



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

**Ενισχυτική Μάθηση για τον Έλεγχο Ρομποτικού Εξωσκελετού Κάτω
Άκρων**

Δέσποινα Μάρκογλου

Μάρτιος 2021

Περίληψη

Η ελεύθερη και απρόσκοπτη συμμετοχή των ατόμων με κινητικά προβλήματα σε κάθε εκδήλωση της καθημερινής ζωής, εκτός ότι αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι μιας ευνομούμενης κοινωνίας, ορίζεται ρητά και μέσω της Διεθνούς Σύμβασης των Δικαιωμάτων των Ατόμων με Αναπηρίες. Πάνω σε αυτήν την βάση διενεργήθηκε (για πρώτη φορά το 2016) ο παγκόσμιος διαγωνισμός «Cybathlon», με στόχο τόσο την βελτίωση της καθημερινότητας των ατόμων με αναπηρίες όσο και στην ευαισθητοποίηση του κοινωνικού συνόλου γενικότερα. Συγκεκριμένα, στο αγώνισμα του εξωσκελετού, άτομα με πλήρη παραπληγία, που χαρακτηρίζονται ως «πιλότοι», επωφελούμενα από την χρήση ρομποτικών εξωσκελετών είναι σε θέση να σηκωθούν όρθια και να περπατήσουν, να ανέβουν και να κατέβουν σκάλες, καθώς και να βαδίσουν σε ανώμαλο και υπό κλίση έδαφος.

Αντλώντας έμπνευση και με αφορμή την συμμετοχή στον διαγωνισμό αυτόν, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός και ο έλεγχος ενός ρομποτικού εξωσκελετού κάτω άκρων για την υποβοήθηση της καθημερινότητας ατόμων με πλήρη παραπληγία. Μεταξύ των σταδίων του σχεδιασμού σημαντική θέση κατέχει η ανάλυση αντοχής του εξωσκελετού, που γίνεται με στόχο την διασφάλιση της στιβαρότητας και της δομικής ακεραιότητάς του. Για την ανάλυση αντοχής εξετάστηκαν επτά διαφορετικά σενάρια που αντιστοιχούν σε ακραίες περιπτώσεις φόρτισης, ενώ η επίλυση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια αντίστοιχου λογισμικού που βασίζεται στην Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Όπως τα περισσότερα διαθέσιμα μοντέλα έτσι και ο παρόν εξωσκελετός βασίζεται στην ύπαρξη βακτηριών, προκειμένου ο πιλότος να μπορεί να διατηρεί την ισορροπία του. Με γνώμονα, λοιπόν, την αποδέσμευση του εξωσκελετού από την ύπαρξη των βακτηριών και κατ' επέκταση τη δυνατότητα παροχής μεγαλύτερης ελευθερίας κινήσεων στον πιλότο, η παρούσα εργασία προτείνει την εφαρμογή ενός συστήματος ελέγχου, το οποίο στηρίζεται στην χρήση της Βαθιάς Ενισχυτικής Μάθησης. Ως Βαθιά Ενισχυτική Μάθηση νοείται ο τομέας της Τεχνητής Νοημοσύνης, ο οποίος συνδυάζει έννοιες από δύο άλλους τομείς, την Βαθιά και την Ενισχυτική Μάθηση. Ο όρος Ενισχυτική Μάθηση αναφέρεται στην εκπαίδευση ενός πράκτορα, μέσω μιας συνεχούς διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος, με στόχο της συγκέντρωσης όσο το δυνατόν περισσότερων ανταμοιβών, ενώ η Βαθιά μάθηση αφορά στην χρήση και την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων. Για την εύρεση της βέλτιστης προσέγγισης ελέγχου εξετάστηκαν δύο διαφορετικοί αλγόριθμοι, ο DDPG και ο TD3, τόσο ως προς την συγκέντρωση μεγαλύτερου πλήθους ανταμοιβών, όσο και ως προς την ποιότητα του παραγόμενου πρότυπου βάδισης. Για τον έλεγχο του πρότυπου βάδισης, χρησιμοποιήθηκε μία μέθοδος παρόμοια με την ανάλυση βάδισης που χρησιμοποιούν οι επαγγελματίες υγείας και η οποία βασίστηκε στην αξιολόγηση έντεκα διαφορετικών παραμέτρων -όπως η ταχύτητα βάδισης και το μήκος διασκελισμού.

Abstract

The full and equal enjoyment of all human rights and fundamental freedoms by all persons with disabilities, except that it is an integral part of a cultivated society, is explicitly defined through the Convention on the Rights of Persons with Disabilities. On this basis, Cybathlon competition was carried out for the first time in 2016, aiming to serve as a platform to drive forward research on assistance systems for everyday use and to promote dialogue with the public. Specifically, in the Powered Exoskeleton Race, people with complete paraplegia, characterized as "pilots", benefiting from the use of robotic exoskeletons are able to stand and walk, ascend and descend stairs, as well as walk on a rough terrain and a tilted path.

Occasioned by the participation in this competition, the objective of the thesis is to design and control a powered lower limb exoskeleton for the assistance of everyday lives of people with complete paraplegia. Among the design stages, an important place is occupied by the stress analysis of the exoskeleton, which is made in order to ensure its stiffness and structural integrity. For the static analysis, seven different scenarios corresponding to extreme loading cases were examined, while the solution was based on the Finite Element Method.

Most of the available models, including the proposed exoskeleton, use crutches in order to keep balance. Therefore, aiming to relieve the exoskeleton from the presence of crutches and consequently to allow the pilot to move in a more natural way, the present work proposes the implementation of a control system, which is based on the use of Deep Reinforcement Learning. Deep Reinforcement Learning is the field of Artificial Intelligence, which combines concepts from two other areas, Deep Learning and Reinforcement Learning. The term Reinforcement Learning refers to the training of an agent through a continuous process of trial and error in order to gather as many rewards as possible, while Deep Learning refers to the use and training of neural networks. To find the optimal control approach, two different algorithms (DDPG and TD3) were tested both in terms of gathered rewards and the quality of the produced gait pattern. For the assessment of the gait pattern a method similar to the gait analysis was used. This method based on the evaluation of eleven different parameters, among which was the walking speed and the step length.

Αφιέρωση

Στους γονείς μου και στην Παρασκευή

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αμπουντώλα Κωνσταντίνο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και τον χρόνο που αφιέρωσε στην καθοδήγηση μου καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Κοσμήτορα της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Καθηγητή κ. Σταμούλη Γεώργιο, καθώς και τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Διεθνούς Πανεπιστημίου Ελλάδος, κ. Δημήτριο Ευσταθίου, για την πολύτιμη συνεισφορά τους ως επιστημονικοί υπεύθυνοι της φοιτητικής ομάδας «HERMES Team», τον ορθοπεδικό χειρουργό κ. Μεταξιώτη Δημήτριο για τις πολύτιμες συμβουλές του σε θέματα ιατρικής φύσεως και την παρέμβαση του σε καίριας σημασίας ζητήματα, καθώς και όλα τα μέλη της ομάδας για την συνεργασία μας στα δύο χρόνια πορείας της ομάδας.

Θερμό ευχαριστώ θα ήθελα να απευθύνω και στον Καθηγητή κ. Παντελή Δημήτριο που ως ακαδημαϊκός μου σύμβουλος ήταν πάντα πρόθυμος να με καθοδηγήσει σε ότι χρειαζόμουν.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους εθελοντές που προθυμοποιήθηκαν να απαντήσουν στο ερωτηματολόγιο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Σταματέλλο Αναστάσιο και τον Καθηγητή κ. Παπαδημητρίου Κωνσταντίνο που δέχθηκαν να στελεχώσουν την τριμελή επιτροπή εξέτασης της εργασίας μου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να εκφράσω στην οικογένειά μου και στους φίλους μου για την αγάπη και την υποστήριξη τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Επεξήγηση Όρων

Αιτιολογία Απόλυτα νούμερα υποδηλώνουν τον αριθμό των ανθρώπων που πάσχουν από κάκωση νωτιαίου μυελού ανάλογα τον μηχανισμό, πρόθεση, τόπο και δραστηριότητα

Αυτόνομη Δυσρεφλεξία Απότομη αύξηση της αρτηριακής πίεσης, άμεσα συνδεδεμένη με τον κίνδυνο εγκεφαλικού

Αυχενική Μοίρα Τμήμα της σπονδυλικής στήλης που αποτελείται από οκτώ σπονδύλους (C1 – C8)

Βακτηρία Ψηλή ράβδος με κάθετο στέλεχος που στερεώνεται κάτω από τη μασχάλη· χρησιμοποιείται από άτομα με κατάγματα ή άλλες κακώσεις στα πόδια, αλλιώς πατερίτσα

Εγκεφαλικό Στέλεχος Χωρικά κατώτερο τμήμα του εγκεφάλου που αποτελεί συνέχεια του νωτιαίου μυελού

Επιπολασμός Το πλήθος των ανθρώπων σε έναν πληθυσμό που πάσχουν από μία ασθένεια σε δεδομένη χρονική στιγμή

Θωρακική Μοίρα Τμήμα της σπονδυλικής στήλης που αποτελείται από δώδεκα σπονδύλους (T1 – T5)

Κάκωση Νωτιαίου Μυελού (ΚΝΜ) Βλάβη του νωτιαίου μυελού που προκαλεί αισθητική ή/και κινητική απώλεια

Νευροτόμιο Τμήμα του νωτιαίου μυελού με τις ρίζες ενός ζεύγους νωτιαίων νεύρων

Νωτιαίος Μυελός Δομή νευρικών κυττάρων η οποία ξεκινάει από το εγκεφαλικό στέλεχος και επεκτείνεται σε όλο το μήκος της σπονδυλικής στήλης

Ορθωτικό Εξωτερική κατασκευή που χρησιμοποιείται για την τροποποίηση των δομικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών του νευρομυϊκού και σκελετικού συστήματος

Παραπληγία Αισθητική ή/και κινητική απώλεια των κάτω άκρων, η οποία προκαλείται συνήθως από ΚΝΜ στην οσφυϊκή ή την θωρακική μοίρα

Ποδοκνημική Η άρθρωση μεταξύ του κάτω άκρου του οστού της κνήμης και της άνω επιφάνειας του οστού του αστραγάλου

Πρωτόκολλο Περιγραφή των βημάτων που γίνονται σε ένα πείραμα ή μία διαδικασία

Οσφυϊκή Μοίρα Τμήμα της σπονδυλικής στήλης που αποτελείται από πέντε σπονδύλους (L1 – L5)

Τετραπληγία Παράλυση και των τεσσάρων άκρων, η οποία συνήθως προκαλείται από βλάβη στην αυχενική μοίρα του νωτιαίου μυελού

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	12
1.1	Εισαγωγή και Κίνητρο	12
1.2	Ο Διαγωνισμός «Cybathlon»	13
1.3	Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	14
1.4	Οργάνωση της Εργασίας	15
2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	16
2.1	Εισαγωγή	16
2.2	Ιατρική Προσέγγιση του Θέματος	16
2.2.1	Κάκωση Νωτιαίου Μυελού	16
2.2.2	Επιπτώσεις στην Υγεία	18
2.2.3	Οφέλη από την Χρήση Εξωσκελετού	20
2.3	Σύγχρονα Μοντέλα Εξωσκελετών	21
2.3.1	ReWalk	22
2.3.2	Ekso GT	23
2.3.3	Indego	24
2.3.4	Rex	25
2.4	Σύνοψη	26
3	Ο Εξωσκελετός «Hermes»	27
3.1	Εισαγωγή	27
3.2	Πορεία σχεδιασμού	28
3.3	Σχεδιαστικές Προσεγγίσεις	30
3.3.1	Επενεργοποιητές	30
3.3.2	Πρώτη Προσέγγιση	31
3.3.3	Δεύτερη Προσέγγιση	33
3.4	Δομή του Εξωσκελετού	35
3.4.1	Πλαίσιο	36
3.4.2	Σημεία Πρόσδεσης	37
3.4.3	Προστατευτικά Καλύμματα	37
3.4.4	Σύστημα Ηλεκτρονικών	38
3.5	Λειτουργία του Εξωσκελετού	41
3.6	Σύνοψη	42
4	Ανάλυση Αντοχής	43
4.1	Εισαγωγή	43
4.2	Καθορισμός μεθόδου επίλυσης	44
4.3	Απλοποίηση Γεωμετρίας	44
4.4	Καθορισμός Υλικού	44
4.5	Επιλογή θέσεων προσομοίωσης	45
4.6	Καθορισμός συντοριακών συνθηκών	46
4.7	Δημιουργία Πλέγματος	48
4.8	Επίλυση	49

4.9	Αποτελέσματα	50
4.10	Σύνοψη	58
5	Βαθιά Μάθηση	59
5.1	Εισαγωγή	59
5.2	Νευρώνες	60
5.3	Νευρωνικά Δίκτυα	60
5.4	Εκπαίδευση Νευρωνικού Δικτύου	62
5.5	Συναρτήσεις Ενεργοποίησης	63
5.5.1	Sigmoid	63
5.5.2	Tanh (Hyperbolic Tangent Activation)	63
5.5.3	ReLU (Rectified Linear Unit) Activation	64
5.5.4	Leaky ReLU	65
5.6	Προσδιορισμός Υπερπαραμέτρων	65
5.7	Σύνοψη	65
6	Ενισχυτική Μάθηση	66
6.1	Εισαγωγή	66
6.2	Μαρκοβιανή Διαδικασία Απόφασης	66
6.3	Προσδοκώμενη Επιστροφή	67
6.4	Πολιτική	68
6.5	Συναρτήσεις Αποτίμησης	68
6.5.1	Συνάρτηση αποτίμησης-κατάστασης	68
6.5.2	Συνάρτηση αποτίμησης-ενέργειας	68
6.6	Βέλτιστη Πολιτική	69
6.7	Βέλτιστες Συναρτήσεις Αποτίμησης	69
6.7.1	Βέλτιστη συνάρτηση αποτίμησης-κατάστασης	69
6.7.2	Βέλτιστη συνάρτηση αποτίμησης-ενέργειας	69
6.8	Εξίσωση Bellman	69
6.9	Στρατηγική Επιλογής Ενεργειών	70
6.10	Γενικευμένη Επανάληψη Πολιτικής	70
6.11	Μέθοδοι Monte Carlo	71
6.12	Μέθοδοι Χρονικών Διαφορών	71
6.12.1	Αλγόριθμος SARSA	71
6.12.2	Αλγόριθμος Q-learning	72
6.13	Μέθοδος Δράστη-Κριτή	72
6.14	Σύνοψη	73
7	Βαθιά Ενισχυτική Μάθηση	74
7.1	Εισαγωγή	74
7.2	Αλγόριθμος Deep Q-Network	74
7.3	Αλγόριθμος Deep Deterministic Policy Gradient	75
7.4	Αλγόριθμος Twin-Delayed Deep Deterministic Policy Gradient	76
7.5	Σύνοψη	77
8	Βαθιά Ενισχυτική Μάθηση για τον Έλεγχο του εξωσκελετού «Hermes»	78
8.1	Εισαγωγή	78
8.2	Σύστημα Ελέγχου	78
8.3	Μοντελοποίηση	79
8.4	Εφαρμογή των DDPG και TD3	80
8.5	Εκπαίδευση	80
8.6	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	80
8.7	Σύνοψη	87

9 Σύνοψη και Προτάσεις για μελλοντική εργασία	88
Βιβλιογραφία	91

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Αδρή παρουσίαση των κύριων λειτουργιών του νωτιαίου μυελού και διαμήκης οργάνωση του σε επίπεδα [3]	17
2.2	Κατανομή της ΤΚΝΜ ανάλογα με την γεωγραφική περιοχή [3]	18
2.3	Επιπολασμός ΚΝΜ για το 2010 στον Καναδά [3]	18
2.4	Σωρευτικό κόστος διαβίωσης για τυπική περίπτωση ασθενή με ΚΝΜ και πηγές κάλυψης των εξόδων αυτών - σύστημα υγείας (κόκκινο), ιδιώτες (μπλε), άλλες πηγές (γκρι) [16]	19
2.5	Νευρολογικό επίπεδο και έκταση της βλάβης μετά το πέρας της νοσηλείας [12]	20
2.6	Ο εξωσκελετός ReWalk [22]	22
2.7	Ο εξωσκελετός της εταιρίας Ekso Bionics [23]	23
2.8	Ο εξωσκελετός Indego [24]	24
2.9	Ο εξωσκελετός Rex [25]	25
3.1	Διάγραμμα ροής της πορείας του σχεδιασμού του εξωσκελετού Hermes	28
3.2	Περιοχές ανθρωπομετρικών μετρήσεων Hermes [26]	29
3.3	Οι κινήσεις των αρθρώσεων σε ισχία, γόνατα και αστραγάλους [27]	31
3.4	Μονάδα ενεργοποίησης Exoskeleton Drive GEN.1	31
3.5	Πρώτη σχεδιαστική προσέγγιση	32
3.6	Η μπροστινή όψη του πρώτου σχεδίου	33
3.7	Η δεύτερη σχεδιαστική προσέγγιση	34
3.8	Ο εξωσκελετός «Hermes»	35
3.9	Το πλαίσιο του εξωσκελετού χωρισμένο σε δύο πλευρικά και ένα κεντρικό τμήμα	36
3.10	Η κεντρική μονάδα ελέγχου	38
3.11	Ο μικροελεγκτής Arduino Mega 2560 R3	39
3.12	Ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης	39
3.13	Ο ηλεκτρονόμος τεσσάρων επαφών	39
3.14	Η οθόνη αφής που χρησιμοποιείται για τον χειρισμό του εξωσκελετού	40
3.15	Διευρυμένη όψη του εξωσκελετού «Hermes»	40
3.16	Διεπαφή πιλότου-εξωσκελετού	41
4.1	Διαχωρισμός των στοιχείων ως προς την διάσταση και την τάξη τους [29]	44
4.2	Απλοποίηση της γεωμετρίας του επενεργοποιητή για την ανάλυση αντοχής	45
4.3	Τα στάδια του κύκλου βάρδισης	46
4.4	Τα επτά διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν στην ανάλυση αντοχής	47
4.5	Το αρχικό πλέγμα που σχηματίστηκε με την μέθοδο «curvature-based mesh»	49
4.6	Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά το πάτημα πτέρνας	51
4.7	Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά το πάτημα πέλματος	52
4.8	Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά τη μονή στήριξη	53
4.9	Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά την ανάβαση σκάλας	54
4.10	Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά την κατάβαση σκάλας	55
4.11	Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά την καθημερινή στάση	56
4.12	Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά την όρθια στάση	57
5.1	Σχηματική απεικόνιση ενός βιολογικού (επάνω) και ενός τεχνητού (κάτω) νευρώνα [30]	60
5.2	Σχηματική απεικόνιση ενός βιολογικού (επάνω) και ενός τεχνητού (κάτω) νευρώνα [31]	61

5.3	Σχηματική αναπαράσταση νευρωνικού δικτύου [32]	61
5.4	Η σιγμοειδής συνάρτηση ενεργοποίησης (sigmoid activation function) [31]	63
5.5	Η υπερβολικά εφαπτόμενη συνάρτηση ενεργοποίησης (Tanh – Hyperbolic tangent activation function) [31]	64
5.6	Η συνάρτηση ReLu (Rectified Linear Unit activation function) [31]	64
5.7	Η συνάρτηση ενεργοποίησης Leaky ReLu [31]	65
6.1	Σχηματική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης μεταξύ πράκτορα και περιβάλλοντος κατά την Μαρκοβιανή διαδικασία απόφασης	67
6.2	Γενικευμένη επανάληψη πολιτικής (generalized evaluation iteration)	70
8.1	Σχηματική αναπαράσταση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου	79
8.2	Σχηματική αναπαράσταση του απλοποιημένου μοντέλου του εξωσκελετού	79
8.3	Σύγκριση των DDPG και TD3 ως προς το μέση τιμή ανταμοιβών ανά επεισόδιο	81
8.4	Σύγκριση των DDPG και TD3 ως προς τον μέσο αριθμό βημάτων ανά επεισόδιο	82
8.5	Τριμετρική όψη για την αξιολόγηση του TD3	82
8.6	Πλάγια όψη για την αξιολόγηση του TD3	83
8.7	Κατακόρυφη όψη για την αξιολόγηση του TD3	83
8.8	Μπροστινή όψη για την αξιολόγηση του TD3	83
8.9	Τριμετρική όψη για την αξιολόγηση του DDPG	83
8.10	Πλάγια όψη για την αξιολόγηση του DDPG	84
8.11	Κατακόρυφη όψη για την αξιολόγηση του DDPG	84
8.12	Μπροστινή όψη για την αξιολόγηση του DDPG	84
8.13	Σύγκριση απόδοσης των DDPG και TD3 ως προς τις 11 παραμέτρους της ανάλυσης βάρδισης	86
9.1	Το ερωτηματολόγιο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία	93

Κατάλογος πινάκων

3.1	Ανθρωπομετρικά στοιχεία των δύο πιλότων	30
4.1	Ιδιότητες των τριών κραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του εξωσκελετού .	45
4.2	Στοιχεία του πλέγματος και χρόνοι επίλυσης για κάθε ένα από τα επτά σενάρια	50
4.3	Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων και για τα επτά σενάρια	58
8.1	Σύγκριση των αποτελεσμάτων του DDPG και του TD3	81
8.2	Ορισμός και περιγραφή των 11 παραμέτρων	85
8.3	Ορισμός και περιγραφή των 11 παραμέτρων	86

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή και Κίνητρο

Η ικανότητα της απρόσκοπτης κίνησης, ιδίως της βάδισης, παίζει καθοριστικό ρόλο στην καθημερινότητα ενός ανθρώπου. Ωστόσο, μια μεγάλη και συνεχώς αυξανόμενη σε αριθμό μερίδα του πληθυσμού αντιμετωπίζει ή μπορεί να βρεθεί αντιμέτωπη με κάποιου είδους απώλεια της κινητικότητας των κάτω άκρων [1]. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (World Health Organization - WHO) ο αριθμός αυτός αγγίζει περί τα 5,5 εκατομμύρια ανθρώπους ανά τον κόσμο [2]. Τα αίτια πρόκλησης της ποικίλουν και μπορεί να αφορούν εγκεφαλικά επεισόδια, γενετικές ανωμαλίες, παθήσεις όπως η σκλήρυνση κατά πλάκας και η εγκεφαλική παράλυση, ενώ σε πολλές περιπτώσεις ιδιαίτερη σημασία έχει και η ηλικία του ατόμου. Ανάμεσα τους ξεχωρίζει η Κάκωση του Νωτιαίου Μυελού (ΚΝΜ)· όχι τόσο για την συχνότητα εμφάνισής της, αλλά κυρίως για το μέγεθος των επιπτώσεων που επιφέρει στην υγεία του ανθρώπου [4] [3].

Η παραπληγία είναι άμεσα συνυφασμένη με την ΚΝΜ και επηρεάζει σημαντικά τόσο την υγεία όσο και την ψυχολογία. Πρόκειται για την κατάσταση εκείνη κατά την οποία το άτομο παρουσιάζει μερική ή ολική απουσία κίνησης του κάτω μέρους του σώματος, ενώ πολύ συχνά συνοδεύεται και από αισθητικό έλλειμμα. Η έλλειψη της αυτόνομης βάδισης εξαναγκάζει τους πάσχοντες από ΚΝΜ σε έναν καθιστικό τρόπο ζωής, ενώ οι περισσότεροι από αυτούς στηρίζονται σχεδόν αποκλειστικά στην χρήση αναπηρικών αμαξιδίων προκειμένου να παραμείνουν ενεργοί, να αυτοεξυπηρετούνται και να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της καθημερινότητάς τους [5]. Αυτή η μείωση της κινητικότητας έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο από επιπρόσθετα προβλήματα υγείας, η έκταση και η ένταση των οποίων διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος της βλάβης, την ηλικία, αλλά και την γενικότερη κατάσταση της υγείας του ατόμου πριν την κάκωση [6].

Το ευτύχημα είναι ότι πλέον, λόγω της συνεχούς προόδου της τεχνολογίας, υπάρχουν περισσότερα και διαφορετικά ως προς το είδος τους βοηθητικά μέσα, τα οποία δεν στοχεύουν μόνο στην διευκόλυνση της καθημερινότητας των ασθενών, αλλά κατέχουν ενεργό θέση και στο κομμάτι της αποκατάστασής τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ρομποτικοί εξωσκελετοί κάτω άκρων οι οποίοι κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος σε σχέση με τις κλασικές τεχνικές αποκατάστασης που εφαρμόζονται μέχρι σήμερα [7]. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μέχρι το 2008 είχαν πωληθεί τουλάχιστον χίλιες συσκευές, ενώ μέχρι και τον Αύγουστο του 2018 υπήρχαν περισσότερες από εκατό εταιρείες και ερευνητικές ομάδες που ασχολούνταν με την ανάπτυξη εξωσκελετών [8].

Με γνώμονα την ανάπτυξη της τεχνολογίας προς όφελος των ατόμων με ειδικές ανάγκες, αλλά και την ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης γύρω από το συγκεκριμένο θέμα, διεξάγεται τα τελευταία τέσσερα χρόνια ο παγκόσμιος διαγωνισμός «Cybathlon» [9]. Στο πλαίσιο αυτό άτομα με αναπηρία συναγωνίζονται μεταξύ τους για την ταχύτερη και αποτελεσματικότερη εκτέλεση απλών καθημερινών δραστηριοτήτων, πάντα με την βοήθεια του κατάλληλου τεχνολογικού μέσου. Για παράδειγμα, ένα παραπληγικό άτομο μπορεί μέσω της χρήσης ενός εξωσκελετού να διαγωνιστεί σε δοκιμασίες όπως η βάδιση σε ομαλό και ανώμαλο έδαφος ή η ανάβαση και κατάβαση σκάλας. Έτσι, δημιουργείται ένα κοινό σημείο αναφοράς όπου όλοι οι συμμετέχοντες -είτε είναι διαγωνιζόμενοι, είτε μηχανικοί, είτε θεατές- συνυπάρχουν και αλληλεπιδρούν αρμονικά, ενώ τα όρια και οι φραγμοί ανάμεσα τους καταργούνται. Με αυτόν τον τρόπο αποδεικνύεται για μία ακόμα φορά ότι η αναπηρία δεν πρέπει πλέον να αντιμετωπίζεται ως τροχοπέδη για την ζωή των ανθρώπων, αλλά ως έναυσμα για την εξέλιξη ολόκληρης της κοινωνίας.

1.2 Ο Διαγωνισμός «Cybathlon»

Το 2013 ξεκίνησε στο πανεπιστήμιο του ΕΤΗ, και με πρωτοβουλία του καθηγητή Αισθητικών - Κινητικών Συστημάτων Robert Riener, η ανάπτυξη μιας πλατφόρμας για την δημιουργία συστημάτων υποβοήθησης των ατόμων με αναπηρίες [9]. Η πλατφόρμα αυτή εξελίχθηκε σε τέτοιο βαθμό, ώστε τρία χρόνια αργότερα από την έναρξή της -τον Οκτώβριο του 2016- οδήγησε στην διεξαγωγή ενός διαγωνισμού παγκοσμίου εμβέλειας με το όνομα «Cybathlon». Στα χρόνια που ακολούθησαν ο διαγωνισμός αυτός πραγματοποιήθηκε με την μορφή τοπικών πρωταθλημάτων σε διάφορα μέρη του κόσμου, ενώ ο επόμενος σταθμός του είναι το 2020. Φιλοδοξία των δημιουργών του είναι η καθιέρωση του ως θεσμό παρόμοιου με αυτόν των Παραολυμπιακών αγώνων, με την ύπαρξη ωστόσο ορισμένων βασικών διαφορών. Η κυριότερη έγκειται στο γεγονός ότι τα άτομα με αναπηρίες δεν χρησιμοποιούν μόνο τις φυσικές τους δυνατότητες, αλλά μπορούν να επωφεληθούν και από τα σύγχρονα επιτεύγματα της τεχνολογίας. Επιπλέον, τα αγωνίσματα δεν σχετίζονται με τις αθλητικές τους επιδόσεις, αλλά αφορούν την αποτελεσματικότερη και συνάμα την ταχύτερη εκτέλεση απλών δραστηριοτήτων της καθημερινότητας.

Οι συμμετέχοντες είναι ομάδες οι οποίες αποτελούνται από τουλάχιστον έναν μηχανικό και ένα άτομο με αναπηρία, το οποίο στο πλαίσιο του διαγωνισμού αποκαλείται «πιλότος». Ρόλος του μηχανικού ή των μηχανικών είναι η υλοποίηση της κατάλληλης συσκευής για την υποβοήθηση του πιλότου κατά την διάρκεια του αγώνα, καθώς επίσης και η παροχή τεχνικής υποστήριξης εάν αυτό κριθεί αναγκαίο. Στην περίπτωση όπου ο ίδιος ο πιλότος είναι και ο δημιουργός της συσκευής που χρησιμοποιεί, παρέχεται η δυνατότητα να συμμετέχει ως μονάδα εάν και εφόσον το επιθυμεί.

Το Cybathlon χωρίζεται σε έξι αγωνίσματα κάθε ένα από τα οποία είναι σχεδιασμένο για κάποιο συγκεκριμένο είδος αναπηρίας. Έτσι, τα αγωνίσματα απευθύνονται σε άτομα με παραπληγία, τετραπληγία, απώλεια κάτω άκρου/ων και απώλεια άνω άκρου/ων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πιλότος μπορεί να έχει μεγαλύτερο βαθμό αναπηρίας από τον ελάχιστο που ορίζει το κάθε αγώνισμα υπό την προϋπόθεση ότι είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει με σωστό και ασφαλή τρόπο το τεχνολογικό μέσο που του παρέχεται. Πιο συγκεκριμένα, τα αγωνίσματα είναι τα εξής:

- **Αγώνισμα Διεπαφής Εγκεφάλου-Υπολογιστή - Brain-Computer Interface Race (BCI):** Απευθύνεται σε άτομα με τετραπληγία τα οποία καλούνται να παίξουν ένα ηλεκτρονικό παιχνίδι. Οι εντολές δίνονται απευθείας από τον εγκέφαλο του διαγωνιζόμενου μέσω ειδικών διεπαφών που περιβάλλουν το κεφάλι του.
- **Αγώνισμα Ποδηλασίας με Ηλεκτρομυοδιέγερση - Functional Electrical Stimulation Bike Race (FES):** Απευθύνεται σε άτομα με παραπληγία τα οποία καλούνται να καλύψουν την απόσταση των 1200 μέτρων κάνοντας ποδήλατο. Τα ποδήλατα αυτά έχουν ιδιαίτερη γεωμετρία, ενώ η κίνηση τους επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρικής διέγερσης των μυών των κάτω άκρων των διαγωνιζόμενων.
- **Αγώνισμα Προσθητικού Χεριού - Powered Arm Prosthesis Race (ARM):** Απευθύνεται σε άτομα με απώλεια τουλάχιστον ενός από τα δύο άνω άκρα τους. Τα άτομα αυτά καλούνται να ολοκληρώσουν δοκιμασίες όπως η προετοιμασία ενός πρωινού γεύματος, η αλλαγή μιας λάμπας και η τακτοποίηση κάποιων ρούχων στο εσωτερικό μιας ντουλάπας.
- **Αγώνισμα Προσθητικού Ποδιού - Powered Leg Prosthesis Race (LEG):** Απευθύνεται σε άτομα που παρουσιάζουν απώλεια τουλάχιστον ενός από τα δύο κάτω άκρα τους -συμπεριλαμβανομένης της άρθρωσης του γόνατου- τα οποία καλούνται να ολοκληρώσουν δοκιμασίες όπως η ανάβαση και κατάβαση σκάλας και η βάρδιση σε κεκλιμένο έδαφος.
- **Αγώνισμα Αναπηρικού Αμαξιδίου - Powered Wheelchair Race (WHL):** Απευθύνεται σε άτομα με σοβαρές κινητικές δυσκολίες τα οποία χρησιμοποιώντας αναπηρικό αμαξίδιο καλούνται να καλύψουν μία απόσταση 42 μέτρων, η οποία περιλαμβάνει μεταξύ άλλων σκάλες, ανώμαλο έδαφος και έδαφος υπό κλίση.
- **Αγώνισμα Εξωσκελετού - Powered Exoskeleton Race (EXO):** Απευθύνεται σε άτομα με πλήρη παραπληγία τα οποία καλούνται να καλύψουν μία απόσταση 42 μέτρων που περιλαμβάνει την μετάβαση από όρθια σε καθιστή θέση και το αντίστροφο, την τακτοποίηση αντικειμένων που βρίσκονται πάνω σε ένα τραπέζι, την βάρδιση σε ομαλό και ανώμαλο έδαφος, την ανάβαση και κατάβαση σκάλας, καθώς και

την βάδιση σε κεκλιμένο επίπεδο. Επιπλέον, ο όρος «πλήρης παραπληγία» αναφέρεται στην παντελή κινητική και αισθητική απώλεια των κάτω άκρων (Α στην κλίμακα AIS) ή την παντελή απώλεια της κινητικής, όμως με διατήρηση της αισθητικής ικανότητας (Β στην κλίμακα AIS) στα κάτω άκρα, εξαιτίας κάκωσης στον νωτιαίο μυελό - η κλίμακα AIS ορίζεται επαρκώς στην ενότητα 2.2.

Εστιάζοντας στο τελευταίο αγώνισμα, αναφέρεται ότι ως εξωσκελετός νοείται οποιαδήποτε κατασκευή βρίσκεται περιμετρικά του ανθρώπινου σώματος προσφέροντας του στήριξη και κίνηση. Η κίνηση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με ενεργητικό είτε με παθητικό τρόπο, με αποτέλεσμα να προκύπτει και ο πρώτος διαχωρισμός των εξωσκελετών σε δύο μεγάλες ομάδες: τους ενεργητικούς (powered exoskeletons) και τους παθητικούς (passive exoskeletons). Όσον αφορά τους ενεργητικούς, η κίνηση πραγματοποιείται μέσω ενός συστήματος ενεργοποίησης, το οποίο μπορεί να είναι πνευματικό, υδραυλικό ή ηλεκτρικό. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η ενεργοποίηση γίνεται μέσω ηλεκτρικών κινητήρων που τοποθετούνται σε συγκεκριμένες αρθρώσεις -ισχία, γόνατα και αστραγάλους- προκαλώντας την περιστροφή τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο άνθρωπος που τον φοράει να μπορεί να σταθεί όρθιος και να περπατήσει -συνήθως με την βοήθεια βακτηριών ή περιπατητήρα. Αντίθετα, οι παθητικοί εξωσκελετοί δεν χρησιμοποιούν κάποιο είδος επενεργοποιητή, αλλά στηρίζονται στην χρήση μηχανικών μέσων, όπως τα ελατήρια και οι αποσβεστήρες, για την παραγωγή της κίνησης.

1.3 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η υλοποίηση ενός ρομποτικού εξωσκελετού κάτω άκρων ικανού να συμμετέχει στον παγκόσμιο διαγωνισμό Cybathlon 2020. Η υλοποίηση αυτή περιλαμβάνει τόσο τον σχεδιασμό και την κατασκευή των μηχανικών εξαρτημάτων που απαρτίζουν την συσκευή όσο και το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου.

Όσον αφορά τον σχεδιασμό της συσκευής αυτής καθ' εαυτής οι κύριες παράμετροι που ελήφθησαν υπ' όψιν, πέρα από την συμμόρφωση με τους κανονισμούς του διαγωνισμού, σχετίζονται με την κατασκευή ενός εξωσκελετού ικανού να συνεισφέρει στην βελτίωση της καθημερινότητας, αλλά και στην ενίσχυση της διαδικασίας αποκατάστασης ατόμων που έχουν υποστεί Κάκωση του Νωτιαίου Μυελού. Οι παράμετροι αυτές αφορούν:

- Την ασφάλεια τόσο του πιλότου όσο και των ανθρώπων που βρίσκονται γύρω του (π.χ. φροντιστές)
- Την ανθεκτικότητα απέναντι στα φορτία που καταπονούν τον εξωσκελετό, μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται το βάρος του πιλότου και η κάθετη αντίδραση από το έδαφος
- Το μειωμένο βάρος της συσκευής, ούτως ώστε να καθίσταται δυνατή η αύξηση της έντασης και της διάρκειας της προπόνησης λόγω μειωμένης κόπωσης του χρήστη
- Την άνεση στην εφαρμογή
- Την δυνατότητα προσαρμογής σε ύψος και πλάτος, ώστε να μπορεί να φιλοξενεί πιλότους με διαφορετικά σωματομετρικά χαρακτηριστικά
- Την ευκολία χειρισμού και τοποθέτησης στο σώμα του πιλότου
- Την διασφάλιση αυτονομίας της μπαταρίας για ικανοποιητικό χρονικό διάστημα, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για δραστηριότητες εκτός σπιτιού, όπως η μετακίνηση εντός της πόλης
- Την μείωση του κόστους κατασκευής στο ελάχιστο δυνατό, ώστε η απόκτηση του να καταστεί δυνατή από μεγαλύτερο κομμάτι του πληθυσμού, από κέντρα αποκατάστασης έως τους ίδιους τους ασθενείς

Όσον αφορά τον έλεγχο του εξωσκελετού, αναφέρεται ότι η προσέγγιση που υιοθετήθηκε αφορά στην υλοποίηση ενός συστήματος που βασίζεται στην ύπαρξη μίας κεντρικής μονάδας ελέγχου (Main Control Unit - MCU). Συγκεκριμένα, η μονάδα αυτή έχει προγραμματιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε, με βάση το πρόγραμμα λειτουργίας (mode) που ορίζει ο πιλότος και τα σήματα που λαμβάνει από τους αισθητήρες, να προκαλεί την κίνηση των αρθρώσεων σε ισχία και γόνατα. Η κινήσεις αυτές πραγματοποιούνται με την βοήθεια τεσσάρων επενεργοποιητών, οι γωνίες και οι ταχύτητες περιστροφής των οποίων είναι προκαθορισμένες για κάθε ένα

από τα διαθέσιμα προγράμματα λειτουργίας. Ανάμεσά τους βρίσκονται ο αργός και ο γρήγορος βηματισμός, η μετάβαση από όρθια σε καθήμενη θέση και το αντίστροφο, καθώς και η ανάβαση (ή κατάβαση) σκαλοπατιού -αναλυτικές πληροφορίες για τον τρόπο λειτουργίας της συσκευής δίνονται στην ενότητα 3.5.

Εστιάζοντας στο κομμάτι της ισορροπίας, αξίζει να αναφερθεί ότι μέχρι στιγμής σχεδόν όλα τα διαθέσιμα μοντέλα εξωσκελετών (μεταξύ των οποίων και ο «Hermes») είναι εξαρτώμενα από κάποιου είδους εξωτερικό στήριγμα -βακτηρίες ή περιπατητήρα. Η ύπαρξη των στηριγμάτων αυτών μειώνει την αποτελεσματικότητα του εξωσκελετού, καθώς ο χρήστης όντας αναγκασμένος να κρατάει τα στηρίγματα και με τα δύο του χέρια δεν μπορεί να τα χρησιμοποιήσει για οτιδήποτε άλλο, όπως για παράδειγμα να μεταφέρει ένα ποτήρι νερό. Από την άλλη πλευρά, όσοι εξωσκελετοί δεν χρειάζονται επιπρόσθετο στήριγμα έχουν πολύ πιο μεγάλο μέγεθος και παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένο βάρος. Το γεγονός αυτό τους καθιστά ιδιαίτερα δυσκίνητους, πράγμα που μεταφράζεται σε μείωση της ταχύτητας βάδισης που προσφέρουν (έως και επτά φορές μικρότερη ταχύτητα σε σχέση με τους εξωσκελετούς που χρησιμοποιούν επιπλέον στηρίγματα) [21]. Δίνοντας έμφαση, λοιπόν, στην ευκολία χειρισμού και τη γενικότερη άνεση του ατόμου που τον φοράει, η παρούσα εργασία παρουσιάζει ένα σύστημα ελέγχου το οποίο κάνοντας χρήση της ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning) αποσκοπεί στην επίτευξη ισορροπίας της συσκευής, χωρίς την αναγκαιότητα ύπαρξης βακτηριών.

Το σύστημα ελέγχου που προτείνεται δεν κάνει τίποτα άλλο παρά να αντικαθιστά τον ελεγκτή που ήδη υπάρχει στο σύστημα με έναν πράκτορα ενισχυτικής μάθησης. Η επιλογή αυτή στηρίζεται αφ' ενός στην δυσκολία μοντελοποίησης όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός δίποδου ρομπότ και αφ' ετέρου στην αποτελεσματικότητα της ενισχυτικής μάθησης σε προβλήματα ελέγχου πολυπαραμετρικών συστημάτων, ιδιαίτερα όταν αυτή συνδυάζεται με άλλες τεχνικές, όπως η βαθιά μάθηση (deep learning). Τέλος, αναφέρεται ότι το προτεινόμενο μοντέλο ελέγχου υλοποιήθηκε αποκλειστικά σε περιβάλλον προσομοίωσης, καθώς η ενσωμάτωση του στην πραγματική συσκευή ξεφεύγει από το πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

1.4 Οργάνωση της Εργασίας

Η διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται με σαφήνεια η ιατρική διάσταση της παραπληγίας και τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν για την ανθρώπινη υγεία μέσω της χρήσης των εξωσκελετών, ενώ παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας ορισμένων από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα εξωσκελετών που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας του ρομποτικού εξωσκελετού «Hermes», ενώ περιγράφεται λεπτομερώς και η πορεία που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό και την κατασκευή του.

Το Κεφάλαιο 4 εστιάζει στο κρίσιμο κομμάτι της δομικής ακεραιότητας του εξωσκελετού και περιγράφει τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την ανάλυση αντοχής του αλουμινένιου πλαισίου της συσκευής, μέσω λογισμικού που βασίζεται στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Στο κεφάλαιο 5 εισάγονται οι βασικές έννοιες της μηχανικής μάθησης (machine learning) οι οποίες θα αποτελέσουν τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται το προτεινόμενο μοντέλο ελέγχου του εξωσκελετού.

Το κεφάλαιο 6 συμπληρώνει τις γνώσεις περί μηχανικής μάθησης που αποκτήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο εισάγοντας την έννοια της ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning), τις βασικές αρχές οι οποίες την διέπουν, καθώς και ορισμένες από τις κύριες μεθόδους που χρησιμοποιεί για την επίλυση των σχετικών με αυτήν προβλημάτων.

Το κεφάλαιο 7 περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο συνδυάζονται οι έννοιες της βαθιάς και της ενισχυτικής μάθησης με στόχο τον έλεγχο του ρομποτικού εξωσκελετού (που θα αναπτυχθεί στο επόμενο κεφάλαιο), εστιάζοντας στους δύο αλγορίθμους DDPG και TD3 που σχετίζονται με την εκπαίδευση του συστήματος βαθιάς ενισχυτικής μάθησης που χρησιμοποιήθηκε.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η διαδικασία ενσωμάτωσης των αλγορίθμων DDPG και TD3 στο σύστημα ελέγχου του ρομποτικού εξωσκελετού σε περιβάλλον προσομοίωσης, ενώ παρουσιάζεται και η σύγκριση της απόδοσής τους.

Το Κεφάλαιο 9 αποτελεί την σύνοψη της διπλωματικής εργασίας και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική εργασία.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή

Η αναγνώριση του εξωσκελετού ως ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την υποβοήθηση και την βελτίωση της καθημερινότητας ατόμων με παραπληγία κερδίζει διαρκώς έδαφος. Επίσης, αποτελεί ευτύχημα το γεγονός ότι πλέον όλο και περισσότεροι ταγοί του ιατρικού κόσμου τάσσονται υπέρ της ενσωμάτωσης των ρομποτικών εξωσκελετών ως αναπόσπαστο κομμάτι της αποκατάστασης των ατόμων που αντιμετωπίζουν κινητικές δυσκολίες, από ήπιες περιπτώσεις έως βαριάς μορφής περιστατικά, όπως για παράδειγμα ασθενείς με σκλήρυνση κατά πλάκας.

Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει σε μία από τις πιο συχνά εμφανιζόμενες αιτίες πρόκλησης κινητικών βλαβών, την κάκωση του νωτιαίου μυελού (KNM), στα αίτια που την προκαλούν, καθώς και στις επιπρόσθετες συνέπειες που αυτή επιφέρει στην ζωή των ανθρώπων που την αντιμετωπίζουν. Επιπλέον, αναφέρονται τα οφέλη που συνεπάγεται η χρήση των εξωσκελετών στις δευτεροπαθείς επιπλοκές της KNM και τέλος παρουσιάζονται ορισμένοι από τους πιο ευρέως διαδεδομένους εξωσκελετούς, οι οποίοι προορίζονται είτε για οικιακή είτε για κλινική χρήση.

2.2 Ιατρική Προσέγγιση του Θέματος

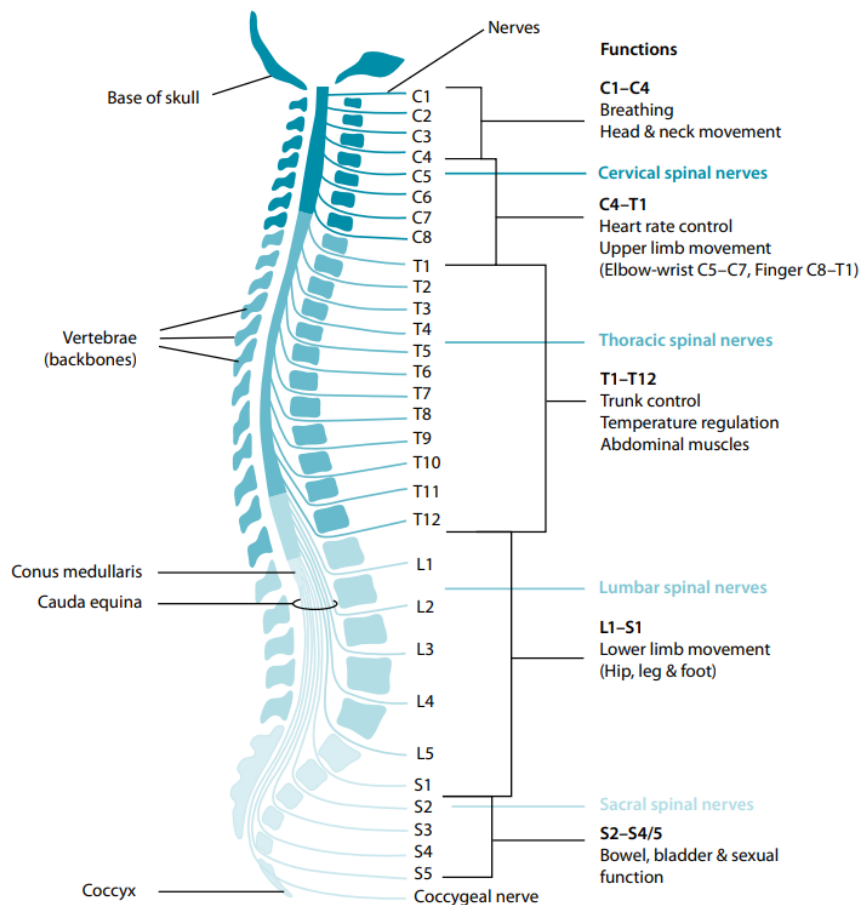
2.2.1 Κάκωση Νωτιαίου Μυελού

Ο νωτιαίος μυελός συνίσταται από μία δομή νευρικών κυττάρων η οποία ξεκινάει από το εγκεφαλικό στέλεχος και επεκτείνεται σε όλο το μήκος της σπονδυλικής στήλης. Η σημασία του είναι καίρια για τον οργανισμό καθώς είναι επιφορτισμένος με την μεταφορά των ερεθισμάτων από και προς τον εγκέφαλο [10]. Επιπλέον, χωρίζεται σε νευρολογικά επίπεδα που αντιστοιχούν στις νευρικές ρίζες που εξέρχονται ανάμεσα σε δύο σπονδύλους (Σχήμα 2.1). Ανάλογα με την θέση και τις λειτουργίες που επιτελούν, οι νευρικές ρίζες χωρίζονται στις αυχενικές, τις θωρακικές, τις οσφυϊκές, τις ιερές και τις κοκκυγικές [3].

Ο νωτιαίος μυελός, ωστόσο, στερείται ενδογενώς της ικανότητας για αναγέννηση με αποτέλεσμα να είναι εκτεθειμένος στις δυσμενείς επιπτώσεις μιας πιθανής κάκωσης. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι ακόμα και μία μικρή σε μέγεθος τραυματική εστία μπορεί να επιφέρει σοβαρές και μη αναστρέψιμες βλάβες στην νευρολογική λειτουργία του οργανισμού [5].

Με τον όρο «κάκωση» νοείται ακριβώς αυτή η κατάσταση της πρόκλησης βλάβης στον νωτιαίο μυελό, η οποία έχει ως άμεση συνέπεια την κινητική ή/και την αισθητική απώλεια. Αν και υπάρχει μεγάλη δυσκολία στον ακριβή προσδιορισμό των ανθρώπων που ζουν με KNM -η οποία οφείλεται τόσο στην αδυναμία διεξαγωγής μετρήσεων (σε εθνικό επίπεδο) λόγω έλλειψης πόρων σε πολλές χώρες του κόσμου όσο και στην έλλειψη συγκεκριμένου πρωτόκολλου καταγραφής ακόμα και σε οικονομικά εύρωστες κοινωνίες, διεθνή στοιχεία του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO) υποδεικνύουν ότι κάθε χρόνο 250.000 έως 500.000 άνθρωποι υφίστανται KNM [11], ενώ αντίστοιχα στοιχεία του Εθνικού Στατιστικού Κέντρου για την Κάκωση Νωτιαίου Μυελού (National Spinal Cord Statistical Center – NSCISC) αναφέρουν ότι έως και 363.000 περιστατικά βρίσκονται στην περιοχή των Ηνωμένων Πολιτειών [12].

Ανάλογα με τα αίτια πρόκλησής της, η KNM διακρίνεται σε τραυματική (TKNM) ή μη τραυματική (MT-KNM). Η τραυματική καλύπτει το μεγαλύτερο κομμάτι των περιστατικών, σε ποσοστό που αγγίζει το 90% των

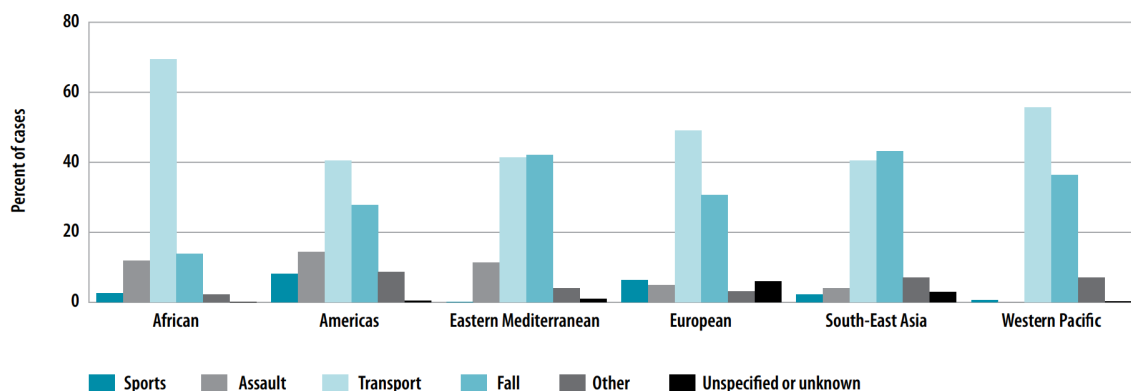


Σχήμα 2.1: Αδρή παρουσίαση των κύριων λειτουργιών του νωτιαίου μυελού και διαμήκης οργάνωση του σε επίπεδα [3]

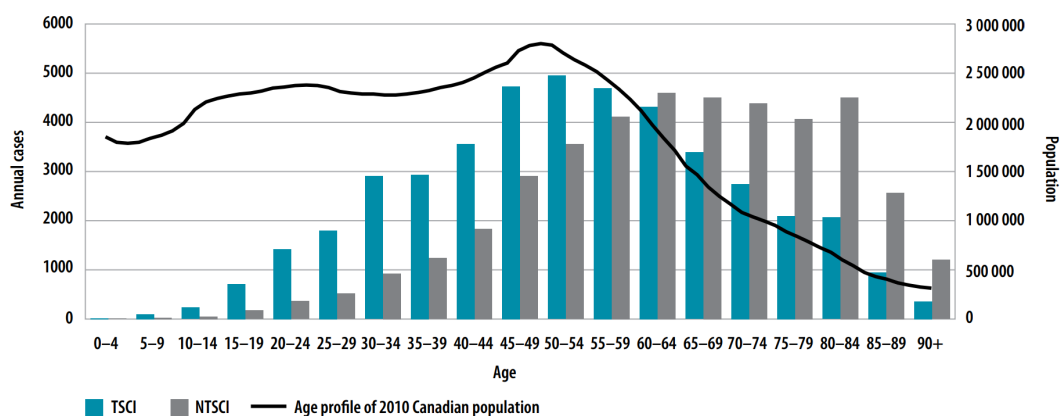
συνολικών κρουσμάτων [11], με κύρια αιτία την εμπλοκή σε τροχαίο ατύχημα (39.3%). Την λίστα με τις αιτίες που προκαλούν ΤΚΝΜ συμπληρώνουν οι πτώσεις (31.8%), η κακοποίηση (13.5%) και οι αθλητικοί τραυματισμοί (8%) [12] -οι αριθμοί μέσα στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στο ποσοστό επί τοις εκατό των συνολικών κρουσμάτων ΚΝΜ. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται μία εκτίμηση της κατανομής των συνολικών περιστατικών ΤΚΝΜ ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή, καθώς επίσης και η κατανομή της αιτιολογίας σε κάθε περιοχή.

Όσον αφορά την μη τραυματική αναφέρεται ότι προκύπτει εξαιτίας υποκείμενης παθολογίας, η οποία μπορεί να είναι απόρροια κάποιου καρκινώματος, λοιμώδους νοσήματος (όπως η φυματίωση) ή του ιού της ανοσοανεπάρκειας (HIV), ενώ συχνά προκαλείται και λόγω γενετικών ανωμαλιών, μυοσκελετικών παθήσεων (όπως η οστεοαρθρίτιδα), ιατρικών επιπλοκών και διατροφικών ανεπαρκειών. Σημειώνεται ότι παρατηρείται συχνότερα σε μεγαλύτερης ηλικίας άτομα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο επιπολασμός της ΚΝΜ στον Καναδά για το έτος 2010 (Σχήμα 2.3), δηλαδή ο αριθμός των ανθρώπων που εμφανίζουν ΚΝΜ σε ετήσια βάση, ως ενδεικτικό μιας γενικότερης βορειοαμερικανικής τάσης [3]. Από το Σχήμα 2.3 φαίνεται καθαρά η υπεροχή των κρουσμάτων ΤΚΝΜ (μπλε) στις νεαρότερες ηλικίες έναντι της ΜΤΚΝΜ (γκρι). Ως γενική διαπίστωση και με βάση τα στοιχεία που παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.2 και 2.3 καθίσταται σαφές ότι ενέργειες που στοχεύουν στον περιορισμό των τροχαίων ατυχημάτων θα συνέβαλαν δραστικά στη μείωση της εμφάνισης της ΚΝΜ.

Σε κάθε περίπτωση οι επιπτώσεις της ΚΝΜ εξαρτώνται από την οξύτητά της αιτίας που προκάλεσε την εμφάνισή της, καθώς και το σημείο του νωτιαίου μυελού που πλήττεται. Ως κοινώς αποδεκτή αρχή μπορεί να θεωρηθεί ότι όσο υψηλότερα βρίσκεται το επίπεδο του τραυματισμού, δηλαδή όσο πλησιάζει το εγκεφαλικό στέλεχος, τόσο πιο εκτεταμένο θα είναι το εύρος των διαταραχών. Επομένως, αν η πληγείσα περιοχή ανήκει στην οσφυϊκή μοίρα προκαλείται αισθητική και κινητική απώλεια των κάτω άκρων (παραπληγία), ενώ αν η βλάβη ανήκει στην θωρακική ή την αυχενική μοίρα προκαλείται, επιπλέον της αδυναμίας κίνησης ή/και αίσθησης των κάτω άκρων, παράλυση του κορμού και των άνω άκρων αντίστοιχα (τετραπληγία). Επίσης, σε μία ακόμα προσπάθεια κατηγοριοποίησης, η βλάβη χαρακτηρίζεται ως «ατελής» ή «πλήρης», ανάλογα με το αν έχει διατηρηθεί ή όχι κάποιου είδους κινητική ή αισθητική λειτουργία στα S4-S5 (Σχήμα 2.1) νευροτόμια



Σχήμα 2.2: Κατανομή της ΤΚΝΜ ανάλογα με την γεωγραφική περιοχή [3]



Σχήμα 2.3: Επιπολασμός ΚΝΜ για το 2010 στον Καναδά [3]

αντίστοιχα [3].

Σήμερα, η πλέον αποδεκτή ταξινόμηση του επιπέδου της κάκωσης παρέχεται από την Αμερικανική Εταιρεία Κακώσεων Νωτιαίου Μυελού (American Spinal Injury Association (ASIA) Impairment scale - AIS) μέσω της πενταβάθμιας κλίμακας που έχει ορίσει [13]. Η κλίμακα αυτή χρησιμοποιεί τα πέντε πρώτα γράμματα του λατινικού αλφάβητου Α-Ε με το Α να δηλώνει την κατάσταση της πλήρους απώλειας κίνησης και το Ε την πλήρη δυνατότητα κίνησης.

2.2.2 Επιπτώσεις στην Υγεία

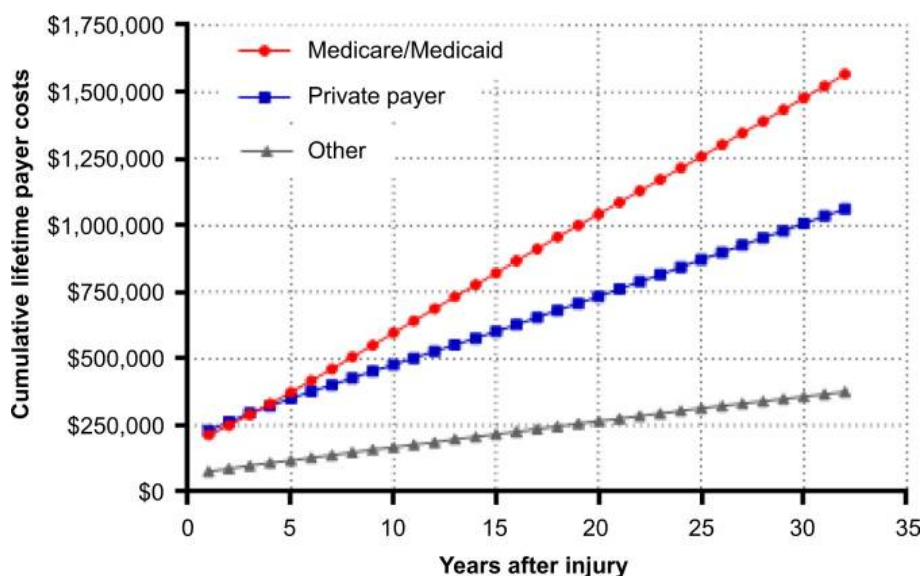
Αν και λιγότερο από το 0,1% του παγκόσμιου πληθυσμού υφίσταται ΚΝΜ, δεν παύει να παραμένει μία άκρως σοβαρή κατάσταση για την υγεία, η οποία χρήζει άμεσης προσοχής. Το πιο ανησυχητικό χαρακτηριστικό της είναι το υψηλό ποσοστό θνησιμότητας, το οποίο μπορεί να αγγίξει έως και το 80% των περιπτώσεων -ιδιαίτερα σε χώρες με χαμηλό βιοτικό επίπεδο. Επωφελούμενες από τις εξελίξεις στην υγειονομική περίθαλψη, οι χώρες με υψηλά εισοδήματα έχουν πετύχει σημαντική μείωση των θανάτων για το πρώτο διάστημα μετά την βλάβη (έως και 40%), όμως ο κίνδυνος της μείωσης του προσδόκιμου ζωής των πασχόντων έναντι των υγείων παραμένει [3]. Το γεγονός αυτό δεν οφείλεται μόνο στην κάκωση αυτήν καθ' εαυτήν αλλά και στο σύνολο των δευτεροπαθών επιπλοκών που συνεπάγεται η απώλεια της κινητικότητας και κατ' επέκταση η διαγωγή καθιστικού βίου.

Η πιο κοινή επίπτωση για την υγεία ενός ατόμου με παραπληγία, αλλά και η πιο εύκολα αναγνωρίσιμη, είναι η πρόκληση ελκών πίεσης. Πρόκειται για βλάβη της επιφάνειας του δέρματος η οποία προκαλείται λόγω της παρατεταμένης άσκησης πίεσης από μία σκληρή επιφάνεια, όπως είναι το κρεβάτι και το αμαξίδιο, για χρονικό διάστημα που υπερβαίνει την μία ή τις δύο ώρες. Επίσης, η μειωμένη σωματική δραστηριότητα οδηγεί σταδιακά στον περιορισμό του εύρους κίνησης των αρθρώσεων, προκαλεί μυϊκή ατροφία και συστολή των μυών των κάτω άκρων (λόγω ακινησίας), ενώ σε συνδυασμό με ένα μη προσεγμένο και υγιεινό δια-

τολόγιο μπορεί να οδηγήσει στην παχυσαρκία ακόμα και τον διαβήτη [3]. Μία ακόμα επίπτωση της έλλειψης σωματικής άσκησης είναι η μείωση της οστικής πυκνότητας και κατ' επέκταση η οστεοπόρωση, καθώς η επικείμενη έλλειψη μηχανικών ερεθισμάτων στα οστά μειώνει τον ρυθμό παραγωγής οστικής μάζας από τα οστεοκύτταρα [14] -ως μηχανικό ερέθισμα στα οστά νοείται οποιαδήποτε άσκηση πίεσης η οποία συνήθως προκαλείται από φυσιολογικές λειτουργίες του ανθρώπινου οργανισμού, όπως η βάδιση. Επιπλέον, τα άτομα με ΚΝΜ είναι ιδιαίτερος επιρρεπής σε παθήσεις του αναπνευστικού συστήματος (όπως η πνευμονία), παρουσιάζουν καρδιαγγειακά προβλήματα (από ορθοστατική υπόταση έως αυτόνομη δυσρεφλεξία), δυσλειτουργία του ουροποιητικού (όπως νεφρική ανεπάρκεια) και του πεπτικού συστήματος, ενώ είναι πολύ πιθανό να παρουσιάσουν σπαστικότητα, θρόμβωση και να υποφέρουν από χρόνια πόνο [15].

Πέρα από τις επιπτώσεις στη σωματική υγεία, η ΚΝΜ επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ψυχολογία καθώς και την κοινωνική/οικονομική πραγματικότητα των ανθρώπων που ζουν με αυτήν. Η πλειονότητα διακόπτει απότομα την εργασία της εξαιτίας του τραυματισμού, ενώ η υποαπασχόληση και η ανεργία παραμένουν ανάμεσα στα πιο σημαντικά ζητήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν καθ' όλη την διάρκεια του βίου τους [3]. Πιο συγκεκριμένα, μόλις το 12% των περιπτώσεων εργάζεται κατά τον πρώτο χρόνο από την εμφάνιση της βλάβης, ενώ ακόμα και σε διάστημα 20 έως 40 ετών μετά την κάκωση το ποσοστό ανεργίας ανέρχεται στο 60%. Άμεση συνέπεια της έλλειψης εργασίας είναι η επακόλουθη έλλειψη εισοδήματος, το οποίο συν τοις άλλοις είναι απαραίτητο για την συνέχιση των θεραπειών τους και γενικότερα για την κάλυψη των εξόδων που προκύπτουν λόγω της ΚΝΜ. Μόνο για τον πρώτο χρόνο τα έξοδα διαβίωσης ενός ατόμου με παραπληγία ανέρχονται περί τις \$ 500.000, ενώ για κάθε επόμενο έτος δαπανάται κατά μέσο όρο το ποσό των \$ 73.000 [12]. Το Σχήμα 2.4 δείχνει την σταδιακή αύξηση των ετήσιων εξόδων διαβίωσης, όπως επίσης και το γεγονός ότι σημαντικό μέρος των εξόδων (35%) καλύπτεται ιδιωτικά, δηλαδή από τους ίδιους τους ασθενείς (μπλε καμπύλη) [16].

Ο αντίκτυπος, όμως, της έλλειψης απασχόλησης έχει και άλλες προεκτάσεις. Μέσα από την εργασία το άτομο αισθάνεται παραγωγικό, χρήσιμο και ενεργό μέλος της κοινωνίας, έχει έναν στόχο που του δίνει το έναυσμα να βελτιώνεται καθημερινά, έρχεται σε επαφή με κόσμο, αλλάζει παραστάσεις, ιδέες, απόψεις και, ειδικότερα σε ότι αφορά τα άτομα με ΚΝΜ, η συμμετοχή στον επαγγελματικό στίβο στρέφει την προσοχή τους από την πάθηση σε πιο ευχάριστες δραστηριότητες και γενικότερα συμβάλλει δραστικά στην προσαρμογή τους σε αυτήν την διαφορετική τάξη πραγμάτων. Επομένως, όταν αυτή απουσιάζει τα άτομα αισθάνονται ότι χάνουν την ανεξαρτησία τους, την εμπιστοσύνη στις ικανότητές τους, ότι αποτελούν εμπόδιο για τις οικογένειές τους και ότι μειονεκτούν έναντι των υπολοίπων, με αποτέλεσμα να κλείνονται στον εαυτό τους, να χάνουν το ενδιαφέρον ή το αίσθημα της ικανοποίησης από την ζωή, ενώ μπορεί πολύ εύκολα να οδηγηθούν σε σοβαρές καταστάσεις ψυχικής διαταραχής, όπως η κατάθλιψη [3]. Επιπλέον, αυτό το αίσθημα παραίτησης εμποδίζει και την διαδικασία της αποκατάστασης, καθώς οι ασθενείς παρουσιάζουν μειωμένο ζήλο και δυσκολεύουν το έργο των επαγγελματιών υγείας [11].



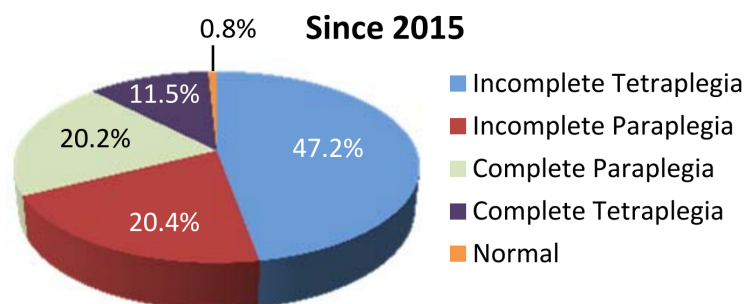
Σχήμα 2.4: Σωρευτικό κόστος διαβίωσης για τυπική περίπτωση ασθενή με ΚΝΜ και πηγές κάλυψης των εξόδων αυτών - σύστημα υγείας (κόκκινο), ιδιώτες (μπλε), άλλες πηγές (γκρι) [16]

Αξίζει να σημειωθεί ότι, πέρα από τον εργασιακό τομέα, επηρεάζονται σημαντικά και άλλες πτυχές του δημόσιου βίου, όπως η συμμετοχή στην εκπαίδευση, τα πολιτιστικά δρώμενα και την ψυχαγωγία, καθώς και απλές δραστηριότητες της καθημερινότητας, όπως η απρόσκοπτη μετακίνηση. Το κύριο πρόβλημα έγκειται στην αδυναμία παροχής φυσικής πρόσβασης και την απουσία ειδικά εκπαιδευμένου προσωπικού ικανού να ανταποκριθεί στις ιδιαίτερες ανάγκες αυτής της μερίδας του πληθυσμού [2]. Χώροι όπως σχολεία, θέατρα, κέντρα διασκέδασης, υπαίθριοι χώροι αναψυχής, ιδιωτικά και δημόσια κτήρια, μέσα μαζικής μεταφοράς, πολλές φορές κρίνονται ακατάλληλα και εμποδίζουν την πρόσβαση σε άτομα που μετακινούνται με αμαξίδιο. Η αδυναμία αυτή μεταφράζεται σε απουσία ευρύχωρων ανελκυστήρων ή ακόμα και παντελή έλλειψη τους, στην ύπαρξη μη ασφαλών διαβάσεων, ανεπαρκούς πεζοδρόμησης και ακατάλληλου οδοστρώματος, μεταφορικών μέσων χωρίς ειδικά αναβατόρια, ενώ σε πολλά κτήρια, ιδιαίτερα παλαιάς κατασκευής, απουσιάζουν οι ειδικές ράμπες διάβασης ή έχουν προβλήματα στον σχεδιασμό και την κατασκευή τους (όπως μικρό πλάτος ή/και απότομη κλίση) [3].

Όπως είναι αναμενόμενο, ο αποκλεισμός των ατόμων με κινητικά προβλήματα, έστω και μερικώς, από τομείς της κοινωνικής ζωής όχι απλώς είναι δείγμα ηθικής και πολιτειακής παθογένειας, αλλά αντιτίθεται και στην διεθνή Σύμβαση για τα Δικαιώματα των Ατόμων με Αναπηρία (Convention on the Rights of Persons with Disabilities – CRPD). Επομένως, κρίνεται επιτακτική η ενεργοποίηση όλων των απαραίτητων μηχανισμών προκειμένου να εξασφαλισθεί ίση πρόσβαση και ίση συμμετοχή για όλους [3].

2.2.3 Οφέλη από την Χρήση Εξωσκελετού

Αντλώντας στοιχεία από το Εθνικό Στατιστικό Κέντρο για την Κάκωση Νωτιαίου Μυελού - NSCISC (Σχήμα 2.5) παρατηρείται ότι σχεδόν το 40% των περιστατικών που υφίστανται κάποιου είδους τραυματισμό του νωτιαίου μυελού οδηγούνται σε ολική ή μερική απώλεια της κινητικότητας των κάτω άκρων (παραπληγία) [12].



Σχήμα 2.5: Νευρολογικό επίπεδο και έκταση της βλάβης μετά το πέρας της νοσηλείας [12]

Οι επιπτώσεις μιας τέτοιας κατάστασης μπορούν να αντιμετωπιστούν σε σημαντικό βαθμό μέσω της συνεχούς παρακολούθησης και της εντατικής φροντίδας του πάσχοντα [11]. Προς αυτήν την κατεύθυνση φιλοδοξεί να συμβάλει η χρήση των ρομποτικών εξωσκελετών. Χάρη σε αυτούς δεν επιτυγχάνεται μόνο η αποκατάσταση μέρους της ικανότητας βάδισης των ασθενών με ατελή παραπληγία, αλλά παρατηρείται και μια γενικότερη βελτίωση της φυσικής κατάστασης, ακόμα και σε ασθενείς με πλήρη βλάβη, και κατ' επέκταση η υποχώρηση πολλών δευτεροπαθών επιπτώσεων που σχετίζονται με την ΚΝΜ και τον καθιστικό τρόπο ζωής που αυτή επιφέρει [17]. Ανάμεσα τους ξεχωρίζουν ο περιορισμός της σπαστικότητας και του αισθήματος πόνου, ενώ πολύ συχνά γίνεται λόγος για βελτίωση της γαστρεντερικής και νεφρικής λειτουργίας [14]. Παράλληλα, η αύξηση της σωματικής δραστηριότητας επηρεάζει θετικά την λειτουργία του κυκλοφορικού και του αναπνευστικού συστήματος, προκαλεί μείωση του σωματικού βάρους και άρα μείωση του κινδύνου εμφάνισης παχυσαρκίας [17], αύξηση της δύναμης και της αντοχής κατά 25% και 75% αντίστοιχα και ταυτόχρονα βελτίωση της στάσης του σώματος, κυρίως λόγω της ενδυνάμωσης του κορμού [14]. Επιπρόσθετα, η παραμονή του ατόμου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε όρθια στάση δυνητικά συμβάλλει στην διατήρηση ή ακόμα και στην αύξηση της οστικής πυκνότητας του κάτω μέρους του σώματος εξαιτίας της άσκησης μηχανικών ερεθισμάτων στα οστά των ποδιών [18]. Επομένως, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο ο κίνδυνος των δευτεροπαθών επιπλοκών περιορίζεται τόσο περισσότερο βελτιώνεται η ποιότητα και αυξάνεται το προσδόκιμο της ζωής των ανθρώπων με ΚΝΜ.

Όσον αφορά το κομμάτι της παροχής υπηρεσιών υγείας, σημειώνεται ότι η ένταξη των εξωσκελετών στα προγράμματα αποκατάστασης έχει συμβάλλει δραστικά στην εντατικοποίηση των θεραπειών, καθώς ενθαρρύνει την ενεργό συμμετοχή των ασθενών και παράλληλα ενισχύει την ένταση της προπόνησης, χωρίς όμως να δημιουργείται αίσθημα κόπωσης, μιας και η κίνηση του ανθρώπινου σώματος υποβοηθείται από την λειτουργία των κινητήρων [17]. Οι συσκευές αυτές πέρα από κίνηση παρέχουν και στήριξη, επομένως ο αριθμός των θεραπειών που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του προγράμματος είναι μικρότερος σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους αποκατάστασης οι οποίες βασίζονται στην χρήση ορθωτικών. Ένα ακόμα σημείο υπεροχής των εξωσκελετών έναντι των υπόλοιπων μεθόδων είναι ότι πολλοί από αυτούς έχουν ενσωματωμένα ειδικά μετρητικά όργανα για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων και άρα την ακριβέστερη αξιολόγηση της πορείας της υγείας του ασθενή. Επιπλέον, η εντατικοποίηση των θεραπειών αφήνει ανοιχτό το ενδεχόμενο για λιγότερες συνολικά ή πιο αραιές χρονικά φυσικοθεραπείες, εφόσον φυσικά η χρήση του εξωσκελετού ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της υγείας του εκάστοτε θεραπευόμενου [18]. Αυτή η εξέλιξη έχει και οικονομικό αντίκρυσμα, καθώς όσο λιγότεροι επαγγελματίες υγείας απασχολούνται και όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των αναγκαίων φυσικοθεραπειών τόσο μικρότερο είναι και το ποσό που πρέπει να καλυφθεί.

Ανάμεσα στα οφέλη συγκαταλέγεται και ο θετικός ψυχολογικός αντίκτυπος, αφ' ενός ως συνέπεια της αύξησης της σωματικής δραστηριότητας [3], αλλά κυρίως εξαιτίας του αισθήματος ικανοποίησης που λαμβάνουν από το γεγονός ότι μπορούν να σταθούν ξανά όρθιοι και να περπατήσουν [14]. Ειδικά στις περιπτώσεις όπου είναι δυνατή η απόκτηση ενός προσωπικού εξωσκελετού από τον ασθενή για χρήση εντός και εκτός της οικίας του παρατηρούνται επιπλέον πλεονεκτήματα όπως η αύξηση του αισθήματος της ανεξαρτησίας, καθώς και η ευχέρεια μετακίνησης σε μέρη και μέσα μεταφοράς όπου δεν έχει προηγηθεί κατάλληλος σχεδιασμός για την πρόσβαση αμαξιδίων [19]. Επίσης, η αύξηση της λειτουργικότητας του ατόμου σε πολλές περιπτώσεις οδηγεί και σε αύξηση της παραγωγικότητας του (με ιδιαίτερα θετική επίδραση και στον τομέα της εργασίας του) [18], ενώ η γενικότερη βελτίωση της ψυχικής του κατάστασης βελτιώνει σημαντικά και την συναναστροφή του με τον κοινωνικό του περίγυρο [17].

Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι η χρήση ενός εξωσκελετού δεν αποτελεί πανάκεια, καθώς τα όποια οφέλη προκύψουν αφορούν συγκεκριμένους τομείς και ποικίλουν από ασθενή σε ασθενή [20], ενώ για τις περιπτώσεις πολύ σοβαρών βλαβών ή ύπαρξης υποκείμενων προβλημάτων υγείας η χρήση τους δεν συνιστάται εξαρχής [17]. Επιπλέον, ως τεχνολογικό προϊόν χρήζει ακόμα πολλών βελτιώσεων τόσο σε επίπεδο υλοποίησης όσο και σε επίπεδο σχεδιασμού [17] [14].

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι πέρα από τους ανθρώπους με ΚΝΜ, υπάρχει ακόμα πλήθος κόσμου με μειωμένη κινητικότητα στα κάτω άκρα που μπορεί να επωφεληθεί από την ύπαρξη των εξωσκελετών. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελούν οι ηλικιωμένοι, άτομα που έχουν υποστεί εγκεφαλικό ή πάσχουν από άλλες νευρομυϊκές παθήσεις, ακόμα και ασθενείς με σκλήρυνση κατά πλάκας -μέχρι το σημείο όπου η εναπομένουσα διατήρηση της κινητικότητάς τους είναι επαρκής ώστε να καταστεί δυνατός ο αυτόνομος χειρισμός του εξωσκελετού [8].

2.3 Σύγχρονα Μοντέλα Εξωσκελετών

Τα τελευταία χρόνια όλο και μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας κοινότητας ασχολείται με την ανάπτυξη ειδικών ρομποτικών συσκευών που φέρουν το όνομα «εξωσκελετός». Ωστόσο, η εμφάνισή τους δεν αποτελεί μια πρόσφατη ανακάλυψη, καθώς η πορεία τους μέσα στον χρόνο μετράει περισσότερο από έναν αιώνα. Η πρώτη οργανωμένη προσπάθεια κατασκευής ενός εξωσκελετού χρονολογείται την δεκαετία του 1960 και προοριζόταν κυρίως για στρατιωτική χρήση. Έκτοτε, οι συσκευές αυτές έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον ποικίλων επιστημονικών (και όχι μόνο) κλάδων, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σήμερα πάνω από 14 διαφορετικά είδη εξωσκελετών. Ανάλογα με την χρησιμότητα και τις λειτουργίες που επιτελούν μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: τους στρατιωτικούς, τους βιομηχανικούς, τους εμπορικούς και τους ιατρικούς.

Όσον αφορά τους εξωσκελετούς που προορίζονται για ιατρική χρήση μπορεί να προκύψει ένας επιπλέον διαχωρισμός, ο οποίος σχετίζεται με το αν η συσκευή στοχεύει στην αποκατάσταση ή στην υποβοήθηση του ανθρώπου που την χρησιμοποιεί. Στην πρώτη περίπτωση προορίζονται για χρήση εντός των εξουσιοδοτημένων κέντρων αποκατάστασης και δρουν επικουρικά του έργου των φυσικοθεραπευτών. Αντίστοιχα, η δεύτερη κατηγορία έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την διευκόλυνση της καθημερινότητας των ανθρώπων με μειωμένη κινητικότητα και προτείνονται για οικιακή χρήση [8]. Αυτήν την στιγμή υπάρχουν δεκάδες συσκευές οι οποίες

συνδυάζουν χαρακτηριστικά και από τις δύο ομάδες με στόχο την ικανοποίηση όσο το δυνατόν μεγαλύτερου τμήματος των υπαρχόντων αναγκών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικοί από τους πλέον δημοφιλείς εξωσκελετούς στον τομέα της ιατρικής.

2.3.1 ReWalk

«ReWalk» είναι το όνομα που εμπνεύστηκαν οι ιδρυτές της εταιρείας Argo Medical Technologies Ltd για το τεχνολογικό τους προϊόν [22]. Πρόκειται για έναν εξωσκελετό κάτω άκρων (Σχήμα 2.6) ο οποίος παρέχει την δυνατότητα αυτόνομης βάδισης σε ασθενείς με μερική ή πλήρη παραπληγία, η οποία οφείλεται σε τραυματισμό του νωτιαίου μυελού στο ύψος της θωρακικής μοίρας. Το ακριβές επίπεδο της βλάβης για το οποίο συνίσταται καθορίζεται από το αν προορίζεται για οικιακή (έως και το T7 νευροτόμιο) ή για κλινική (έως και το T4 νευροτόμιο) χρήση. Σε κάθε περίπτωση, συνίσταται για ασθενείς που έχουν διατηρήσει την κινητικότητα των άνω άκρων τους -ικανότητα απαραίτητη για τον χειρισμό της συσκευής.

Η παραγωγή της κίνησης επιτυγχάνεται μέσω τεσσάρων ανεξάρτητα ελεγχόμενων κινητήρων συνεχούς ρεύματος, οι οποίοι βρίσκονται πλευρικά των ισχίων και των γονάτων, ενώ η κίνηση των αστραγάλων προκύπτει μέσω μιας απλής άρθρωσης με την προσθήκη ελατηρίου. Η κεντρική μονάδα ελέγχου καθώς και η πηγή τροφοδοσίας -επαναφορτιζόμενη μπαταρία- βρίσκονται σε μια ειδικά κατασκευασμένη θήκη στο πάνω μέρος του εξωσκελετού, δηλαδή στο ύψος της μέσης του ανθρώπου που τον φοράει. Η πρόσδεση του ασθενή γίνεται μέσω ζωνών τύπου Velcro που βρίσκονται στην περιοχή της μέσης, του μηρού, της κνήμης, ενώ κάθε σημείο διεπαφής ανθρώπου-εξωσκελετού είναι καλυμμένο με αφρώδες υλικό για την αποφυγή δημιουργίας έλκων πίεσης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο σχεδιασμός του πέλματος ο οποίος δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να φορέσει τα δικά του παπούτσια.

Η ενεργοποίηση αλλά και ο έλεγχος του εξωσκελετού πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός χειριστηρίου που μπορεί να φορεθεί στον καρπό και βασίζεται σε ένα δίκτυο αισθητήρων ανίχνευσης κλίσης, οι οποίοι αναγνωρίζουν την πρόθεση του χρήστη να κινηθεί μέσω των αλλαγών της κλίσης του κορμού και της μετατόπισης του κέντρου βάρους. Οι λειτουργίες που μπορούν να επιλεγούν μέσω του χειριστηρίου είναι η μετάβαση από καθήμενη σε όρθια θέση και το αντίστροφο, η βάδιση, η ανάβαση και η κατάβαση σκάλας. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι για την διατήρηση της ισορροπίας του σώματος είναι αναγκαία η ύπαρξη βακτηριών [19].



Σχήμα 2.6: Ο εξωσκελετός ReWalk [22]

Η συσκευή έχει βάρος 30 kg και είναι προσαρμόσιμη ως προς το ύψος και το πλάτος της, ούτως ώστε να ταιριάζει στα σωματομετρικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε ασθενή. Βέβαια για να συμβεί αυτό πρέπει να τηρούνται τα ανώτατα όρια ύψους και βάρους που βρίσκονται στα 193 cm και 100 kg αντίστοιχα [18]. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο συγκεκριμένος εξωσκελετός είναι ο πρώτος που έλαβε αναγνώριση από τον Οργανισμό Τροφίμων και Φαρμάκων των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (U.S. Food and Drug Administration - FDA) ως ιατρική συσκευή για την αποκατάσταση της KNM [21]. Η τιμή πώλησης του ανέρχεται στα \$ 67.000.

2.3.2 Ekso GT

Ο εξωσκελετός της αμερικανικής εταιρείας Ekso Bionics συνίσταται για την αποκατάσταση ασθενών που έχουν υποστεί εγκεφαλικό και KNM (έως και το C4 νευροτόμιο) [18]. Έλαβε έγκριση από τον FDA το 2016 και προορίζεται μόνο για ενδονοσοκομειακή χρήση [8]. Οι λειτουργίες που επιτελεί αφορούν την βάρδια και την μετάβαση από όρθια σε καθήμενη θέση και το αντίστροφο, ενώ για την διατήρηση της ισορροπίας είναι απαραίτητη η χρήση βακτηριών ή περιπατητήρα. Ειδικά για τα άτομα με μερική απώλεια της κινητικότητάς τους υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του βαθμού υποστήριξης της κίνησης τους από την συσκευή σε μία κλίμακα από το 0 έως το 100, με το μηδέν να αντιστοιχεί στην πλήρως ανεξάρτητη και το εκατό στην πλήρως εξαρτημένη σχέση του ατόμου από τον εξωσκελετό.

Η βάρδια πραγματοποιείται μέσα από ένα υδραυλικό σύστημα κινητήρων οι οποίοι προκαλούν την κίνηση των αρθρώσεων σε ισχία και γόνατα. Η περιστροφή των αρθρώσεων στους αστραγάλους πραγματοποιείται με παθητικό τρόπο μέσω ελατηρίων. Επιπλέον, γίνεται εκτεταμένη χρήση αισθητήρων πίεσης με στόχο τον αποτελεσματικότερο έλεγχο της συσκευής. Προς την κατεύθυνση αυτήν τοποθετούνται αισθητήρες πίεσης και στο κάτω μέρος των βακτηριών καθιστώντας τες αναπόσπαστο κομμάτι της κατασκευής. Για την πρόσδεση του χρήστη χρησιμοποιούνται ιμάντες τόσο στην περιοχή των ποδιών όσο και στο ύψος της μέσης και των ώμων. Οι ιμάντες που βρίσκονται στη μέση και τους ώμους χρησιμεύουν για την σταθεροποίηση ενός σακιδίου πλάτης που αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του εξωσκελετού, μιας και περικλείει τις μπαταρίες και την κεντρική μονάδα ελέγχου. Οι εντολές για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της συσκευής καθώς και την έναρξη της βάρδιας δίνονται από τον χρήστη μέσω ενός χειριστηρίου [18].

Το βάρος του Ekso GT ανέρχεται στα 23 kg, ενώ το μέγιστο βάρος που μπορεί να αντέξει είναι τα 100 kg. Υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής στο ύψος του χρήστη αρκεί αυτό να βρίσκεται εντός του εύρους των 158 - 188 cm [21]. Η τιμή πώλησης του ανέρχεται στα \$ 130.000.



Σχήμα 2.7: Ο εξωσκελετός της εταιρείας Ekso Bionics [23]

2.3.3 Indego

Η εταιρεία Parker Hannifin ήταν η δεύτερη -μαζί με την Ekso bionics- που κατάφερε να λάβει την έγκριση του FDA το 2016 για το προϊόν της με την επωνυμία «Indego». Ο εξωσκελετός αυτός είναι κατάλληλος και για οικιακή και για κλινική χρήση και συνίσταται για την αποκατάσταση ατόμων που έχουν υποστεί εγκεφαλικό ή ΚΝΜ. Το εγκεκριμένο επίπεδο της βλάβης για κλινική χρήση εκτείνεται έως και το T4 νευροτόμιο, ενώ για την οικιακή το επίπεδο αυτό περιορίζεται σε κακώσεις που πλήττουν έως και το T7 νευροτόμιο.

Όπως και στους προηγούμενους δύο εξωσκελετούς, έτσι και σε αυτόν, η κίνηση επιτυγχάνεται μέσω της ενεργοποίησης τεσσάρων κινητήρων στα ισχία και τα γόνατα [18]. Ωστόσο, υπάρχει μια σημαντική διαφορά ως προς τον σχεδιασμό του, καθώς ο Indego αποτελεί μία αρθρωτή κατασκευή. Αυτό μεταφράζεται στον διαχωρισμό του σε πέντε διαφορετικά μέρη -ένα στην περιοχή της μέσης, δύο για κάθε μηρό και δύο για κάθε κνήμη- τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ειδικούς προσαρμογείς [21]. Επίσης, η μπαταρία και η κεντρική μονάδα ελέγχου βρίσκονται στο εσωτερικό του τμήματος που περικλείει την μέση, επομένως δεν υπάρχει η ανάγκη ύπαρξης κάποιας επιπλέον θήκης ή σακιδίου πλάτης. Οι λειτουργίες που επιτελεί περιλαμβάνουν την μετάβαση από όρθια σε καθήμενη θέση και το αντίστροφο, καθώς και την δυνατότητα βάρδισης - πάντα με την χρήση βακτηριών ή περιπατητήρα για την διατήρηση της ισορροπίας. Δεν υπάρχει χειριστήριο οπότε η ενεργοποίηση του εξωσκελετού πραγματοποιείται μέσω της αναγνώρισης της κλίσης του κορμού του ατόμου που τον φοράει. Ωστόσο, παρέχεται η δυνατότητα στον επαγγελματία υγείας να μεταβάλλει στοιχεία όπως το μήκος βηματισμού και την ταχύτητα βάρδισης μέσω ειδικής εφαρμογής που έχει σχεδιάσει η εταιρεία για κινητά τηλέφωνα και tablet [21].

Η συσκευή αυτή είναι από τις ελαφρύτερες της αγοράς αφού, για τα ίδια σωματομετρικά όρια με τους υπόλοιπους εξωσκελετούς, ζυγίζει μόλις 12 kg. Ως σωματομετρικά όρια αναφέρονται το μέγιστο ύψος και βάρος του ασθενή που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 191 cm και 100 kg. Επιπλέον, η Parker Hannifin στοχεύει στην ενσωμάτωση ενός συστήματος αναγνώρισης πτώσης καθώς και στην αντικατάσταση των κινητήρων με ηλεκτροδιέγερση των μυών. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν εφαρμοστεί ήδη, όμως μόνο σε εργαστηριακό επίπεδο και προς το παρόν δεν είναι διαθέσιμες στο ευρύ κοινό. Η τιμή πώλησης της αυτήν την στιγμή βρίσκεται στις \$ 73.000 [18].



Σχήμα 2.8: Ο εξωσκελετός Indego [24]

2.3.4 Rex

Ο εξωσκελετός της εταιρείας Rex Bionics Ltd στοχεύει στην ενδυνάμωση του προγράμματος αποκατάστασης ατόμων με ΚΝΜ, σκλήρυνση κατά πλάκας, καθώς και ασθενών που έχουν υποστεί εγκεφαλικό [25]. Επιπλέον, ο σχεδιασμός του έχει γίνει με τέτοιον τρόπο που του εξασφαλίζει επαρκή σταθερότητα ακόμα και χωρίς την χρήση βακτηριών ή κάποιου επιπρόσθετου στηρίγματος. Έτσι, η χρήση του ενδείκνυται ακόμα και για περιπτώσεις παντελούς απουσίας κινητικότητας στα χέρια, δηλαδή για επίπεδο βλάβης έως και το C4 νευροτόμιο. Αυτήν την στιγμή υπάρχουν δύο παραλλαγές της συσκευής. Η πρώτη προορίζεται καθαρά για κλινική χρήση, ενώ η δεύτερη σχεδιάζεται κατόπιν παραγγελίας με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ασθενή και προορίζεται για οικιακή χρήση.

Η παραγωγή της κίνησης γίνεται μέσω ηλεκτρικών κινητήρων οι οποίοι βρίσκονται στα ισχία, τα γόνατα και τους αστραγάλους παρέχοντας κίνηση πέντε βαθμών ελευθερίας σε κάθε άκρο -δύο στο ισχίο, έναν στο γόνατο και δύο στον αστράγαλο. Οι ενεργειακές απαιτήσεις του εξωσκελετού καλύπτονται από δύο μπαταρίες ιόντων λιθίου, οι οποίες προσφέρουν αυτονομία κίνησης έως και δύο ωρών. Η εφαρμογή του στο ανθρώπινο σώμα γίνεται με την βοήθεια ζωνών πρόσδεσης που βρίσκονται στους μηρούς, στις κνήμες και την κοιλιακή χώρα. Ζώνες πρόσδεσης υπάρχουν και στο κάτω μέρος της συσκευής, όπου χρησιμεύουν στην σταθεροποίηση του πέλματος του χρήστη με τις αλουμινένιες πλάκες που έρχονται σε επαφή με το έδαφος. Οι πλάκες αυτές έχουν μεγάλο πλάτος και είναι αρκετά άκαμπτες. Επομένως, εξασφαλίζεται μεγάλη σταθερότητα στην βάρδιση, αλλά μόνο σε επίπεδες επιφάνειες.

Σχετικά με τις λειτουργίες που επιτελεί αναφέρεται ότι υπάρχει ιδιαίτερα μεγάλη ποικιλομορφία. Συγκεκριμένα, παρέχει την δυνατότητα κίνησης προς όλες τις κατευθύνσεις (εμπρός, πίσω και πλάγια) και επίσης επιτρέπει την εκτέλεση ενεργειών όπως η επιτόπια περιστροφή και η ανάβαση/κατάβαση σκάλας, αλλά και ασκήσεων γυμναστικής, όπως το βαθύ κάθισμα. Ο έλεγχος του εξωσκελετού γίνεται με την βοήθεια ειδικού μοχλού (joystick) που είναι ενσωματωμένος σε ένα από τα δύο υποβραχιόνια.



Σχήμα 2.9: Ο εξωσκελετός Rex [25]

Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία ο κίνδυνος τραυματισμού του χρήστη, ακόμα και σε περίπτωση πλήρους αποφόρτισης της μπαταρίας, είναι αμελητέος. Αυτό συμβαίνει αφ' ενός διότι η συσκευή βρίσκεται κάθε στιγμή σε πλήρη στατική ισορροπία και αφ' ετέρου λόγω της ύπαρξης ενός αισθητήρα μέτρησης κλίσης, ο οποίος σε περίπτωση εντοπισμού απότομης αλλαγής της θέσης του εξωσκελετού δίνει εντολή για διακοπή της κίνησης, αποτρέποντας έτσι την απώλεια της ισορροπίας και κατ' επέκταση την πτώση. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα βάρδισης που παρέχει είναι αισθητά (3 έως 7 φορές) μικρότερη συγκριτικά με τα υπόλοιπα μοντέλα [21].

Το συνολικό βάρος της συσκευής ανέρχεται στα 50 kg, ενώ τα ανώτατα σωματομετρικά όρια των επίδοξων χρηστών είναι 195 cm για το ύψος και 100 kg για το βάρος. Δεν έχει λάβει έγκριση από τον FDA, όμως διατίθεται κανονικά σε Αυστραλία, Νέα Ζηλανδία και Ευρώπη με την τιμή πώλησης της να βρίσκεται στις \$ 160.000 [18].

2.4 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό εισήχθησαν οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με την ανατομία του νωτιαίου μυελού και της σημασίας των επιπτώσεων που μπορεί να επιφέρει μία επικείμενη βλάβη του. Ορίστηκαν με σαφήνεια τα δύο είδη κάκωσης νωτιαίου μυελού που υπάρχουν, ως τραυματική και μη τραυματική κάκωση (TKNM και MTKNM αντίστοιχα), με την τραυματική να παρουσιάζει εμφανώς μεγαλύτερα ποσοστά εμφάνισης σε σχέση με την μη τραυματική. Επιπλέον, έγινε εκτενής αναφορά στα αίτια που οδηγούν στην πρόκληση κάκωσης στο νωτιαίο μυελό, με τα τροχαία ατυχήματα να βρίσκονται στην πρώτη θέση τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Ακόμη, παρουσιάστηκαν οι δευτεροπαθείς επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων με KNM ως απόρροια του καθιστικού τρόπου ζωής, ενώ τέθηκε και το ζήτημα της αντιμετώπισης που έχουν τα παραπληγικά άτομα από το υπόλοιπο κοινωνικό σύνολο. Επίσης, εξετάστηκαν με λεπτομέρεια τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την χρήση των εξωσκελετών εξετάζοντας παραμέτρους που σχετίζονται με την σωματική και ψυχική υγεία, την οικονομία και την γενικότερη βελτίωση της καθημερινότητας. Τέλος, παρουσιάστηκαν τέσσερα από τα πιο γνωστά μοντέλα εξωσκελετών που προορίζονται είτε για κλινική είτε και για οικιακή χρήση.

Κεφάλαιο 3

Ο Εξωσκελετός «Hermes»

3.1 Εισαγωγή

Ο εξωσκελετός «Hermes» είναι προϊόν της συνεργασίας μίας ομάδας προπτυχιακών φοιτητών από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και το Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος. Το όνομα της συσκευής έρχεται ως φυσική συνέπεια του ονόματος της ομάδας «HERMES Team», όπου η λέξη «HERMES» δεν είναι παρά το αρκτικόλεξο των λέξεων «Hellenic Robotic Modular Exoskeleton System».

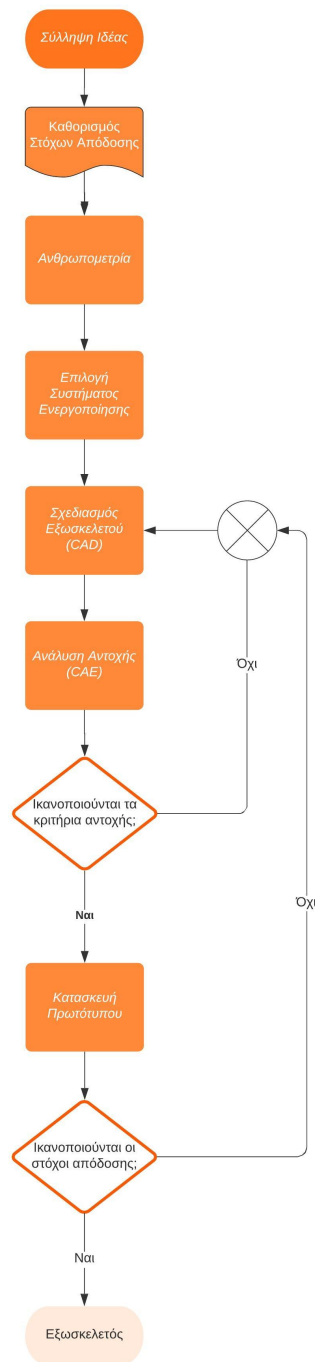
Πρόκειται για έναν ενεργητικό εξωσκελετό, ο οποίος παρέχει κίνηση σε ισχία και γόνατα μέσω της χρήσης τεσσάρων ηλεκτρικών επενεργοποιητών -δύο σε κάθε πόδι. Το μεταλλικό πλαίσιο που περικλείει το ανθρώπινο σώμα προσφέρει στήριξη στον κορμό και στα κάτω άκρα, ενώ χάρη στο ρυθμιζόμενο ύψος και πλάτος του μπορεί να φορεθεί από άτομα ύψους 165 - 187 cm. Το συνολικό βάρος του εξωσκελετού ανέρχεται στα 21 kg και μπορεί να αντέξει φορτίο έως και 100 kg. Επιπλέον, το κόστος του εκτιμάται περί τις € 20.000 ή \$ 25.000.

Ο έλεγχος της συσκευής από τον πιλότο πραγματοποιείται μέσω ειδικής διεπαφής που βρίσκεται σε μία από τις δύο βακτηρίες, οι οποίες εκτός από την συνεισφορά τους στην διατήρηση της ισορροπίας χρησιμοποιούνται και στην αλλαγή της κατεύθυνσης της κίνησης του εξωσκελετού. Η πηγή τροφοδοσίας (μπαταρία) καθώς και η πλειονότητα των ηλεκτρονικών μερών βρίσκονται μέσα σε ειδική θήκη στο ύψος της μέσης.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτενής περιγραφή όλων των μηχανικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που απαρτίζουν τον εξωσκελετό. Επιπλέον, παρουσιάζεται η συλλογιστική που ακολουθήθηκε κατά τον σχεδιασμό, καθώς επίσης και ο τρόπος λειτουργίας και χειρισμού της εν λόγω συσκευής από τον πιλότο. Σημειώνεται ότι για τον σχεδιασμό της συσκευής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό «Solidworks 2019».

3.2 Πορεία σχεδιασμού

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται συνοπτικά όλη η πορεία που ακολουθήθηκε από την στιγμή της αρχικής σύλληψης έως και την τελική κατασκευή του εξωσκελετού.



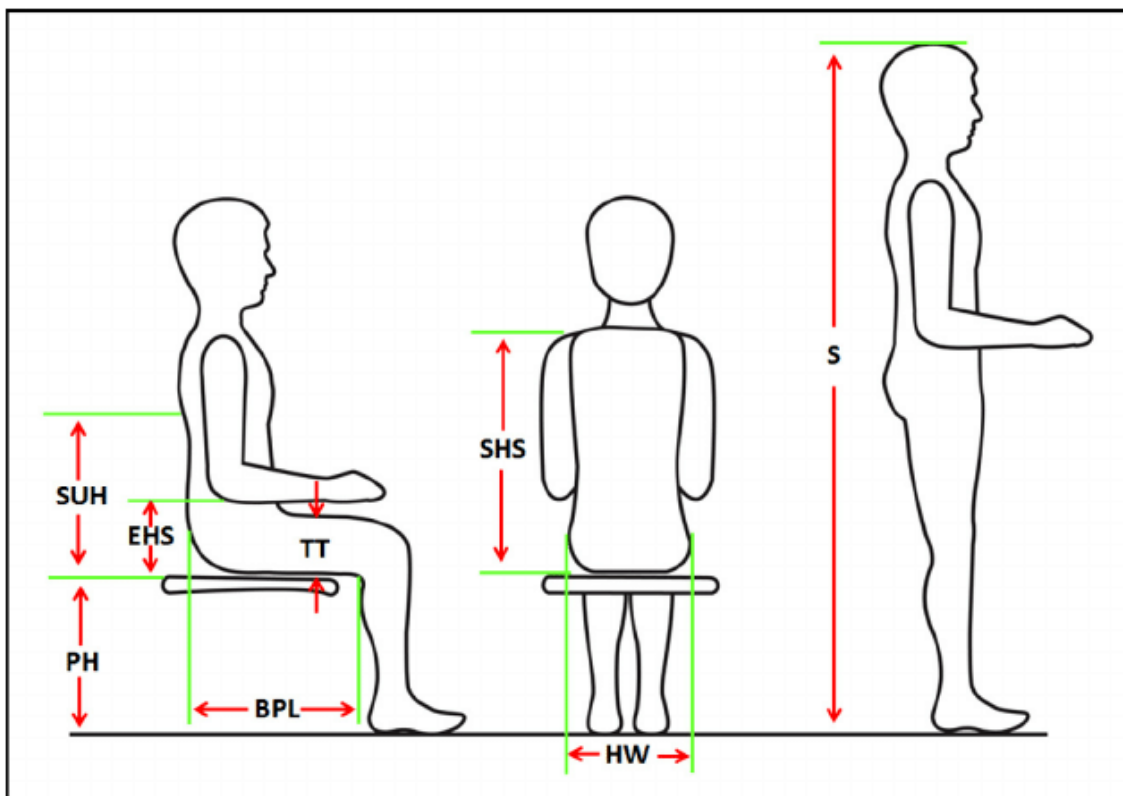
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής της πορείας του σχεδιασμού του εξωσκελετού Hermes

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.1, το πρώτο βήμα του σχεδιασμού αφορά την διεξαγωγή των ανθρωπομετρικών μετρήσεων σε κάθε έναν από τους δύο υποψήφιους πιλότους, ούτως ώστε να διασφαλισθεί η σφιχτή συναρμογή του εξωσκελετού γύρω από το σώμα του καθενός από αυτούς. Πρόκειται για μία γυναίκα ύψους 172 cm και βάρους 60 kg και για έναν άντρα ύψους 180 cm και βάρους 80 kg. Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται οι περιοχές που μετρήθηκαν, ενώ στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι τιμές αυτών των μετρήσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι κανονικά οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε όρθια και καθήμενη θέση, όπως άλλωστε φαίνεται και στο Σχήμα 3.2. Ωστόσο, λόγω του ότι και οι δύο πιλότοι είναι άτομα με παραπληγία και κατ' επέκταση δεν μπορούν να σταθούν όρθιοι, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε καθιστή και ξαπλωτή (αντί για όρθια) θέση.

Έχοντας ως βάση τα σωματομετρικά χαρακτηριστικά και των δύο πιλότων, η αμέσως επόμενη κίνηση είναι η επιλογή του συστήματος παραγωγής κίνησης του εξωσκελετού ή αλλιώς η επιλογή του τύπου, της θέσης και του πλήθους των επενεργοποιητών που θα προκαλούν την περιστροφή των αρθρώσεων -εκτενής αναφορά θα γίνει στην παράγραφο 3.3.1.

Ακολουθεί η έναρξη του σχεδιασμού. Πρόκειται για μία ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, καθώς περιλαμβάνει πολλά επιμέρους στάδια και υπόκειται στους περισσότερους περιορισμούς. Στα στάδια αυτά συγκαταλέγονται ο καθορισμός των στόχων απόδοσης -όπως περιγράφονται στην παράγραφο 1.3-, η σύλληψη πολλαπλών σχεδιαστικών προσεγγίσεων και η επιλογή των επικρατέστερων ανάμεσα σε αυτές, η επιλογή υλικού και μεθόδου κατασκευής (λαμβάνοντας υπ' όψιν την διαθεσιμότητα των πόρων, το κόστος και τον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής) και φυσικά η αξιολόγηση του εκάστοτε σχεδίου, ώστε να αποφασισθεί αν θα προχωρήσει στο στάδιο της κατασκευής ή αν θα δεχθεί περεταίρω βελτιώσεις.

Άρρηκτα συνδεδεμένη με την διαδικασία του σχεδιασμού είναι και η ανάλυση αντοχής. Συνήθως πραγματοποιείται κάνοντας χρήση συγκεκριμένου τύπου λογισμικού και βασίζεται στην Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method - FEM). Μέσω αυτής καθίσταται δυνατή η εποπτεία της κατανομής των τάσεων και των παραμορφώσεων στο σώμα που μελετάται και άρα κρίνεται η καταλληλότητα του για το αν είναι ικανό ή όχι να αντέξει τα φορτία που θα το καταπονούν. Σε αντίθετη περίπτωση θα έπρεπε να γίνει πειραματικός έλεγχος αντοχής σε πραγματικές συνθήκες. Κάτι τέτοιο θα ήταν ασύμφορο από κάθε άποψη, καθώς πέρα από χρονοβόρο, οδηγεί και στην σπατάλη πολύτιμων πόρων -κατασκευάζεται μεγάλος αριθμός κομματιών τα οποία καταστρέφονται κατά την διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 3.2: Περιοχές ανθρωπομετρικών μετρήσεων Hermes [26]

	Γυναίκα (cm)	Άντρας (cm)
Ύψος (S)	172	180
Μήκος κορμού (SHS)	57	65
Πλάτος μέσης (HW)	40	38
Μέσο μήκος κορμού (SUH)	41	50
Ιγνυακό ύψος (PH)	37	45
Ύψος αγκώνα (EHS)	17	26
Πάχος μηρού (TT)	13	18
Απόσταση ιγνυακού-ιερού (BPL)	46	53

Πίνακας 3.1: Ανθρωπομετρικά στοιχεία των δύο πιλότων

Αμέσως μετά και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης αντοχής, ακολουθεί η κατασκευή του πρωτότυπου. Το γεγονός αυτό αποτελεί καμπή για την όλη διαδικασία, καθώς έρχεται η ώρα όπου εξετάζεται στην πράξη η αποτελεσματικότητα της δουλειάς που έχει γίνει έως εκείνη την στιγμή. Αν έστω και ένα από τα κριτήρια απόδοσης δεν ικανοποιείται τότε γίνεται αλλαγή του σχεδίου και επαναξιολόγηση του. Ο βρόγχος αυτός θα πραγματοποιηθεί τόσες φορές όσες χρειαστεί μέχρις ότου να ικανοποιηθούν όλα τα κριτήρια και άρα να προκύψει η τελική μορφή του εξωσκελετού.

3.3 Σχεδιαστικές Προσεγγίσεις

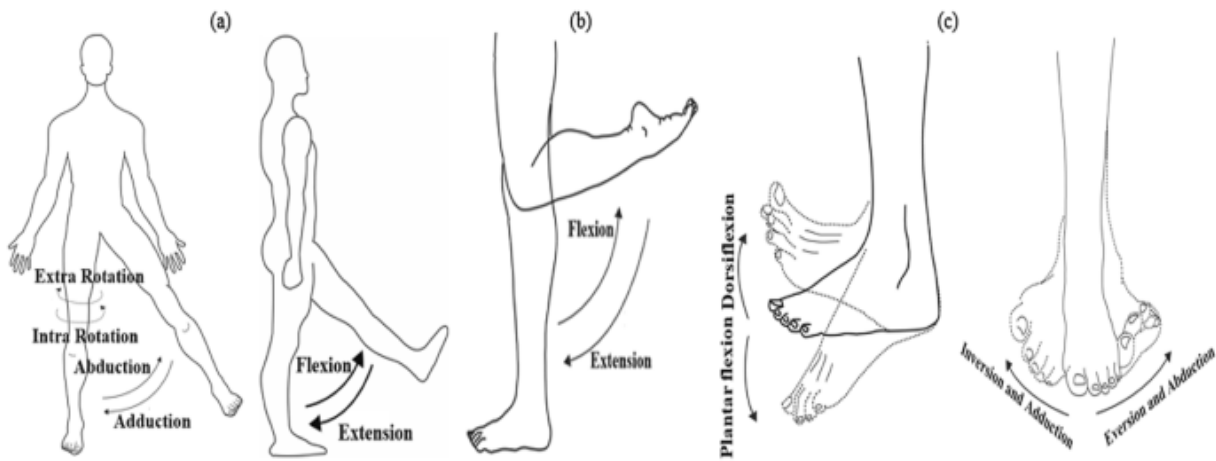
Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2, κατά την διαδικασία του σχεδιασμού γίνεται παραγωγή πολλών διαφορετικών προκαταρκτικών σχεδίων με την μορφή σκαριφημάτων. Έπειτα, τα σχέδια αυτά εξετάζονται με περισσότερη λεπτομέρεια και μεταξύ τους επιλέγονται εκείνα που (φαινομενικά τουλάχιστον) ικανοποιούν σε μεγαλύτερο βαθμό τους στόχους απόδοσης που έχουν τεθεί. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι δύο επικρατέστερες προσεγγίσεις για τον σχεδιασμό του εξωσκελετού, αφού πρώτα γίνει αναλυτική περιγραφή του συστήματος παραγωγής της κίνησης, καθώς η οριστικοποίηση του αποτελεί το σημείο εκκίνησης του σχεδιασμού.

3.3.1 Επενεργοποιητές

Για την επιλογή του συστήματος παραγωγής κίνησης εξετάστηκαν πολλοί διαφορετικοί τύποι επενεργοποιητών. Ανάμεσα τους ξεχώρισαν οι πνευματικοί, οι υδραυλικοί και οι ηλεκτρικοί. Οι πνευματικοί, αν και φαντάζουν ιδανική επιλογή λόγω του χαμηλού κόστους και της απλότητας της κατασκευής τους, υστερούν στο κομμάτι της απόδοσης, κυρίως εξαιτίας της συμπίεσότητας του αερίου αλλά και της ύπαρξης διαρροών που οδηγούν σε απώλεια πίεσης. Με το ίδιο σκεπτικό απορρίφθηκε και η επιλογή ενός υδραυλικού συστήματος, καθώς το πρόβλημα της συμπίεσότητας του ρευστού συνεχίζει να υπάρχει (αν και σε μικρότερη κλίμακα), ενώ μία επικείμενη διαρροή, πέρα από την μείωση της απόδοσης, θα προκαλούσε προβλήματα καθαριότητας και λειτουργικότητας στα περιβάλλοντα εξαρτήματα. Επομένως, για την τελική κατασκευή του εξωσκελετού επιλέχθηκαν ηλεκτρικοί επενεργοποιητές, τόσο για την σταθερά υψηλή απόδοση που προσφέρουν όσο και για την δυνατότητα ακριβούς ελέγχου της λειτουργίας τους.

Επιπλέον παράμετροι που χρειάστηκε να προσδιοριστούν αφορούν τη θέση και το πλήθος των επενεργοποιητών, καθώς και το ελάχιστο ποσό ενέργειας που απαιτείται προκειμένου να πραγματοποιείται αποτελεσματικά η περιστροφή των αρθρώσεων. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται ορισμένες από τις κινήσεις που μπορούν να πραγματοποιήσουν οι αρθρώσεις σε ισχία, γόνατα και αστραγάλους.

Μία πρώτη προσέγγιση θα ήταν η τοποθέτηση τόσων επενεργοποιητών και με τέτοιον τρόπο ώστε να καθίσταται δυνατή η εκτέλεση όλων αυτών των κινήσεων μέσω του εξωσκελετού. Ωστόσο, μια τέτοια πρακτική θα αύξανε σημαντικά την πολυπλοκότητα του συστήματος, καθώς και τον χρόνο σχεδιασμού, κατασκευής και ελέγχου της αξιοπιστίας της συσκευής. Έτσι, και έχοντας ως κύριο γνώμονα την επίτευξη της καλύτερης δυνατής αναλογίας μεταξύ απλότητας και αποτελεσματικότητας, επιλέχθηκε η χρήση συνολικά τεσσάρων επενεργοποιητών για την περιστροφή των ισχίων και τον γονάτων (ένας σε κάθε άρθρωση), ενώ η περιστροφή των αστραγάλων γίνεται με παθητικό τρόπο.



Σχήμα 3.3: Οι κινήσεις των αρθρώσεων σε ισχία, γόνατα και αστραγάλους [27]

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις προαναφερθείσες παραμέτρους, η τελική επιλογή για την παραγωγή της κίνησης κάθε μιας από τις αρθρώσεις είναι μία ολοκληρωμένη μονάδα ενεργοποίησης «Exoskeleton Drive GEN.1» (Σχήμα 3.4), η οποία παράγεται από την ελβετική εταιρεία Maxon και προορίζεται αποκλειστικά για χρήση σε εξωσκελετούς κάτω άκρων. Η μονάδα αυτή, πέρα από τον επενεργοποιητή (Brushless DC motor - EC90 flat), περιλαμβάνει το πλανητικό σύστημα γραναζιών για την μετάδοση της κίνησης, τον κωδικοποιητή (4096 MILE encoder) και τον ελεγκτή θέσης (EPOS4 position controller) με ενσωματωμένο το πρωτόκολλο επικοινωνίας (CAN). Η μονάδα παράγει συνεχή ροπή στα 54 Nm, ενώ η ταχύτητα περιστροφής του επενεργοποιητή μπορεί να φτάσει έως και τα 22 rpm. Το περίβλημα της μονάδας αποτελείται από κράμα αλουμινίου Al-7075, ενώ το συνολικό βάρος της αγγίζει τα 2550 g. Για λόγους συντομίας από το σημείο αυτό και για όλη την πορεία της εργασίας η μονάδα ενεργοποίησης θα αναφέρεται απλώς ως επενεργοποιητής.



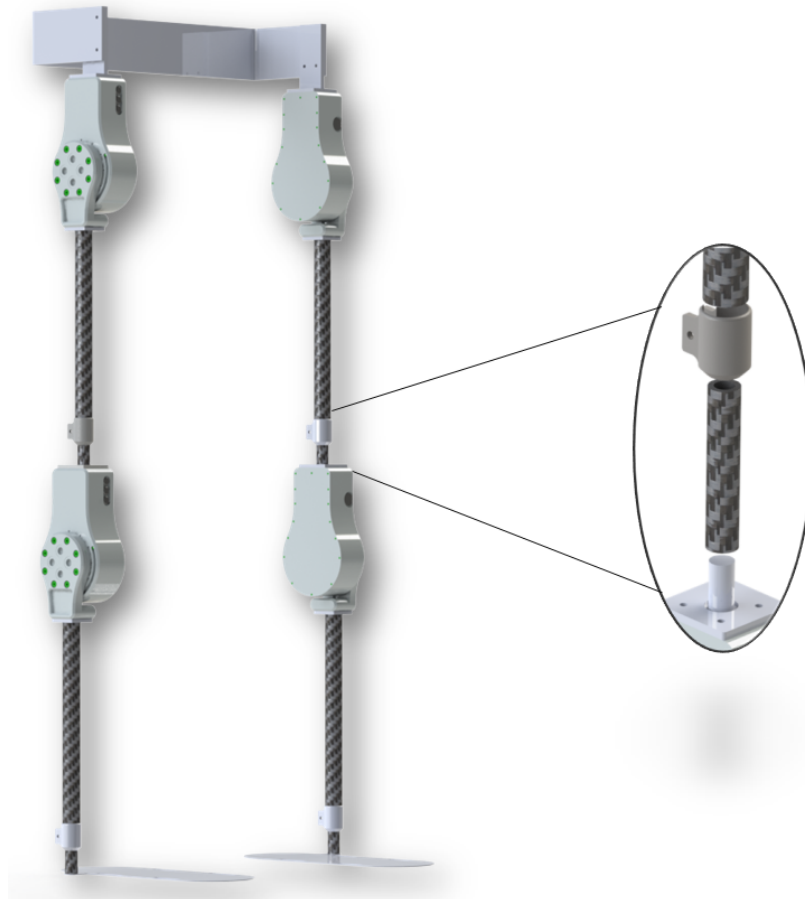
Σχήμα 3.4: Μονάδα ενεργοποίησης Exoskeleton Drive GEN.1

3.3.2 Πρώτη Προσέγγιση

Έχοντας ως βάση την τοποθέτηση ενός επενεργοποιητή σε κάθε μία από τις αρθρώσεις των ισχύων και των γονάτων, ξεκίνησε ο σχεδιασμός του αρχικού πλαισίου. Η προσέγγιση αυτή περιλάμβανε σωλήνες από ανθρακόνημα (carbon fiber) και ελάσματα (sheet metal) αλουμινίου. Κύριοι λόγοι που συντέλεσαν στην επιλογή των συγκεκριμένων υλικών ήταν η άμεση διαθεσιμότητα και φυσικά η υψηλή αναλογία στιβαρότητας-βάρους που προσφέρουν.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5 οι σωλήνες χρησιμεύουν για την σύνδεση των επενεργοποιητών των ισχύων με αυτούς των γονάτων και την μετέπειτα σύνδεση των επενεργοποιητών των γονάτων με τα πέλματα (που είναι επίσης από έλασμα αλουμινίου), σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο το δεξί και το αριστερό «πόδι» του εξωσκελετού. Επιπλέον, έλασμα αλουμινίου χρησιμοποιήθηκε και για την ένωση των επενεργοποιητών των ισχύων μεταξύ τους, σχηματίζοντας έτσι την «μέση» του εξωσκελετού.

Παρατηρώντας πιο προσεκτικά το Σχήμα 3.5 φαίνεται ότι στο κάτω μέρος των τεσσάρων σωλήνων που ήδη αναφέρθηκαν, υπάρχουν και κάποια άλλοι (τέσσερις στον αριθμό) σωλήνες ανθρακονημάτων μικρότερων διαστάσεων. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται σε μεγέθυνση το ένα από τα τέσσερα εξαρτήματα που υπάρχουν στην ένωση των μεγάλων με τους μικρούς σωλήνες. Ουσιαστικά πρόκειται για έναν τηλεσκοπικό μηχανισμό που έχει ως στόχο την αυξομείωση του μήκους των «ποδιών» του εξωσκελετού ούτως ώστε να μπορεί να φιλοξενήσει πιλότους με διαφορετικό ύψος.



Σχήμα 3.5: Πρώτη σχεδιαστική προσέγγιση

Αν και η προσέγγιση αυτή παρέχει πολλαπλά οφέλη, κυρίως σε ότι αφορά την μείωση του βάρους και την υψηλή στιβαρότητα, απορρίφθηκε για δύο λόγους. Ο πρώτος αφορά την επιθυμία για αποφυγή της χρήσης κόλλας στην κατασκευή, ενώ ο δεύτερος σχετίζεται με την γεωμετρία του εξωσκελετού.

Αναφορικά με την πρώτη αιτία, παρατηρείται στο Σχήμα 3.5 ότι οι μονάδες ενεργοποίησης συνδέονται με τους σωλήνες ανθρακονημάτων μέσω ειδικών προσαρμογών. Παρ' όλο που οι προσαρμογείς αυτοί στερεώνονται στο άνω και κάτω τμήμα των μονάδων ενεργοποίησης με την βοήθεια κοχλίων (M5), η ένωσή τους με τους σωλήνες ανθρακονημάτων γίνεται μέσω ειδικής κόλλας, η οποία γεμίζει το διάκενο μεταξύ της εσωτερικής διαμέτρου του προσαρμογέα και της εξωτερικής διαμέτρου του σωλήνα. Η τοποθέτηση της είναι γενικά μια επίπονη διαδικασία, καθώς απαιτεί τον σχεδιασμό και την κατασκευή πρόσθετων εξωτερικών στηριγμάτων (jigs) προκειμένου να επιτευχθεί η ευθυγράμμιση των συνδεόμενων μερών· τα στηρίγματα αυτά αφαιρούνται όταν η κόλλα έχει στερεοποιηθεί πλήρως. Ακόμα όμως και η ύπαρξη τους δεν εξασφαλίζει την ποιότητα της τελικής σύνδεσης. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι η τοποθέτηση της κόλλας γίνεται χειρονακτικά, πράγμα που σημαίνει ότι η επιτυχία της κόλλησης εξαρτάται απόλυτα από την ικανότητα και την εμπειρία του ανθρώπου που την τοποθετεί.

Επιπλέον, ο τρόπος τοποθέτησης των σωλήνων προκαλεί την προς τα έξω μετατόπιση του πλαισίου από την άρθρωση του γόνατου και κάτω, όπως φαίνεται από την μπροστινή όψη του εξωσκελετού στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Η μπροστινή όψη του πρώτου σχεδίου

Μια λύση θα μπορούσε να είναι ο έκκεντρος σχεδιασμός των προσαρμογέων, ώστε να επιτευχθεί η ευθυγράμμιση του πλαισίου. Κάτι τέτοιο όμως αντιβαίνει τις οδηγίες του κατασκευαστή των επενεργοποιητών, ο οποίος υποδεικνύει το κέντρο της άνω και κάτω διατομής τους ως την μοναδική περιοχή για την σύνδεση τους με άλλα εξαρτήματα.

Αναγνωρίζοντας, λοιπόν, την σημασία των ανωτέρω περιορισμών, τόσο για την ασφάλεια του πιλότου όσο και για την εύρυθμη λειτουργία της συσκευής, αποφασίσθηκε η αναζήτηση άλλων εναλλακτικών προσεγγίσεων, όπως περιγράφεται στις επόμενες ενότητες.

3.3.3 Δεύτερη Προσέγγιση

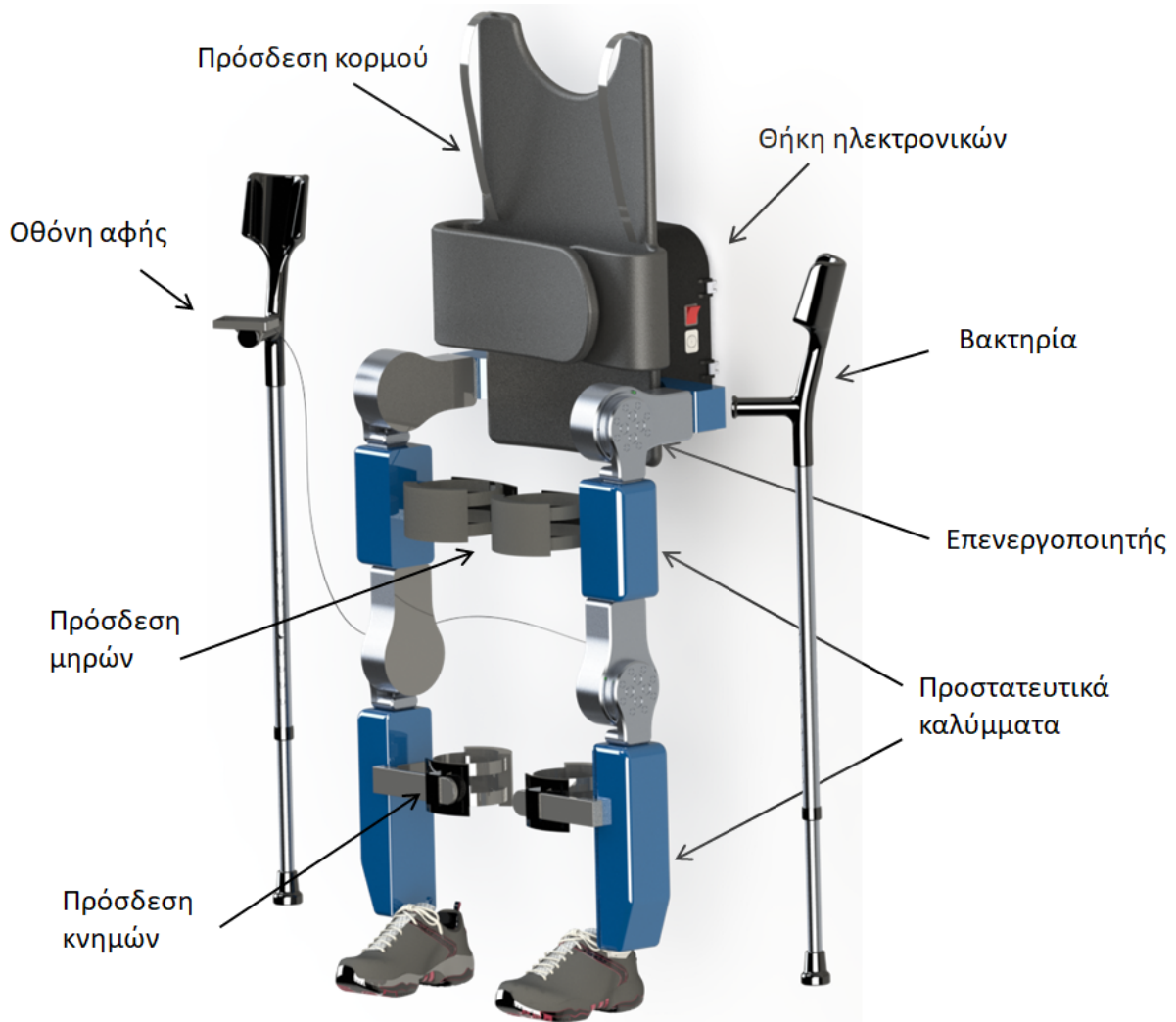
Έχοντας ως πρωταρχικό στόχο τον σχεδιασμό μιας αξιόπιστης και αποτελεσματικής συσκευής και λαμβάνοντας υπ' όψιν τα προβλήματα που υπήρχαν στο πρώτο πρωτότυπο, υιοθετήθηκε μία νέα προσέγγιση, η οποία μάλιστα είναι και εκείνη που ακολουθήθηκε για την τελική κατασκευή του εξωσκελετού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7 οι carbon σωλήνες αντικαταστάθηκαν από ελάσματα αλουμινίου, απαλλάσσοντας την συσκευή από την χρήση κόλλας, ενώ για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ευθυγράμμισης χρησιμοποιήθηκαν οι κατάλληλοι αποστάτες. Στην ενότητα που ακολουθεί περιγράφονται αναλυτικά όλα τα μηχανικά εξαρτήματα που απαρτίζουν τον εξωσκελετό.



Σχήμα 3.7: Η δεύτερη σχεδιαστική προσέγγιση

3.4 Δομή του Εξωσκελετού

Ο εξωσκελετός «Hermes» απαρτίζεται από το μεταλλικό πλαίσιο, τους τέσσερις επενεργοποιητές (το αλουμινένιο περίβλημα των οποίων αποτελεί δομικό στοιχείο του πλαισίου) σε ισχία και γόνατα, τα σημεία πρόσδεσης του σώματος του πιλότου με την συσκευή, την θήκη των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, τα προστατευτικά καλύμματα και τις δύο βακτηρίες -μία από τις οποίες φέρει την μονάδα χειρισμού του εξωσκελετού (Σχήμα 3.8).¹

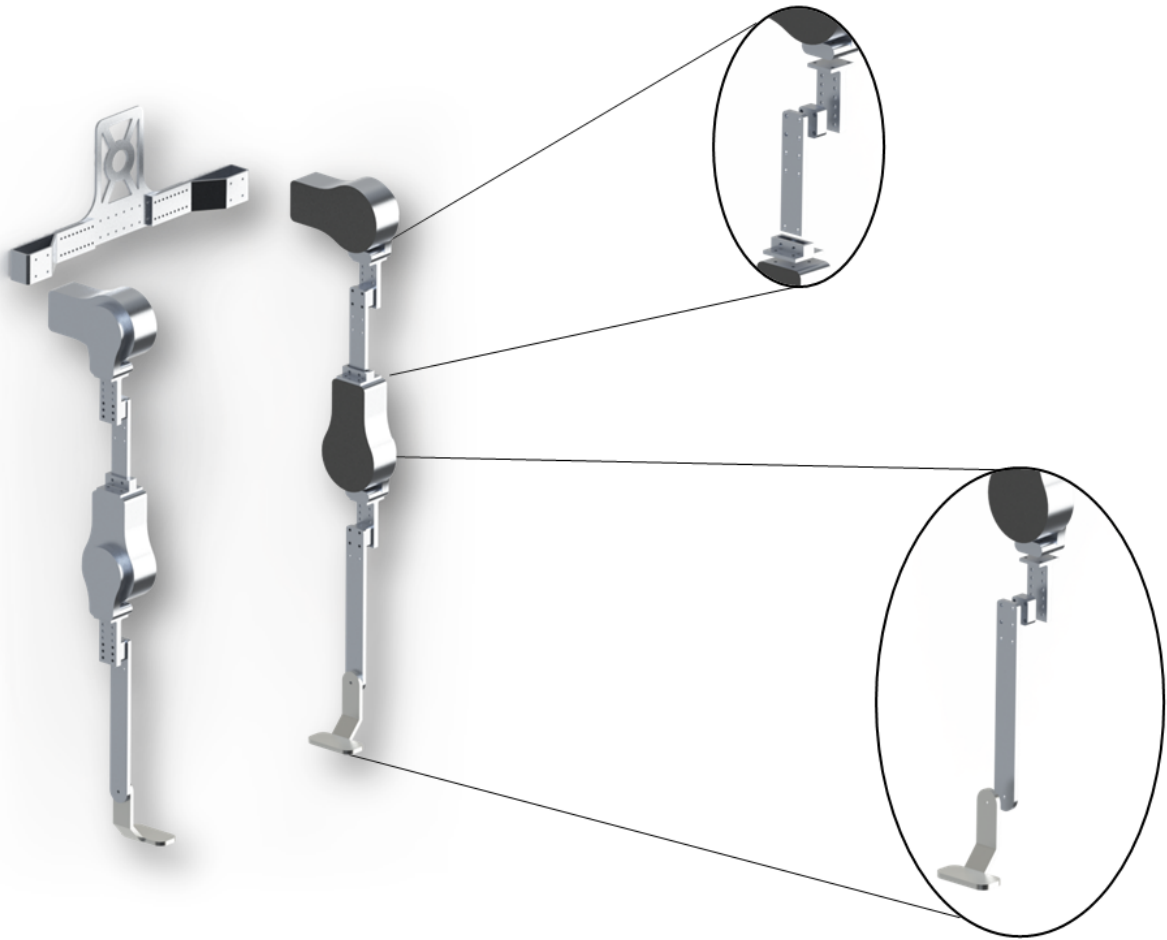


Σχήμα 3.8: Ο εξωσκελετός «Hermes»

¹Τα παπούτσια και οι βακτηρίες που εικονίζονται στο Σχήμα 3.8 προέρχονται από την διαδικτυακή πλατφόρμα GrabCAD [28].

3.4.1 Πλαίσιο

Για την κατασκευή του πλαισίου χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα αλουμινίου (Al 5754) σε διαφορετικά πάχη και μήκη. Σκοπός του είναι η σύνδεση όλων των υπόλοιπων εξαρτημάτων του εξωσκελετού μεταξύ τους και φυσικά η παροχή στήριξης στο σώμα του πιλότου. Αν και αντιμετωπίζεται ως ενιαία κατασκευή μπορεί να χωριστεί σε τρία επιμέρους τμήματα: το δεξί, το αριστερό και το κεντρικό τμήμα. (Σχήμα 3.9) Τα δύο πρώτα βρίσκονται πλευρικά του δεξιού και του αριστερού ποδιού του πιλότου αντίστοιχα, ενώ το κεντρικό βρίσκεται στο ύψος της μέσης του.



Σχήμα 3.9: Το πλαίσιο του εξωσκελετού χωρισμένο σε δύο πλευρικά και ένα κεντρικό τμήμα

Ξεκινώντας την περιγραφή των πλευρικών τμημάτων παρατηρείται ότι καθένα από αυτά μπορεί να χωριστεί στο άνω και στο κάτω μέρος. Το άνω μέρος εκτείνεται κατά μήκος του μηρού του πιλότου και χρησιμεύει στην σύνδεση του επενεργοποιητή του ισχίου με αυτόν του γονάτου, ενώ το κάτω βρίσκεται παράλληλα της κνήμης και συνδέει τον επενεργοποιητή του γονάτου με το δεξί πέλμα.

Παρατηρώντας τη μεγέθυνση του Σχήματος 3.9 φαίνεται ότι το άνω τμήμα αποτελείται από τέσσερα εξαρτήματα: τον άνω προσαρμογέα, τον αποστάτη, ένα επίμηκες κομμάτι και τον κάτω προσαρμογέα. Ο άνω προσαρμογέας συνδέεται με το κάτω μέρος του επενεργοποιητή και οι οπές που φέρει χρησιμεύουν στην αυξομείωση του ύψους του εξωσκελετού. Το υλικό που επιλέχθηκε για την κατασκευή τόσο του ίδιου όσο και του κάτω προσαρμογέα είναι το Al 7075 και η κατεργασία τους πραγματοποιήθηκε σε CNC μηχανήμα. Αντίθετα, ο αποστάτης και το επίμηκες κομμάτι είναι ελάσματα αλουμινίου 5754 και η κατεργασία που έχουν υποστεί είναι κοπή με laser. Αν και στο Σχήμα 3.9 ο αποστάτης φαίνεται ως ενιαίο κομμάτι (πάχους 18 mm), στην πραγματικότητα αποτελείται από τρία κομμάτια μικρότερου πάχους (6 mm). Ο λόγος οφείλεται στο γεγονός ότι το μεγαλύτερο πάχος αλουμινίου που μπορεί να κοπεί με laser είναι 10 mm. Επιπλέον, ο λόγος που επιλέχθηκε η κατασκευή του κάτω προσαρμογέα και του επιμήκους κομματιού ως δύο ξεχωριστά μέρη αντί ως ένα ενιαίο έγινε καθαρά για λόγους μείωσης κόστους.

Το κάτω τμήμα είναι σχεδόν πανομοιότυπο με το άνω, καθώς περιλαμβάνει τον άνω προσαρμογέα, τον αποστάτη και το επίμηκες κομμάτι. Η διαφορά έγκειται στην προσθήκη ενός πέμπτου (sheet metal) κομματιού, το οποίο κατά κάποιον τρόπο αποτελεί το πέλμα του εξωσκελετού. Το κομμάτι αυτό τοποθετείται στο εσωτερικό του παπουτσιού του πιλότου, ακριβώς κάτω από έναν ειδικό πάτο από αφρώδες υλικό -στην παράγραφο 3.4.4 αναφέρεται ότι κάτω από τον αφρώδη πάτο βρίσκονται επίσης και οι αισθητήρες πίεσης. Σχετικά με τον τρόπο κατασκευής του σημειώνεται ότι και αυτό έχει υποστεί κοπή με laser, όμως σε αντίθεση με τα υπόλοιπα sheet metal κομμάτια, αυτό αποτελείται από ανοξείδωτο χάλυβα (304). Η επιλογή αυτή βασίστηκε τόσο στα υψηλά φορτία που καταπονούν την συγκεκριμένη περιοχή όσο και στην αδυναμία διαμόρφωσης του αλουμινίου για πάχος μεγαλύτερο των 5 mm. Επιπλέον αναφέρεται ότι υπάρχει η δυνατότητα περιστροφής των πελμάτων ως προς το επίμηκες κομμάτι κατά μία γωνία 20°. Η γωνία αυτή αντιστοιχεί στην ραχιαία κάμψη της ποδοκνημικής και περιορίζεται από την ύπαρξη ενός μικρού μεταλλικού πείρου ο οποίος λειτουργεί σαν μηχανική ασφάλεια. Η επαναφορά στην αρχική θέση γίνεται μέσω ελατηρίου.

Όσον αφορά το άνω τμήμα του πλαισίου, από το Σχήμα 3.9 φαίνεται ότι αυτό αποτελείται από τρία sheet metal κομμάτια που ενώνουν τους επενεργοποιητές των ισχύων μεταξύ τους, ενώ μέσω των οπών που φέρουν επιτυγχάνεται η δυνατότητα ρύθμισης του πλάτους του εξωσκελετού. Επιπλέον, το κεντρικό κομμάτι χρησιμεύει και ως στήριγμα για την θήκη των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

3.4.2 Σημεία Πρόσδεσης

Προκειμένου να επιτευχθεί η σφιχτή συναρμογή του σώματος του πιλότου με τον εξωσκελετό απαιτούνται πολλαπλά σημεία πρόσδεσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα σημεία αυτά βρίσκονται στην περιοχή των μηρών, των κνημών και του κορμού (Σχήμα 3.8).

Συγκεκριμένα για την πρόσδεση των μηρών και των κνημών έχουν σχεδιαστεί ειδικά στηρίγματα τα οποία είναι στερεωμένα πάνω στα επιμήκη κομμάτια του αλουμινένιου πλαισίου. Τα στηρίγματα αυτά έχουν κατασκευαστεί από ανθρακονήματα με τη μέθοδο hand lay up, ενώ τα καλούπια για την κατασκευή τους είναι προϊόν τριδιάστατης εκτύπωσης (3D printing). Πάνω σε αυτά τοποθετούνται κάποια πρόσθετα (αποσπώμενα) εξαρτήματα τα οποία έχουν σχήμα που αγκαλιάζει τις καμπύλες του σώματος, είναι καλυμμένα από αφρώδες υλικό σε κάθε διεπαφή ανθρώπου-μηχανής και επιπλέον φέρουν ιμάντες με κούμπωμα στο τελείωμα, εξασφαλίζοντας έτσι την εύκολη πρόσδεση του πιλότου στον εξωσκελετό.

Αντίστοιχα, για την πρόσδεση του κορμού έχει χρησιμοποιηθεί μία ιδιοκατασκευή από αφρώδες υλικό, η οποία μοιάζει με γιλέκο. Η επιλογή του αφρώδους υλικού έγινε με γνώμονα την άνεση και την ασφάλεια στην επαφή πιλότου-εξωσκελετού. Το δέσιμο στη μέση του κορμού πραγματοποιείται με αυτοκόλλητες ταινίες τύπου Velcro, ενώ οι ιμάντες που διαθέτει έχουν την δυνατότητα αυξομείωσης του μήκους τους, ώστε να φιλοξενήσουν πιλότους με διαφορετικό μήκος κορμού. Επίσης, το γιλέκο παραμένει σταθερό στη θέση του με την βοήθεια ιμάντων που είναι στερεωμένοι στο κεντρικό κομμάτι του πλαισίου και εξέρχονται από την θήκη των ηλεκτρονικών.

3.4.3 Προστατευτικά Καλύμματα

Πέρα από την ύπαρξη αφρώδους υλικού στα σημεία όπου έρχεται σε άμεση επαφή το σώμα του πιλότου με τον εξωσκελετό, ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί και σε όλες εκείνες τις επιφάνειες οι οποίες μπορεί να τραυματίσουν τόσο τον πιλότο όσο και τους ανθρώπους που βρίσκονται γύρω του. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.4.1 το μεγαλύτερο μέρος του πλαισίου αποτελείται από μεταλλικά κομμάτια που εμφανίζουν έντονες αιχμές στο τελείωμά τους. Αν οι αιχμές αυτές έρθουν σε επαφή με οποιοδήποτε σημείο του σώματος του πιλότου, για παράδειγμα την ώρα που φοράει τον εξωσκελετό, είναι πολύ πιθανόν να οδηγήσουν στην πρόκληση εκδορών στο δέρμα του. Για την αποφυγή τέτοιου είδους τραυματισμών έχουν σχεδιαστεί καλύμματα που χαρακτηρίζονται για την ομαλότητα της γεωμετρίας τους και περικλείουν όλα τα κομμάτια που απαρτίζουν το πλαίσιο, πλην των επενεργοποιητών (Σχήμα 3.8). Επιπλέον, τα καλύμματα αυτά είναι επιφορτισμένα και με την προστασία του πιλότου από την πιθανή επαφή του με τα καλώδια που διατρέχουν κατά μήκος τον εξωσκελετό -τα καλώδια χρησιμοποιούνται για την σύνδεση τόσο των αισθητήρων πίεσης όσο και των επενεργοποιητών με τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που βρίσκονται στο άνω τμήμα της συσκευής.

Για την κατασκευή των καλυμμάτων έχει επιλεγεί η μέθοδος της τριδιάστατης εκτύπωσης (3D printing), ενώ το υλικό από το οποίο αποτελούνται είναι το πλαστικό PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol). Με τον

ίδιο τρόπο έχει κατασκευαστεί και η θήκη των ηλεκτρονικών. Τονίζεται ότι η θήκη διαθέτει καπάκι για την εξασφάλιση εύκολης πρόσβασης στο εσωτερικό της, ενώ οι σχισμές που φέρει στο κάτω μέρος του λειτουργούν ως δίοδοι αέρα για την ψύξη της μπαταρίας που κινδυνεύει από υπερθέρμανση.

3.4.4 Σύστημα Ηλεκτρονικών

Όπως έχει ήδη λεχθεί, η πλειονότητα των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων βρίσκεται μέσα σε μία θήκη, η οποία βρίσκεται στο άνω τμήμα του εξωσκελετού και στηρίζεται στο κεντρικό κομμάτι του πλαισίου. Η θέση αυτή επιλέχθηκε τόσο για την επίτευξη εργονομικού σχεδιασμού όσο και για λόγους ευκολίας κατά την τοποθέτηση και την επιδιόρθωση τυχόν βλαβών στα ηλεκτρονικά. Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα είναι πολυάριθμα και συνδέονται μεταξύ τους μέσω καλωδίων. Έτσι, η απομακρυσμένη τοποθέτηση τους πάνω στην συσκευή (παραδείγματος χάριν η κατανομή τους στα «πόδια» του εξωσκελετού) θα προκαλούσε αφ' ενός πρόβλημα διαχείρισης του όγκου των καλωδίων και αφ' ετέρου άσκοπη σπατάλη πόρων -το επιπλέον μήκος πέρα από το δικό του κόστος οδηγεί και στην ανάγκη απόκτησης επιπλέον εξοπλισμού, όπως είναι οι τελεστικοί ενισχυτές, για την εξισορρόπηση της πτώσης τάσης λόγω του αυξημένου μήκους των καλωδίων. Επιπλέον, η πολιτική μιας πλευρικής τοποθέτησης των ηλεκτρονικών πιθανόν να οδηγούσε και σε πρόβλημα ισορροπίας, καθώς λόγω του διαφορετικού βάρους και σχήματος που έχει το κάθε εξάρτημα θα έπαυε να υπάρχει συμμετρία και ομοιόμορφη κατανομή μάζας στην συσκευή.

Προχωρώντας στην περιγραφή του συστήματος των ηλεκτρονικών, αναφέρεται ότι αυτό αποτελείται από την κεντρική μονάδα ελέγχου (Main Control Unit - MCU), την μονάδα ελέγχου των αισθητήρων, τους μετατροπείς υποβιβασμού συνεχούς τάσης (Buck converters), τον ηλεκτρονόμο τεσσάρων επαφών (4-relay module), τον αισθητήρα μέτρησης αδράνειας (Inertial Measurement Unit - IMU), τους αισθητήρες πίεσης και την οθόνη αφής (touch screen). Εκτός από τους αισθητήρες πίεσης που βρίσκονται στο εσωτερικό των παπουτσιών του πιλότου και την οθόνη αφής που βρίσκεται στην δεξιά βακτηρία, όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα βρίσκονται στην θήκη που προαναφέρθηκε. Μέσα στην θήκη βρίσκεται και η πηγή τροφοδοσίας (μπαταρία) της συσκευής.

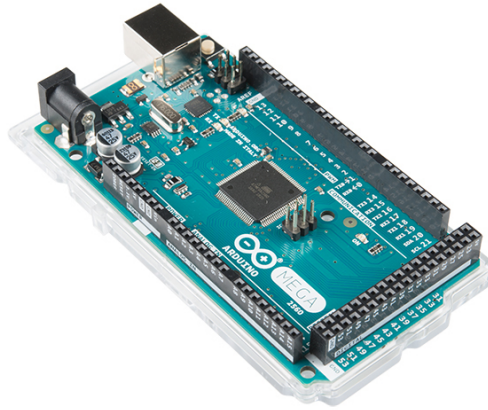
Συγκεκριμένα, ως κεντρική μονάδα ελέγχου των λειτουργιών του εξωσκελετού (Σχήμα 3.10) χρησιμοποιήθηκε ένα Raspberry Pi 3 Model B+ (το τελευταίο μοντέλο της σειράς Raspberry Pi 3). Πρόκειται για μια αρκετά ισχυρή υπολογιστική μονάδα η οποία διαθέτει τετραπύρινο επεξεργαστή 64-bit με συχνότητα επεξεργασίας 1,4 GHz και μνήμη 1 GB LPDDR2 SDRAM.



Σχήμα 3.10: Η κεντρική μονάδα ελέγχου

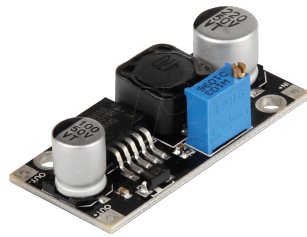
Ο έλεγχος των σημάτων από τους αισθητήρες πραγματοποιείται μέσω μιας ξεχωριστής μονάδας, η οποία συνδέεται με την MCU. Ο λόγος γίνεται για τον μικροελεγκτή Arduino Mega 2560 R3 (Σχήμα 3.11) με ονομαστική τάση λειτουργίας στα 5 V, μνήμη (flash memory) 256 KB και 54 ψηφιακούς ακροδέκτες (digital input/output pins). Επίσης, ο μικροελεγκτής είναι υπεύθυνος για την λήψη και την επεξεργασία των εντολών που δίνει ο χρήστης μέσω της οθόνης αφής.

Όσον αφορά την τροφοδοσία της συσκευής, χρησιμοποιήθηκε μια συστοιχία 40 μικρότερων μπαταριών ιόντων λιθίου ονομαστικής τάσης 3.6 V (INR18650-30Q Samsung). Για την σύνδεση τους χρησιμοποιήθηκαν ταινίες νικελίου, ενώ η τελική μπαταρία έχει ονομαστική τάση 48 V και για λόγους ασφάλειας περικλείεται από θερμοσυστελλόμενο μονωτικό.



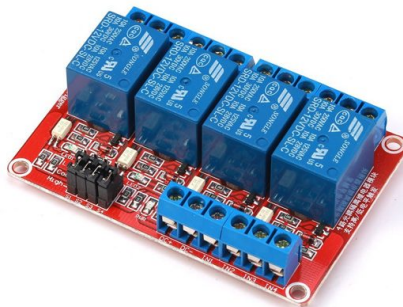
Σχήμα 3.11: Ο μικροελεγκτής Arduino Mega 2560 R3

Λόγω της διαφοράς μεταξύ της παραγόμενης από την μπαταρία και της ονομαστικής τάσης λειτουργίας των υπόλοιπων εξαρτημάτων, όπως είναι το Arduino, είναι απαραίτητη η χρήση μετατροπών υποβιβασμού τάσης (Σχήμα 3.12), προκειμένου να εξασφαλισθεί η εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Πρόκειται για έναν πυκνωτή υψηλής τάσης, ο οποίος μπορεί να δεχθεί ως είσοδο μία τάση μεταξύ 5 - 55 V, ενώ η έξοδος της κυμαίνεται μεταξύ 1,25 - 26 V.



Σχήμα 3.12: Ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης

Απαραίτητη είναι, επίσης, και η χρήση του ηλεκτρονόμου (Σχήμα 3.13). Ρόλος του είναι ο έλεγχος της ροής της ενέργειας μεταξύ της μπαταρίας και των υπόλοιπων στοιχείων, όπως είναι οι επενεργοποιητές, και την προστασία αυτών από τυχόν απότομη αύξηση της τιμής του ρεύματος.



Σχήμα 3.13: Ο ηλεκτρονόμος τεσσάρων επαφών

Όπως θα περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 3.5, ο χειρισμός του εξωσκελετού γίνεται μέσω μιας οθόνης αφής (Σχήμα 3.15) στη δεξιά βακτηρία. Χάρη σε αυτήν ο πιλότος μπορεί να επιλέξει την κίνηση επιθυμεί, ενώ η τελική επιβεβαίωση πραγματοποιείται μέσω της σκανδάλης που επικοινωνεί με την οθόνη. Η ανάλυση της είναι 320 x 240 pixels και το μέγεθός της δεν ξεπερνά τα 48,96 mm x 36,72 mm x 25 mm.



Σχήμα 3.14: Η οθόνη αφής που χρησιμοποιείται για τον χειρισμό του εξωσκελετού

Η ενότητα αυτή κλείνει με την παράθεση μίας εικόνας όπου δείχνει όλα τα κομμάτια που απαρτίζουν τον εξωσκελετό (πλην των καλωδίων των αισθητήρων και των επενεργοποιητών) σε διεγερμένη όψη (exploded view).



Σχήμα 3.15: Διεγερμένη όψη του εξωσκελετού «Hermes»

3.5 Λειτουργία του Εξωσκελετού

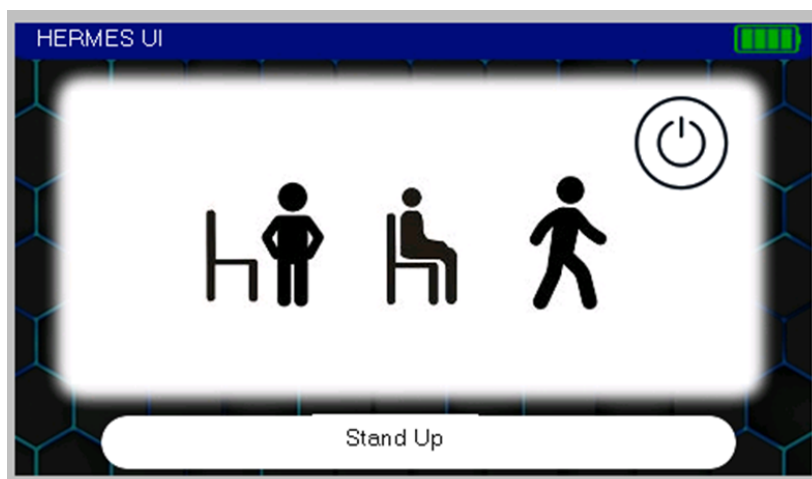
Ο έλεγχος του εξωσκελετού αποτελείται από τέσσερις βασικές λειτουργίες, οι οποίες περιλαμβάνουν την λειτουργία έναρξης, την λειτουργία ασφαλείας, την γενική λειτουργία και την λειτουργία τερματισμού.

Η λειτουργία έναρξης είναι επιφορτισμένη με την ενεργοποίηση της συσκευής έπειτα από προτροπή του χρήστη. Συγκεκριμένα, το πάτημα του διακόπτη ενεργοποίησης από τον πιλότο -ο διακόπτης έχει κόκκινο χρώμα και βρίσκεται πάνω στην θήκη των ηλεκτρονικών (Σχήμα 3.8), σηματοδοτεί και την έναρξη της λειτουργίας όλων των ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών μερών της συσκευής. Εάν η κεντρική μονάδα ελέγχου (MCU) και ο μικροελεγκτής (Arduino) ενεργοποιηθούν κανονικά, τότε η εκτέλεση του κεντρικού προγράμματος της συσκευής (HERMES Core) μεταφέρει την συσκευή στην λειτουργία ασφαλείας και ειδοποιεί τον χρήστη μέσω φωτεινής ένδειξης στην οθόνη.

Η λειτουργία ασφαλείας δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένα σύνολο ελέγχων που πραγματοποιούνται από το κεντρικό πρόγραμμα της συσκευής, ώστε να διασφαλιστεί η εύρυθμη λειτουργία όλων των επιμέρους τμημάτων της. Μεταξύ των ελέγχων που πραγματοποιούνται περιλαμβάνεται ο έλεγχος του επιπέδου της μπαταρίας, η σταθερή επικοινωνία των αισθητήρων με τον μικροελεγκτή, καθώς και η επιτυχής ενεργοποίηση των τεσσάρων επενεργοποιητών.

Εφόσον οι έλεγχοι ασφαλείας έχουν ολοκληρωθεί με επιτυχία, ο εξωσκελετός μεταβαίνει στην κατάσταση γενικής λειτουργίας. Ουσιαστικά από αυτό το σημείο και έπειτα η συσκευή είναι έτοιμη να δεχθεί τις εντολές του χρήστη και να πραγματοποιήσει τις κινήσεις που αυτός επιθυμεί. Οι κινήσεις αυτές είναι επτά στο σύνολο και περιλαμβάνουν τον αργό και τον γρήγορο βηματισμό, την εκτέλεση ενός βήματος, την ανάβαση και την κατάβαση σκαλοπατιού, την μετάβαση από όρθια σε καθιστή θέση και το αντίστροφο. Η επιλογή κάποιας από αυτές γίνεται μέσω της οθόνης αφής, όπου ο χρήστης επιλέγει το αντίστοιχο εικονίδιο, ενώ η τελική επιβεβαίωση έρχεται μέσα από το πάτημα ενός κουμπιού (trigger) που βρίσκεται ενσωματωμένο στην θήκη στήριξης της οθόνης στην βακτηρία. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι ο πιλότος επιλέγει την κίνηση που θέλει να κάνει, για παράδειγμα τον μονό βηματισμό, ακουμπώντας το αντίστοιχο εικονίδιο στην οθόνη αφής, όμως για να ξεκινήσει η κίνηση χρειάζεται και το πάτημα της σκανδάλης. Αυτό γίνεται ώστε να έχει ο πιλότος τον χρόνο που χρειάζεται, ώστε να προετοιμάσει την στάση του σώματός του για την κίνηση που πρόκειται να συμβεί και μόλις νιώσει έτοιμος να πατήσει την σκανδάλη και να ξεκινήσει. Στο Σχήμα 3.16 που ακολουθεί φαίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της οθόνης αφής, στην οποία μάλιστα έχει επιλεγεί η μετάβαση σε όρθια θέση (stand up).

Ακολουθώντας την αντίστροφη πορεία από την λειτουργία ενεργοποίησης, η λειτουργία τερματισμού είναι επιφορτισμένη με την απενεργοποίηση της συσκευής. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε έπειτα από επιλογή του χρήστη πατώντας το αντίστοιχο σύμβολο που βρίσκεται στο πάνω και δεξιά τμήμα της οθόνης (Σχήμα 3.16) είτε εξαιτίας κάποιας αδυναμίας στην λειτουργία που παρατηρείται από το λογισμικό του εξωσκελετού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο αναγκαστικός τερματισμός της λειτουργίας του εξωσκελετού λόγω χαμηλής στάθμης της μπαταρίας, αφού έχει προηγηθεί ενημέρωση του χρήστη μέσω ηχητικού σήματος και φωτεινής ένδειξης στην οθόνη.



Σχήμα 3.16: Διεπαφή πιλότου-εξωσκελετού

Αξίζει να σημειωθεί ότι καθ' όλη την διάρκεια της κίνησης οι αισθητήρες πίεσης που βρίσκονται στα πέλματα και ο αισθητήρας μέτρησης αδράνειας που βρίσκεται εντός της θήκης των ηλεκτρονικών στέλνουν σήματα στην κεντρική μονάδα ελέγχου (εφόσον έχουν επεξεργαστεί από τον μικροελεγκτή), παρέχοντας της χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν την ταχύτητα και την κλίση του κορμού, καθώς και την επαφή των πελμάτων του εξωσκελετού με το έδαφος.

3.6 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό φάνηκε ότι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός πλήρως λειτουργικού εξωσκελετού είναι μία ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, η οποία επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους και περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια. Ανάμεσα τους βρίσκεται και η εξέταση δύο διαφορετικών προσεγγίσεων που αφορούν το κομμάτι του κορμού του εξωσκελετού και την επιλογή ανάμεσα τους πριν την έναρξη της κατασκευής. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν με λεπτομέρεια όλα τα δομικά στοιχεία της συσκευής που σχετίζονται τόσο με την λειτουργικότητά της όσο και με την ασφάλεια του χρήστη, ενώ παρουσιάστηκε και ο τρόπος λειτουργίας της.

Κεφάλαιο 4

Ανάλυση Αντοχής

4.1 Εισαγωγή

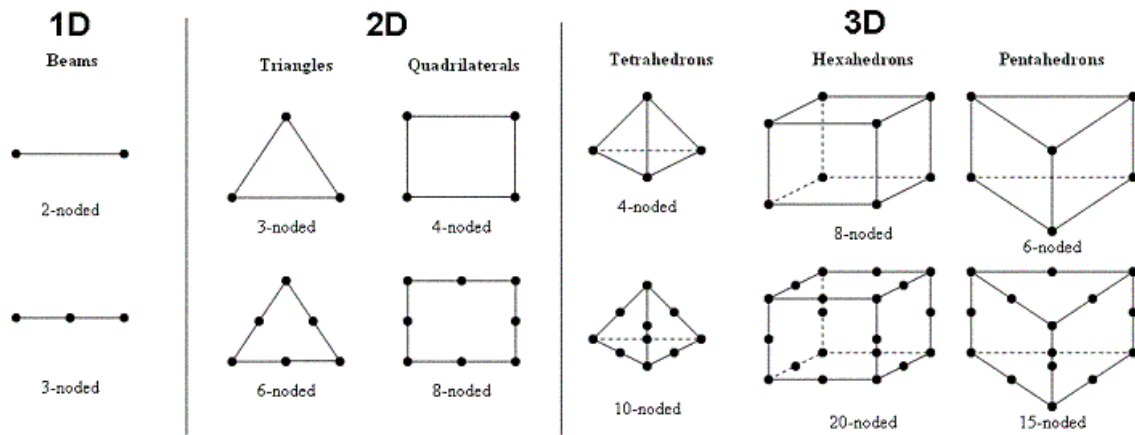
Απαραίτητο στοιχείο για την αξιοπιστία μιας κατασκευής είναι η διασφάλιση της δομικής της ακεραιότητας. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου υπάρχει άμεση επαφή με το ανθρώπινο σώμα, μία πιθανή αστοχία μπορεί να οδηγήσει σε πολύ σοβαρούς και μη αναστρέψιμους τραυματισμούς. Για τον λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η ενσωμάτωση κάποιου είδους ελέγχου της συγκεκριμένης παραμέτρου πριν την τελική κατασκευή.

Στην παράγραφο 3.2 έγινε λόγος για την ανάλυση αντοχής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η οποία αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της πορείας του σχεδιασμού. Χάρη σε αυτήν καθίσταται δυνατή η εποπτεία της δομικής συμπεριφοράς της συσκευής και παρ' όλο που πρόκειται για μία προσεγγιστική μέθοδο εφαρμόζεται κατά κόρον καλύπτοντας πλήθος εφαρμογών. Αυτό συμβαίνει διότι η παραγόμενη λύση εμφανίζει μικρή απόκλιση από την αναλυτική (αρκεί φυσικά να έχει γίνει προσεκτική επιλογή ως προς την στρατηγική επίλυσης και τις εμπλεκόμενες παραμέτρους), ενώ παρέχεται η δυνατότητα επίλυσης ακόμα και πολύπλοκων μοντέλων που υφίστανται πολλαπλή φόρτιση και όπου η αναλυτική περιγραφή τους καθίσταται αδύνατη.

Εστιάζοντας στα χαρακτηριστικά της μεθόδου, αναφέρεται ότι πρόκειται για μια τεχνική βασισμένη στην αριθμητική επίλυση διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν την φυσική υπόσταση του προβλήματος. Για τον σκοπό αυτό η προς εξέταση γεωμετρία διακριτοποιείται σε επιμέρους στοιχεία (elements), τα σύνορα των οποίων καθορίζονται από τους γειτονικούς κόμβους (nodes). Μέσω της διακριτοποίησης, η οποία είναι γνωστή και ως σχηματισμός του πλέγματος (meshing), προκύπτει ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων το οποίο και επιλύεται αριθμητικά. Ανάλογα με το είδος της γεωμετρίας τους τα στοιχεία χωρίζονται σε μονοδιάστατα (linear ή 1D), διδιάστατα (shell ή 2D) και τριδιάστατα (solid ή 3D). (Σχήμα 4.1). Επιπλέον διαχωρισμός μπορεί να προκύψει κατ' αντιστοιχία με την τάξη των εξισώσεων που παρεμβάλλονται μεταξύ των κόμβων. Έτσι, τα στοιχεία διακρίνονται σε 1^{ης} και 2^{ης} (ή μεγαλύτερης) τάξης ανάλογα με το αν οι παρεμβαλλόμενες εξισώσεις είναι γραμμικές ή πολυωνυμικές αντίστοιχα -στις δύο σειρές του Σχήματος 4.1 παρουσιάζονται τα στοιχεία 1^{ης} και 2^{ης} τάξης αντίστοιχα. Επίσης, αναφέρεται ότι το αποτέλεσμα που προκύπτει κάνοντας χρήση των γραμμικών στοιχείων υστερεί σε ακρίβεια έναντι των στοιχείων μεγαλύτερης τάξης, ωστόσο υπερτερεί στην ταχύτητα επίλυσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται στον προκαταρκτικό έλεγχο της κατασκευής και γενικότερα σε περιπτώσεις όπου το ζητούμενο δεν είναι η ακρίβεια, αλλά η εξοικονόμηση χρόνου.

Όπως είναι φυσικό, μια επικείμενη αύξηση του αριθμού ή της τάξης των στοιχείων οδηγεί σε αύξηση της ακρίβειας της λύσης, η οποία όμως συνοδεύεται και από την αντίστοιχη αύξηση του υπολογιστικού φόρτου. Επομένως, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την δημιουργία του πλέγματος, καθώς μια αναίτια αύξηση στον αριθμό των στοιχείων μπορεί να αυξήσει κατακόρυφα το υπολογιστικό κόστος χωρίς, ωστόσο, να προκύψει κάποιο όφελος για την ακρίβεια της λύσης. Μια ασφαλής πολιτική είναι η έναρξη της επίλυσης με ένα αδρό πλέγμα (coarse mesh), δηλαδή με χαμηλό αριθμό στοιχείων, το οποίο θα βελτιώνεται (fining) σταδιακά έως ότου επιτευχθεί η σύγκλιση στην λύση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάλυση με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis - FEA) δεν γίνεται άπαξ. Αντίθετα, όπως φανερώνει και το Σχήμα 3.1, είναι μια κυκλικά επαναλαμβανόμενη διαδικασία η οποία επιφέρει αλλαγές αλλά και επηρεάζεται από την γεωμετρία του προς εξέταση σώματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τον έλεγχο αντοχής του εξωσκελετού κάνοντας χρήση του λογισμικού «Solidworks 2019».



Σχήμα 4.1: Διαχωρισμός των στοιχείων ως προς την διάσταση και την τάξη τους [29]

4.2 Καθορισμός μεθόδου επίλυσης

Το πρώτο και κύριο στοιχείο που πρέπει να καθοριστεί είναι το είδος της ανάλυσης, καθώς με βάση αυτό θα γίνει ο προσδιορισμός και όλων των υπόλοιπων παραμέτρων. Για την προσομοίωση (ή επίλυση) του εξωσκελετού επιλέχθηκε το μοντέλο της στατικής-γραμμικής ανάλυσης. Πρακτικά αυτός ο τύπος μοντελοποίησης στηρίζεται στην παραδοχή ότι η θέση εφαρμογής και το μέγεθος του φορτίου δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο (στατικότητα) και ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ του φορτίου και της παραμόρφωσης που αυτό επιφέρει, δηλαδή όσο η ασκούμενη τάση αυξάνεται τόσο και η αντίστοιχη παραμόρφωση μεγαλώνει. Επισημαίνεται ότι το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για μικρές παραμορφώσεις οι οποίες συνήθως δεν ξεπερνούν το 0,2%.

Εστιάζοντας στην περίπτωση του εξωσκελετού παρατηρείται ότι αυτού του είδους η μοντελοποίηση κρίνεται κατάλληλη τόσο από δομικής άποψης, μιας και όλα τα υλικά που απαρτίζουν το πλαίσιο είναι γραμμικώς ελαστικά, όσο και από μηχανικής, καθώς οι παραμορφώσεις που αναμένεται να εμφανιστούν είναι αρκετά μικρές ώστε να μην ξεπερνούν την γραμμική περιοχή. Η τελευταία διατύπωση γίνεται και διαισθητικά αντιληπτή καθώς η εμφάνιση μόνιμης παραμόρφωσης ακόμα και περιορισμένης κλίμακας θα σήμαινε αστοχία του υλικού, ενώ θα έθετε σε κίνδυνο την ασφάλεια του πιλότου.

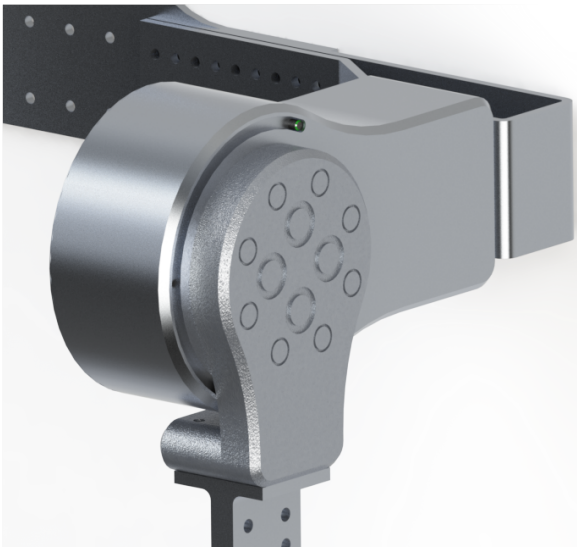
4.3 Απλοποίηση Γεωμετρίας

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται όλα τα μηχανικά εξαρτήματα που απαρτίζουν τον εξωσκελετό -εκτενής περιγραφή τους πραγματοποιήθηκε στην ενότητα 3.4. Ωστόσο, πολλά από αυτά, όπως τα προστατευτικά καλύμματα και οι ηλεκτρονικές συσκευές, έχουν υποστηρικτικό ρόλο και κατ' επέκταση δεν συμβάλλουν στην στιβαρότητα του εξωσκελετού. Επομένως, τα κομμάτια αυτά μπορούν να παραλειφθούν και να παραμείνουν μόνο τα κομμάτια του πλαισίου όπως αυτά περιγράφηκαν στην ενότητα 3.4.1 (Σχήμα 3.7).

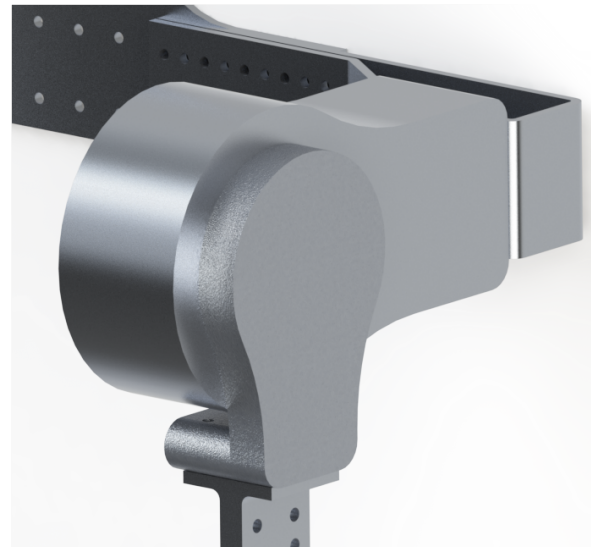
Ακόμα κι έτσι, όμως, υπάρχουν επιπλέον λεπτομέρειες, όπως οι κοιλίες σύνδεσης, το σπείρωμα στο εσωτερικό των οπών και οι περιοχές εξομάλυνσης γωνιών (fillets), οι οποίες όχι μόνο δεν επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα, αλλά δυσκολεύουν τον σχηματισμό του πλέγματος και επιβραδύνουν την επίλυση. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι κατά τις πρώτες δοκιμές η παρουσία τους αύξησε τον χρόνο επίλυσης από μερικά δευτερόλεπτα (περίπου 30 - 40 sec) σε μερικά λεπτά (μεταξύ 5 - 6 min) χωρίς αισθητή διαφορά στην παραγόμενη ισοδύναμη τάση. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ενδεικτικά η περιοχή του επενεργοποιητή του ισχίου πριν (4.2α') και μετά (4.2β') την απλοποίηση της γεωμετρίας του.

4.4 Καθορισμός Υλικού

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.4.1 τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα εξαρτήματα του πλαισίου είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας 304, το κράμα αλουμινίου 7075-T6 και το κράμα αλουμινίου 5754-H34. Στον Πίνακα ?? συνοψίζονται οι κύριες ιδιότητες των τριών αυτών υλικών:



(α') Πραγματική γεωμετρία



(β') Απλοποιημένη εκδοχή

Σχήμα 4.2: Απλοποίηση της γεωμετρίας του επενεργοποιητή για την ανάλυση αντοχής

Όνομα υλικού	Al 7075-T6	Al 5754-H34	Stainless steel 304
Πυκνότητα	2810 gr/cc	2700 gr/cc	8000 gr/cc
Μέτρο ελαστικότητας	71,7 GPa	70 GPa	193 GPa
Λόγος Poisson	0.33	0.33	0.29
Όριο διαρροής	503 MPa	240 MPa	310 MPa
Όριο θραύσης	572 MPa	305 MPa	600 MPa

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες των τριών κραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του εξωσκελετού

4.5 Επιλογή θέσεων προσομοίωσης

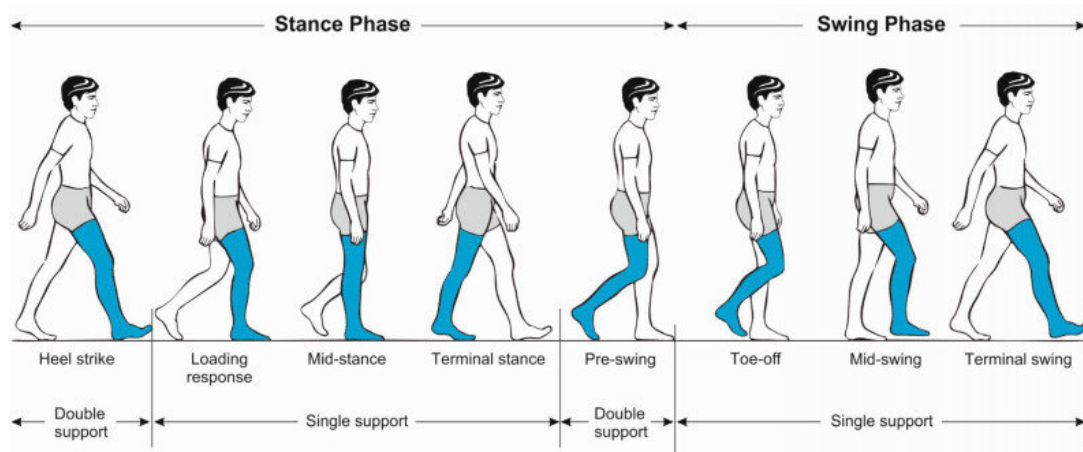
Ο εξωσκελετός «Hermes» έχει ως στόχο την εκτέλεση ορισμένων βασικών λειτουργιών μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται η βάρδια, η ανάβαση και κατάβαση σκάλας, καθώς και η μετάβαση από όρθια σε καθημερινή θέση και το αντίστροφο. Προφανώς αυτό σημαίνει ότι κατά την εκτέλεση των προαναφερθέντων κινήσεων η δομική ακεραιότητα του εξωσκελετού οφείλει να είναι εξασφαλισμένη. Έτσι, για την στατική ανάλυση αντοχής επιλέχθηκαν επτά διαφορετικά σενάρια τα οποία αντιστοιχούν σε χαρακτηριστικές περιπτώσεις κινήσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια χρήσης του εξωσκελετού. Όλες τους αφορούν ακραίες περιπτώσεις φόρτισης, με εξαίρεση το τελευταίο σενάριο, το οποίο αναφέρεται στην όρθια στάση και συμπεριλαμβάνεται για τυπικούς λόγους. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται επτά προς εξέταση σενάρια με τα τρία πρώτα να αντιστοιχούν σε αντιπροσωπευτικά στάδια του κύκλου βάρδιας, τα δύο επόμενα να αφορούν την συμπεριφορά του εξωσκελετού κατά την ανάβαση και κατάβαση σκάλας, ενώ τα δύο τελευταία αφορούν την μετάβαση από όρθια σε καθιστή θέση. Συγκεκριμένα, στα επιμέρους σχήματα 4.4α' – 4.4ζ' παρουσιάζονται οι εξής καταστάσεις φόρτισης μαζί με τις ανάλογες στηρίξεις όπως αυτές θα περιγραφούν σε επόμενη παράγραφο (4.6):

- **Πάτημα πτέρνας (heelstrike):** Αποτελεί το εναρκτήριο στάδιο του κύκλου της βάρδιας, κατά το οποίο το άκρο της πτέρνας του προεξέχοντος ποδιού (στην συγκεκριμένη περίπτωση του δεξιού) ακουμπάει στο έδαφος, όπως επίσης και τα άκρα των δακτύλων του αντίθετου ποδιού (αριστερό).
- **Πάτημα πέλματος (loading response):** Αντιστοιχεί στην φάση όπου το πέλμα το προπορευόμενου ποδιού (δεξί) ακουμπάει εξ' ολοκλήρου στο έδαφος, ενώ τα άκρα των δακτύλων του ποδιού που ακολουθεί (αριστερό) συνεχίζουν να βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος.
- **Μονή στήριξη (single support):** Αφορά την στιγμή όπου μόνο το ένα πόδι (στην συγκεκριμένη περίπτωση το δεξί) ακουμπάει στο έδαφος (stance phase), ενώ το άλλο (αριστερό) βρίσκεται στην φάση

αιώρησης (swing phase).

- **Ανάβαση σκαλοπατιού:** Κατάσταση στην οποία μόνο το ένα πόδι (στην συγκεκριμένη περίπτωση το δεξί) ακουμπάει στο έδαφος, ενώ το άλλο (αριστερό) βρίσκεται στην φάση αιώρησης.
- **Κατάβαση σκαλοπατιού:** Αντίστοιχη κατάσταση με την προαναφερόμενη με την μόνη διαφορά ότι το αιωρούμενο πόδι (αριστερό) προπορεύεται του ποδιού στήριξης (δεξί).
- **Καθήμενη στάση:** Τα δύο πέλματα ακουμπούν στο έδαφος, ενώ οι μηροί είναι παράλληλοι με το έδαφος. Αναπαριστά την ακραία συνθήκη φόρτισης, η οποία μπορεί να προκύψει στην περίπτωση χαμηλού ύψους καθίσματος.
- **Όρθια στάση:** Αποτελεί την πλέον ήπια συνθήκη φόρτισης, όπως άλλωστε θα φανεί και από την εξέταση των αποτελεσμάτων στην παράγραφο 4.9. Κατά το στάδιο αυτό κάθε σημείο του κορμού βρίσκεται ευθυγραμμισμένο και κάθετο στο έδαφος, ενώ η στήριξή του εξωσκελετού παρέχεται και από τα δύο πέλματα.

Προκειμένου να αποκτηθεί μία πιο καθαρή εικόνα για τα τρία πρώτα σενάρια, στο Σχήμα 4.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα εν λόγω στάδια όπως αυτά εμφανίζονται στον κύκλο βάρδισης. Σημειώνεται επίσης ότι όλα τα σενάρια προσομοίωσης δοκιμάστηκαν ξεχωριστά και για τους δύο πιλότους. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία τα σχήματα που έχουν παρουσιαστεί και αφορούν την ανάλυση αντοχής, όπως και τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν, αφορούν την θέση εκείνη του εξωσκελετού που μπορεί να φιλοξενήσει τον πιο μεγαλύτερο πιλότο για τον οποίο έχει σχεδιαστεί. Η επιλογή αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι στη θέση αυτή εμφανίζονται οι υψηλότερες τάσεις που καταπονούν την συσκευή.

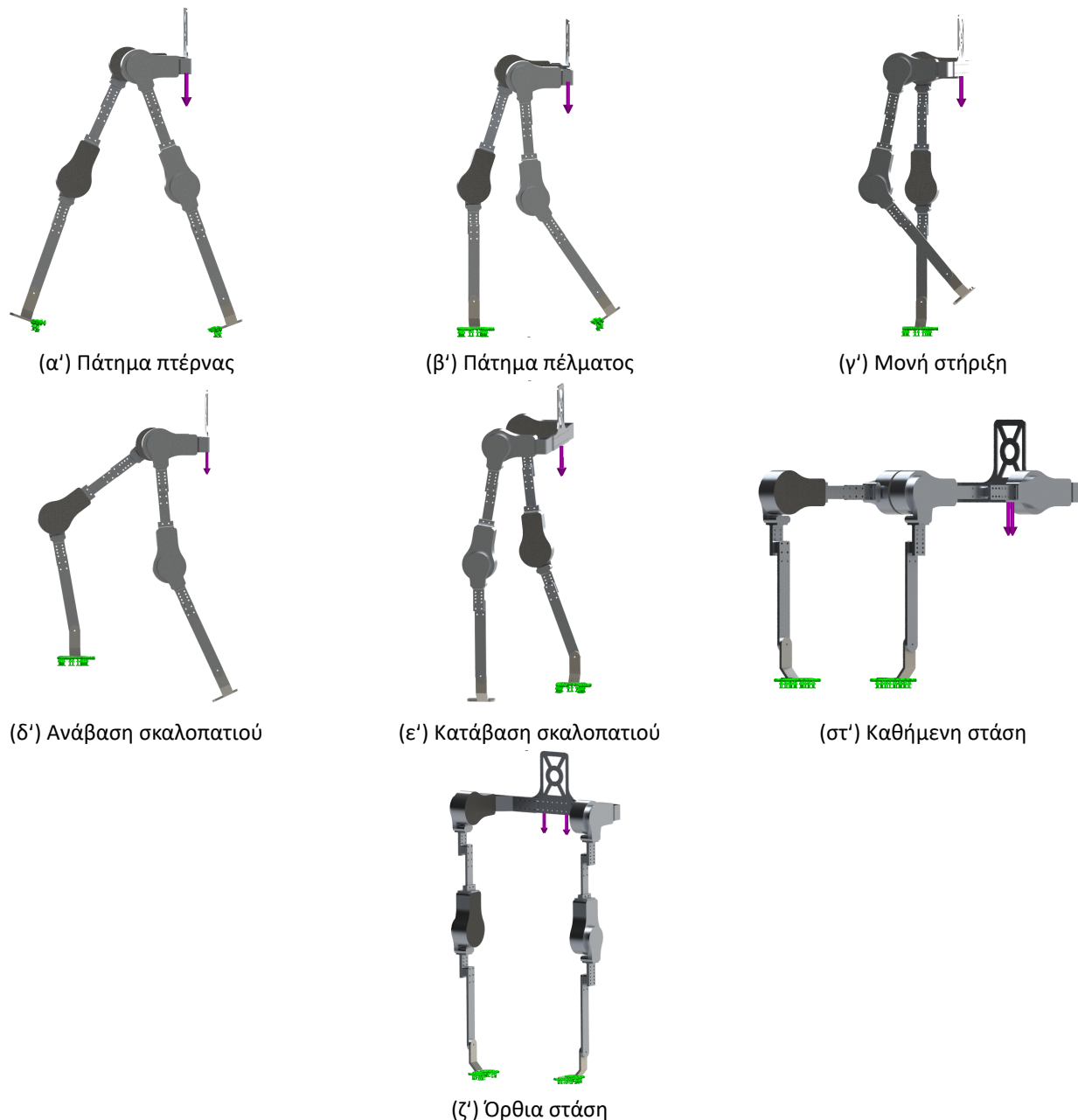


Σχήμα 4.3: Τα στάδια του κύκλου βάρδισης

4.6 Καθορισμός συνοριακών συνθηκών

Ο εξωσκελετός είναι σχεδιασμένος ώστε να μπορεί να φιλοξενεί ένα άτομο βάρους έως 100 kg. Πέρα όμως από αυτό, το πλαίσιο του εξωσκελετού καταπονείται από φορτία τα οποία αντιστοιχούν σε όλα εκείνα τα μέρη της συσκευής που παραλείφθηκαν στην παράγραφο 4.3 -μεταξύ αυτών βρίσκεται η πηγή τροφοδοσίας, τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και η θήκη των ηλεκτρονικών. Επομένως, η συνολική δύναμη που ασκείται στο πλαίσιο ανέρχεται στα 1100 N, συμπεριλαμβάνοντας τόσο το βάρος του πιλότου όσο και των υπόλοιπων εξαρτημάτων. Το σημείο εφαρμογής της δύναμης βρίσκεται στο μέσο της κάτω επιφάνειας του κεντρικού κομματιού του πλαισίου. Η θέση αυτή επιλέχθηκε διότι σχεδόν ταυτίζεται με το κέντρο μάζας του σώματος του πιλότου, το οποίο βρίσκεται 10 cm χαμηλότερα από τον ομφαλό, κοντά στο άνω τμήμα των ισχιακών οστών. Το σημείο εφαρμογής της δύναμης διατηρείται ακόμα και για τις περιπτώσεις όπου το κέντρο βάρους του ανθρώπου μετατοπίζεται πλευρικά, όπως στην περίπτωση της μονής στήριξης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπό κανονικές συνθήκες κίνησης η μετατόπιση του κέντρου βάρους δεν ξεπερνάει τα 7 cm, σχετικά μικρή αλλαγή η οποία δεν προκαλεί αισθητή διαφορά στο αποτέλεσμα.

Εκτός όμως από την επιβολή του εξωτερικού φορτίου, απαραίτητη προϋπόθεση για την επίλυση του μοντέλου είναι και ο καθορισμός των στηρίξεων. Οι στηρίξεις αυτές αναπαρίστανται με την μορφή πακτώσεων και εφαρμόζονται στα σημεία εκείνα του εξωσκελετού που έρχονται σε επαφή με το έδαφος, όπως αυτά περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Επιγραμματικά, στην όρθια και την καθιστή θέση η πάκτωση εφαρμόζεται και στα δύο πέλματα, στη μονή στήριξη, την ανάβαση και την κατάβαση του σκαλοπατιού εφαρμόζεται μόνο στο ένα πέλμα, στο πάτημα πτέρνας εφαρμόζεται στο πίσω μέρος του πέλματος του προπορευόμενου ποδιού και το εμπρός μέρος του ποδιού που ακολουθεί, ενώ στο πάτημα πέλματος οι στηρίξεις εφαρμόζονται σε όλο το δεξί πέλμα και μόνο στο μπροστινό μέρος του αριστερού πέλματος (Σχήμα 4.4)



Σχήμα 4.4: Τα επτά διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν στην ανάλυση αντοχής

4.7 Δημιουργία Πλέγματος

Ο αποτελεσματικός σχηματισμός του πλέγματος είναι άμεσα συνυφασμένος με την αξιοπιστία της παραγόμενης λύσης. Μία άστοχη επιλογή είτε ως προς το είδος είτε ως προς την τάξη των στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε υποτίμηση των αναπτυσσόμενων τάσεων ή ακόμα και σε υπόδειξη διαφορετικής περιοχής συγκέντρωσης τους από την πραγματική. Εξίσου σημαντική παράμετρος για την επιτυχία της ανάλυσης είναι και η επιλογή του κατάλληλου τύπου σύνδεσης μεταξύ των διαφόρων κομματιών της κατασκευής, καθώς αυτή αποτελεί το πρώτο στοιχείο που θα εξετάσει ο αντίστοιχος αλγόριθμος προκειμένου να προχωρήσει στη δημιουργία του πλέγματος.

Ανάμεσα στα στοιχεία που απαλείφθηκαν κατά το προπαρασκευαστικό στάδιο του μοντέλου βρίσκονται και οι κοιλίες σύνδεσης. Το μέγεθός τους είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό των υπόλοιπων εξαρτημάτων του πλαισίου, με αποτέλεσμα αυτή η διαφορά να δυσχεραίνει την δημιουργία του πλέγματος. Ωστόσο, η απαλοιφή τους σημαίνει αυτόματα και κατάργηση όλων των συνδέσεων μεταξύ των κομματιών που απαρτίζουν τον εξωσκελετό. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, το ίδιο το λογισμικό προσφέρει πολλές εναλλακτικές επιλογές σύνδεσης. Ανάμεσα τους επιλέχθηκε η σύνδεση τύπου «bonded», η οποία αναγνωρίζει την διεπιφάνεια μεταξύ δύο εξαρτημάτων ως την μεταξύ τους σύνδεση, ενώ χάρη σε αυτήν επιτυγχάνεται πολύ υψηλή αναλογία ανάμεσα στην αξιοπιστία της λύσης και τον χρόνο επίλυσης.

Όσον αφορά το πλέγμα αυτό καθ' εαυτό, αναφέρεται ότι για την προσομοίωση του πλαισίου χρησιμοποιήθηκαν τριδιάστατα στοιχεία ανώτερης τάξης (solid - high order elements), ενώ για την επίλυση του μοντέλου επιλέχθηκε η τεχνική του «adaptive meshing». Πρόκειται για μία ομάδα αλγορίθμων, που βρίσκονται ενσωματωμένοι στο Solidworks 2019, και σκοπός τους είναι η αυτοματοποιημένη αλλαγή των παραμέτρων του πλέγματος έως ότου επιτευχθεί ο καλύτερος δυνατός σχηματισμός του, σύμφωνα πάντα με τα κριτήρια που έχει ορίσει ο χρήστης. Συγκεκριμένα, αυτό που κάνει ο ένας εξ αυτών (p-adaptive) είναι να αυξάνει σταδιακά την τάξη των στοιχείων (από 2^η έως 5^η), ενός ήδη υπάρχοντος πλέγματος, στις περιοχές εκείνες όπου η σχετική ενέργεια παραμόρφωσης μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων βρίσκεται πάνω από την τιμή που ορίζει ο χρήστης (συνήθως 2%). Η διαδικασία αυτή σταματάει είτε όταν ολοκληρωθεί ο μέγιστος αριθμός των τεσσάρων επαναλήψεων, είτε όταν ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού που ορίζεται από τον χρήστη. Το κριτήριο αυτό αφορά το σφάλμα μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων της συνολικής ενέργειας παραμόρφωσης της κατασκευής (συνήθως 1%). Εναλλακτικά, ως κριτήριο τερματισμού μπορεί να επιλεγεί είτε η συνολική μετατόπιση (displacement) της κατασκευής, είτε η παραγόμενη κατά von Mises τάση. Για την περίπτωση του εξωσκελετού, ως κριτήριο τερματισμού επιλέχθηκε η συνολική ενέργεια παραμόρφωσης με τιμή σφάλματος 0.5%, ενώ η τιμή του σφάλματος της σχετικής ενέργειας παραμόρφωσης ορίστηκε σε 1%.

Σημειώνεται πως στο πλαίσιο του «adaptive meshing» παρέχεται και η δυνατότητα επιλογής ενός ακόμα αλγορίθμου (h-adaptive), ο οποίος αφορά την σταδιακή αύξηση του αριθμού των στοιχείων του πλέγματος ή αλλιώς της μείωσης του μήκους τους (element length) στις περιοχές εκείνες που είναι ύποπτες για υψηλή συγκέντρωση τάσεων. Ωστόσο, τα στοιχεία που προστίθενται με την μέθοδο αυτή είναι πρώτης τάξης με αποτέλεσμα το τελικό αποτέλεσμα να υστερεί σε ακρίβεια σε σχέση με την p-adaptive, ενώ η αύξηση των στοιχείων από ένα σημείο και έπειτα είναι υπολογιστικά πολύ πιο ασύμφορη από την αύξηση της τάξης των ήδη υπάρχοντων στοιχείων.

Επιπλέον λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή της μεθόδου p-adaptive σχετίζονται με την ακρίβεια, αλλά και την ταχύτητα παραγωγής ποιοτικών αποτελεσμάτων. Σχετικά με την πρώτη παράμετρο γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ένας αλγόριθμος, που ελέγχει σε κάθε του επανάληψη ολόκληρο το πλήθος των κόμβων, έχει περισσότερες πιθανότητες επιτυχίας σε σύγκριση με την χειροκίνητη βελτίωση του πλέγματος, η οποία βασίζεται κατά πολύ στην εμπειρία και την παρατηρητικότητα του χρήστη. Όμως ακόμη και ο πιο έμπειρος μηχανικός ίσως χρειαστεί περισσότερο χρόνο και περισσότερες επαναλήψεις μέχρις ότου πετύχει την σύγκλιση στην λύση.

Φυσικά, δεν πρέπει να παραλειφθεί το γεγονός ότι ακόμα και μία αυτοματοποιημένη διαδικασία ενέχει τον κίνδυνο του σφάλματος. Επομένως, κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος και η αξιολόγηση όλων των βημάτων της διαδικασίας. Ειδικά για την περίπτωση του «adaptive meshing», αναφέρεται ότι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος εξαρτάται άμεσα από τον αρχικό σχηματισμό του πλέγματος. Έπειτα από δοκιμές ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε και για τα επτά σενάρια είναι ο «curvature-based mesh», με μέγιστο μήκος στοιχείου τα 10 mm. Όπως μαρτυρά και το όνομά του ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προσαρμόζει το μέγεθος των στοιχείων που δημιουργεί σύμφωνα με τις εναλλαγές στην καμπυλότητα της γεωμετρίας.

Στο Σχήμα 4.5 που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά το σενάριο της μονής στήριξης, όπως προκύπτει από την εφαρμογή του «curvature-based mesh».



Σχήμα 4.5: Το αρχικό πλέγμα που σχηματίστηκε με την μέθοδο «curvature-based mesh»

4.8 Επίλυση

Η ανάλυση αντοχής πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τα εξής χαρακτηριστικά:

Επεξεργαστής	Intel(R) Core(TM) i7-4710HQ CPU @ 2.50GHz 2.50 GHz
Εγκατεστημένη RAM	16.0 GB
Τύπος συστήματος	λειτουργικό σύστημα 64-bit, επεξεργαστής τεχνολογίας x64
Κάρτα γραφικών	AMD Radeon R9 M265X

Επιπλέον, στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα βασικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας επίλυσης καθενός από τα επτά σενάρια:

Σενάριο	Πάτημα πτέρνας	Πάτημα πέλματος	Μονή στήριξη	Ανάβαση σκάλας	Κατάβαση σκάλας	Καθήμενη στάση	Όρθια στάση
Αριθμός στοιχείων	240092	241287	239013	281906	238697	237737	240313
Αριθμών κόμβων	389357	391310	387839	452747	387539	386091	389995
Χρόνος Σχηματισμού πλέγματος	22 sec	19 sec	18 sec	24 sec	16 sec	19 sec	17 sec
Χρόνος επίλυσης	19 min 42 sec	17 min 20 sec	29 min 55 sec	42 min 8 sec	26 min 39 sec	14 min 27 sec	10 min 2 sec
Αριθμός Επαναλήψεων για σύγκλιση	3	3	4	4	4	2	2

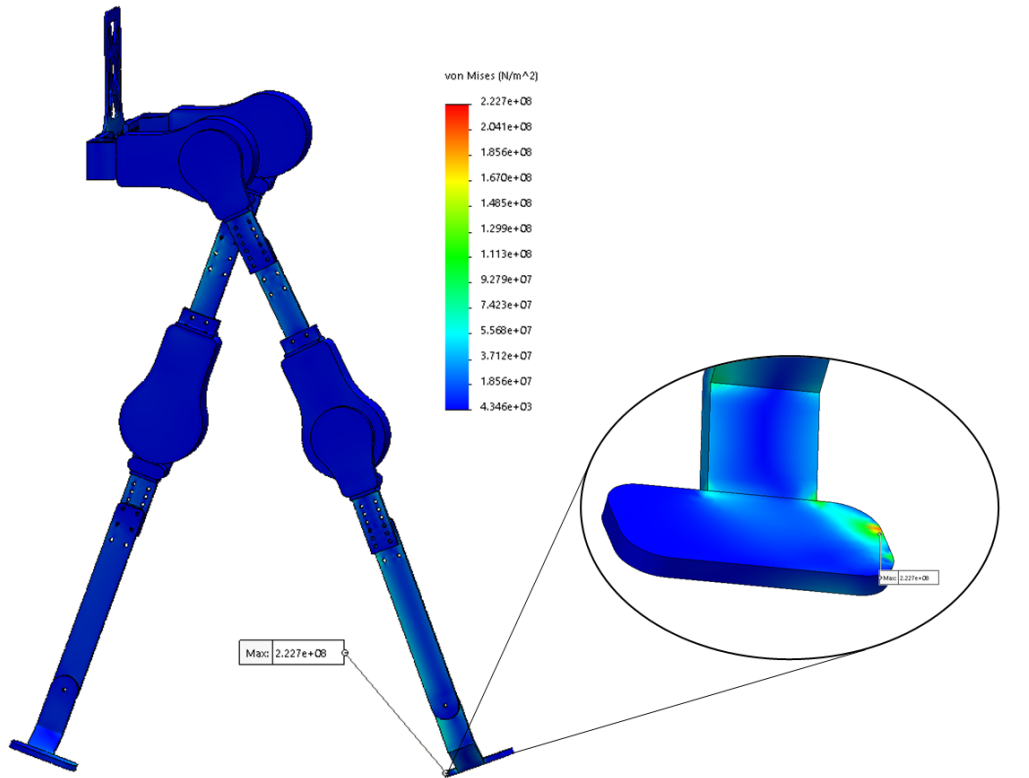
Πίνακας 4.2: Στοιχεία του πλέγματος και χρόνοι επίλυσης για κάθε ένα από τα επτά σενάρια

4.9 Αποτελέσματα

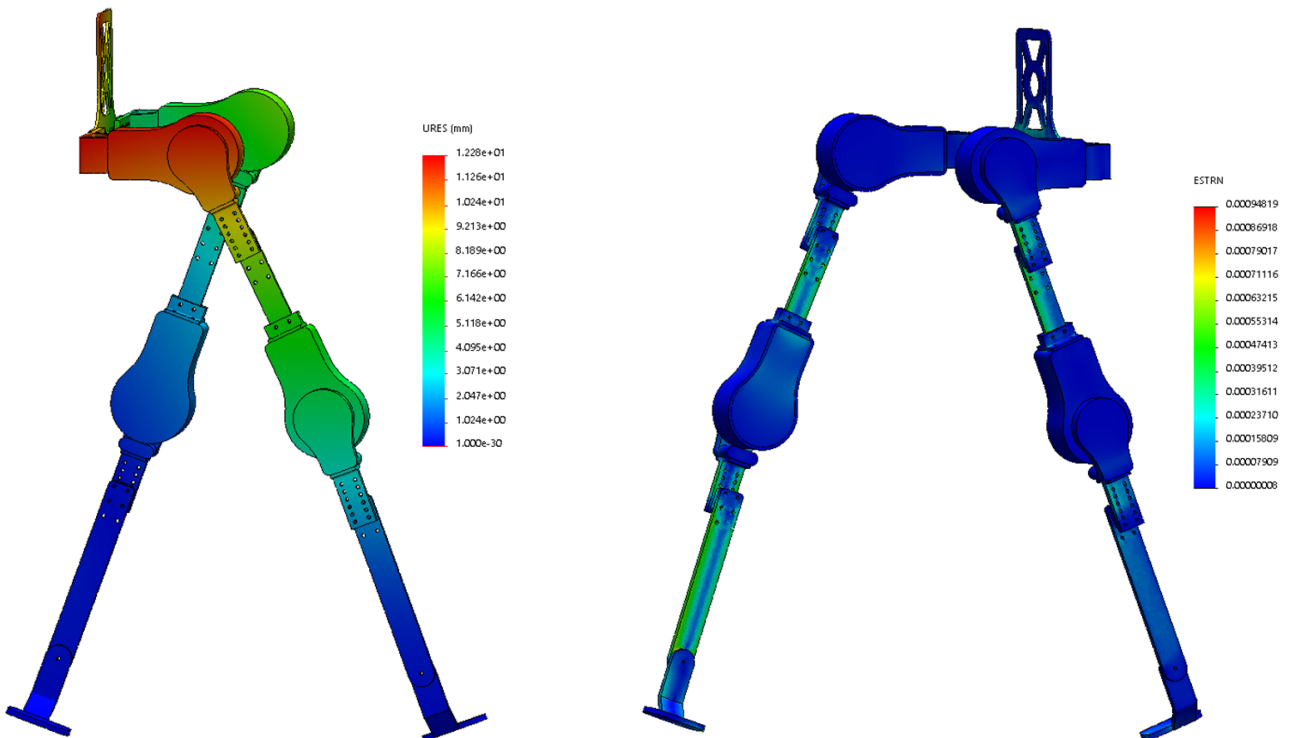
Όπως ήδη έχει ειπωθεί, πρώτος και κύριος στόχος της ανάλυσης αντοχής είναι η εξασφάλιση μιας επαρκώς στιβαρής και ανθεκτικής κατασκευής. Προς αυτήν την κατεύθυνση οι τρεις παράμετροι που εξετάζονται για κάθε ένα από τα σενάρια είναι η μέγιστη τάση, η μέγιστη παραμόρφωση και η μέγιστη μετατόπιση.

Εστιάζοντας στον εντοπισμό της μέγιστης τάσης αναφέρεται ότι υπολογίστηκε με βάση το κριτήριο του von Mises. Το κριτήριο αυτό λαμβάνοντας υπ' όψιν μόνο το αποκλίνον μέρος του τανυστή των τάσεων, δηλαδή εκείνο το κομμάτι του που αποτελείται εξ ολοκλήρου από τις συνιστώσες που προκαλούν διάτμηση, καταλήγει στην παραγωγή μίας τιμής η οποία είναι γνωστή και ως «ισοδύναμη τάση». Στη συνέχεια, η τιμή αυτή συγκρίνεται με το όριο διαρροής του υλικού. Στην περίπτωση που η ισοδύναμη τάση δεν υπερβαίνει το όριο διαρροής του υλικού η κατασκευή βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων της ελαστικής-γραμμικής περιοχής, γεγονός που την καθιστά επαρκώς στιβαρή και άρα ασφαλή για χρήση. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου δηλαδή η ισοδύναμη τάση υπερτερεί, συμβαίνει πλαστική ροή του υλικού, η οποία έχει ως συνέπεια την μόνιμη παραμόρφωση ή ακόμα και την θραύση της κατασκευής -στο σημείο εκείνο όπου παρατηρείται η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων. Φυσικά, η προοπτική εμφάνισης μόνιμης παραμόρφωσης είναι κάτι περισσότερο από δυσάρεστη και επομένως κρίνεται αναγκαία η ενίσχυση της κατασκευής στην συγκεκριμένη περιοχή ή/και η αλλαγή του χρησιμοποιούμενου υλικού με κάποιο ισχυρότερο.

Στη Σχήματα 4.6 - 4.12 που ακολουθούν παρουσιάζεται, για κάθε ένα από τα επτά εξεταζόμενα σενάρια, η κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων της τελικής γεωμετρίας του πλαισίου.



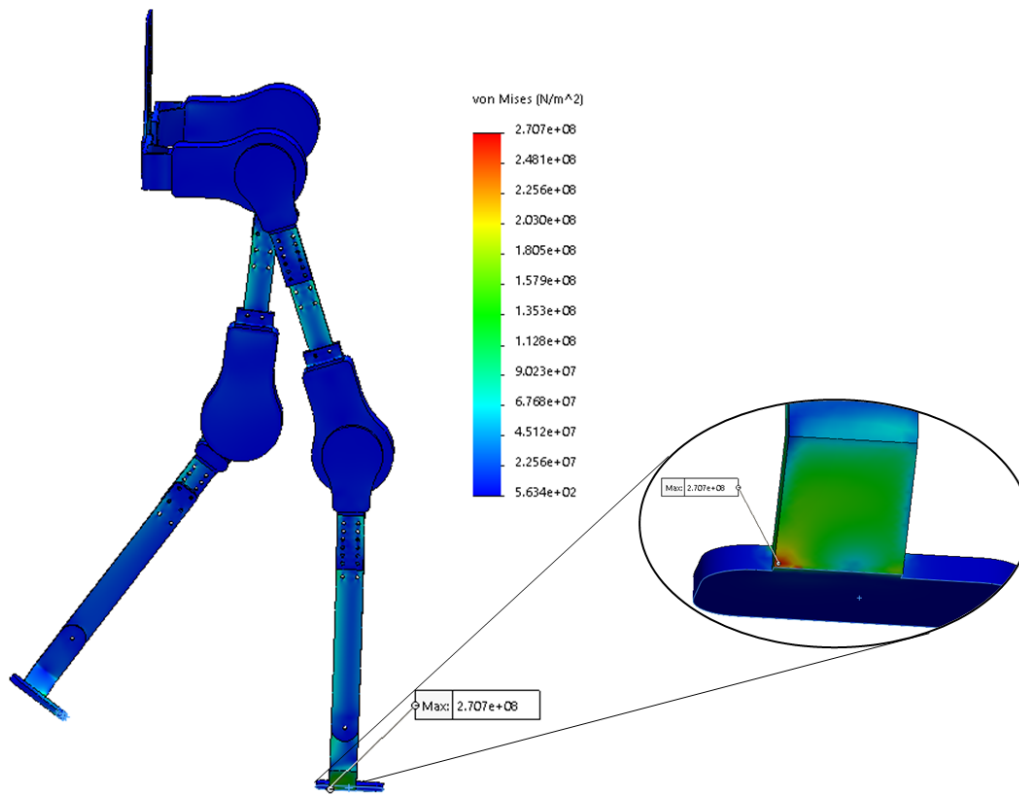
(α') Κατανομή των τάσεων και περιοχή μέγιστης συγκέντρωσης



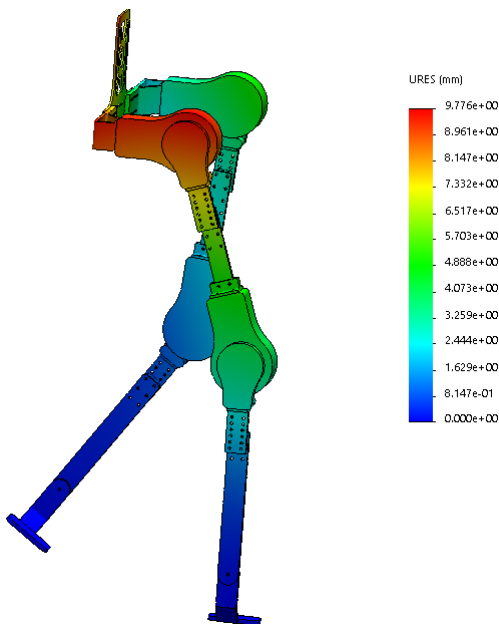
(β') Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων

(γ') Κατανομή παραμορφώσεων

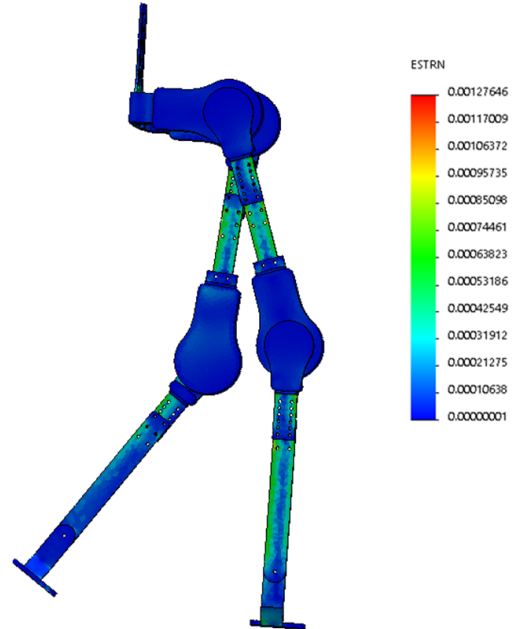
Σχήμα 4.6: Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά το πάτημα πτέρνας



(α') Κατανομή των τάσεων και περιοχή μέγιστης συγκέντρωσης

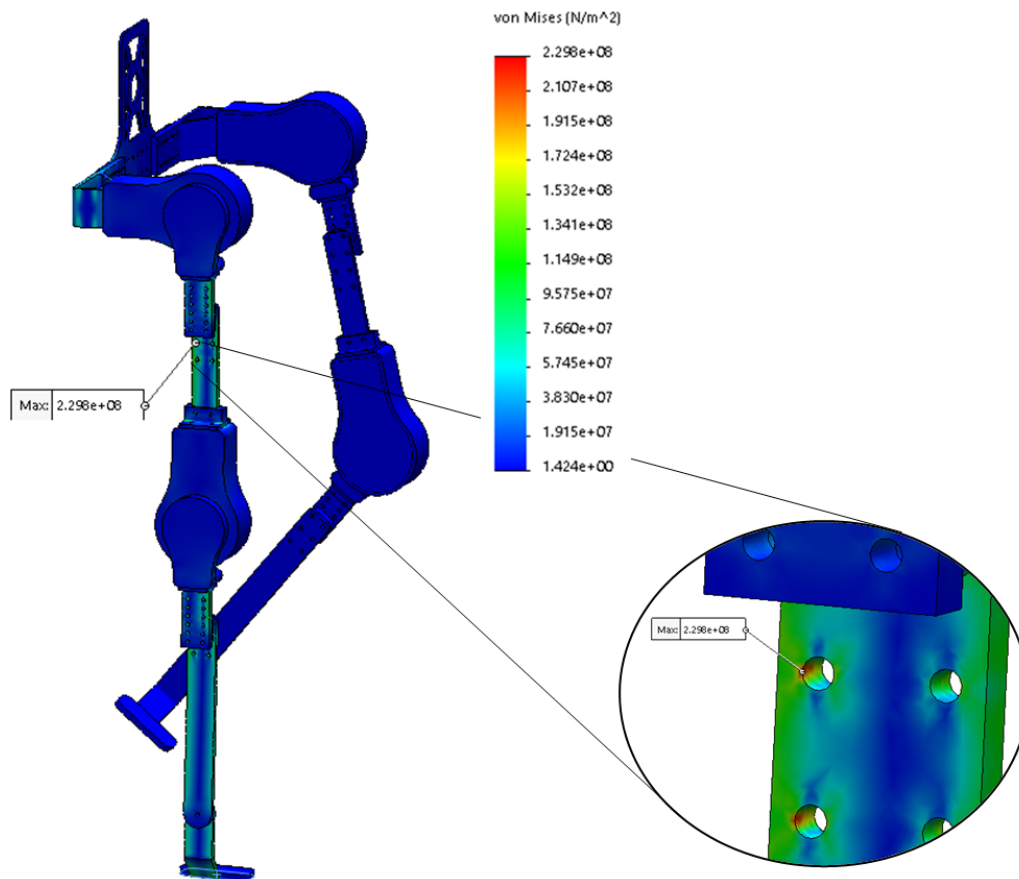


(β') Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων

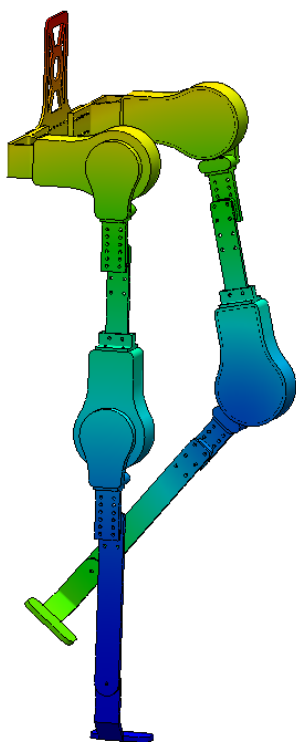


(γ') Κατανομή παραμορφώσεων

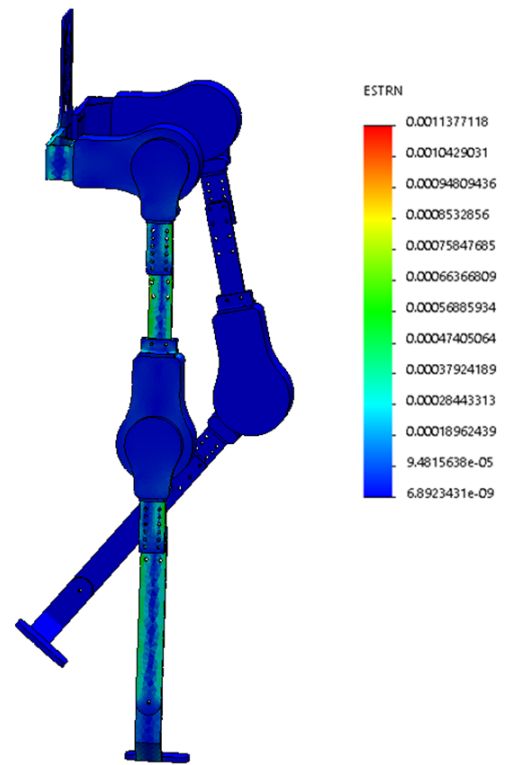
Σχήμα 4.7: Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά το πάτημα πέλματος



(α') Κατανομή των τάσεων και περιοχή μέγιστης συγκέντρωσης

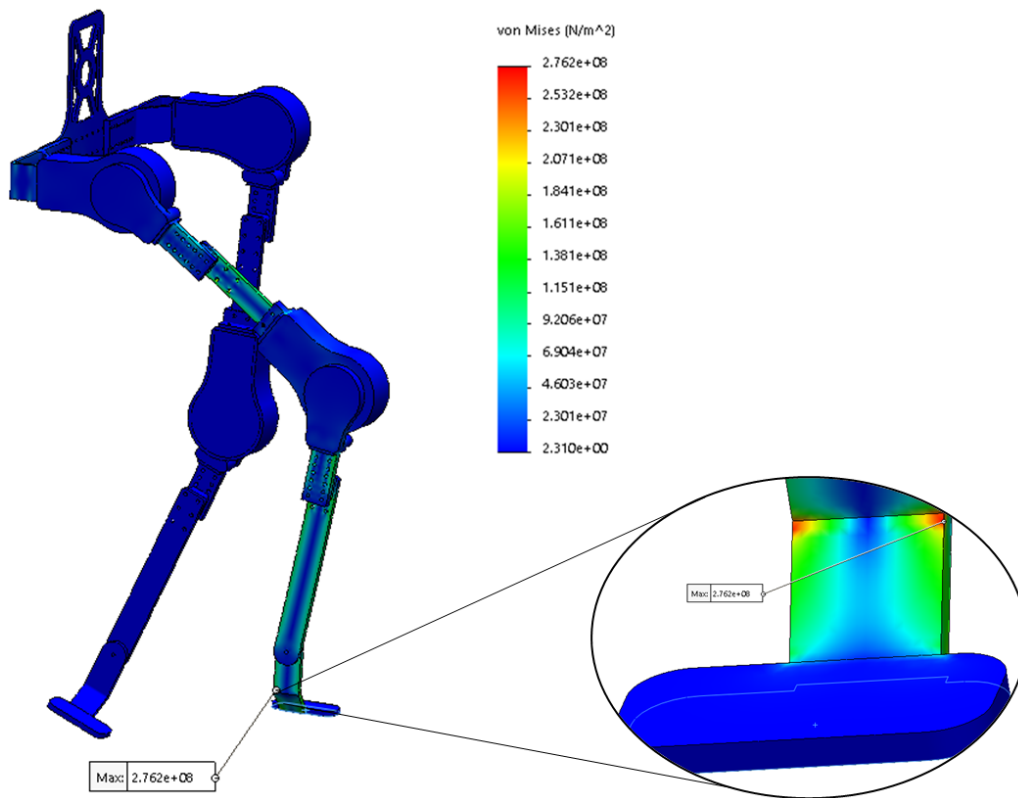


(β') Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων

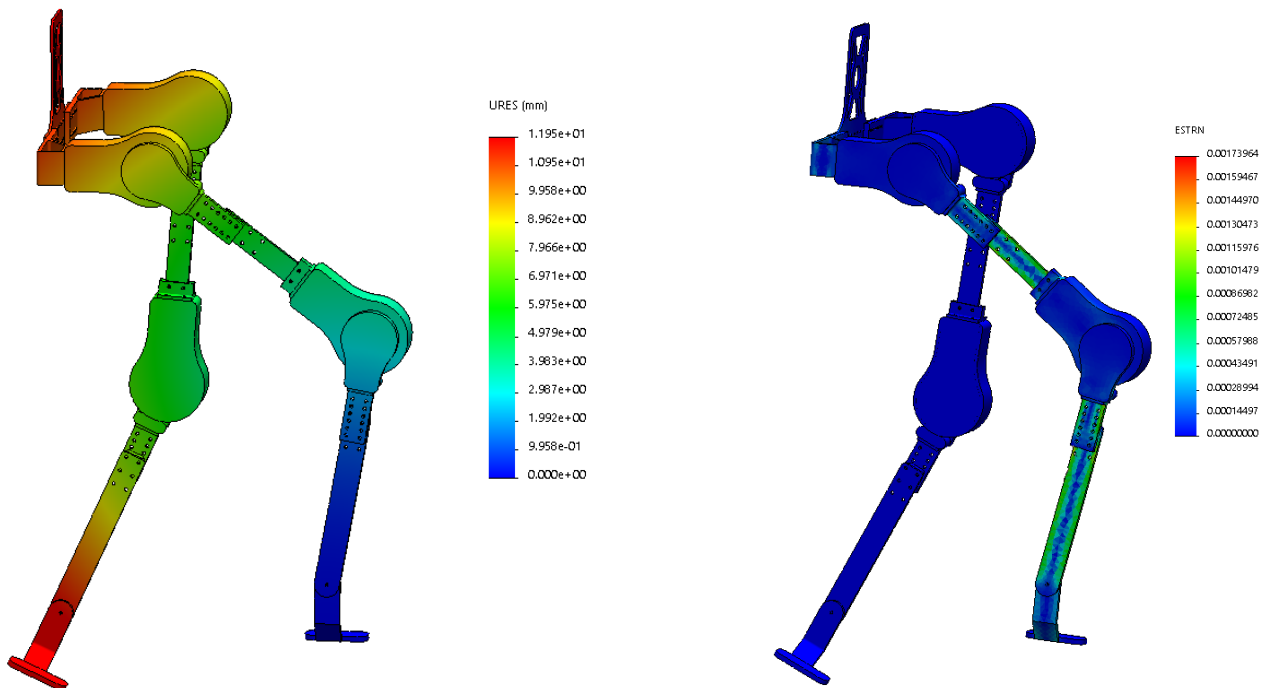


(γ') Κατανομή παραμορφώσεων

Σχήμα 4.8: Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά τη μονή στήριξη



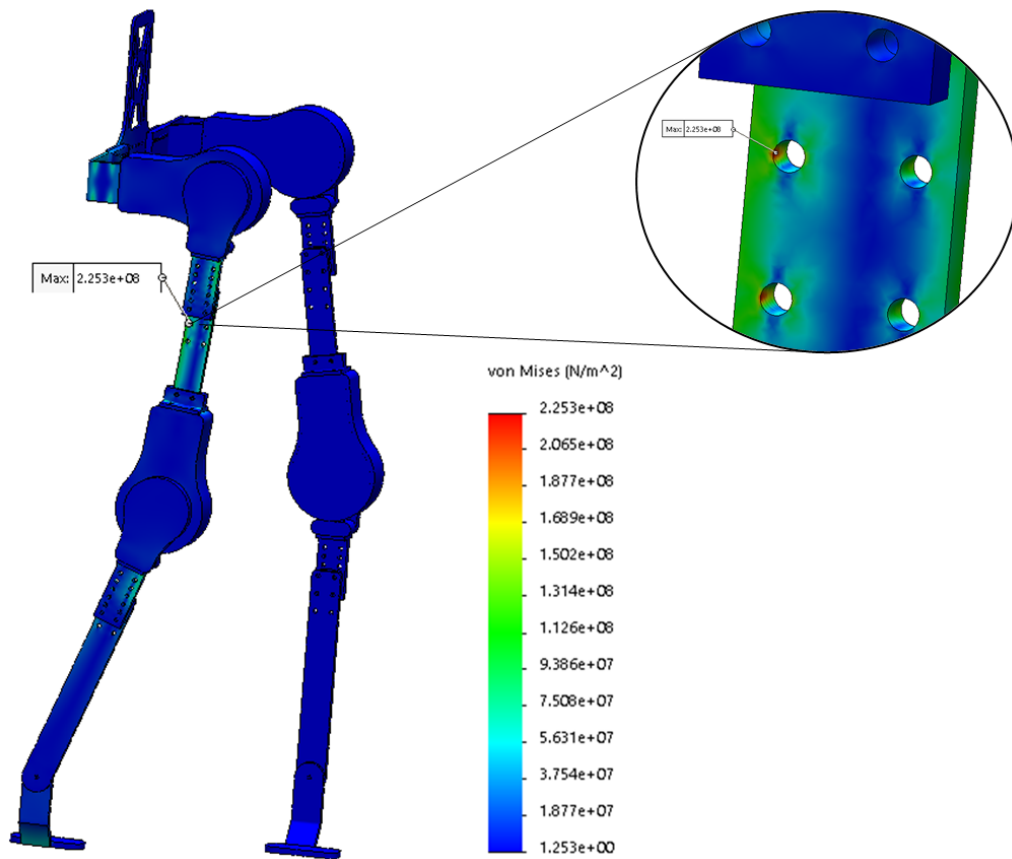
(α') Κατανομή των τάσεων και περιοχή μέγιστης συγκέντρωσης



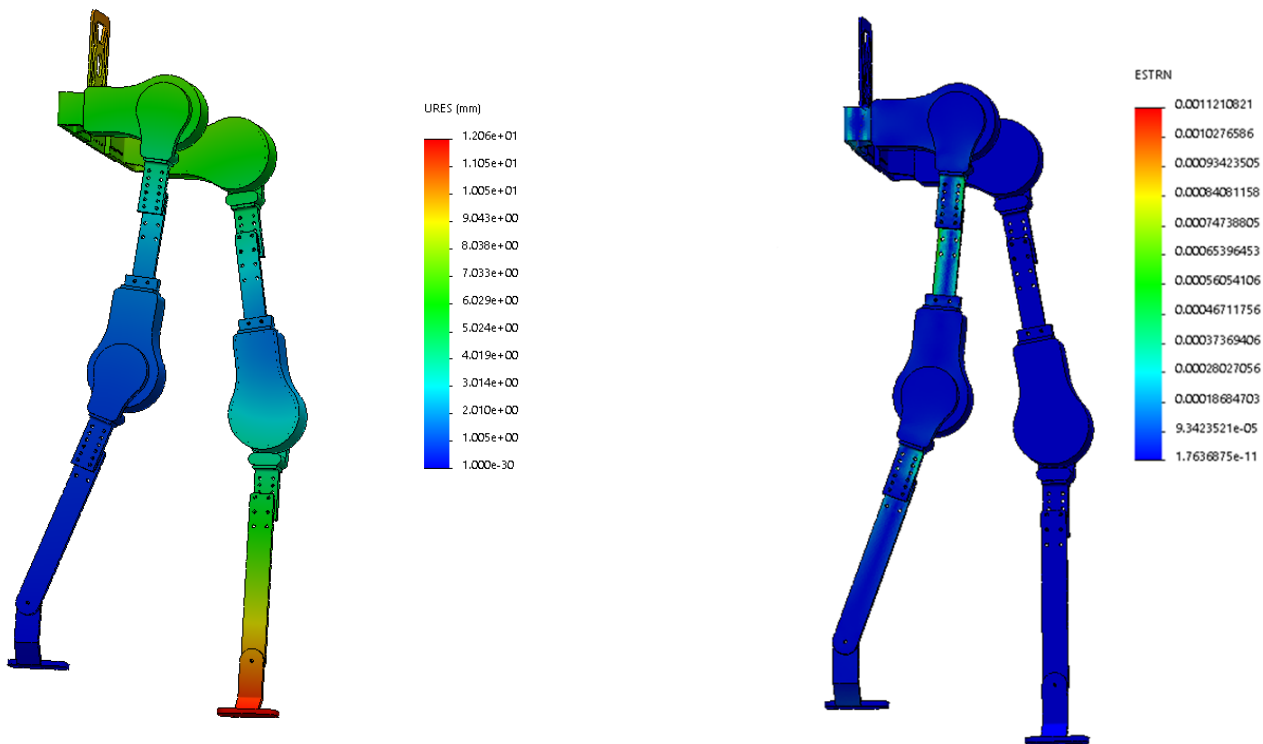
(β') Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων

(γ') Κατανομή παραμορφώσεων

Σχήμα 4.9: Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά την ανάβαση σκάλας



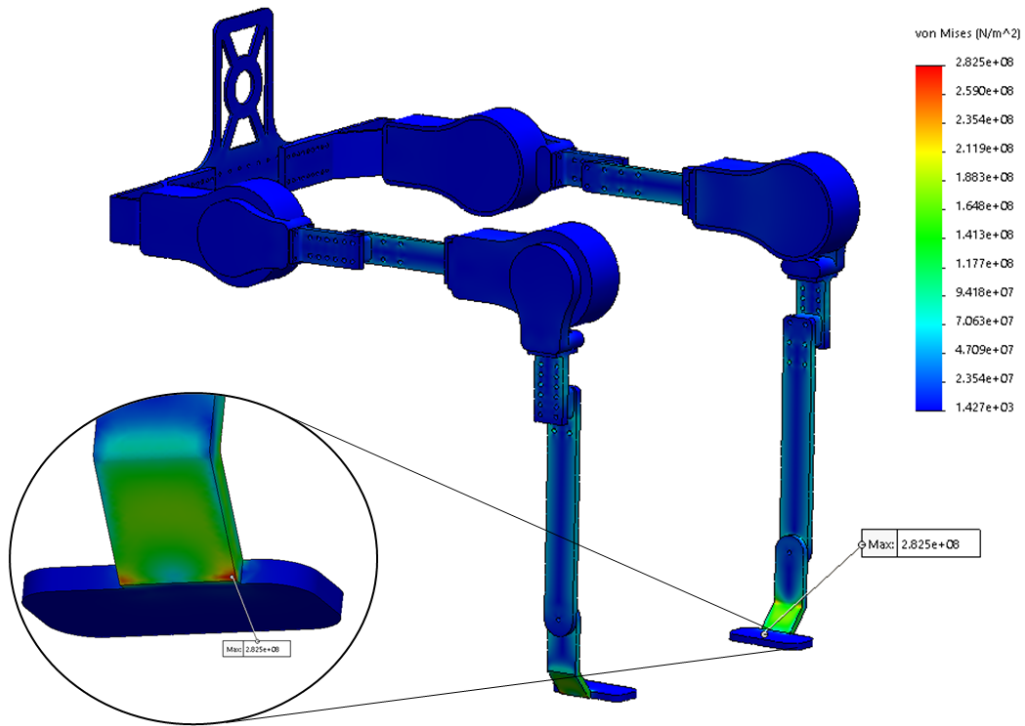
(α') Κατανομή των τάσεων και περιοχή μέγιστης συγκέντρωσης



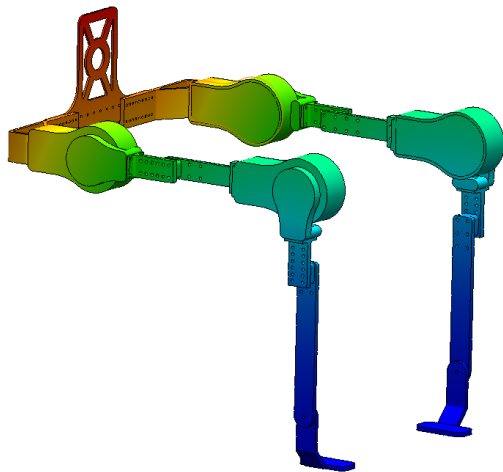
(β') Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων

(γ') Κατανομή παραμορφώσεων

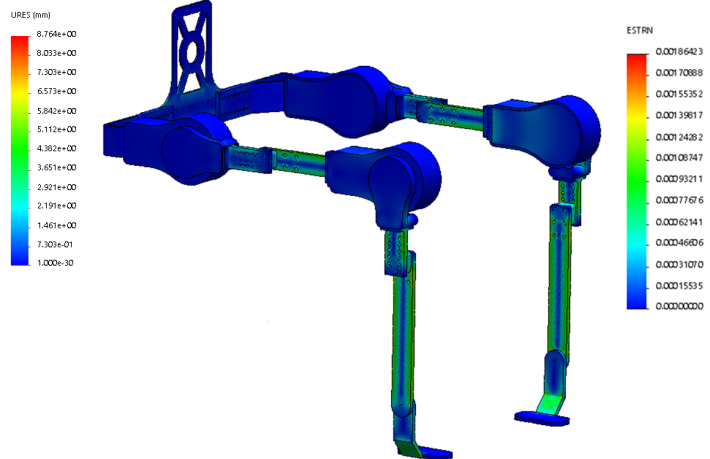
Σχήμα 4.10: Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά την κατάβαση σκάλας



(α') Κατανομή των τάσεων και περιοχή μέγιστης συγκέντρωσης

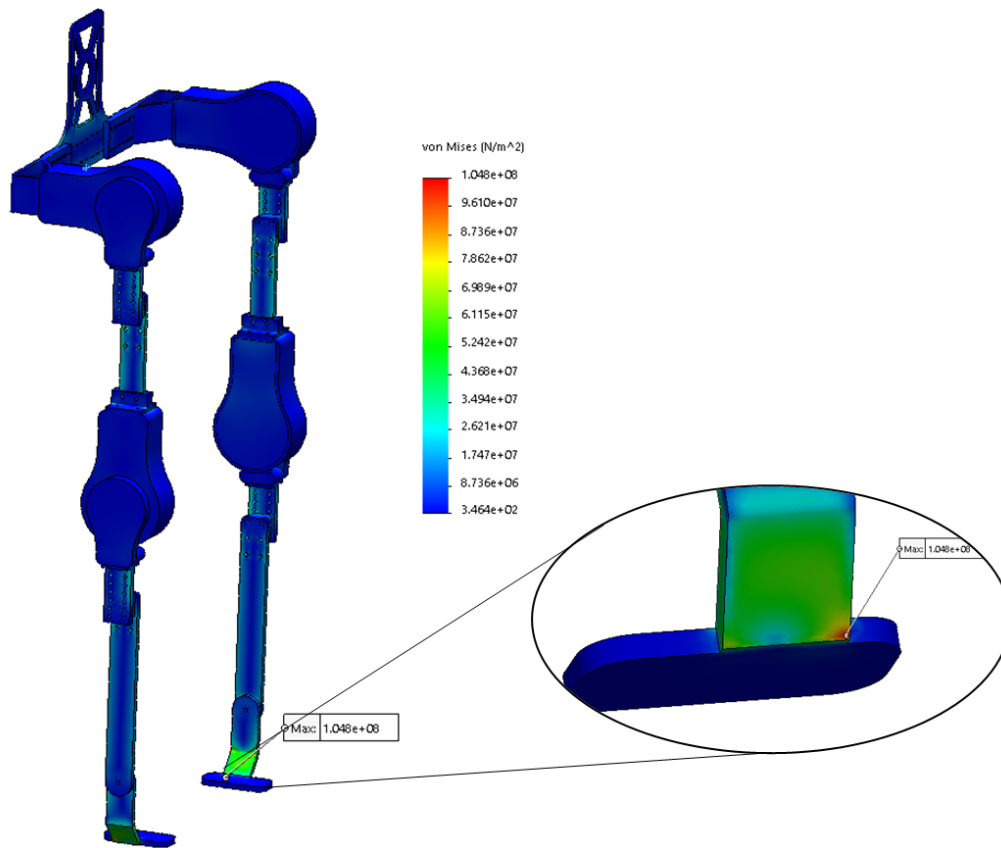


(β') Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων

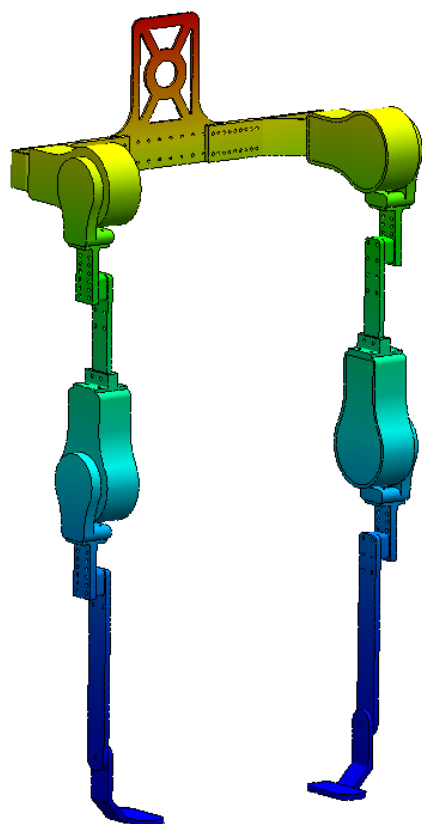


(γ') Κατανομή παραμορφώσεων

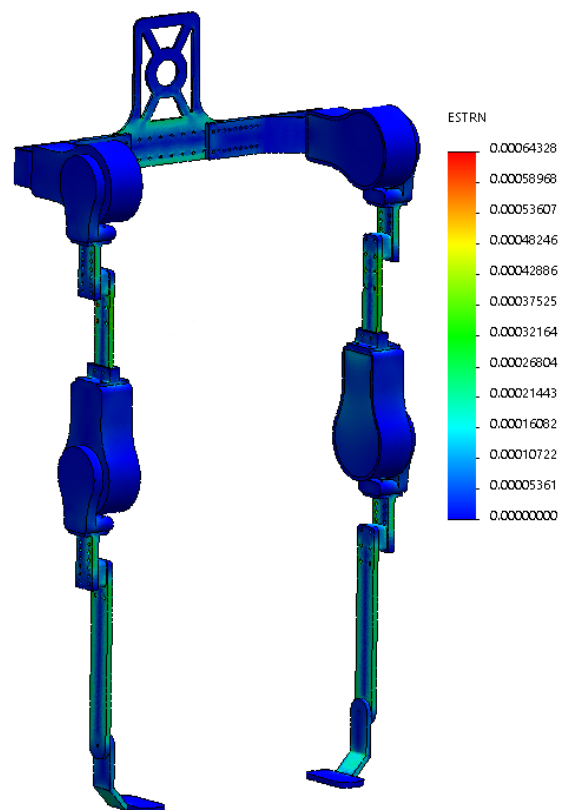
Σχήμα 4.11: Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά την καθήμενη στάση



(α') Κατανομή των τάσεων και περιοχή μέγιστης συγκέντρωσης



(β') Κατανομή συνολικών μετατοπίσεων



(γ') Κατανομή παραμορφώσεων

Σχήμα 4.12: Κατανομή των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων κατά την όρθια στάση

Σενάριο	Πάτημα πτέρνας	Πάτημα πέλματος	Μονή στήριξη	Ανάβαση σκάλας	Κατάβαση σκάλας	Καθήμενη στάση	Όρθια στάση
Μέγιστη τάση (MPa)	222,7	270,7	229,8	276,2	225,3	282,5	104,8
Μέγιστη παραμόρφωση	0,000948	0,00127	0,00113	0,00174	0,00112	0,00186	0,000643
Μέγιστη μετατόπιση (mm)	12,3	9,78	12,9	12,0	12,1	8,76	8,58

Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων και για τα επτά σενάρια

Ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει σε συγκεντρωτική μορφή τα αποτελέσματα και των επτά σεναρίων. Σύμφωνα με αυτόν η μέγιστη τάση που παρατηρείται ισούται με 283 MPa και προκύπτει κατά την εκτέλεση του έκτου σεναρίου, δηλαδή την στιγμή που ο πιλότος ετοιμάζεται να ακουμπήσει στο κάθισμα. Επιπλέον, παρατηρώντας το Σχήμα 4.11α' φαίνεται ότι η περιοχή της μέγιστης συγκέντρωσης τάσεων κατά το έκτο σενάριο βρίσκεται στη βάση του χαλύβδινου πέλματος του εξωσκελετού. Η τιμή αυτή είναι αποδεκτή, καθώς είναι αρκετά χαμηλότερη του ορίου διαρροής του υλικού που ισούται με 310 MPa (Πίνακας 4.1). Παρατηρώντας επίσης τον Πίνακα 4.3 και τα Σχήματα 4.6 - 4.12 φαίνεται ότι σε κανένα σενάριο η μέγιστη (ισοδύναμη) τάση δεν υπερβαίνει το όριο διαρροής του εκάστοτε υλικού, πράγμα που σημαίνει ότι ο σχεδιασμός αυτός είναι αποτελεσματικός και άρα η κατασκευή του πλαισίου σύμφωνα με αυτόν κρίνεται ασφαλής. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των μετατοπίσεων και των επτά σεναρίων που κυμαίνονται μεταξύ 8,58 - 12,9 mm, καθώς και από τις τιμές των παραμορφώσεων, οι οποίες σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνούν το 0,2%.

4.10 Σύνοψη

Εστιάζοντας στο κομμάτι της δομικής ακεραιότητας του εξωσκελετού που συζητήθηκε στις προηγούμενες ενότητες, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η ανάλυση αντοχής του πλαισίου της συσκευής κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά, ορίστηκαν τα κυριότερα από τα στοιχεία που απαρτίζουν τη μέθοδο και στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την εφαρμογή της. Ανάμεσα τους περιλαμβάνονται η απλοποίηση της γεωμετρίας, η επιλογή των υλικών των επιμέρους εξαρτημάτων, ο καθορισμός των σεναρίων προσομοίωσης που αντιστοιχούν ως επί το πλείστον σε ακραίες περιπτώσεις φόρτισης που μπορεί να προκύψουν κατά τη χρήση, καθώς και η διακριτοποίηση του συστήματος σύμφωνα με την μέθοδο. Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της τελικής γεωμετρίας του πλαισίου, όπως αυτή προέκυψε από την επαναληπτική εφαρμογή της μεθόδου σε κάθε ένα από τα επτά σενάρια που εξετάστηκαν, υποδεικνύοντας μάλιστα και την καταλληλότητα κατασκευής του.

Κεφάλαιο 5

Βαθιά Μάθηση

5.1 Εισαγωγή

Η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) είναι ο κλάδος της επιστήμης των υπολογιστών που υπάγεται στο ευρύτερο πλαίσιο της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence) και στηρίζεται στην επεξεργασία μεγάλου πλήθους δεδομένων για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων, χωρίς να απαιτείται εκτενής ανθρώπινη παρέμβαση. Αν και μετράει πάνω από είκοσι δεκαετίες παρουσίας στο χώρο της επιστήμης των υπολογιστών, μόλις τα τελευταία χρόνια γνώρισε της ευρείας αποδοχής από την επιστημονική και όχι μόνο κοινότητα. Ο κύριος λόγος έγκειται στη μέχρι πρότινος αδυναμία των υπολογιστικών συστημάτων να επεξεργαστούν, αλλά και να παράγουν, τον μεγάλο όγκο των δεδομένων πάνω στον οποίο βασίζεται η λειτουργία των συστημάτων μηχανικής μάθησης.

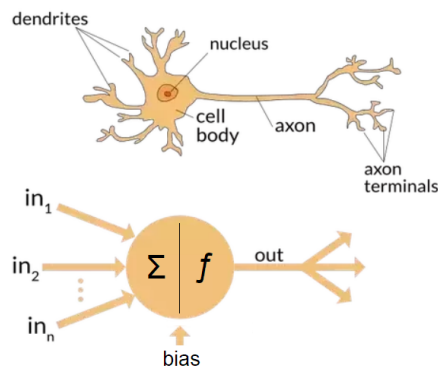
Οι τρεις κύριες κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης είναι η μάθηση με επίβλεψη (supervised learning), η μάθηση χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning) και η ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning). Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία αναφέρεται ότι ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται στην αναγνώριση συγκεκριμένων προτύπων πάνω στην δοθείσα βάση δεδομένων (dataset) προκειμένου να είναι σε θέση να αναγνωρίσει αντίστοιχα πρότυπα σε ένα καινούριο όγκο δεδομένων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αναγνώριση των διαβάσεων και των φαναριών σε εικόνες που μπορεί να λαμβάνονται από την κάμερα ενός αυτοκινήτου. Αντίθετα, η μάθηση χωρίς επίβλεψη πραγματοποιείται για την ανακάλυψη δομών και προτύπων στα δεδομένα που δεν είναι (και δεν θα μπορούσαν να είναι) εκ των προτέρων γνωστά. Μια ιδιαίτερα χρήσιμη εφαρμογή της στον χώρο της υγείας είναι η επεξεργασία των δεδομένων των ασθενών ενός νοσοκομείου προκειμένου να εντοπιστούν οι παράγοντες εκείνοι που ευθύνονται για την εκδήλωση συγκεκριμένων ασθενειών. Η ενισχυτική μάθηση βασίζεται στην αλληλεπίδραση ενός πράκτορα με το περιβάλλον του, ενώ η εκπαίδευση του αλγορίθμου πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος.

Ένας εξίσου σημαντικός τομέας της μηχανικής μάθησης αποτελεί και η ενασχόληση με τα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία διαμορφώνουν τον κλάδο της «βαθιάς μάθησης» (deep learning). Ωστόσο, διευκρινίζεται ότι η βαθιά μάθηση δεν αποτελεί κάποια μεμονωμένη κατηγορία, όπως αυτές που αναφέρθηκαν πρωτίτερα, αλλά θα μπορούσε να πει κανείς ότι αποτελεί κάποιου είδους τεχνική η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων που ανήκουν και στις τρεις (και όχι μόνο) κατηγορίες. Ένα από τα κυριότερα σημεία υπεροχής της βαθιάς μάθησης έναντι άλλων τεχνικών που εφαρμόζονται στην μηχανική μάθηση είναι ο (ακόμα μεγαλύτερος) περιορισμός της ανθρώπινης παρέμβασης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της αναγνώρισης ενός αντικειμένου σε μία φωτογραφία, ένας συνηθισμένος αλγόριθμος μηχανικής μάθησης θα απαιτούσε από τον προγραμματιστή την εξαγωγή ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών προτού αρχίσει η διαδικασία της εκπαίδευσης. Αντίθετα, αν για το ίδιο πρόβλημα χρησιμοποιούνταν βαθιά μάθηση το στάδιο της εξαγωγής των χαρακτηριστικών θα παραλείπονταν.

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στην βαθιά μηχανική μάθηση και εισάγει έννοιες που σχετίζονται με τα δομικά χαρακτηριστικά που την απαρτίζουν, τον τρόπο εκπαίδευσης και τον τρόπο λειτουργίας των συγκεκριμένων αλγορίθμων, καθώς και με ορισμένες παραμέτρους που την επηρεάζουν.

5.2 Νευρώνες

Το βασικό στοιχείο στο οποίο στηρίζεται όλη η δομή της Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning) ονομάζεται «νευρώνας», ενώ η σύνδεση του με άλλους γειτονικούς του σχηματίζει το λεγόμενο «νευρωνικό δίκτυο». Η ονομασία αυτή προέκυψε λόγω της ομοιότητας της λειτουργίας τους με αυτήν των νευρικών κυττάρων (Σχήμα 5.1). Συγκεκριμένα, όπως το σώμα του νευρικού κυττάρου (cell body) συνθέτει τους διαφορετικούς ηλεκτρικούς παλμούς που δέχεται μέσω των δενδριτών του (dendrites) σε έναν ενιαίο παλμό τον οποίο και μεταφέρει κατά μήκος του νευράξονά του (axon) στο επόμενο νευρικό κύτταρο, έτσι και ο τεχνητός νευρώνας συνδυάζει πολλές διαφορετικές τιμές που δέχεται ως είσοδο παράγοντας μία τιμή ως έξοδο, την οποία μπορεί να την μεταβιβάσει στους νευρώνες που τον διαδέχονται.



Σχήμα 5.1: Σχηματική απεικόνιση ενός βιολογικού (επάνω) και ενός τεχνητού (κάτω) νευρώνα [30]

Ο πιο συνηθισμένος τύπος τεχνητού νευρώνα (Σχήμα 5.2) είναι αυτός του οποίου η έξοδος προκύπτει από τον γραμμικό συνδυασμό των τιμών που δέχεται ως είσοδο, συμπεριλαμβανομένης και μίας επιπρόσθετης σταθεράς (bias), έπειτα από την εφαρμογή μίας συνάρτησης f , ακολουθώντας την παρακάτω εξίσωση [31]:

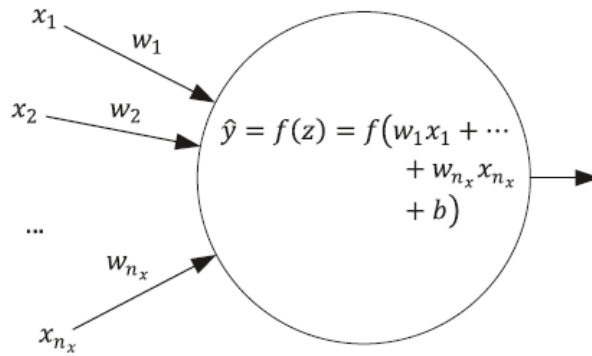
$$y = f(z) = f(w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_{n_x}x_{n_x} + b) \quad (5.1)$$

Στην εξίσωση αυτή ως:

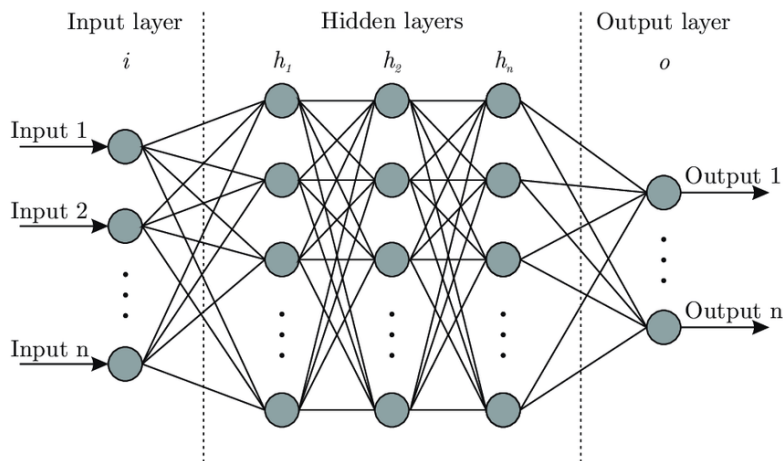
- $x_i \in \mathbb{R}$, όπου $i = 1, 2, \dots, n_x$ και $i \in \mathbb{N}$, εκφράζονται οι τιμές εισόδου,
- $w_i \in \mathbb{N}$ (όπου $i = 1, 2, \dots, n_x$), εκφράζονται οι παράμετροι, ή όπως αλλιώς ονομάζονται τα «βάρη» (weights), του νευρωνικού δικτύου
- $b \in \mathbb{N}$, εκφράζεται η επιπρόσθετη σταθερά
- z , εκφράζεται ο γραμμικός συνδυασμός των τιμών εισόδου
- f , εκφράζεται η εφαρμοζόμενη στον γραμμικό συνδυασμό συνάρτηση ή όπως αλλιώς ονομάζεται συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function)
- y , εκφράζεται η τιμή εξόδου του νευρώνα

5.3 Νευρωνικά Δίκτυα

Ένα σύνολο νευρώνων οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους αποτελούν ένα νευρωνικό δίκτυο. Επίσης αναφέρεται ότι η σύνδεση των νευρώνων μεταξύ τους δεν γίνεται κατά τρόπο τυχαίο, αλλά καθορίζεται από τον τρόπο διάταξης τους σε στρώματα (layers). Συγκεκριμένα, σε ένα νευρωνικό δίκτυο η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται μέσω του αρχικού στρώματος που ονομάζεται και στρώμα εισόδου (input layer), ενώ η εξαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω του τελικού στρώματος (output layer), εφόσον έχει προηγηθεί η επεξεργασία των δεδομένων από όλα τα ενδιάμεσα στρώματα του δικτύου, τα οποία χαρακτηρίζονται και ως «κρυφά»



Σχήμα 5.2: Σχηματική απεικόνιση ενός βιολογικού (επάνω) και ενός τεχνητού (κάτω) νευρώνα [31]



Σχήμα 5.3: Σχηματική αναπαράσταση νευρωνικού δικτύου [32]

στρώματα (hidden layers). Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται ένα τυπικό παράδειγμα νευρωνικού δικτύου το οποίο χαρακτηρίζεται από την σύνδεση των νευρώνων κάθε στρώματος με όλους τους νευρώνες του προηγούμενου στρώματος.

Η διαδικασία αυτή κατά την οποία τα δεδομένα εισόδου διασχίζουν όλα τα στρώματα με στόχο την παραγωγή της τιμής εξόδου ονομάζεται προς τα εμπρός διάδοση (forward propagation). Ο υπολογισμός των τιμών εξόδου για κάθε στρώμα εκφράζεται μέσω της εξίσωσης:

$$Y^{[l]} = g^{[l]}(Z^{[l]}) = g^{[l]}(W^{[l]}Z^{[l-1]} + b^{[l]}) \quad (5.2)$$

όπου ως:

- $W^{[l]}$ ορίζεται ένας τανυστής διαστάσεων $n_l \times n_{l-1}$, όπου το l ισούται με τον αριθμό των νευρώνων του στρώματος που μελετάται, και περιλαμβάνει όλα τα βάρη μεταξύ δύο διαδοχικών στρωμάτων
- $b^{[l]}$ ορίζεται ένας τανυστής διαστάσεων $n_l \times 1$ και αποτελείται από τις σταθερές που προστίθενται στους νευρώνες ενός στρώματος
- $Z^{[l]}$ ορίζεται ένας τανυστής διαστάσεων $n_l \times 1$ ο οποίος εκφράζει τον γραμμικό συνδυασμό των βαρών, των τιμών και των σταθερών όλων των νευρώνων ενός στρώματος
- $Z^{[l-1]}$ ορίζεται ένας τανυστής διαστάσεων $n_{l-1} \times 1$ και εκφράζει τον γραμμικό συνδυασμό του προηγούμενου στρώματος ο οποίος και αποτελεί την είσοδο του επόμενου στρώματος
- $g^{[l]}$ ορίζεται η συνάρτηση ενεργοποίησης που εφαρμόζεται σε κάθε στρώμα και θεωρείται ίδια για κάθε νευρώνα που ανήκει στο στρώμα αυτό
- $Y^{[l]}$ ορίζεται ένας τανυστής διαστάσεων $n_l \times 1$ και περιλαμβάνει όλες τις τιμές που εξέρχονται από ένα στρώμα

5.4 Εκπαίδευση Νευρωνικού Δικτύου

Με τον όρο εκπαίδευση (training) ενός νευρωνικού δικτύου νοείται η προσπάθεια προσδιορισμού των βαρών $w_i \in \mathbb{N}$ και των σταθερών $b \in \mathbb{N}$ κατά τέτοιον τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση μίας καθορισμένης συνάρτησης, η οποία είναι γνωστή ως συνάρτηση κόστους και συμβολίζεται ως $J(\mathbf{w})$, όπου \mathbf{w} είναι ένα διάνυσμα βαρών.

Ο υπολογισμός του ελαχίστου για την συνάρτηση κόστους πραγματοποιείται μέσω αριθμητικών μεθόδων, καθώς η πολυπλοκότητα που παρουσιάζουν τα νευρωνικά δίκτυα και κατ' επέκταση ο ιδιαίτερα αυξημένος αριθμός των βαρών που πρέπει να προσδιοριστούν, δεν επιτρέπει την χρήση αναλυτικών μεθόδων επίλυσης. Ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τον σκοπό αυτόν στηρίζεται στον προσδιορισμό της κατεύθυνσης προς την οποία η κλίση της συνάρτησης (κόστους) μειώνεται (gradient descent algorithm). Ουσιαστικά μέσω του αλγόριθμου αυτού αναζητούνται εκείνα τα βάρη που θα αντιστοιχούν στην μικρότερη τιμή της συνάρτησης κόστους. Τα βήματα του αλγορίθμου περιλαμβάνουν την τυχαία επιλογή μιας αρχικής τιμής w_0 και τον μετέπειτα υπολογισμό όλων των επόμενων τιμών βάση της εξίσωσης [31]:

$$w_{n+1} = w_n - \alpha \nabla J(w_n) \quad (5.3)$$

όπου ως:

- w_{n+1} ορίζεται το διάνυσμα των νέων βαρών που προκύπτουν έπειτα από κάθε επανάληψη
- w_n ορίζεται το διάνυσμα με τις προηγούμενες τιμές των βαρών
- α ορίζεται ο ρυθμός μάθησης (learning rate), ο οποίος υποδηλώνει το μέγεθος της μεταβολής των καινούριων τιμών του w σε σχέση με τις παλιές
- $\nabla J(w_n)$ ορίζεται η κλίση της συνάρτησης κόστους στο σημείο n

Εστιάζοντας στον ρυθμό μάθησης αναφέρεται ότι όσο αυξάνει το μέγεθος του τόσο μεγαλώνουν και οι αντίστοιχες μεταβολές των βαρών, ενώ για μικρότερες τιμές του παρατηρείται η ανάλογη μείωση των μεταβολών στα βάρη. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην παράμετρο αυτή, καθώς μία πολύ μεγάλη τιμή της μπορεί να προκαλέσει την αδυναμία εύρεσης του ελαχίστου, ενώ μία πολύ μικρή τιμή μπορεί να μειώσει δραματικά τον ρυθμό προσέγγισης του ελαχίστου και να οδηγήσει σε αδικαιολόγητη αύξηση του αριθμού των απαιτούμενων βημάτων έως ότου επιτευχθεί η σύγκλιση.

Ως κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου μπορεί να οριστεί, είτε ένας μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, είτε μία τιμή σφάλματος $|J(w_{n+1}) - J(w_n)| < \epsilon$, η οποία δηλώνει την μέγιστη επιτρεπτή διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών της συνάρτησης κόστους. Αναφέρεται ότι η δεύτερη μέθοδος έχει υψηλό υπολογιστικό κόστος, λόγω του ότι ο υπολογισμός του σφάλματος πραγματοποιείται σε κάθε επανάληψη. Στην πράξη αυτό που προτιμάται είναι ο καθορισμός ενός μέγιστου αριθμού επαναλήψεων (για παράδειγμα 10.000) μετά το πέρας του οποίου πραγματοποιείται ο σχεδιασμός της γραφικής παράστασης της συνάρτησης κόστους ως συνάρτηση του αριθμού των επαναλήψεων προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει σύγκλιση σε κάποια ελάχιστη τιμή.

Η εκπαίδευση, επομένως, ενός νευρωνικού δικτύου συνοψίζεται σε τρία βήματα τα οποία εκτελούνται επαναληπτικά. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τον υπολογισμό των τιμών εξόδου του δικτύου μέσω της προς τα εμπρός διάδοσης (forward propagation). Έπειτα ακολουθεί ο υπολογισμός της απόκλισης μεταξύ της εξόδου που παράγει το νευρωνικό δίκτυο και της πραγματικής τιμής (ground truth), όπως αυτή παρέχεται από τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση, και τέλος ο υπολογισμός των νέων βαρών όπως αυτά προκύπτουν από τον αλγόριθμο του gradient descent. Σημειώνεται ότι η ανανέωση των βαρών πραγματοποιείται κατά φορά αντίθετη από αυτήν που επεξεργάζονται τα δεδομένα μέσα στο δίκτυο, δηλαδή τα τελευταία σε σειρά στρώματα είναι τα πρώτα που υφίστανται μεταβολή στις τιμές των βαρών τους. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως backpropagation ή οπισθοδιάδοση.

5.5 Συναρτήσεις Ενεργοποίησης

Η ενσωμάτωση των συναρτήσεων ενεργοποίησης (activation functions) είναι από τα πιο σημαντικά στοιχεία για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου. Η σπουδαιότητα αυτή έγκειται στην αναγκαιότητα εισαγωγής μη γραμμικότητας στο δίκτυο, η οποία και επιτυγχάνεται μέσω των συναρτήσεων αυτών. Εάν αυτό δεν συνέβαινε, θα ήταν αδύνατη η εξασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων για την πλειονότητα των περιπτώσεων, όπου τα δεδομένα στα οποία βασίζεται η μάθηση δεν μπορούν να προσεγγιστούν γραμμικά. Επιπλέον, προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα της μάθησης, χρειάζεται να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή της συνάρτησης ενεργοποίησης. Το πιο κοινό πρόβλημα που μπορεί να προκύψει εξαιτίας μίας λαθεμένης επιλογής είναι η επιβράδυνση της μάθησης του νευρωνικού δικτύου (vanishing gradient problem). Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι οι μεταβολές των βαρών είναι σχεδόν ανεπαίσθητες με αποτέλεσμα η σύγκλιση των τιμών τους στις κατά το δυνατόν βέλτιστες να συμβαίνει με πολύ αργό ρυθμό, ενώ στην πλειονότητα των περιπτώσεων καθίσταται μη εφικτή. Ειδικά στα αρχικά στρώματα το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πιο έντονα σε σχέση με τα τελικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη πολλαπλών παραγώγων κατά τον υπολογισμό των καινούριων βαρών και στο γεγονός ότι ο αριθμός αυτός ολοένα και αυξάνεται καθώς ο αλγόριθμος ανάθεσης των καινούριων τιμών στα βάρη κινείται προς τα αρχικά στρώματα. Όσο πιο μικρές είναι οι τιμές των παραγώγων αυτών τόσο πιο μικρή είναι και η μεταβολή των αντίστοιχων βαρών που επηρεάζουν.

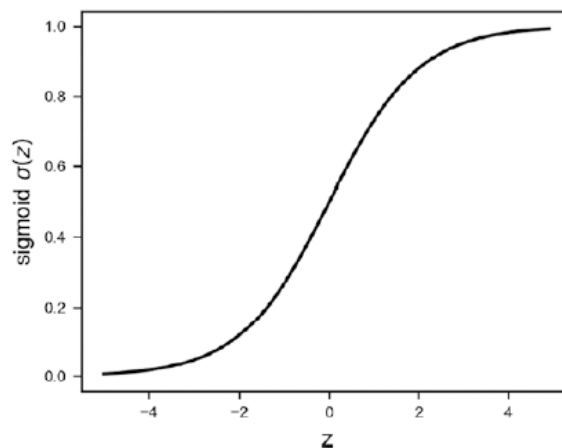
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πιο γνωστοί τύποι συναρτήσεων ενεργοποίησης, καθώς και τα βασικά τους χαρακτηριστικά.

5.5.1 Sigmoid

Η ακριβής μαθηματική έκφραση της συνάρτησης δίνεται από τον τύπο:

$$f(z) = \sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (5.4)$$

Όπως φαίνεται και από την γραφική της παράσταση (Σχήμα 5.4), η συνάρτηση αυτή δίνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Για τον λόγο αυτό είναι ιδανική για εφαρμογές όπου οι έξοδοι που προκύπτουν αντιπροσωπεύουν πιθανότητες.



Σχήμα 5.4: Η σιγμοειδής συνάρτηση ενεργοποίησης (sigmoid activation function) [31]

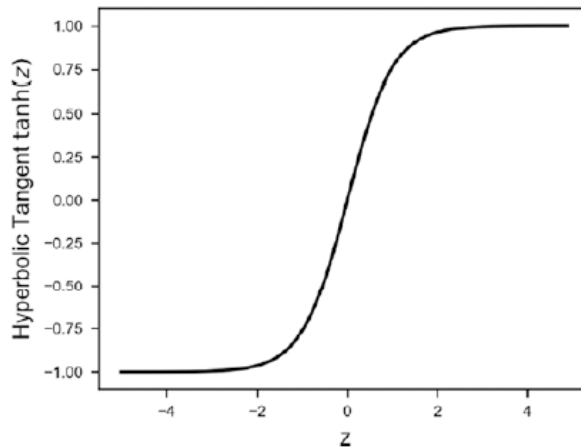
Ωστόσο, παρατηρείται ότι για τιμές μικρότερες του -4 ή μεγαλύτερες του 4 η συνάρτηση εμφανίζει μια σχεδόν επίπεδη συμπεριφορά, η οποία είναι υπεύθυνη για το πρόβλημα του vanishing gradient που αναφέρθηκε προηγουμένως. Επομένως, δεν ενδείκνυται για χρήση στα εσωτερικά στρώματα του δικτύου. Επιπλέον, όλες οι τιμές που δίνει ως έξοδο είναι θετικές, κάτι το οποίο δεν είναι πάντοτε επιθυμητό.

5.5.2 Tanh (Hyperbolic Tangent Activation)

Πρόκειται επίσης για μία σιγμοειδή συνάρτηση, η οποία ωστόσο είναι συμμετρική ως προς το την αρχή των αξόνων, ενώ οι τιμές τις κυμαίνονται μεταξύ -1 και 1 (Σχήμα 5.5). Επιπλέον, η μαθηματική της περιγραφή γίνεται μέσω της σχέσης:

$$f(z) = \tanh(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}} \quad (5.5)$$

Ωστόσο, αναφέρεται ότι και ο συγκεκριμένος τύπος συνάρτησης μπορεί να οδηγήσει στο πρόβλημα του vanishing gradient.



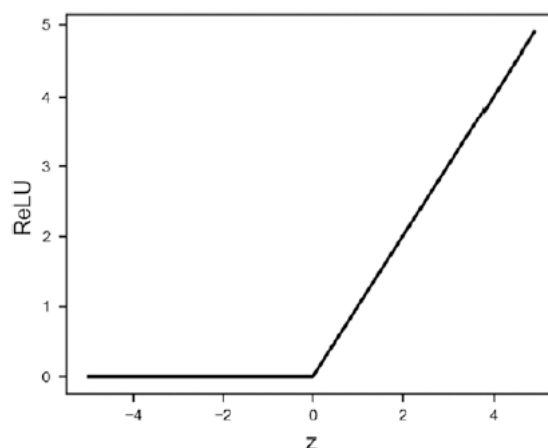
Σχήμα 5.5: Η υπερβολικά εφαιπτόμενη συνάρτηση ενεργοποίησης (Tanh – Hyperbolic tangent activation function) [31]

5.5.3 ReLU (Rectified Linear Unit) Activation

Η ReLU είναι η πλέον διαδεδομένη και χρησιμοποιείται κατά κόρον κατά τον σχεδιασμό των νευρωνικών δικτύων. Η μαθηματική της έκφραση δίνεται μέσω της σχέσης:

$$f(z) = \max(0, z) \quad (5.6)$$

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.6 που ακολουθεί, πρόκειται για μία μη γραμμική συνάρτηση, η οποία για τιμές μικρότερες του μηδενός δίνει ως έξοδο την τιμή μηδέν. Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς χάρη σε αυτήν υπερνικείται το πρόβλημα του vanishing gradient.



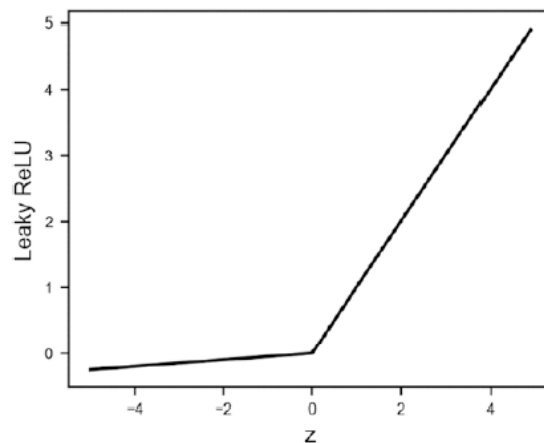
Σχήμα 5.6: Η συνάρτηση ReLU (Rectified Linear Unit activation function) [31]

5.5.4 Leaky ReLU

Μία παραλλαγή της προηγούμενης συνάρτησης είναι η συνάρτηση Leaky ReLU, της οποίας ο μαθηματικός τύπος είναι ο εξής:

$$f(z) = \begin{cases} az, & z < 0 \\ z, & z \geq 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

Τόσο από την μαθηματική περιγραφή όσο και από το Σχήμα 5.7, φαίνεται ότι η μόνη διαφορά της με την ReLU παρατηρείται για τις αρνητικές τιμές του πεδίου ορισμού της, οι οποίες πλέον δεν έχουν ως έξοδο την τιμή 0. Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τις περιπτώσεις νευρώνων των οποίων ο γραμμικός συνδυασμός των βαρών παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα αρνητικός, καθώς η εφαρμογή της απλής ReLU θα σήμαινε μηδενισμό των τιμών εξόδου των συγκεκριμένων νευρώνων, με αποτέλεσμα την σταδιακή αδρανοποίηση τους και εν τέλει τον αποκλεισμό τους από την διαδικασία της εκπαίδευσης (dying ReLU problem).



Σχήμα 5.7: Η συνάρτηση ενεργοποίησης Leaky ReLU [31]

5.6 Προσδιορισμός Υπερπαραμέτρων

Σε ένα νευρωνικό δίκτυο, πέρα από την αναγκαιότητα υπολογισμού των βαρών και των αντίστοιχων σταθερών $b \in \mathbb{R}$, υπάρχει και η ανάγκη προσδιορισμού ορισμένων επιπρόσθετων παραμέτρων. Σε αντίθεση με τα βάρη, οι παράμετροι αυτές δεν προκύπτουν ως αποτέλεσμα της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, αλλά αποφασίζονται εκ των προτέρων. Είναι γνωστές με το όνομα «υπερπαραμέτροι» (hyperparameters) και ανάμεσά τους ξεχωρίζουν ο αριθμός των επαναλήψεων, η επιλογή της συνάρτησης ενεργοποίησης, ο ρυθμός μάθησης, ο αριθμός των στρωμάτων, το είδος των στρωμάτων, ο αριθμός των νευρώνων που θα έχει το κάθε στρώμα, καθώς και ο επιλυτής (optimizer), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ενημέρωση των βαρών του νευρωνικού δικτύου.

5.7 Σύνοψη

Η βαθιά μάθηση είναι ένας κλάδος της μηχανικής μάθησης ο οποίος γνωρίζει ολοένα και μεγαλύτερη άνθηση, τόσο για το εύρος των προβλημάτων που μπορεί να επιλύσει -ορισμένα από τα οποία θα ήταν αδύνατον να αντιμετωπιστούν με άλλο τρόπο- όσο και για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που παράγει. Ειδικά η ενσωμάτωση της στους αλγόριθμους άλλων τεχνικών, όπως αυτών της ενισχυτικής μάθησης, μπορεί να συνεισφέρει στην αντιμετώπιση ακόμη πιο πολύπλοκων προβλημάτων.

Κεφάλαιο 6

Ενισχυτική Μάθηση

6.1 Εισαγωγή

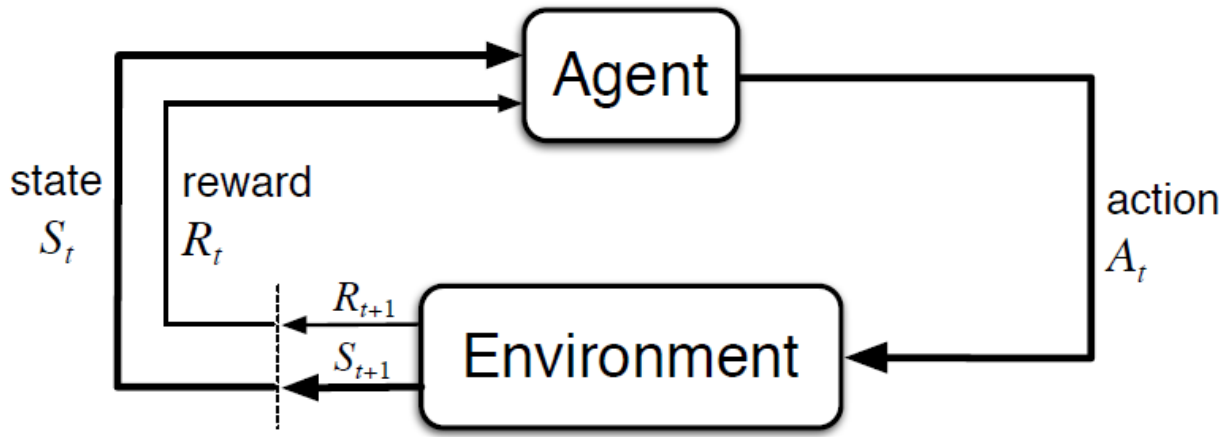
Από όλους τους τομείς της μηχανικής μάθησης, η ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning) είναι εκείνη που προσεγγίζει όσο καμία άλλη τον τρόπο με τον οποίο τόσο οι άνθρωποι όσο και οι υπόλοιποι ζωντανοί οργανισμοί αποκτούν μία καινούρια δεξιότητα. Παραδείγματος χάριν, ένα παιδί που προσπαθεί να μάθει να κάνει ποδήλατο καθώς εξασκείται αντιλαμβάνεται ποιες είναι εκείνες οι κινήσεις του σώματος του που συμβάλλουν στην διατήρηση της ισορροπίας του και ποιες όχι, με αποτέλεσμα να επαναλαμβάνει διαρκώς αυτές που το βοηθούν, απορρίπτοντας τις υπόλοιπες, και τελικά να μπορέσει να απολαύσει μία βόλτα με το ποδήλατό του. Με παρόμοιο τρόπο πραγματοποιείται και η εκπαίδευση ενός αλγορίθμου ενισχυτικής μάθησης. Η βασική ιδέα αφορά την αλληλεπίδραση ενός πράκτορα (agent) με το περιβάλλον του (environment) με στόχο την μεγιστοποίηση των επιβραβεύσεων (rewards) που λαμβάνει από αυτό, ακολουθώντας την μέθοδο δοκιμής και λάθους (trial and error).

Κύριο πλεονέκτημα της ενισχυτικής μάθησης είναι η μη αναγκαιότητα ύπαρξης εξωτερικής παρακολούθησης και ανάπτυξης εκτενούς μοντέλου του προβλήματος. Ειδικά χάρη στην δεύτερη της ιδιότητα μπορεί και επιλύει πληθώρα διαφορετικών και πολύπλοκων προβλημάτων των οποίων η μοντελοποίηση θα ήταν πολύ δύσκολο έως και ακατόρθωτο να πραγματοποιηθεί, ενώ δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου η απόδοση ενός αλγορίθμου ενισχυτικής μάθησης ξεπερνάει τα όρια του ανθρώπινου νου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο αλγόριθμος που ανέπτυξε η εταιρεία DeepMind, ο οποίος κατάφερε να νικήσει τον παγκόσμιο πρωταθλητή του παιχνιδιού Go. Επιπλέον εφαρμογές της αφορούν την ανάπτυξη συστημάτων αυτόνομης οδήγησης σε αυτοκίνητα, την εξοικονόμηση ενέργειας που προορίζεται για την θέρμανση και τον αερισμό ενός χώρου, καθώς και τον έλεγχο ρομποτικών μηχανισμών.

Η ανάπτυξη του κεφαλαίου που ακολουθεί βασίζεται στο σύγγραμμα [33] και παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά της ενισχυτικής μάθησης, τα οποία θα φανούν ιδιαίτερα χρήσιμα για την κατανόηση της μεθόδου που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο του εξωσκελετού.

6.2 Μαρκοβιανή Διαδικασία Απόφασης

Η μοντελοποίηση ενός προβλήματος ενισχυτικής μάθησης βασίζεται στην Μαρκοβιανή Διαδικασία Απόφασης (Markov Decision Process - MDP). Σύμφωνα με αυτήν, η εκπαίδευση του πράκτορα (agent), η οποία και βρίσκεται στο επίκεντρο της όλης διαδικασίας, πραγματοποιείται μέσω της αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον (environment). Απώτερος στόχος είναι η πραγμάτωση των κατάλληλων ενεργειών από μεριάς του πράκτορα, ώστε να επιτευχθεί η συγκέντρωση όσο το δυνατόν μεγαλύτερων ανταμοιβών (rewards). Συγκεκριμένα, κάποια χρονική στιγμή t το περιβάλλον βρίσκεται σε μία κατάσταση $S_t \in S$. Ο πράκτορας παρατηρώντας την κατάσταση αυτή πραγματοποιεί μία ενέργεια (action) $A_t \in A(s)$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μετάβαση του περιβάλλοντος σε μία καινούρια κατάσταση S_{t+1} λαμβάνοντας και μία ανταμοιβή $R_{t+1} \in R \subset \mathbb{R}$. Με βάση την καινούρια κατάσταση και την ανταμοιβή που προέκυψε από αυτήν, ο πράκτορας πραγματοποιεί μία καινούρια ενέργεια η οποία με την σειρά της επηρεάζει το περιβάλλον. Η κυκλική αυτή πορεία της Μαρκοβιανούς διαδικασίας απόφασης (Σχήμα 6.1) - η οποία από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται για λόγους συντομίας ως MDP- θα πραγματοποιηθεί τόσες φορές όσες χρειαστεί προκειμένου να εξασφαλισθεί για τον πράκτορα το μεγαλύτερο δυνατό σύνολο ανταμοιβών.



Σχήμα 6.1: Σχηματική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης μεταξύ πράκτορα και περιβάλλοντος κατά την Μαρκοβιανή διαδικασία απόφασης

Επιπλέον αναφέρεται ότι οι τυχαίες μεταβλητές R_t και S_t μιας MDP που ολοκληρώνεται σε πεπερασμένο αριθμό βημάτων προσδιορίζονται βάσει των διακριτών κατανομών πιθανότητας τους, οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από την προηγούμενη κατάσταση του περιβάλλοντος και την ενέργεια του πράκτορα. Επομένως, για κάθε $s', s \in S, r \in R$, και $a \in A(s)$, ορίζεται η πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση s σύμφωνα με την ενέργεια a στην κατάσταση s' με ανταμοιβή r ως:

$$p(s', r|s, a) = P_r\{S_t = s', R_t = r | S_{t-1} = s, A_{t-1} = a\} \quad (6.1)$$

6.3 Προσδοκώμενη Επιστροφή

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, ο πράκτορας μιας MDP είναι επιφορτισμένος με την μεγιστοποίηση της συνολικής ανταμοιβής που μπορεί να συγκεντρώσει. Στο σημείο αυτό εισάγεται η έννοια της προσδοκώμενης επιστροφής (expected return) η οποία συμβολίζεται με G_t και ορίζεται ως το άθροισμα των ανταμοιβών που λαμβάνει ο πράκτορας κάθε χρονική στιγμή. Η μαθηματική έκφραση που την περιγράφει δίνεται από τον εξής τύπο:

$$G_t = R_{t+1} + R_{t+2} + R_{t+3} + \dots + R_T \quad (6.2)$$

όπου T είναι η τελευταία χρονική στιγμή.

Αν και η παραπάνω σχέση λειτουργεί ικανοποιητικά σε εφαρμογές όπου ο αριθμός των χρονικών βημάτων είναι καθορισμένος, όπως για παράδειγμα στο παιχνίδι της τρίλιζας όπου τελειώνει είτε με τη νίκη κάποιου από τους δύο παίκτες είτε με το γέμισμα και των εννέα θέσεων του πίνακα, δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε εφαρμογές συνεχούς χρόνου, όπως είναι ο έλεγχος ενός ρομποτικού συστήματος. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη σαφούς συνθήκης τερματισμού, με αποτέλεσμα ο αριθμός των χρονικών βημάτων να τείνει στο άπειρο $= \infty$. Έτσι, για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος εισάγονται οι έννοιες της έκπτωσης (discounting) και της εκπιπτόμενης ανταμοιβής (discounted reward). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση ο πράκτορας οφείλει να ενεργεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε να μεγιστοποιηθεί η προσδοκώμενη επιστροφή των ανταμοιβών που έχουν υποστεί έκπτωση (discounted return). Ο ορισμός της δίνεται μέσω της σχέσης:

$$G_t = R_{t+1} + \gamma R_{t+2} + \gamma^2 R_{t+3} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} \quad (6.3)$$

όπου το γ είναι μία παράμετρος με τιμή μεταξύ 0 και 1 και ονομάζεται ρυθμός έκπτωσης (discount rate). Η σχέση αυτή φανερώνει ότι οι πιο άμεσα χρονικά ανταμοιβές έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο στην προσδοκώμενη επιστροφή και αυτό διότι η επίδραση του ρυθμού έκπτωσης πάνω τους φθίνει.

Μία άλλη μορφή της εξίσωσης 6.3, αλλά εξίσου χρήσιμη, είναι και η:

$$\begin{aligned} G_t &= R_{t+1} + \gamma R_{t+2} + \gamma^2 R_{t+3} + \gamma^3 R_{t+4} + \dots \\ &= R_{t+1} + \gamma(R_{t+2} + \gamma R_{t+3} + \gamma^2 R_{t+4} + \dots) \\ &= R_{t+1} + \gamma G_{t+1} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Σημειώνεται ότι παρ' όλο που η προσδοκώμενη επιστροφή, όπως δίνεται από την σχέση 6.3 είναι άθροισμα άπειρων όρων, το τελικό αποτέλεσμα παραμένει πεπερασμένο, εφόσον η ανταμοιβή είναι μη μηδενική και σταθερή και ο ρυθμός έκπτωσης παραμένει μικρότερος της μονάδας $\gamma < 1$. Για παράδειγμα, αν η ανταμοιβή ισούται με $+1$, τότε η επιστροφή είναι:

$$G_t = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k = \frac{1}{1-\gamma} \quad (6.5)$$

6.4 Πολιτική

Η πολιτική (policy) στην ενισχυτική μάθηση είναι ένα μέτρο που εκφράζει το πόσο πιθανό είναι ο πράκτορας να πραγματοποιήσει κάποια συγκεκριμένη ενέργεια με βάση την κατάσταση στην οποία ήδη βρίσκεται, ενώ συμβολίζεται με το γράμμα π . Επομένως, αν ο πράκτορας την χρονική στιγμή t ακολουθήσει την πολιτική π , τότε ως $\pi(a|s)$ ορίζεται η πιθανότητα να ισχύει $A_t = a$, εφόσον $S_t = s$. Με άλλα λόγια αυτό σημαίνει ότι την χρονική στιγμή t , υπό την πολιτική π , η πιθανότητα ο πράκτορας να επιλέξει την ενέργεια a , ενώ βρίσκεται στην κατάσταση s είναι $\pi(a|s)$. Επιπλέον σημειώνεται ότι για κάθε κατάσταση $s \in S$, η πολιτική π εκφράζει μία κατανομή πιθανότητας επί του $a \in A(s)$.

6.5 Συναρτήσεις Αποτίμησης

Οι συναρτήσεις αποτίμησης (value functions) εκφράζουν το όφελος που έχει ο πράκτορας από μία κατάσταση ή από έναν συνδυασμό ενέργειας-κατάστασης. Το όφελος αυτό εκφράζεται ως συνάρτηση της προσδοκώμενης επιστροφής και άρα συνδέεται άμεσα με τις ανταμοιβές που λαμβάνει ο πράκτορας καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας. Επομένως, ανάλογα με το αν το εκτιμώμενο όφελος εστιάζει στην κατάσταση ή στο ζευγάρι ενέργειας-κατάστασης, οι συναρτήσεις αυτές διακρίνονται σε αποτίμησης-κατάστασης (state-value functions) και αποτίμησης-ενέργειας (action-value functions).

6.5.1 Συνάρτηση αποτίμησης-κατάστασης

Η συνάρτηση αποτίμησης-κατάστασης (state-value function) συμβολίζεται με $u_\pi(s)$ και ορίζεται ως η προσδοκώμενη επιστροφή στον πράκτορα που ξεκινάει από την κατάσταση s και ακολουθεί την πολιτική π . Δηλαδή, εκφράζει την αξία της κατάστασης s (ή αλλιώς το πόσο καλή είναι η κατάσταση s) για τον πράκτορα που ακολούθησε την πολιτική π . Η μαθηματική έκφραση της $u_\pi(s)$ είναι:

$$u_\pi(s) = E_\pi[G_t | S_t = s] = E_\pi\left[\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} | S_t = s\right] \quad (6.6)$$

για κάθε $s \in S$.

6.5.2 Συνάρτηση αποτίμησης-ενέργειας

Σε παραλληλία με την προηγούμενη παράγραφο, η συνάρτηση αποτίμησης-ενέργειας (action-value function) για την πολιτική π , συμβολίζεται ως q_π και αποτελεί ένα μέτρο του πόσο καλό είναι για τον πράκτορα, εφόσον βρίσκεται στην κατάσταση s , να επιλέξει μία ενέργεια a ακολουθώντας την πολιτική π . Με άλλα λόγια περιγράφει την αξία μιας ενέργειας υπό την πολιτική π εκφραζόμενη σε όρους προσδοκώμενης επιστροφής ως εξής:

$$q_{\pi}(s, a) = E_{\pi}[G_t | S_t = s, A_t = a] = E_{\pi}\left[\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} | S_t = s, A_t = a\right] \quad (6.7)$$

Η συνάρτηση αποτίμησης-ενέργειας αναφέρεται συχνά και ως Q-function, ενώ το αποτέλεσμα που παράγει ονομάζεται Q-value. Το γράμμα «Q» προέρχεται από το αρχικό γράμμα της αγγλικής λέξης quality που σημαίνει ποιότητα. Επομένως, η συνάρτηση αυτή θα μπορούσε να θεωρηθεί και ένας δείκτης της ποιότητας του ζεύγους κατάστασης-ενέργειας.

6.6 Βέλτιστη Πολιτική

Ο αντικειμενικός σκοπός των αλγορίθμων ενισχυτικής μάθησης είναι η εύρεση της πολιτικής εκείνης η οποία να επιφέρει την μεγαλύτερη επιστροφή στον πράκτορα σε σύγκριση με όλες τις υπόλοιπες. Η πολιτική αυτή είναι γνωστή με τον όρο βέλτιστη πολιτική (optimal policy). Συγκεκριμένα, μία πολιτική π θεωρείται καλύτερη ή εξίσου καλή με μία άλλη πολιτική π' αν και μόνο αν η αξία της κατάστασης s υπό την πολιτική π είναι καλύτερη ή εξίσου καλή με την αξία της κατάστασης s υπό την πολιτική π' .

$$\pi \geq \pi' \Leftrightarrow u_{\pi}(s) \geq u_{\pi'}(s) \quad (6.8)$$

για κάθε $s \in S$.

6.7 Βέλτιστες Συναρτήσεις Αποτίμησης

Κάθε βέλτιστη πολιτική σχετίζεται με μία βέλτιστη συνάρτηση αποτίμησης (optimal value function), η οποία μπορεί να είτε αποτίμησης-κατάστασης είτε αποτίμησης-ενέργειας.

6.7.1 Βέλτιστη συνάρτηση αποτίμησης-κατάστασης

Η βέλτιστη συνάρτηση αποτίμησης-κατάστασης (optimal state-value function) συμβολίζεται ως u_{*} και ορίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$u_{*}(s) = \max_{\pi} u_{\pi}(s) \quad (6.9)$$

και ισχύει για κάθε $s \in S$.

6.7.2 Βέλτιστη συνάρτηση αποτίμησης-ενέργειας

Η βέλτιστη συνάρτηση αποτίμησης-ενέργειας (optimal action-value function), ή όπως είναι γνωστή η βέλτιστη συνάρτηση ποιότητας (optimal Q-function), συμβολίζεται ως q_{*} και ορίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$q_{*}(s, a) = \max_{\pi} q_{\pi}(s, a) \quad (6.10)$$

για κάθε $s \in S$ και $a \in A(s)$.

6.8 Εξίσωση Bellman

Μία θεμελιώδης ιδιότητα της βέλτιστης συνάρτησης αποτίμησης-ενέργειας, q_{*} , εκφράζεται μέσω της εξίσωσης Bellman:

$$q_{*}(s, a) = E[R_{t+1} + \gamma \max_{a'} q_{*}(s', a')] \quad (6.11)$$

Πρακτικά η εξίσωση Bellman δηλώνει ότι, για οποιοδήποτε ζεύγος κατάστασης-ενέργειας (s, a) , η προσδοκώμενη επιστροφή για τον πράκτορα που ξεκινάει από την κατάσταση s και επιλέγει την ενέργεια σύμφωνα με την βέλτιστη πολιτική αντιστοιχεί στην άμεση ανταμοιβή R_{t+1} που λαμβάνει ο πράκτορας εκτελώντας την

ενέργεια a συν την μέγιστη προσδοκώμενη επιστροφή με έκπτωση (expected discounted return) η οποία προκύπτει από κάθε πιθανό επόμενο ζεύγος κατάστασης-ενέργειας (s', a') .

6.9 Στρατηγική Επιλογής Ενεργειών

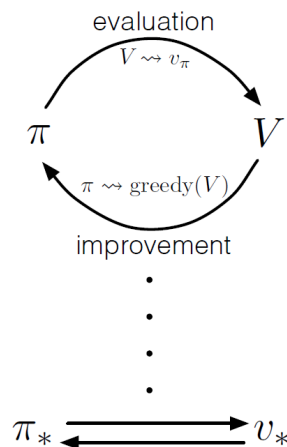
Κατά την διαδικασία επιλογής της ενέργειας εκείνης που θα οδηγήσει στην μεγιστοποίηση της προσδοκώμενης επιστροφής, ο πράκτορας βρίσκεται αντιμέτωπος με ένα δίλημμα. Το δίλημμα αυτό σχετίζεται με την επιλογή της εξερεύνησης (exploration) του περιβάλλοντος με στόχο την ανακάλυψη καινούριων και πιθανώς πιο κερδοφόρων ενεργειών, έναντι της εκμετάλλευσης (exploitation) και άρα επανάληψης των ενεργειών που ήδη γνωρίζει ότι θα του αποφέρουν κέρδος.

Μία προσέγγιση, όσον αφορά την επιλογή των ενεργειών από τον πράκτορα, θα ήταν η υιοθέτηση μίας «άπληστης» (greedy) πολιτικής, όπου θα επέφερε την συνεχή εκτέλεση των ενεργειών εκείνων που είναι ήδη γνωστό ότι οδηγούν σε υψηλό κέρδος. Το πρόβλημα, ωστόσο, με αυτήν την προσέγγιση είναι ότι υπάρχει μεγάλος κίνδυνος να παραμεριστούν ενέργειες που θα οδηγούσαν σε πολύ μεγαλύτερο όφελος, απλά και μόνο επειδή ο πράκτορας αγνοούσε την ύπαρξη τους. Επιπλέον, το πρόβλημα αυτό παίρνει ακόμα μεγαλύτερες διαστάσεις όταν ο πράκτορας δεν έχει καμία πληροφορία σχετικά με το ποιόν των διαθέσιμων ενεργειών - συνήθως αυτό συμβαίνει κατά την έναρξη της διαδικασίας μάθησης, όπου ο πράκτορας δεν έχει καμία γνώση του περιβάλλοντος του και έτσι αδυνατεί να αποφασίσει το ποια ενέργεια θα πρέπει να εκτελέσει. Επομένως, η λύση σε αυτό το ζήτημα προκύπτει μέσα από την εξερεύνηση του περιβάλλοντος με στόχο την αναζήτηση νέων και πιθανώς πιο επικερδών ενεργειών.

Ένας τρόπος ώστε να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ της αναζήτησης νέων ενεργειών και της αξιοποίησης της ήδη υπάρχουσας πληροφορίας, είναι η εφαρμογή της πολιτικής ϵ -greedy. Σύμφωνα με αυτήν, ως ϵ ορίζεται ένας ρυθμός εξερεύνησης (exploration rate) και εκφράζει την πιθανότητα της εξερεύνησης του περιβάλλοντος από τον πράκτορα. Για το λόγο αυτό, η αρχική του τιμή ισούται με την μονάδα ($\epsilon = 1$), πράγμα που σημαίνει ότι κατά την έναρξη της μάθησης η πιθανότητα να εξερευνήσει ο πράκτορας το περιβάλλον είναι 100%. Ωστόσο, όσο ο πράκτορας αποκτά περισσότερη γνώση του περιβάλλοντος του, η αναγκαιότητα αξιοποίησης της γνώσης αυτής ολοένα και αυξάνεται. Για να συμβεί αυτό, η τιμή του ϵ αρχίζει σταδιακά να μειώνεται, συνήθως στην αρχή κάθε επεισοδίου, και έτσι η πιθανότητα ο πράκτορας να επωφεληθεί από ενέργειες που γνωρίζει ήδη ότι είναι επικερδείς αυξάνεται.

6.10 Γενικευμένη Επανάληψη Πολιτικής

Η επίλυση σημαντικής μερίδας αλγορίθμων ενισχυτικής μάθησης βασίζεται σε μία διαδικασία που ονομάζεται γενικευμένη επανάληψη πολιτικής (generalized evaluation iteration - GPI) και δεν αφορά τίποτα άλλο παρά την διαδοχική εναλλαγή μεταξύ της εκτίμησης της πολιτικής (policy evaluation) και της βελτίωσης της πολιτικής (policy improvement), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Γενικευμένη επανάληψη πολιτικής (generalized evaluation iteration)

Ο όρος εκτίμηση της πολιτικής αναφέρεται στον υπολογισμό της συνάρτησης αποτίμησης (q_π ή u_π) για μία τυχαία πολιτική π , ενώ η βελτίωση της πολιτικής πραγματοποιείται προς την κατεύθυνση αύξησης της τιμής που παράγει η συνάρτηση αποτίμησης, με τρόπο αντίστοιχο με αυτόν που περιγράφηκε στην ενότητα 6.6.

6.11 Μέθοδοι Monte Carlo

Οι μέθοδοι Monte Carlo (Monte Carlo methods) αποτελούν μία από τις πιο βασικές μεθόδους για τον υπολογισμό των συναρτήσεων αποτίμησης και την εύρεση της βέλτιστης πολιτικής. Ίδιον τους αποτελεί η ανεξαρτησία σε ότι αφορά την ακριβή περιγραφή των συνθηκών που διέπουν το πρόβλημα ή αλλιώς η μη αναγκαιότητα ύπαρξης λεπτομερούς μοντέλου για την επίλυση του προβλήματος (model-free methods). Έτσι, εφαρμόζονται σε περιπτώσεις όπου οι πιθανότητες μετάβασης είναι άγνωστες, ενώ ο προσδιορισμός της πολιτικής και της συνάρτησης αποτίμησης προκύπτει μέσα από την κατ' επανάληψιν αλληλεπίδραση του πράκτορα με το περιβάλλον. Σχετικά με τον τρόπο ενημέρωσης της ισχύουσας πολιτικής και της συνάρτησης αποτίμησης, αναφέρεται πραγματοποιείται με βάση τον μέσο όρο των επιστροφών (που λαμβάνει ο πράκτορας) και μόνο στο τέλος του εκάστοτε επεισοδίου.

6.12 Μέθοδοι Χρονικών Διαφορών

Όπως οι μέθοδοι Monte Carlo έτσι και οι μέθοδοι χρονικών διαφορών (temporal difference methods - TD) δεν απαιτούν την ύπαρξη ακριβούς μοντέλου του προβλήματος, ενώ ο εντοπισμός της βέλτιστης πολιτικής στηρίζεται στην ιδέα της γενικευμένης επανάληψης πολιτικής (GPI). Ωστόσο, η ενημέρωση της πολιτικής και των τιμών της συνάρτησης αποτίμησης μπορεί να πραγματοποιηθεί πολλές φορές μέσα σε ένα επεισόδιο (στο τέλος κάθε βήματος). Συγκεκριμένα, η εκτίμηση της πολιτικής (policy evaluation) στηρίζεται στον υπολογισμό της διαφοράς της τιμής μεταξύ του τρέχοντος και του προηγούμενου βήματος της συνάρτησης αποτίμησης, γεγονός που δικαιολογεί και το όνομα των μεθόδων αυτών, και περιγράφεται μέσω της σχέσης:

$$V(S_t) \leftarrow V(S_t) + a[R_{t+1} + \gamma V(S_{t+1}) - V(S_t)] \quad (6.12)$$

όπου με R_{t+1} συμβολίζεται η άμεση αμοιβή που λαμβάνεται από τον πράκτορα λόγω της μετάβασης του στην κατάσταση S_{t+1} , ως S_t συμβολίζεται η προηγούμενη κατάσταση του συστήματος, ενώ με το γράμμα a συμβολίζεται μια παράμετρος που ονομάζεται ρυθμός μάθησης (learning rate).

Εστιάζοντας στον ρυθμό μάθησης αναφέρεται ότι πρόκειται για έναν αριθμό μεταξύ 0 και 1, ο οποίος δείχνει το μέγεθος της επίδρασης που έχει η παλιά τιμή της συνάρτησης αποτίμησης στην νέα. Για την ακρίβεια όσο πιο μεγάλος είναι ο ρυθμός μάθησης, τόσο πιο μεγάλη είναι η επίδραση της καινούριας τιμής, με αποκορύφωμα την περίπτωση όπου ο ρυθμός μάθησης είναι ίσος με την μονάδα και κατ' επέκταση η παλιά τιμή αντικαθίσταται εξ ολοκλήρου από την καινούρια.

6.12.1 Αλγόριθμος SARSA

Ακολουθώντας το γενικό πρότυπο της γενικευμένης επανάληψης πολιτικής και σύμφωνα με την σχέση (6.12), ο αλγόριθμος SARSA βασίζεται στον υπολογισμό της συνάρτησης αποτίμησης-ενέργειας προκειμένου να προβεί στην εκτίμηση της ισχύουσας πολιτικής. Για την ακρίβεια, η σχέση (6.12) μετατρέπεται ως εξής:

$$Q(S_t, A_t) \leftarrow Q(S_t, A_t) + a[R_{t+1} + \gamma Q(S_{t+1}, A_{t+1}) - Q(S_t, A_t)] \quad (6.13)$$

ενώ τα βήματα που απαρτίζουν τον αλγόριθμο περιγράφονται ακολούθως:

Αλγόριθμος 1: SARSA

- . Αρχικοποίηση $Q(S, A)$, για κάθε ζεύγος κατάστασης-ενέργειας με τυχαίες τιμές
 - . Για κάθε επεισόδιο:
 - . Επιλογή αρχικής κατάστασης S
 - . Επιλογή ενέργειας A με βάση την S και την πολιτική (π.χ. ϵ -greedy)
 - . Για κάθε βήμα (εντός του επεισοδίου):
 - . Πραγματοποίηση ενέργειας A
 - . Παρατήρηση ανταμοιβής R και επόμενης κατάστασης S'
 - . Επιλογή ενέργειας A' με βάση την S' και την πολιτική (π.χ. ϵ -greedy)
 - . $Q(S, A) \leftarrow Q(S, A) + a[R + \gamma Q(S', A') - Q(S, A)]$
 - . $S \leftarrow S', A \leftarrow A'$
 - . τέλος επαναλήψεων
 - . τέλος επαναλήψεων
-

Επομένως, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βασίζεται στην εναλλαγή ενεργειών-καταστάσεων και περιγράφεται μέσω της πλειάδας $(S_t, A_t, R_{t+1}, S_{t+1}, A_{t+1})$, γεγονός που δικαιολογεί και το όνομά του.

6.12.2 Αλγόριθμος Q-learning

Στόχος του Q-learning είναι η εύρεση της βέλτιστης πολιτικής, μέσω της συνεχούς εκμάθησης των τιμών (Q-values) της συνάρτησης αποτίμησης-ενέργειας για κάθε ζεύγος ενέργειας-κατάστασης. Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο (SARSA), ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί διαφορετική πολιτική για την επιλογή των ενεργειών του σε σχέση με την πολιτική που ακολουθεί για την ενημέρωση των τιμών της συνάρτησης αποτίμησης-ενέργειας. Για τον λόγο αυτόν χαρακτηρίζεται ως μέθοδος off-policy -η μέθοδος SARSA χαρακτηρίζεται ως on-policy, καθώς ακολουθεί την ίδια πολιτική σε κάθε στάδιο της διαδικασίας.

Τα βήματα του Q-learning περιγράφονται ως εξής:

Αλγόριθμος 2: Q-learning

- . Αρχικοποίηση $Q(S, A)$, για κάθε ζεύγος κατάστασης-ενέργειας με τυχαίες τιμές
 - . Για κάθε επεισόδιο:
 - . Επιλογή αρχικής κατάστασης S
 - . Για κάθε βήμα (εντός του επεισοδίου):
 - . Επιλογή ενέργειας A με βάση την S και την πολιτική (π.χ. ϵ -greedy)
 - . Πραγματοποίηση ενέργειας A
 - . Παρατήρηση ανταμοιβής R και επόμενης κατάστασης S'
 - . $Q(S, A) \leftarrow Q(S, A) + a[R + \gamma \max_a Q(S', a) - Q(S, A)]$
 - . $S \leftarrow S'$
 - . τέλος επαναλήψεων
 - . τέλος επαναλήψεων
-

6.13 Μέθοδος Δράστη-Κριτή

Η μέθοδος δράστη-κριτή (actor critic method) υπάγεται σε μία ευρύτερη κατηγορία μεθόδων που φέρουν το όνομα μέθοδοι επικλινούς πολιτικής (policy gradient methods). Σε αντίθεση με τις προηγούμενες μεθόδους, των οποίων η βελτίωση της πολιτικής εξαρτιόνταν από την εκτίμηση της συνάρτησης αποτίμησης, οι μέθοδοι επικλινούς πολιτικής στηρίζονται στην εκμάθηση των παραμέτρων που απαρτίζουν την εφαρμοζόμενη πολιτική (parameterized policy). Το γεγονός αυτό την καθιστά ικανή να επιλέγει και να πραγματοποιεί τις κατάλληλες ενέργειες, χωρίς να απαιτείται η παρουσία μιας συνάρτησης αποτίμησης. Φυσικά αυτό δεν σημαίνει ότι οι συναρτήσεις αποτίμησης καταργούνται ολοκληρωτικά, καθώς υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται.

Ως προς τον συμβολισμό αναφέρεται ότι ως $\theta \in \mathbb{R}$ ορίζεται το διάνυσμα που περιλαμβάνει τις παραμέτρους της πολιτικής, ενώ ως:

$$\pi(a|s, \theta) = P_r\{A_t = a | S_t = s, \theta_t = \theta\} \quad (6.14)$$

ορίζεται η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί η ενέργεια a την χρονική στιγμή t με δεδομένη την κατάσταση s και την παράμετρο θ . Για τις περιπτώσεις όπου η συνάρτηση αποτίμησης χρησιμοποιείται, ως $w \in \mathbb{R}$ ορίζεται το διάνυσμα που περιλαμβάνει τις αντίστοιχες παραμέτρους. Για την εκμάθηση των παραμέτρων χρησιμοποιείται ένα μέτρο απόδοσης (performance measure) το οποίο συμβολίζεται ως $J(\theta)$. Στόχος των μεθόδων αυτών είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης, η οποία πραγματοποιείται μέσω της επικλινούς ανόδου (gradient ascent) της J ως εξής:

$$\theta_{t+1} = \theta_t + a \nabla J(\theta_t) \quad (6.15)$$

όπου ο όρος $\nabla J(\theta_t) \in \mathbb{R}$ αποτελεί μια στοχαστική εκτίμηση της κλίσης του μέτρου απόδοσης συναρτήσει του θ_t .

Εστιάζοντας στην μέθοδο δράστη-κριτή αναφέρεται ότι ως «δράστης» (actor) χαρακτηρίζεται η πολιτική $\pi(a|s, \theta)$, η οποία και προσδιορίζει τις ενέργειες που θα ακολουθήσει ο πράκτορας, ενώ ο «κριτής» (critic) έχει τον ρόλο της συνάρτησης αποτίμησης και αξιολογεί το κατά πόσο είναι συμφέρουσα η εκάστοτε ενέργεια για τον πράκτορα.

6.14 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό εισήχθησαν οι βασικές αρχές που διέπουν την ενισχυτική μάθηση και τον τρόπο λειτουργίας ορισμένων από τις μεθόδους που την απαρτίζουν. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στις μεθόδους όπου δεν απαιτούν λεπτομερή περιγραφή του μοντέλου για την επίλυση του προβλήματος (model free methods). Η επιλογή αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι μέθοδοι αυτές ενδείκνυνται για πολύπλοκα προβλήματα, όπου δεν υπάρχει πρότερη γνώση του περιβάλλοντος χώρου ή για περιπτώσεις όπου η ανάπτυξη ενός λεπτομερούς μοντέλου καθίσταται από δύσκολη έως αδύνατη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δυσκολίας ανάπτυξης ακριβούς μοντέλου αποτελεί η περίπτωση του ρομποτικού εξωσκελετού, ο σχεδιασμός συστήματος ελέγχου του οποίου θα συζητηθεί με λεπτομέρεια στα επόμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 7

Βαθιά Ενισχυτική Μάθηση

7.1 Εισαγωγή

Ο όρος Βαθιά Ενισχυτική Μάθηση (Deep Reinforcement Learning) αναφέρεται στην ενσωμάτωση των εννοιών της βαθιάς μάθησης, και πιο συγκεκριμένα των νευρωνικών δικτύων, στη θεωρία της ενισχυτικής μάθησης. Χάρη στα νευρωνικά δίκτυα, το εύρος εφαρμογής της ενισχυτικής μάθησης επεκτείνεται και σε προβλήματα όπου οι κλασικοί της αλγόριθμοι δεν θα μπορούσαν να αντιμετωπίσουν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα προβλήματα συνεχούς πεδίου ενεργειών και καταστάσεων (continuous state-action space) στα οποία ανήκει και ο έλεγχος ρομποτικών μηχανισμών, όπως ο εξωσκελετός. Η αδυναμία των κλασικών μεθόδων οφείλεται στο υπερβολικά μεγάλο μέγεθος των διαστάσεων ενός προβλήματος συνεχούς πεδίου έναντι ενός διακριτού. Αδυναμία επίσης υπάρχει και στον υπολογισμό των συναρτήσεων επιτίμησης. Ακριβώς αυτό το πρόβλημα καλούνται να αντιμετωπίσουν τα νευρωνικά δίκτυα τα οποία αντικαθιστούν τις έως τώρα γνωστές συναρτήσεις μιμούμενα κατά κάποιον τρόπο την βασική αρχή λειτουργία των συναρτήσεων. Όπως, λοιπόν, μια συνάρτηση δέχεται κάποιες εισόδους και μέσω των κατάλληλων αριθμητικών πράξεων παράγει μία έξοδο, έτσι και ένα νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική του, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5, για να παράξει ένα αποτέλεσμα βασιζόμενο στις τιμές που δέχθηκε ως είσοδο. Το κυριότερο πλεονέκτημα των νευρωνικών δικτύων είναι ότι μπορούν να αναπαραστήσουν αυτήν την σχέση εισόδου-εξόδου ακόμα και σε πολύπλοκα προβλήματα όπου εμπλέκουν μεγάλο πλήθος παραμέτρων. Για τον λόγο αυτόν συχνά αποκαλούνται και ως function approximators, καθώς προσεγγίζουν (approximate) την λειτουργία μιας συνάρτησης (function).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πλέον διαδεδομένος αλγόριθμος βαθιάς ενισχυτικής μάθησης, ο Deep Q-Network (DQN), ο οποίος αποτελεί την βάση για την ανάπτυξη πιο εξεζητημένων αλγορίθμων, όπως ο Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) και ο Twin-Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3). Στο παρόν κεφάλαιο δίνεται ιδιαίτερη σημασία και στους δύο αυτούς αλγορίθμους, καθώς είναι αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του πράκτορα που παίζει τον ρόλο του ελεγκτή στο σύστημα ελέγχου του ρομποτικού εξωσκελετού, όπως θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο.

7.2 Αλγόριθμος Deep Q-Network

Ο αλγόριθμος Deep Q-Network (DQN) είναι το κατεξοχήν παράδειγμα μεθόδου που βασίζεται στην χρήση νευρωνικών δικτύων προκειμένου να προσεγγίσει την λειτουργία της συνάρτησης αποτίμησης-ενέργειας. Συγκεκριμένα, πρόκειται για έναν αλγόριθμο ο οποίος δεν χρειάζεται ακριβή μοντελοποίηση (model-free), ενώ η πολιτική που ακολουθεί για την επιλογή των ενεργειών είναι διαφορετική σε σχέση με την πολιτική που ακολουθεί για την ενημέρωση των τιμών της συνάρτησης αποτίμησης-ενέργειας (off-policy). Επίσης, αναφέρεται ότι πέρα από το νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση την προσδοκώμενης επιστροφής, το οποίο αποκαλείται δίκτυο-κριτής ή απλά κριτής, υπάρχει και ένα δεύτερο νευρωνικό δίκτυο που βοηθά στην εκτίμηση του σφάλματος μεταξύ της επιθυμητής και της εκτιμώμενης από τον κριτή τιμής, όπως ορίζεται από την εξίσωση του Bellman. Το δίκτυο αυτό ονομάζεται στόχος-κριτής και έχει την ίδια δομή και τις ίδιες παραμέτρους με το δίκτυο του κριτή.

Ένα στοιχείο με ιδιαίτερη σημασία για την εκπαίδευση των δύο δικτύων είναι η λεγόμενη επαναπαιζόμενη εμπειρία (experience replay). Η τεχνική αυτή προκαλεί την αποθήκευση των «εμπειριών» του πράκτορα

σε μία βάση δεδομένων, η οποία είναι γνωστή ως επαναπαιζόμενη μνήμη (replay memory). Ως εμπειρία e_t νοείται κάθε πλειάδα της μορφής $(s_t, a_t, r_{t+1}, s_{t+1})$, όπου ως t συμβολίζεται το εκάστοτε χρονικό βήμα. Έτσι, λοιπόν, κάθε χρονική στιγμή μία πλειάδα με την παραπάνω μορφή (ή αλλιώς εμπειρία) αποθηκεύεται σε κάποια από τις θέσεις της επαναπαιζόμενης μνήμης, ενώ αναφέρεται ότι η εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων πραγματοποιείται με βάση την λήψη τυχαίου δείγματος από τις εμπειρίες αυτές. Αυτό συμβαίνει για να αποφευχθεί η εκπαίδευση του δικτύου μέσω συνεχόμενων χρονικά δειγμάτων, τα οποία συνήθως είναι άμεσα συσχετιζόμενα μεταξύ τους. Αν η λήψη τυχαίων δειγμάτων μέσω της μεθόδου της επαναπαιζόμενης μνήμης δεν συνέβαινε τότε υπήρχε πολύ μεγάλη πιθανότητα το νευρωνικό δίκτυο να έδινε πολύ καλά αποτελέσματα για συγκεκριμένο μόνο τμήμα του πεδίου ενεργειών και καταστάσεων, απορρίπτοντας όλο το υπόλοιπο (overfitting). Με βάση λοιπόν τα όσα έχουν λεχθεί, τα βήματα του Deep Q-Network περιγράφονται ως εξής:

Αλγόριθμος 1: Deep Q-Network

- . Αρχικοποίηση επαναπαιζόμενης μνήμης
- . Αρχικοποίηση των βαρών του κριτή $Q(S, A)$ με τυχαίες τιμές θ_Q
- . Αρχικοποίηση των βαρών του στόχου-κριτή $Q'(S, A)$ με τυχαίες τιμές $\theta_{Q'} = \theta_Q$
- . Για κάθε επεισόδιο:
 - . Επιλογή αρχικής κατάστασης S
 - . Για κάθε βήμα (εντός του επεισοδίου):
 - . Επιλογή ενέργειας A με βάση την S και την πολιτική (π.χ. ϵ -greedy)
 - . Πραγματοποίηση ενέργειας A
 - . Παρατήρηση ανταμοιβής R και επόμενης κατάστασης S'
 - . Αποθήκευση εμπειρίας (S, A, R, S') στην επαναπαιζόμενη μνήμη
 - . Επιλογή μίας τυχαίας δέσμης M εμπειριών (S_i, A_i, R_i, S'_i)
 - . Αν η κατάσταση S' είναι η τελική:
 - . $y_i = R_i$
 - . αλλιώς:
 - . $y_i = R_i + \gamma \max_{A'} Q'(S'_i, A' | \theta_{Q'})$
 - . τέλος συνθήκης
 - . Ανανέωση των βαρών του κριτή ως:
 - . $L = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - Q(S_i, A_i | \theta_Q))^2$
 - . Ανανέωση των βαρών του στόχου-κριτή (συνήθως κάθε x βήματα)
 - . τέλος επαναλήψεων
 - . τέλος επαναλήψεων

7.3 Αλγόριθμος Deep Deterministic Policy Gradient

Όπως προδίδει και το όνομα του ο αλγόριθμος Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων επικλινούς πολιτικής (policy gradient methods) και συγκεκριμένα ακολουθεί το πρότυπο του δράστη-κριτή για την εύρεση της βέλτιστης πολιτικής. Όπως ο DQN που εξετάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, έτσι και ο DDPG είναι ελεύθερος μοντέλου (model free) και πολιτικής (off-policy). Ωστόσο, το σημαντικό του πλεονέκτημα έναντι του DQN είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί και σε προβλήματα όπου τόσο το πεδίο των καταστάσεων όσο και των ενεργειών είναι συνεχές -ο DQN, να μην εφαρμόζεται εξίσου αποτελεσματικά σε προβλήματα όπου το πεδίο των καταστάσεων είναι διακριτό ή συνεχές, όμως απαιτεί το πεδίο των ενεργειών να είναι διακριτό.

Εστιάζοντας στα χαρακτηριστικά του σημειώνεται ότι ο δράστης και ο κριτής της μεθόδου αναπαρίστανται ως δύο διαφορετικά νευρωνικά δίκτυα, τα οποία μάλιστα συνοδεύονται από τα αντίστοιχα δίκτυα-στόχους ακολουθώντας το πρότυπο του DQN. Επίσης, αναφέρεται ότι πέρα από την τεχνική της επαναπαιζόμενης μνήμης εισάγεται και μία επιπλέον παράμετρος, η οποία συμβολίζεται με N και ονομάζεται στοχαστικός θόρυβος (stochastic noise). Η εισαγωγή του στοχαστικού θορύβου συνεισφέρει στην αποτελεσματικότερη εξερεύνηση του περιβάλλοντος από τον πράκτορα και κατ' επέκταση στην αποδοτικότερη εκπαίδευση των δικτύων.

Τα βήματα του Deep Deterministic Policy Gradient περιγράφονται ως εξής:

Αλγόριθμος 1: Deep Deterministic Policy Gradient

- Αρχικοποίηση επαναπαιζόμενης μνήμης
 - Αρχικοποίηση των βαρών του κριτή $Q(S, A)$ με τυχαίες τιμές θ_Q
 - Αρχικοποίηση των βαρών του στόχου-κριτή $Q'(S, A)$ με τυχαίες τιμές $\theta_{Q'} = \theta_Q$
 - Αρχικοποίηση των βαρών του δράστη $\mu(S)$ με τυχαίες τιμές θ_μ
 - Αρχικοποίηση των βαρών του στόχου-δράστη $\mu'(S)$ με τυχαίες τιμές $\theta_{\mu'} = \theta_\mu$
 - Για κάθε επεισόδιο:
 - Επιλογή αρχικής κατάστασης S
 - Αρχικοποίηση παραμέτρου N
 - Για κάθε βήμα (εντός του επεισοδίου):
 - Επιλογή ενέργειας $A = \mu(S) + N$
 - Πραγματοποίηση ενέργειας A
 - Παρατήρηση ανταμοιβής R και επόμενης κατάστασης S'
 - Αποθήκευση εμπειρίας (S, A, R, S') στην επαναπαιζόμενη μνήμη
 - Επιλογή μίας τυχαίας δέσμης M εμπειριών (S_i, A_i, R_i, S'_i)
 - Αν η κατάσταση S' είναι η τελική:
 - $y_i = R_i$
 - αλλιώς:
 - $y_i = R_i + \gamma Q'(S'_i, \mu'(S'_i|\theta_\mu)|\theta_{Q'})$
 - τέλος συνθήκης
 - Ανανέωση των βαρών του κριτή ως:
 - $L = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - Q(S_i, A_i|\theta_Q))^2$
 - Ανανέωση των βαρών του δράστη ως:
 - $\nabla_{\theta_\mu} J \approx \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_{ai} G_{\mu i}$, όπου
 - $G_{ai} = \nabla_A Q(S_i, \mu(S_i|\theta_\mu)|\theta_Q)$
 - $G_{\mu i} = \nabla_{\theta_\mu} \mu(S_i|\theta_\mu)$
 - Ανανέωση των βαρών των δικτύων-στόχων ως:
 - $\theta_{Q'} = \tau\theta_Q + (1 - \tau)\theta_{Q'}$
 - $\theta_{\mu'} = \tau\theta_\mu + (1 - \tau)\theta_{\mu'}$
 - τέλος επαναλήψεων
 - τέλος επαναλήψεων
-

7.4 Αλγόριθμος Twin-Delayed Deep Deterministic Policy Gradient

Κατ' αντιστοιχία με τους δύο προηγούμενους αλγόριθμους, ο Twin - Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3) είναι επίσης ελεύθερος μοντέλου και πολιτικής (model free και off-policy). Συγκεκριμένα, ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων επικλινούς πολιτικής (policy gradient methods) και όπως ο DDPG ακολουθεί το πρότυπο του δράστη-κριτή. Για την ακρίβεια ο TD3 αποτελεί μία επέκταση του DDPG, η οποία βασίζεται στην ενσωμάτωση ενός δεύτερου δικτύου κριτή, συνοδευόμενο φυσικά από το αντίστοιχο δίκτυο-στόχο. Χάρη σε αυτήν την προσθήκη περιορίζεται το πρόβλημα της υπερεκτίμησης της συνάρτησης αποτίμησης που παρατηρείται κατά την εκτέλεση του DDPG. Επιπλέον αναφέρεται ότι και σε αυτήν την περίπτωση η εκπαίδευση ενισχύεται χάρη στην εφαρμογή της επαναπαιζόμενης μνήμης και της ενσωμάτωσης του στοχαστικού θορύβου κατά την διαδικασία επιλογής των ενεργειών του πράκτορα. Τα βήματα του Twin-Delayed Deep Deterministic Policy Gradient περιγράφονται ως εξής:

Αλγόριθμος 1: Twin-Delayed Deep Deterministic Policy Gradient

- . Αρχικοποίηση επαναπαιζόμενης μνήμης
- . Αρχικοποίηση των βαρών των δύο κριτών $Q_k(S, A)$ με τυχαίες τιμές θ_{Qk}
- . Αρχικοποίηση των βαρών των δύο στόχων-κριτών $Q'_k(S, A)$ με τυχαίες τιμές $\theta_{Qk'} = \theta_{Qk}$
- . Αρχικοποίηση των βαρών του δράστη $\mu(S)$ με τυχαίες τιμές θ_μ
- . Αρχικοποίηση των βαρών του στόχου-δράστη $\mu'(S)$ με τυχαίες τιμές $\theta_{\mu'} = \theta_\mu$
- . Για κάθε επεισόδιο:
 - . Επιλογή αρχικής κατάστασης S
 - . Αρχικοποίηση παραμέτρου N
 - . Για κάθε βήμα (εντός του επεισοδίου):
 - . Επιλογή ενέργειας $A = \mu(S) + N$
 - . Πραγματοποίηση ενέργειας A
 - . Παρατήρηση ανταμοιβής R και επόμενης κατάστασης S'
 - . Αποθήκευση εμπειρίας (S, A, R, S') στην επαναπαιζόμενη μνήμη
 - . Επιλογή μίας τυχαίας δέσμης M εμπειριών (S_i, A_i, R_i, S'_i)
 - . Αν η κατάσταση S' είναι η τελική:
 - . $y_i = R_i$
 - . αλλιώς:
 - . $y_i = R_i + \gamma \min_k (Q'_k(S'_i, \text{clip}(\mu'(S'_i|\theta_\mu) + \varepsilon)|\theta_{Qk'}))$
 - . τέλος συνθήκης
 - . Ανανέωση των βαρών του κριτή ως:
 - . $L = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - Q_k(S_i, A_i|\theta_{Qk}))^2$
 - . Ανανέωση των βαρών του δράστη ως:
 - . $\nabla_{\theta_\mu} J \approx \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_{ai} G_{\mu i}$, όπου
 - . $G_{ai} = \nabla_A \min_k (Q_k(S_i, \mu(S_i|\theta_\mu)|\theta_Q))$
 - . $G_{\mu i} = \nabla_{\theta_\mu} \mu(S_i|\theta_\mu)$
 - . Ανανέωση των βαρών των δικτύων-στόχων (συνήθως κάθε x βήματα)
 - . τέλος επαναλήψεων
 - . τέλος επαναλήψεων

7.5 Σύνοψη

Η βαθιά ενισχυτική μάθηση αποτελεί έναν από τους πιο πολλά υποσχόμενους κλάδους στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης με πλήθος εφαρμογών σε προβλήματα συνεχούς πεδίου. Προς αυτήν την κατεύθυνση περιγράφηκαν οι αλγόριθμοι DDPG και TD3, καθώς και τα πλεονεκτήματά τους έναντι της απλής εφαρμογής των νευρωνικών δικτύων στην ενισχυτική μάθηση μέσω του αλγορίθμου DQN. Το ζήτημα της υπεροχής ενός από τους δύο αλγορίθμους, DDPG και TD3, έναντι του άλλου θα αποτελέσει το αντικείμενο συζήτησης του επόμενου κεφαλαίου.

Κεφάλαιο 8

Βαθιά Ενισχυτική Μάθηση για τον Έλεγχο του εξωσκελετού «Hermes»

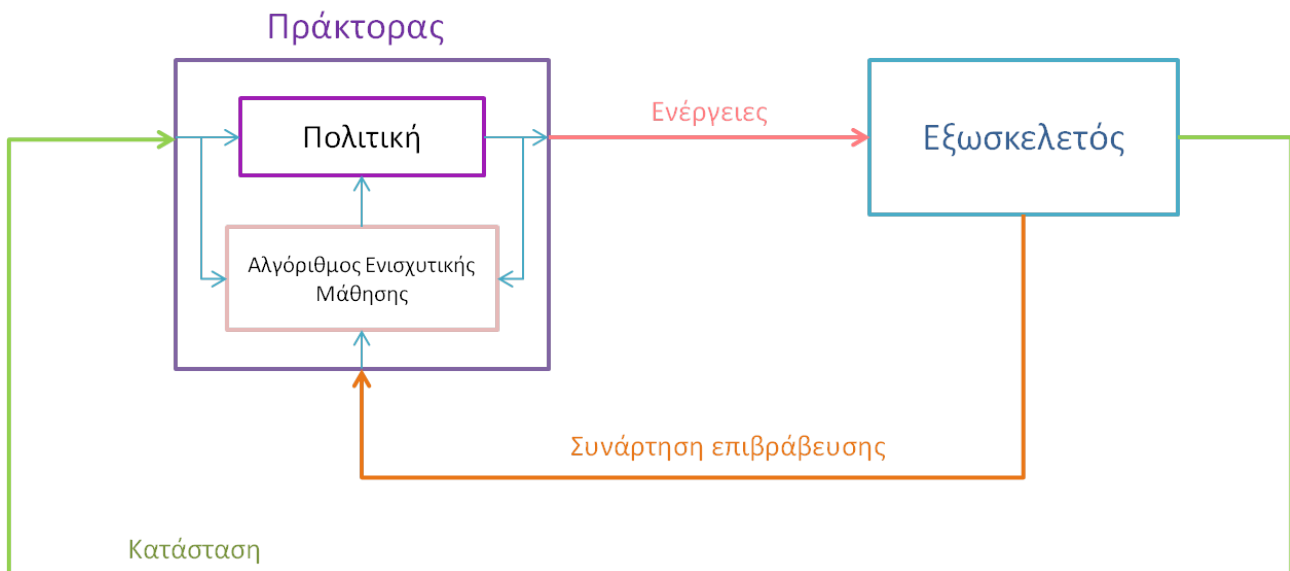
8.1 Εισαγωγή

Όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, ο εξωσκελετός «Hermes» στηρίζεται στην χρήση βακτηριών για την διατήρηση της ισορροπίας του πιλότου. Η παρουσία των βακτηριών, ωστόσο, δεν είναι ιδιαίτερα επιθυμητή. Ο κύριος λόγος είναι η δέσμευση και των δύο χεριών του και άρα ο περιορισμός εκτέλεσης ορισμένων κινήσεων, όπως η τακτοποίηση των αντικειμένων ενός ραφιού ή ακόμα και η μεταφορά ενός ποτηριού.

Με γνώμονα, λοιπόν, την αποδέσμευση του εξωσκελετού από την ύπαρξη των βακτηριών και κατ' επέκταση τη δυνατότητα παροχής μεγαλύτερης ελευθερίας κινήσεων στον πιλότο, το παρόν κεφάλαιο προτείνει την εφαρμογή ενός συστήματος ελέγχου, το οποίο στηρίζεται στην χρήση της βαθιάς ενισχυτικής μάθησης. Συγκεκριμένα, ένας πράκτορας αναλαμβάνει τον ρόλο του ελεγκτή, ενώ για την εκπαίδευσή του δοκιμάζονται δύο διαφορετικοί αλγόριθμοι, ο DDPG και ο TD3. Το κεφάλαιο κλείνει με την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζουν οι δύο αλγόριθμοι, καθώς και την μεταξύ τους σύγκριση για την επιλογή του καταλληλότερου ανάμεσα τους. Τέλος, αναφέρεται ότι το σύστημα έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει την δυνατότητα ελεύθερης βόδισης μόνο σε ευθεία πορεία και επίσης ότι η προσομοίωση και η εκπαίδευση του πράκτορα πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού «Matlab 2019b».

8.2 Σύστημα Ελέγχου

Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου αντικαθιστά τον κλασικό ελεγκτή με έναν πράκτορα, η πολιτική του οποίου είναι επιφορτισμένη με τον ρόλο της λήψης αποφάσεων για το ποιες ενέργειες θα εκτελέσει ο εξωσκελετός (Σχήμα 8.1). Μια επιπλέον διαφορά του συστήματος ενισχυτικής μάθησης έναντι των κλασικών συστημάτων αυτόματου ελέγχου αφορά την θεώρηση του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, ο δεύτερος τύπος ελέγχου θεωρεί ότι οτιδήποτε βρίσκεται εκτός του ελεγκτή και του συστήματός (plant) του ανήκει στο περιβάλλον, όπως για παράδειγμα το έδαφος πάνω στο οποίο κινείται ένα ρομπότ. Αντίθετα, για ένα σύστημα ενισχυτικής μάθησης περιβάλλον θεωρείται οτιδήποτε υπάρχει εκτός του ελεγκτή, συμπεριλαμβανομένου και του συστήματος (plant) που πρόκειται να ελεγχθεί. Στην περίπτωση του εξωσκελετού ακόμα και η ίδια του η υλική υπόσταση υπάγεται στο περιβάλλον. Ο πράκτορας -και πιο συγκεκριμένα η πολιτική του- είναι απλώς το κομμάτι εκείνο του λογισμικού το οποίο είναι υπεύθυνο για την επιλογή των ενεργειών που πρόκειται να εκτελεστούν, καθώς επίσης και για την ενημέρωση της πολιτικής καθ' όλη την διάρκεια της εκπαίδευσης μέσω του κατάλληλου αλγορίθμου. Σημειώνεται ότι ο πράκτορας δεν χρειάζεται να γνωρίζει τίποτα για το περιβάλλον του, παρά μόνο να εκπαιδευτεί σε αυτό μέσω μίας διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος με την βοήθεια του αντίστοιχου μηχανισμού επιβράβευσης.

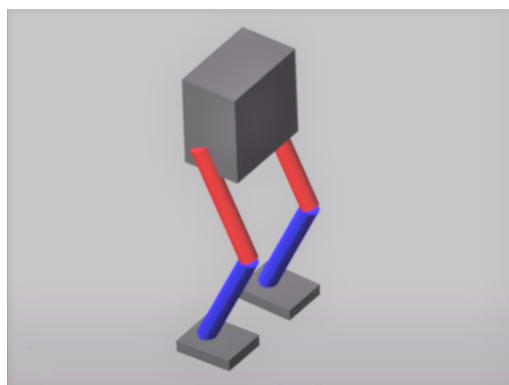


Σχήμα 8.1: Σχηματική αναπαράσταση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου

8.3 Μοντελοποίηση

Για την προσομοίωση της γεωμετρίας του εξωσκελετού χρησιμοποιήθηκε το πακέτο Simscape Multibody του λογισμικού Matlab. Στο Σχήμα 8.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται μία απλοποιημένη εκδοχή του εξωσκελετού, στην οποία ο κορμός και τα πόδια του παρουσιάζονται ως ορθογώνια παραλληλεπίπεδα. Η μάζα των παραλληλεπιπέδων ορίστηκε ίση με την πραγματική μάζα των αντίστοιχων τμημάτων του εξωσκελετού συν την μάζα του πιο μεγάλωσμου πιλότου (που μπορεί να φιλοξενήσει η συσκευή) κατανομημένη στις συγκεκριμένες περιοχές.

Αναφορικά με τις διαστάσεις του μοντέλου του σχήματος 8.2, σημειώνεται ότι στην περιοχή των ποδιών δεν ελήφθησαν υπ' όψιν τα προστατευτικά καλύμματα, καθώς η προσθήκη τους θα αύξανε την πολυπλοκότητα του μοντέλου, χωρίς ιδιαίτερο όφελος -χρησιμοποιούνται καθαρά για λόγους προστασίας από τραυματισμούς. Αντίθετα, οι διαστάσεις του κορμού ταυτίζονται με αυτές της θήκης των ηλεκτρονικών, κυρίως λόγω της σφιχτής συναρμογής των ηλεκτρονικών και της μπαταρίας στο εσωτερικό της, η οποία επιτρέπει την θεώρηση της ως ενιαίο κομμάτι.



Σχήμα 8.2: Σχηματική αναπαράσταση του απλοποιημένου μοντέλου του εξωσκελετού

Ως προς το πεδίο των ενεργειών αναφέρεται ότι αποτελείται από έξι παραμέτρους που αφορούν το μέγεθος της ροπής που θα ασκηθεί σε κάθε μία από τις αρθρώσεις σε ισχία, γόνατα και αστραγάλους. Σημειώνεται ότι το μοντέλο του σχήματος 8.2 διαθέτει επενεργοποιητές στις αρθρώσεις των αστραγάλων, σε αντίθεση με τον ήδη υπάρχοντα εξωσκελετό. Αυτό οφείλεται αφ' ενός στην ικανοποίηση του μελλοντικού στόχου της ομάδας που είναι η ενεργοποίηση και αφ' ετέρου στην παραγωγή πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων μέσω της εκπαίδευσης. Αντίστοιχα, το πεδίο των καταστάσεων περιλαμβάνει 29 παραμέτρους, οι οποίες αφορούν την μετατόπιση του κορμού ως προς το κατακόρυφο και το οριζόντιο επίπεδο, την γραμμική ταχύτητα του κορ-

μού στις τρεις διευθύνσεις, τις γωνίες περιστροφής του κορμού στις τρεις διαστάσεις, μαζί με τις αντίστοιχες γωνιακές ταχύτητες, τις γωνίες περιστροφής και τις γωνιακές ταχύτητες των έξι αρθρώσεων (ισχία, γόνατα, και αστράγαλοι), καθώς και τις έξι ενέργειες του προηγούμενου χρονικού βήματος.

Η παραγωγή των ανταμοιβών γίνεται μέσω μίας συνάρτησης βασισμένη στο [34], η οποία επιβραβεύει τον πράκτορα για κάθε επιπλέον βήμα που κάνει προς τα εμπρός, ενώ του επιβάλλει ποινή για κάθε άσκοπη κατανάλωση ενέργειας, αναπήδηση του κορμού και φυσικά παρέκκλιση από την ευθεία πορεία.

8.4 Εφαρμογή των DDPG και TD3

Ο αντικειμενικός στόχος του πράκτορα είναι να τροποποιήσει την πολιτική του με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί τελικά να επιλέγει την πιο συμφέρουσα ενέργεια, ανεξάρτητα από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα. Για την εκπαίδευση της πολιτικής, λοιπόν, επιλέχθηκαν οι αλγόριθμοι DDPG και TD3, οι οποίοι ενδείκνυνται για την περίπτωση του συνεχούς πεδίου ροπών. Αναφέρεται ότι κάθε τιμή που δίνει ως έξοδος ο πράκτορας αντιστοιχούν στο μέγεθος της ροπής που δίνεται ως εντολή σε κάθε έναν από τους έξι επενεργοποιητές.

Αναφορικά με τον σχηματισμό των νευρωνικών δικτύων, σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκε η ίδια αρχιτεκτονική για τους δράστες και για τους κριτές των δύο αλγορίθμων. Συγκεκριμένα, ο δράστης αποτελείται από τέσσερα στρώματα (συμπεριλαμβανομένων των στρωμάτων εισόδου και εξόδου) και με αριθμό κόμβων των εσωτερικών στρωμάτων 400 και 300 αντίστοιχα. Για τον σχηματισμό του κριτή χρησιμοποιήθηκαν δύο και ένα στρώμα (πέραν του στρώματος εισόδου) για την επεξεργασία των εισόδων του πεδίου καταστάσεων και ενεργειών αντίστοιχα, ενώ την ένωση τους σε ένα κοινό στρώμα ακολουθεί ένα τελικό στρώμα με μοναδική τιμή εξόδου την αξία (Q-value) της συνάρτησης αποτίμησης-ενέργειας.

Κοινή γραμμή ακολουθήθηκε και στον καθορισμό των υπερπαραμέτρων, όπου ως επιλυτής χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Adam και ο ρυθμός μάθησης ορίστηκε ως 0,001. Αντίστοιχα ορίστηκε και η τιμή του ρυθμού έκπτωσης ίση με 0,99.

8.5 Εκπαίδευση

Η εκπαίδευση του πράκτορα πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τα εξής χαρακτηριστικά:

Επεξεργαστής	AMD FX™-8350 Eight-core 4.00 GHz
Εγκατεστημένη RAM	8.0 GB
Τύπος συστήματος	λειτουργικό σύστημα 64-bit, επεξεργαστής τεχνολογίας x64
Κάρτα γραφικών	ASUS Radeon RX 560 Series

Η εναρκτήρια θέση του μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 8.2. Σημειώνεται ότι πέρα από την μικρή κλίση των γονάτων, η οποία επηρεάζει και την κλίση σε ισχία και αστραγάλους, όλες οι υπόλοιπες παράμετροι που σχετίζονται και με τον προσανατολισμό του κορμού, καθώς και με την γραμμική και την γωνιακή ταχύτητα των αρθρώσεων ορίστηκαν ίσες με το μηδέν.

Ως κριτήριο τερματισμού της εκπαίδευσης ορίστηκε η ολοκλήρωση 2000 επεισοδίων, όπου η τιμή του μέγιστου αριθμού χρονικών βημάτων εντός του κάθε επεισοδίου είναι ίση με 400. Για τον χρόνο εκπαίδευσης αναφέρεται ότι η μέση τιμή για τον DDPG είναι τα 42320 sec (περίπου 12 ώρες), ενώ για τον TD3 είναι τα 50410 sec (περίπου 14 ώρες).

8.6 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

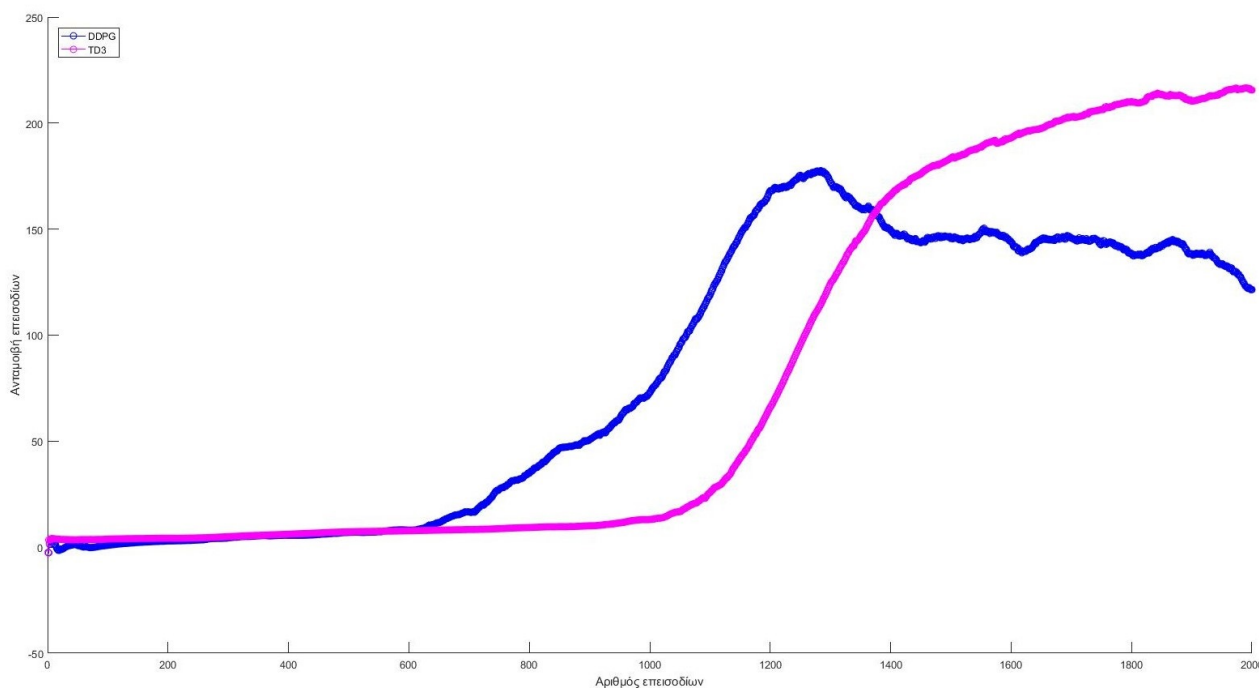
Για την εκπαίδευση του πράκτορα πραγματοποιήθηκαν συνολικά 40 προσομοιώσεις, 20 για κάθε έναν αλγόριθμο. Στον Πίνακα 8.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μέση ανταμοιβή που έλαβε ο πράκτορας καθ' όλη την διάρκεια των επαναλήψεων με διάστημα εμπιστοσύνης 95%, ξεχωριστά για τον κάθε αλγόριθμο.

Επιπλέον στο Σχήμα 8.3 παρουσιάζεται η μέση ανταμοιβή που έλαβε ο πράκτορας ως συνάρτηση του αριθμού των επεισοδίων. Παρατηρείται ότι ο DDPG οδηγεί πιο γρήγορα στην συγκέντρωση υψηλών ανταμοιβών, ωστόσο μετά το πέρας των 1200 επαναλήψεων φαίνεται ότι αγγίζει μια μέγιστη τιμή ανταμοιβής,

Αλγόριθμος	Μέση Ανταμοιβή	Μέσος Αριθμός Βημάτων
TD3	177,42 ± 32,7	156 ± 24
DDPG	158,87 ± 14,35	185 ± 10

Πίνακας 8.1: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του DDPG και του TD3

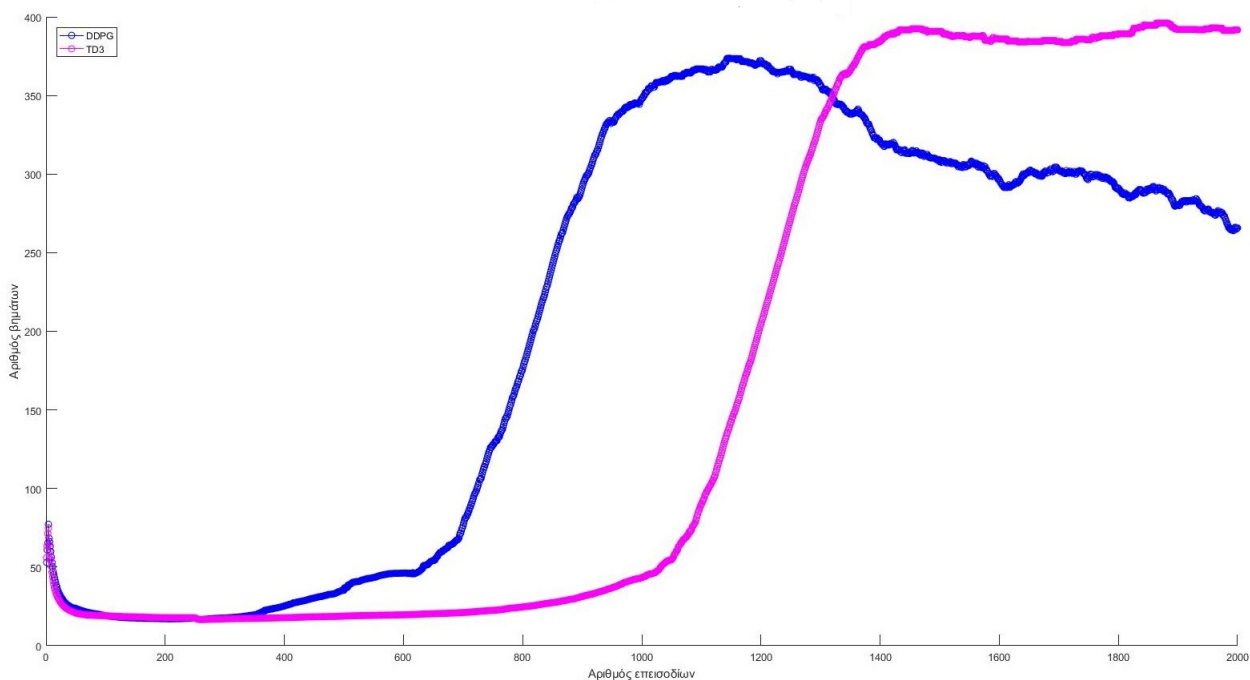
την οποία μάλιστα εγκαταλείπει όλο και πιο πολύ καθώς το πλήθος των επαναλήψεων αυξάνεται. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο πρόβλημα της υπερεκτίμησης των τιμών (Q-values) της συνάρτησης αποτίμησης-ενέργειας. Αντίθετα, ο TD3 φαίνεται ότι ξεπερνάει αυτό το πρόβλημα και τελικά οδηγεί στην συγκέντρωση πολύ υψηλότερων ανταμοιβών σε σχέση με τον DDPG. Ωστόσο, τονίζεται ότι περνάει αρκετά μακρά περίοδο, η οποία μάλιστα ξεπερνάει το μέσο των επαναλήψεων που έχουν οριστεί, έως ότου δείξει κάποια ουσιαστική πρόοδο στο κομμάτι της συγκέντρωσης ανταμοιβών. Η ανάγκη περισσότερου χρόνου για την εκπαίδευση των δικτύων του TD3 δικαιολογείται από το πρόσθετο υπολογιστικό φόρτο που επιφέρει η προσθήκη του δεύτερου δικτύου-κριτή μαζί με τον αντίστοιχο κριτή-στόχο. Το σημείο αυτό είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον, καθώς αποδεικνύει ότι μία αισθητή μείωση του αριθμού των επαναλήψεων θα οδηγούσε σε εντελώς διαφορετικά συμπεράσματα, καθώς μέχρι και την καμπή περί των 1200 επαναλήψεων φαίνεται ότι ο DDPG υπερτερεί του TD3, γεγονός που σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 8.3 δεν ισχύει.



Σχήμα 8.3: Σύγκριση των DDPG και TD3 ως προς το μέση τιμή ανταμοιβών ανά επεισόδιο

Ωστόσο, οι διαπιστώσεις αυτές που αφορούν την συγκέντρωση ανταμοιβών έρχονται σε αντίθεση με την πληροφορία που παρέχει ο Πίνακας 8.1 και αφορά τον μέσο αριθμό βημάτων που εκτελέστηκαν ανά επεισόδιο. Θα μπορούσε πολύ εύκολα να υποθεθεί ότι η υψηλή συγκέντρωση ανταμοιβών για τον TD3 οφείλεται και στην εκτέλεση περισσότερων βημάτων από πλευράς του, γεγονός όμως που σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 8.1 δεν ισχύει. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα του Σχήματος 8.4, για τη συμπεριφορά αυτή ευθύνεται η αργοπορημένη έναρξη συγκέντρωσης υψηλών ανταμοιβών για τους λόγους που προαναφέρθηκαν. Από την στιγμή όμως που ο TD3 αρχίζει να εκτελεί όλο και περισσότερα βήματα φαίνεται ξεκάθαρα ότι υπερτερεί, γεγονός που ενισχύεται και λόγω της μειούμενης απόδοσης του DDPG. Πάνω στη βάση αυτή λοιπόν βγαίνει το συμπέρασμα ότι ο αριθμός των βημάτων που εκτελέστηκαν, και κατ' επέκταση η απόσταση που διανύθηκε, δεν αποτελεί ασφαλές κριτήριο για τον έλεγχο της ποιότητας των αποτελεσμάτων, αποτελώντας τον προάγγελο για την αναζήτηση πιο αξιόπιστων μεθόδων.

Προς αυτήν την κατεύθυνση κινείται και η εξέταση των αποτελεσμάτων η οποία προσέγγισε το ζήτημα από την ιατρική του διάσταση. Δεν πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι, ανεξάρτητα από την ταχύτητα της

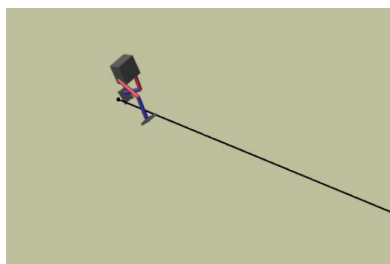


Σχήμα 8.4: Σύγκριση των DDPG και TD3 ως προς τον μέσο αριθμό βημάτων ανά επεισόδιο

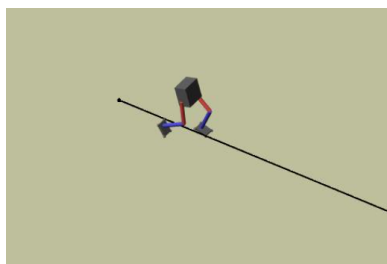
εκπαίδευσης και το πλήθος των βημάτων που κατάφερε να εκτελέσει, ο εξωσκελετός είναι μία συσκευή η οποία σχεδιάστηκε για να φιλοξενήσει έναν άνθρωπο και να τον βοηθήσει στην προσπάθειά του να περπατήσει σε ευθεία πορεία χωρίς την χρήση βακτηριών. Επομένως, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε μία μέθοδος που προσεγγίζει τον τρόπο με τον οποίο οι επαγγελματίες υγείας πραγματοποιούν την ανάλυση βάδισης.

Η ανάλυση βάδισης δεν είναι τίποτα άλλο από μία εξέταση κατά την οποία ο γιατρός ή ο φυσικοθεραπευτής παρατηρεί τον τρόπο με τον οποίο ο εξεταζόμενος περπατάει, καταλήγοντας έτσι σε συμπεράσματα για την φυσική του κατάσταση (αν πρόκειται για αθλητή) ή την κατάσταση της υγείας του (αν πρόκειται για ασθενή). Ο πιο διαδεδομένος τρόπος είναι η παρατήρηση με βιντεοσκόπηση. Κατά τη μέθοδο αυτή ο εξεταζόμενος εκτελεί μερικά βήματα σε ευθεία πορεία, ενώ η βάδιση του καταγράφεται σε βίντεο. Η εν λόγω καταγραφή γίνεται σε πέραν της μίας όψεως -συνήθως μπροστινή και πλάγια όψη, ώστε να μπορεί ο εξεταστής να την παρακολουθήσει όσες φορές χρειαστεί έως ότου καταλήξει σε ασφαλές συμπέρασμα.

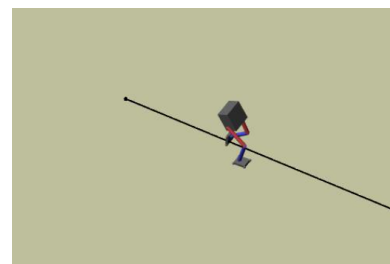
Προχωρώντας πιο βαθιά στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, αναφέρεται ότι μετά το πέρας της εκπαίδευσης, βιντεοσκοπήθηκε (μέσω του Matlab) η πορεία που ακολούθησε το μοντέλο του εξωσκελετού για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις. Η λήψη των βίντεο πραγματοποιήθηκε από τέσσερις διαφορετικές όψεις στις οποίες συγκαταλέγονται η μπροστινή, η πλαινική, η τριμετρική και η κατακόρυφη. Στα Σχήματα 8.5-8.11 φαίνονται τρία στιγμιότυπα από την κάθε όψη, ώστε να αποκτηθεί μία πιο καθαρή αντίληψη της μεθόδου.



(α') 1ο στιγμιότυπο

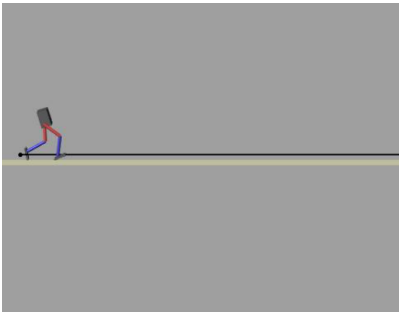


(β') 2ο στιγμιότυπο

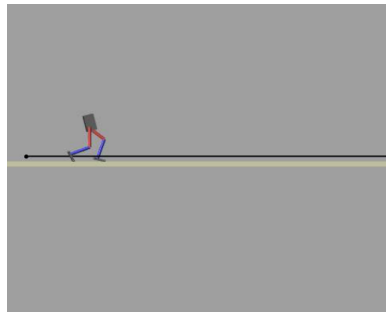


(γ') 3ο στιγμιότυπο

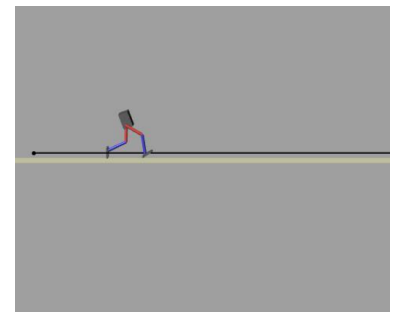
Σχήμα 8.5: Τριμετρική όψη για την αξιολόγηση του TD3



(α') 1ο στιγμιότυπο

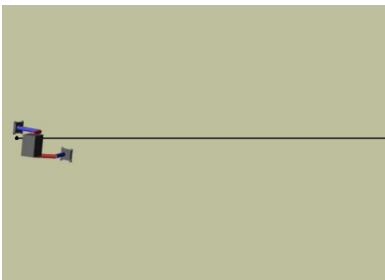


(β') 2ο στιγμιότυπο

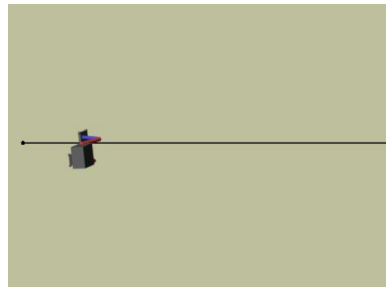


(γ') 3ο στιγμιότυπο

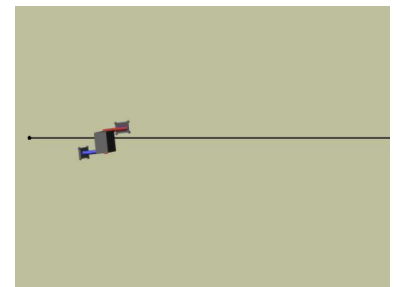
Σχήμα 8.6: Πλάγια όψη για την αξιολόγηση του TD3



(α') 1ο στιγμιότυπο

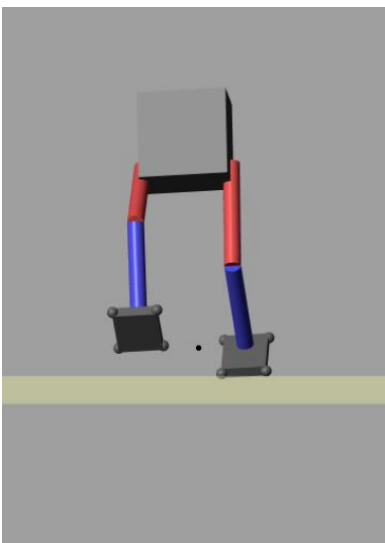


(β') 2ο στιγμιότυπο

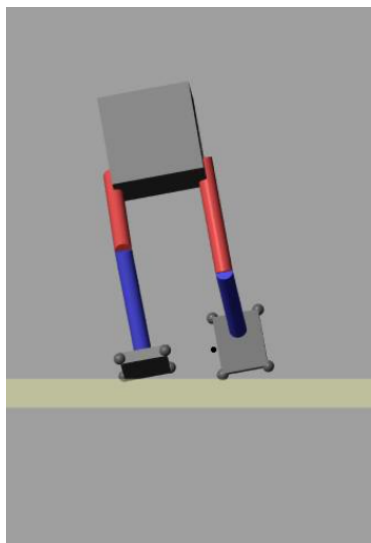


(γ') 3ο στιγμιότυπο

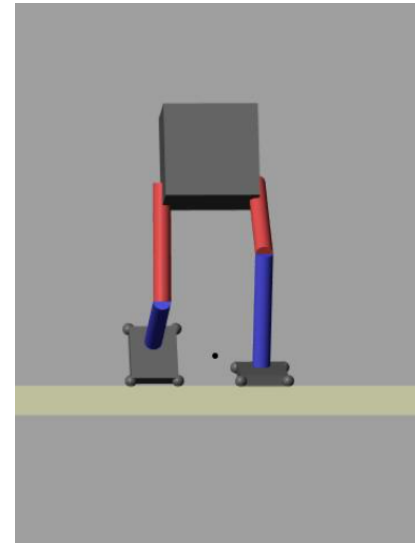
Σχήμα 8.7: Κατακόρυφη όψη για την αξιολόγηση του TD3



(α') 1ο στιγμιότυπο

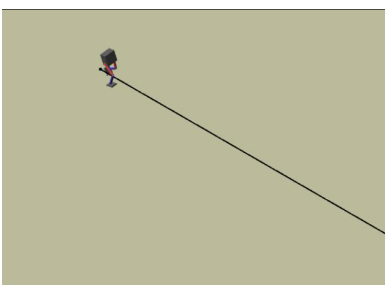


(β') 2ο στιγμιότυπο

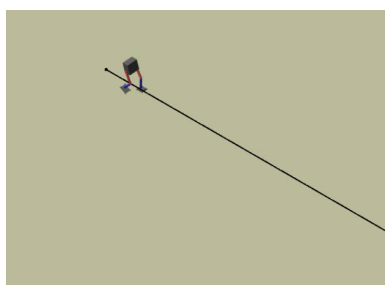


(γ') 3ο στιγμιότυπο

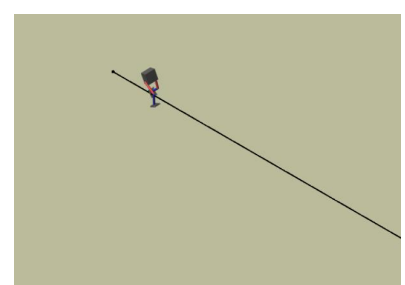
Σχήμα 8.8: Μπροστινή όψη για την αξιολόγηση του TD3



(α') 1ο στιγμιότυπο

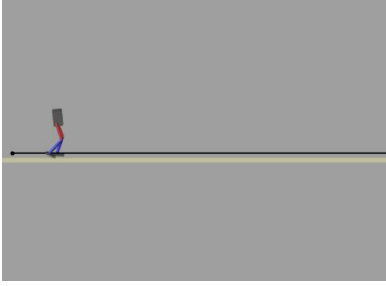


(β') 2ο στιγμιότυπο

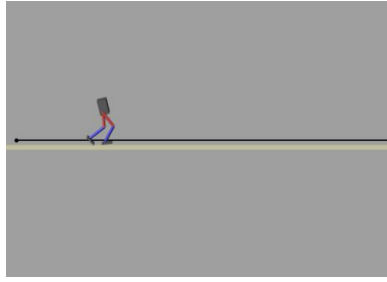


(γ') 3ο στιγμιότυπο

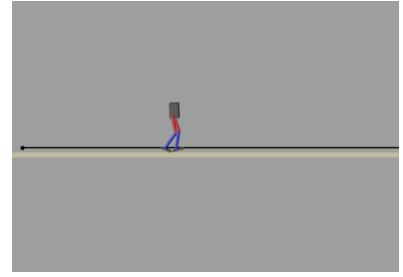
Σχήμα 8.9: Τριμετρική όψη για την αξιολόγηση του DDPG



(α') 1ο στιγμιότυπο

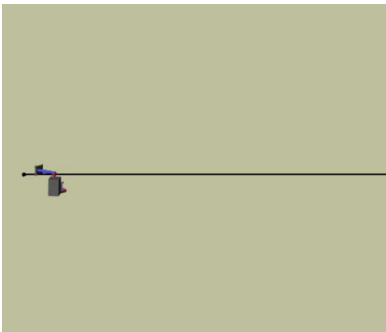


(β') 2ο στιγμιότυπο

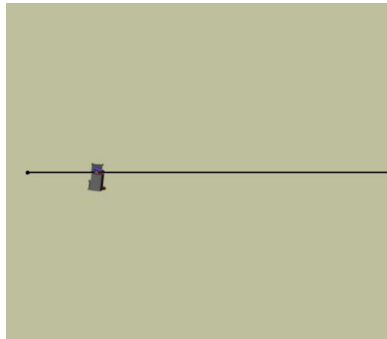


(γ') 3ο στιγμιότυπο

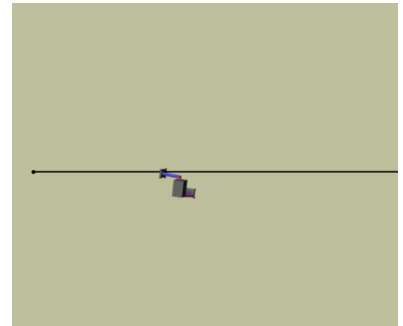
Σχήμα 8.10: Πλάγια όψη για την αξιολόγηση του DDPG



(α') 1ο στιγμιότυπο

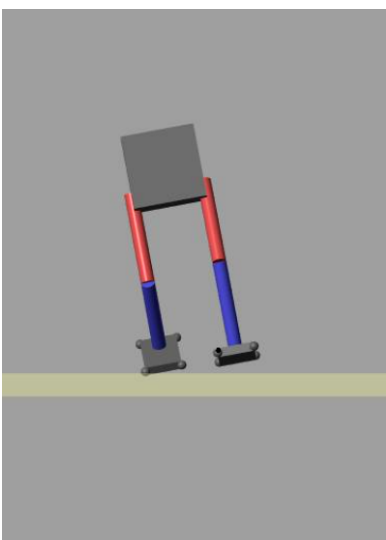


(β') 2ο στιγμιότυπο

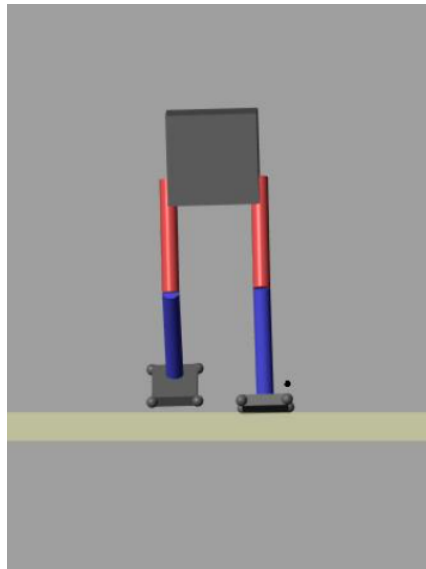


(γ') 3ο στιγμιότυπο

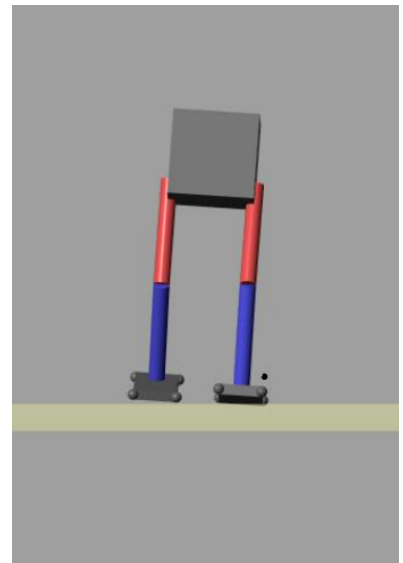
Σχήμα 8.11: Κατακόρυφη όψη για την αξιολόγηση του DDPG



(α') 1ο στιγμιότυπο



(β') 2ο στιγμιότυπο



(γ') 3ο στιγμιότυπο

Σχήμα 8.12: Μπροστινή όψη για την αξιολόγηση του DDPG

Όνομα και Συντομογραφία	Παράμετρος που εξετάζει
Ταχύτητα βάδισης (ΤΒ)	αν η ταχύτητα βάδισης είναι φυσιολογική
Συνέπεια μοτίβου (ΣΜ)	την συνέπεια του μοτίβου βάδισης
Αμοιβαιότητα βημάτων (ΑΒ)	την φυσιολογική εναλλαγή μεταξύ των βημάτων
Ισορροπία (Ισ)	την ισορροπία του εξωσκελετού
Σταθερότητα (Στ)	την έλλειψη αναπήδησης κατά τη βάδιση
Μήκος διασκελισμού (ΜΔ)	αν το μήκος των βημάτων είναι φυσιολογικό
Επαφή με το έδαφος (ΕΕ)	αν και τα δύο πέλματα ακουμπούν στο έδαφος
Λυγισμός γονάτων (ΛΓ)	αν η κάμψη των γονάτων είναι φυσιολογική
Κλίση ως προς το διάμεσο επίπεδο (ΚΔ)	αν η κλίση του κορμού ως προς την πλάγια όψη είναι φυσιολογική
Κλίση ως προς το εγκάρσιο επίπεδο (ΚΕ)	αν η κλίση του κορμού ως προς την μπροστινή όψη είναι φυσιολογική
Ευθεία πορεία (ΕΠ)	αν διατηρείται η βάδιση σε ευθεία πορεία
Συνολική απόδοση (ΣΑ)	είναι η μέση τιμή των ανωτέρω παραμέτρων

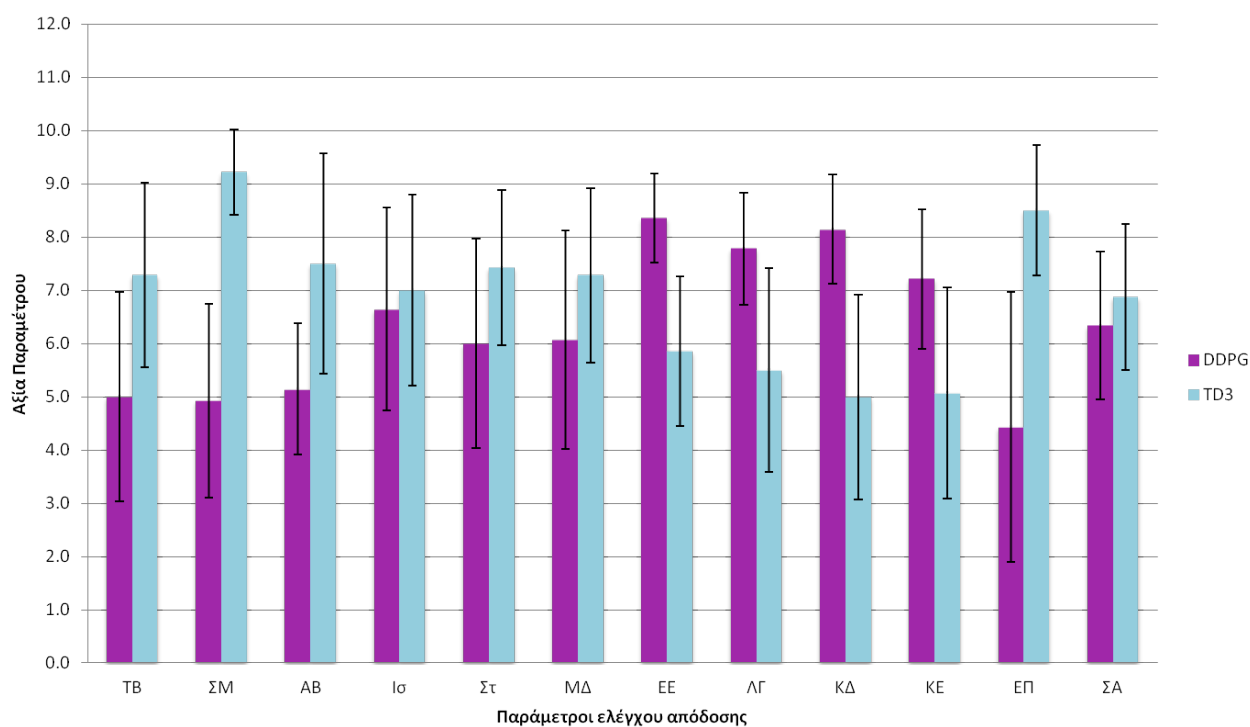
Πίνακας 8.2: Ορισμός και περιγραφή των 11 παραμέτρων

Στη συνέχεια, τα οκτώ βίντεο διανεμήθηκαν σε 25 εθελοντές, οι οποίοι με βάση αυτά κλήθηκαν να απαντήσουν ένα ερωτηματολόγιο 11 ερωτήσεων. Μέσω των ερωτήσεων οι εθελοντές καλούνταν να αξιολογήσουν την ποιότητα της εκτελούμενης βάδισης σε μία κλίμακα από το 1 έως το 10, όπου το 10 εκφράζει την απολύτως φυσιολογική κίνηση. Οι 11 παράμετροι που ελέγχθηκαν παρουσιάζονται ονομαστικά στον Πίνακα 8.2. Επιπλέον, στο Σχήμα 8.13 παρουσιάζεται η μέση αξία κάθε μίας από αυτές, καθώς και η μέση αξία της συνολικής τους απόδοσης.

Παρατηρώντας το Σχήμα 8.13 φαίνεται ότι δυνητικά και οι δύο αλγόριθμοι εμφανίζουν ικανοποιητική απόδοση και ότι το πλεονέκτημα του ενός έναντι του άλλου εξαρτάται από το ποια παράμετρος εξετάζεται κάθε φορά και το κατά πόσο κρίνεται σημαντική. Αν το ζητούμενο είναι η διασφάλιση ορθής στάσης σώματος και σταθερής επαφής με το έδαφος, τότε είναι φανερό ότι ο DDPG υπερτερεί. Αντίθετα, αν η προσοχή εστιαστεί σε παραμέτρους όπως η ταχύτητα, το μήκος και η σταθερότητα των βημάτων, η διατήρηση του ίδιου μοτίβου καθ' όλη την διάρκεια της βάδισης και η διατήρηση της επιθυμητής (ευθείας) πορείας τότε πρέπει να προτιμηθεί ο TD3. Όσον αφορά την ισορροπία σημειώνεται πως και οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια απόδοση, με τον TD3 να προηγείται ελάχιστα. Παρατηρώντας την τελευταία στήλη του διαγράμματος, φαίνεται ότι ο TD3 υπερτερεί συνολικά του DDPG με τιμή $6,88 \pm 1,37$ έναντι του $6,34 \pm 1,39$ -το διάστημα εμπιστοσύνης και για τις δύο περιπτώσεις ορίστηκε στο 95%.

Ως γενικό σχόλιο με βάση την συνολική απόδοση παρατηρείται, ότι παρά την εξασφάλιση ικανοποιητικής απόδοσης που περνάει το μέσο (το όριο του 5) και για τις δύο μεθόδους, υπάρχει ακόμα αρκετό έδαφος για βελτίωση πριν την ενσωμάτωση στην πραγματική συσκευή. Αυτό συμβαίνει διότι η συνολική μέση τιμή και των δύο μεθόδων δεν ξεπερνάει το 7, την στιγμή που για να θεωρηθεί μία απόδοση ασφαλής για εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες πρέπει να ξεπερνάει το 9 στο σύνολο, ενώ καμία από τις επιμέρους παραμέτρους δεν πρέπει να βρίσκεται κάτω από το 8. Ο λόγος για την επιβολή τόσο αυστηρών ορίων έγκειται στο ότι πρόκειται για ιατρική συσκευή η οποία έρχεται σε στενή επαφή με το ανθρώπινο σώμα. Σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή επρόκειτο για ένα απλό δίποδο ρομπότ που επιχειρεί αυτόνομη βάδιση, τα κριτήρια θα ήταν τελείως διαφορετικά και η απόδοση θα θεωρούνταν πολύ πιο υψηλή. Ακόμα και υπό αυτές τις συνθήκες ιδιαιτέρως ενθαρρυντικό στοιχείο αποτελεί η υπέρβαση του ορίου του 8 από δύο παραμέτρους για την κάθε μέθοδο, από τις οποίες η μία υπερβαίνει το 9 ως απόρροια της εφαρμογής του TD3.

Σύγκριση Απόδοσης



Σχήμα 8.13: Σύγκριση απόδοσης των DDPG και TD3 ως προς τις 11 παραμέτρους της ανάλυσης βάδισης

Αλγόριθμος	DDPG	TD3
Ταχύτητα (TB)	5.00 ± 1,96	7.29 ± 1,73
Συνέπεια μοτίβου (ΣΜ)	4.93 ± 1,82	9.21 ± 0,80
Αμοιβαιότητα (ΑΒ)	5.14 ± 1,23	7.50 ± 2,07
Ισορροπία (Ισ)	6.64 ± 1,91	7.00 ± 1,80
Σταθερότητα (Στ)	6.00 ± 1,96	7.43 ± 1,45
Μήκος διασκελισμού (ΜΔ)	6.07 ± 2,06	7.29 ± 1,64
Επαφή με το έδαφος (ΕΕ)	8.36 ± 0,84	5.86 ± 1,41
Λυγισμός γονάτων (ΛΓ)	7.79 ± 1,05	5.50 ± 1,91
Κλίση ως προς το διάμεσο (ΚΔ)	8.14 ± 1,03	5.00 ± 1,92
Κλίση ως προς το εγκάρσιο (ΚΕ)	7.21 ± 1,31	5.07 ± 1,98
Ευθεία πορεία (ΕΠ)	4.43 ± 2,53	8.50 ± 1,22
Συνολική απόδοση (ΣΑ)	6.34 ± 1,39	6.88 ± 1,37

Πίνακας 8.3: Ορισμός και περιγραφή των 11 παραμέτρων

8.7 Σύνοψη

Η ανάγκη αποδέσμευσης του πιλότου από την χρήση βακτηριών αποτέλεσε την αφορμή για τον σχεδιασμό ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου, το οποίο βασίζεται στην εκπαίδευση της πολιτικής ενός πράκτορα με στόχο την επίτευξη αυτόνομης βάρδισης. Απώτερος σκοπός είναι η ενσωμάτωση της εκπαιδευμένης πολιτικής στον εξωσκελετό είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυαστικά με τον αντίστοιχο αλγόριθμο ενισχυτικής μάθησης για περεταίρω εκπαίδευση σε πραγματικές συνθήκες. Ωστόσο, το κομμάτι αυτό ξεπερνάει τους σκοπούς αυτής της εργασίας.

Για την προσομοίωση του εξωσκελετού χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο, το οποίο ωστόσο λαμβάνει υπ' όψιν του την κατανομή της μάζας του σώματος του πιλότου. Οι δύο αλγόριθμοι που επιλέχθηκαν για την εκπαίδευση είναι ο DDPG και ο TD3, η αρχιτεκτονική και οι υπερπαράμετροι των οποίων καθορίστηκαν με τον ίδιο τρόπο.

Επιπλέον, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ακολουθήθηκαν δύο προσεγγίσεις, από τις οποίες η μία προσεγγίζει το θέμα από την υπολογιστική του σκοπιά, ενώ η δεύτερη έχει προεκτάσεις και στο κομμάτι της κινησιολογίας του ανθρώπινου σώματος. Σύμφωνα με την πρώτη ο TD3 φαίνεται να εμφανίζει υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τον DDPG για μεγάλο αριθμό επαναλήψεων τόσο από άποψης συλλογής ανταμοιβών όσο και σε αριθμό βημάτων που εκτελέστηκαν. Η εξέταση της ποιότητας των αποτελεσμάτων με τρόπο που προσεγγίζει την ανάλυση βάρδισης που πραγματοποιείται από τους επαγγελματίες υγείας, φανερώνει και πάλι ότι ο TD3 υπερέχει ελαφρώς του DDPG, καταδεικνύοντας τον έτσι ως τον αλγόριθμο που θα δεχθεί περεταίρω διερεύνηση για την βελτίωση των αποτελεσμάτων του έως ότου αγγίξει τα όρια ασφαλούς εφαρμογής στην πραγματική συσκευή.

Κεφάλαιο 9

Σύνοψη και Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Συμπεράσματα

Η Κάκωση του Νωτιαίου Μυελού (KNM) αποτελεί μία από τις κυριότερες αιτίες απώλειας της κινητικότητας των κάτω άκρων, επιφέροντας σημαντικές επιπτώσεις τόσο για την υγεία όσο και για την κοινωνική και οικονομική πραγματικότητα του ατόμου που ζει με αυτήν. Η χρήση των ρομποτικών εξωσκελετών φιλοδοξεί να δώσει μία λύση στο πρόβλημα των δευτεροπαθών επιπτώσεων της KNM και να συμβάλλει στην υποβοήθηση της καθημερινότητας και στην γενικότερη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Ήδη τα πρώτα αποτελέσματα της ενσωμάτωσής τους στα προγράμματα αποκατάστασης ατόμων με κινητικές δυσκολίες είναι ιδιαιτέρως ενθαρρυντικά. Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα ρομποτικού εξωσκελετού κάτω άκρων, με αφορμή την συμμετοχή στον παγκόσμιο διαγωνισμό «Cybathlon». Ο διαγωνισμός αυτός αποτελεί ένα είδος παραολυμπιάδας, όπου άτομα με αναπηρίες αγωνίζονται στην αποτελεσματικότερη και ταχύτερη εκτέλεση κοινών δραστηριοτήτων της καθημερινής ζωής. Οι κυριότερες παράμετροι που ελήφθησαν υπ' όψιν για τον σχεδιασμό του ρομποτικού εξωσκελετού αφορούν την ασφάλεια κατά την εφαρμογή και την χρήση, την προσαρμογή στα ιδιαίτερα σωματομετρικά χαρακτηριστικά του πιλότου, την μείωση βάρους και κόστους, καθώς και την ευκολία χειρισμού, ενώ οι λειτουργίες που επιτελεί αφορούν την εκτέλεση αργού, γρήγορου και μονού βηματισμού, την ανάβαση και κατάβαση σκάλας και την μετάβαση από όρθια σε καθήμενη θέση και το αντίστροφο.

Με γνώμονα την διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας του εξωσκελετού, το κεφάλαιο 4 περιγράφει τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την ανάλυση αντοχής της μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η απαλοιφή επουσιωδών στοιχείων της γεωμετρίας προηγήθηκε του σχηματισμού του πλέγματος, ενώ για την επίλυση του χρησιμοποιήθηκε η τεχνική του «*r-adaptive meshing*». Για την ανάλυση αντοχής εξετάστηκαν επτά διαφορετικά σενάρια, τα οποία ως επί το πλείστον αντιστοιχούν σε ακραίες περιπτώσεις φόρτισης. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους έδειξε ότι η υψηλότερη συγκέντρωση τάσεων αναπτύσσεται κατά το έκτο σενάριο (μετάβαση σε καθήμενη στάση) και συγκεκριμένα στο κομμάτι που αντιστοιχεί στο πέλμα του εξωσκελετού. Η τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης στην περιοχή αυτήν είναι σημαντικά μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού (282,5 MPa έναντι 310 MPa αντίστοιχα), ενώ το μέγεθος των μέγιστων παραμορφώσεων δεν ξεπερνά σε καμία περίπτωση το 0,2%, γεγονός που διασφαλίζει την ασφαλή κατασκευή του εξωσκελετού.

Κύριο χαρακτηριστικό των περισσότερων διαθέσιμων μοντέλων, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται και ο «Hermes», είναι η εξάρτηση από την παρουσία βακτηριών για την διατήρηση της ισορροπίας κατά την βάδιση. Έχοντας ως στόχο την απαλλαγή του εξωσκελετού από την ύπαρξη πρόσθετων στηριγμάτων, στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται ένα σύστημα ελέγχου βασιζόμενο στις αρχές της βαθιάς ενισχυτικής μάθησης, όπως αυτές περιγράφονται μεταξύ των κεφαλαίων 5 έως 7. Για την προσομοίωση του εξωσκελετού χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο, που έλαβε όμως υπ' όψιν και την μάζα του πιλότου, ενώ για την εκπαίδευση του πράκτορα χρησιμοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι DDPG και TD3. Από την εξέταση των αποτελεσμάτων ενός συνόλου 40.000 επαναλήψεων για τον κάθε αλγόριθμο, προκύπτει ότι ο TD3 υπερέρχει του DDPG ως προς το σύνολο της μέσης συλλεχθείσας ανταμοιβής κατά ένα ποσοστό που προσεγγίζει το 12%. Η περαιτέρω αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με μέθοδο που παρομοιάζει την ανάλυση βάδισης έδειξε ότι ο TD3 εξακολουθεί

να διατηρεί το συγκριτικό του πλεονέκτημα, αυτήν την φορά με γνώμονα την ποιότητα και του πρότυπου βάρδισης που ακολουθεί. Συμπερασματικά αναφέρεται ότι, παρ' όλο που υπάρχει ακόμα έδαφος για επιπλέον διερεύνηση της προτεινόμενης μεθόδου, φαίνεται ότι η μελλοντική ενσωμάτωση ενός TD3 πράκτορα στην κεντρική μονάδα ελέγχου του εξωσκελετού είναι μία υποσχόμενη πρακτική, η οποία ακόμα και σε αρχικό στάδιο συνοδεύεται από ικανοποιητική απόδοση.

Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Ως προς το κομμάτι του σχεδιασμού του εξωσκελετού μία πρόταση θα ήταν σε πρώτο στάδιο η ενσωμάτωση άλλων δύο επενεργοποιητών στις αρθρώσεις των αστραγάλων και έπειτα η ενσωμάτωση άλλων δύο στο ύψος των ισχίων, ούτως ώστε να εξασφαλίζονται περισσότεροι βαθμοί ελευθερίας και η παραγόμενη κίνηση να πλησιάζει περισσότερο την φυσιολογική κίνηση των κάτω άκρων.

Προς την ίδια κατεύθυνση κινείται και η πρόταση για αύξηση της λειτουργικότητας της συσκευής μέσα από την μελέτη επιπλέον κινήσεων, όπως για παράδειγμα το βαθύ κάθισμα για ανόρθωση αντικειμένου που έχει πέσει στο έδαφος.

Αναφορικά με το κομμάτι της ανάλυσης αντοχής προτείνεται η δυναμική προσομοίωση του πλαισίου, ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά του καθ' όλη την διάρκεια της εκτέλεσης των κινήσεων που πραγματοποιεί και όχι μόνο για συγκεκριμένο αριθμό σεναρίων.

Εστιάζοντας στην δομή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου παρατηρείται ότι είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να εκτελεί κίνηση σε ευθεία πορεία. Σε περίπτωση που ο πιλότος επιθυμεί να ακολουθήσει κάποιου άλλου είδους πορεία, όπως για παράδειγμα να στρίψει δεξιά ή να κάνει αναστροφή, δεν υπάρχει κάποιος τρόπος να το επικοινωνήσει με το σύστημα. Επομένως μία πρόταση θα ήταν η επέκταση του σχεδιασμού του συστήματος, ώστε να μπορεί να δεχθεί ένα σήμα αναφοράς που θα δηλώνει την πρόθεση του πιλότου να κινηθεί προς την κατεύθυνση που επιθυμεί. Το σήμα αυτό θα συγκρίνεται με την πραγματική θέση του εξωσκελετού μέσω μιας συνάρτησης σφάλματος. Φυσικά μια τέτοια αλλαγή θα σήμαινε και τον επαναπροσδιορισμό ορισμένων από τα υπάρχοντα στοιχεία, όπως η συνάρτηση επιβράβευσης στους όρους της οποίας πρέπει να συμπεριληφθεί και η ανταμοιβή που σχετίζεται με την μείωση του σφάλματος που αναφέρθηκε.

Τέλος, και εφόσον εξασφαλιστεί η επάρκεια του σε περιβάλλον προσομοίωσης, προτείνεται η ενσωμάτωση του συστήματος ενισχυτικής μάθησης στην τελική κατασκευή του εξωσκελετού. Η πρακτική αυτή θα μπορούσε να ενισχυθεί και με την ένταξη συστημάτων για την ανίχνευση εμποδίων, όπως κάμερες ή lidar. Τονίζεται ότι μία τέτοια προσθήκη θα επέφερε αλλαγές και στην αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν, προκειμένου να μπορούν να επεξεργαστούν τον μεγάλο όγκο πληροφοριών που θα μπορούσε να καταγράψει για παράδειγμα μία κάμερα.

Βιβλιογραφία

- [1] Chen, B., Zhong, C., Zhao, X., Ma, H., Guan, X., Li, X., Liang, F., Cheng, J., Qin, L., Law, S. και Liao, W. *A wearable exoskeleton suit for motion assistance to paralysed patients*. Journal of Orthopaedic Translation, 11:7-18, 2017.
- [2] World Health Organization. *World report on disability*. WHO Press, Geneva, Switzerland, 2013.
- [3] World Health Organization και The International Spinal Cord Society. *International Perspectives On Spinal Cord Injury*. WHO Press, Geneva, Switzerland, 2013.
- [4] Ayad, S., Ayad, M., Megueni, A., Spaich, E. και Struijk, L. *Toward Standardizing the Classification of Robotic Gait Rehabilitation Systems*. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 12:138-153, 2019.
- [5] Τσαγκουριάς, Μ. Κ. *Τραυματικές Βλάβες του Νωτιαίου Μυελού, Παθοφυσιολογία - Επιπλοκές*. [Στο Θέμα Αιμοδυναμικής και Εντατικής Ιατρικής]. ΕΑΕΙΒΕ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 1995.
- [6] Sezer, N. *Chronic complications of spinal cord injury*. World Journal of Orthopedics, 6(1):24, 2015.
- [7] Krebs, H., Ferraro, M., Buerger, S., Newbery, M., Makiyama, A., Sandmann, M., Lynch, D., Volpe, B. και Hogan, N. *Rehabilitation robotics: pilot trial of a spatial extension for MIT-Manus*. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 1(1):5, 2004.
- [8] Jayaraman, A., Marinov, B., Singh, Y., Burt, S. και Rymer, W. Z. *Chapter 15 - Current Evidence for Use of Robotic Exoskeletons in Rehabilitation*. [Στο *Wearable Robotics*]. Academic Press, 2020.
- [9] Cybathlon – moving people and technology,
<https://cybathlon.ethz.ch/en/>
- [10] Jayaraman, A., Marinov, B., Singh, Y., Burt, S. και Rymer, W. Z. *Spinal Cord*. MSD Manual Consumer Version, 2018.
- [11] Who.int: Spinal Cord Injury ,
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury>
- [12] Nscisc: National Spinal Cord Injury Statistical Center,
<https://www.nscisc.uab.edu/Public/Facts%20and%20Figures%20-%202018.pdf>
- [13] Asia-spinalinjury: National Spinal Cord Injury Statistical Center
<https://asia-spinalinjury.org>
- [14] Heinemann, A., Jayaraman, A., Mummidisetty, C., Spraggins, J., Pinto, D., Charlifue, S., Tefertiller, C., Taylor, H., Chang, S., Stampas, A., Furbish, C. και Field-Fote, E. *Experience of Robotic Exoskeleton Use at Four Spinal Cord Injury Model Systems Centers*. Journal of Neurologic Physical Therapy, 42(4):256-267, 2018.
- [15] elire: Ρευματικές Παθήσεις - Οστεοπόρωση,
<http://www.elire.gr>
- [16] Goldman, S. *Health and economic benefits of physical activity for patients with spinal cord injury*. ClinicoEconomics and Outcomes Research, 8:551-558, 2016.

- [17] Gorgey, A. *Robotic exoskeletons: The current pros and cons*. World Journal of Orthopedics, 9(9):112-119, 2018.
- [18] Gorgey, A., Sumrell, R. και Goetz, L. *44 - Exoskeletal Assisted Rehabilitation After Spinal Cord Injury*. [Στο *Atlas of Orthoses and Assistive Devices*] Academic Press, 2019
- [19] Esquenazi, A., Talaty, M., Packel, A. και Saulino, M. *The ReWalk Powered Exoskeleton to Restore Ambulatory Function to Individuals with Thoracic-Level Motor-Complete Spinal Cord Injury*. American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation, 91(11):911-921, 2012.
- [20] Onose, G., Cârdei, V., Crăciunoiu, Ş., Avramescu, V., Oprea, I., Lebedev, M. και Constantinescu, M. *Mechatronic Wearable Exoskeletons for Bionic Bipedal Standing and Walking: A New Synthetic Approach*. Frontiers in Neuroscience, 10:343, 2016.
- [21] Gardner, A., Potgieter, J. και Noble, F. *A review of commercially available exoskeletons' capabilities*. 2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP), 1-5, 2017.
- [22] Rewalk Robotics - More Than Walking,
<https://rewalk.com>
- [23] Ekso Bionics - Pioneers In Wearable Bionic Exoskeleton Suits Since 2005,
<https://eksobionics.com>
- [24] Indego | Powering People Forward,
<http://www.indego.com/indego>
- [25] Rex Bionics - Reimagining Rehabilitation,
<https://www.rexbionics.com>
- [26] Castellucci, I., Arezes, P. και Molenbroek, J. *Analysis of the most relevant anthropometric dimensions for school furniture selection based on a study with students from one Chilean region*. Applied ergonomics, 46, 2014.
- [27] Kalita, B., Narayan, J. και Dwivedy, S.K. *Development of Active Lower Limb Robotic-Based Orthosis and Exoskeleton Devices: A Systematic Review*. Int J of Soc Robotics, 2020.
- [28] GrabCAD: The largest online community of professional designers, engineers, manufacturers, and students.
<https://grabcad.com/>
- [29] Rider, B. *The Regularized Singularity - Computational modeling & simulation doesn't have to be boring*. 2014.
- [30] Towards data science,
<https://towardsdatascience.com>
- [31] Michelucci, U. *Applied Deep Learning: A Case-Based Approach to Understanding Deep Neural Networks*. Apress, Dübendorf, Switzerland, 2018.
- [32] Bre, F., Gimenez, J. και Fachinotti, V. *Prediction of wind pressure coefficients on building surfaces using Artificial Neural Networks*. Energy and Buildings, 158, 2017.
- [33] Richard S. Sutton και Andrew G. Barto *Reinforcement Learning: An Introduction*. MIT Press, Massachusetts, 2018.
- [34] Heess, N., TB, D., Sriram, S., Lemmon, J., Merel, J., Wayne, G., Tassa, Y., Erez, T., Wang, Z., Eslami, A., Riedmiller, M. και Silver, D. *Emergence of Locomotion Behaviours in Rich Environments*. 2017.

Παράρτημα

Βαθμολόγηση ερωτήσεων με κλίμακα από το 1 έως το 10, όπου 10 = απόλυτη συμφωνία με την ερώτηση.

1. Είναι η ταχύτητα βάρδισης φυσιολογική;
 - DDPG:
 - TD3:
2. Ακολουθείται το ίδιο μοτίβο βάρδισης καθ' όλη τη διάρκεια;
 - DDPG:
 - TD3:
3. Είναι η εναλλαγή μεταξύ των βημάτων φυσιολογική;
 - DDPG:
 - TD3:
4. Υπάρχει ισορροπία κατά τη βάρδιση;
 - DDPG:
 - TD3:
5. Η περιοδική κίνηση του κορμού ως προς το στεφανιαίο επίπεδο είναι φυσιολογική (αν υπάρχει αναπήδηση η βαθμολογία πέφτει);
 - DDPG:
 - TD3:
6. Είναι το μέγεθος του διασκελισμού φυσιολογικό;
 - DDPG:
 - TD3:
7. Πατάνε και τα δύο πέλματα (καλά) στο έδαφος;
 - DDPG:
 - TD3:
8. Είναι ο λυγισμός των γονάτων φυσιολογικός;
 - DDPG:
 - TD3:
9. Η θέση του κορμού ως προς το διάμεσο επίπεδο είναι φυσιολογική (αν υπάρχει κλίση προς τα εμπρός ή προς τα πίσω η βαθμολογία πέφτει);
 - DDPG:
 - TD3:
10. Η θέση του κορμού ως προς το εγκάρσιο επίπεδο είναι φυσιολογική (αν υπάρχει κλίση προς το πλάι η βαθμολογία πέφτει);
 - DDPG:
 - TD3:
11. Η βάρδιση πραγματοποιείται σε ευθεία γραμμή;
 - DDPG:
 - TD3:

Σχήμα 9.1: Το ερωτηματολόγιο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία