



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Αξιολόγηση συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ σε καθήκοντα  
συναρμολόγησης με χρήση εικονικής πραγματικότητας**

**Αγγελική Δημητροκάλλη**

*Επιβλέπων Καθηγητής: ΓΕΩΡΓΙΟΣ-Χ. ΒΟΣΝΙΑΚΟΣ*

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κο. Βοσνιάκο Γεώργιο Χ., καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και τη συμβολή και την καθοδήγησή του για την εκπόνηση αυτής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κο. Ναθαναήλ Δημήτριο για την καθοδήγησή του σε ζητήματα εργονομίας, αλλά και όλο το προσωπικό που εργάζεται στο Κτίριο Ξ της σχολής του ΕΜΠ για τη βοήθειά τους στην πορεία της εργασίας μου και τη συμμετοχή τους στις πειραματικές δοκιμές.*

*Ακόμη, δε θα μπορούσα να παραλείψω τις ευχαριστίες μου, από βάθος καρδιάς, προς την οικογένειά μου, που με στηρίζει και με βοηθά όλα τα χρόνια της φοιτητικής μου πορείας.*

# Περίληψη

Δεδομένου ότι η εικονική πραγματικότητα και ο αυτοματισμός έχουν προχωρήσει σημαντικά τα τελευταία χρόνια, τα πολλαπλά τους οφέλη και οι διαφορετικές χρήσεις σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον εξετάζονται όλο και περισσότερο. Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στη συνεργασία ανθρώπου - ρομπότ, όπως παρουσιάζεται στις σύγχρονες γραμμές συναρμολόγησης, από δύο διαφορετικές πτυχές: την πτυχή της κατάρτισης και την πτυχή της μελέτης εργασίας / εργονομικής αξιολόγησης.

Όσον αφορά την πτυχή της εκπαίδευσης, η χρήση της εικονικής πραγματικότητας αξιολογήθηκε αντί των παραδοσιακών μέσων κατάρτισης του βιομηχανικού προσωπικού, προκειμένου να διευκολυνθεί η ταχύτερη και ασφαλέστερη εισαγωγή των εργαζομένων σε νέο εξοπλισμό ή / και διαδικασίες.

Όσον αφορά την εργονομική αξιολόγηση των εργασιών συναρμολόγησης, μελετήθηκε η συναρμολόγηση με ρομποτική βοήθεια, προκειμένου να διερευνηθεί ποσοτικά η συνεργασία μεταξύ της ανθρώπινης εργασίας και της συμβολής των ρομπότ για καλύτερη απόδοση.

Τα παραπάνω μελετήθηκαν, παρουσιάστηκαν και εφαρμόστηκαν πάνω σε ένα σενάριο που αφορούσε τη συνεργασία ενός ανθρώπου με ένα εικονικό ρομπότ για τη συναρμολόγηση μιας πρωτότυπης κεφαλής περιέλιξης ανθρακονημάτων, αποτελούμενη από μια σειρά μηχανικών εξαρτημάτων, όπως ένα πλαίσιο, σύνολο αξόνων, τροχών, ελατηρίων κλπ.

Το εικονικό περιβάλλον κατασκευάστηκε στο Unity 3D™, ενώ το Leap Motion™ χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση της κίνησης των χεριών του χρήστη και η κάσκα εικονικής πραγματικότητας χρησιμοποιήθηκε για διάδραση με το εικονικό περιβάλλον και, σε περιορισμένο βαθμό, για πλοήγηση.

Πραγματοποιήθηκαν πολλαπλά πειράματα με κοινό φοιτητών μηχανολογίας. Η αποτελεσματικότητα της εικονικής εκπαίδευσης αξιολογήθηκε μέσω ερωτηματολογίων που απαντήθηκαν από τους συμμετέχοντες και βρέθηκε συνολικά ανώτερη από την εκπαίδευση στον πραγματικό κόσμο.

Επιπλέον, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από την εκτέλεση διαφορετικών σεναρίων συναρμολόγησης υποβλήθηκαν σε επεξεργασία για να δώσουν τους εργονομικούς δείκτες που ποσοτικοποιούν τη συνεργασία ανθρώπου - ρομπότ στα καθήκοντα συναρμολόγησης. Αυτοί οι δείκτες μπορούν να αντικατασταθούν από άλλους, εάν πρόκειται να δημιουργηθεί ένα διαφορετικό σενάριο συνεργασίας μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ.

**Λέξεις κλειδιά:** εικονική εκπαίδευση, εργονομία, ρομπότ, συναρμολόγηση, συνεργασία, εικονική πραγματικότητα.

# Abstract

As virtual reality and automation have greatly advanced in recent years, their multiple benefits and different uses in an industrial environment are increasingly under study. This thesis focuses on human - robot collaboration as exemplified in modern assembly lines from two different aspects, namely the training aspect and the work study / ergonomic assessment aspect.

As far as the training aspect is concerned, the use of virtual reality was assessed in place of traditional means of training industrial staff, in order to facilitate both faster and safer introduction of workers to new equipment and / or processes.

As far as ergonomics assessment of assembly tasks is concerned, assembling with robotic assistance was studied, in order to investigate in quantitative terms the collaboration between human labour and robot contribution towards better efficiency.

The above were studied, presented and discussed on the basis of a case study concerning collaboration of a human with a virtual robot in assembling a prototype robotic filament winding head, consisting of a number of mechanical engineering artifacts, such as a frame, number of axles, wheels, springs etc.

The virtual environment was constructed in Unity 3D™, whilst Leap Motion™ was used to track user's hands and a Head Mounted Display was exploited for immersion purposes and in a more restricted way for navigation purposes.

Multiple experiments with an audience of mechanical engineering students were conducted. Virtual training efficiency was assessed through questionnaires, answered by the participants, and was found overall superior to training in real-world.

Moreover, data collected from the execution of different assembly scenarios was processed in order to provide the ergonomic indices that quantify the human – robot equilibrium in assembly tasks. Such indices can be substituted by others, if a different collaboration scenario between human and robot is to be set up.

**Keywords:** virtual training, ergonomics, robot, assembly, collaboration, virtual reality.

# Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	iii
Abstract .....	iv
Πίνακας Περιεχομένων .....	v
Κατάλογος Διαγραμμάτων .....	vii
Κατάλογος Εικόνων.....	viii
Κατάλογος Πινάκων .....	ix
1 Εισαγωγή .....	1
1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	1
1.2 Ρομπότ και Ρομποτικά Συστήματα Παραγωγής .....	4
1.3 Η Ανάγκη Συνεργασίας Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P) .....	5
1.4 Η Εξέλιξη του Τρόπου Επικοινωνίας Ανθρώπου- Μηχανής .....	7
1.5 Η Εικονική Πραγματικότητα (ΕΠ) ως Διαδραστικό Μέσο.....	8
1.6 Η Χρήση των ΕΠε στη Συνεργασία A-P .....	9
2 Η Συνεργασία Ανθρώπου – Βιομηχανικού Ρομπότ (A-P).....	11
2.1 Τα Ρομπότ στη Βιομηχανία .....	11
2.2 Τα Συνεργατικά Ρομπότ .....	12
2.3 Οι Τύποι της Συνεργασίας A-P.....	14
2.4 Η Ασφάλεια των Συνεργατικών Ρομπότ.....	15
2.5 Παραδείγματα Εφαρμογών Συνεργατικών Ρομπότ .....	17
3 Η Εργονομία στη Συνεργασία Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P).....	19
3.1 Η Αναγκαιότητα Εργονομικού Σχεδιασμού στη Βιομηχανική Παραγωγή.....	19
3.2 Εργονομία και Συνεργατικά Ρομπότ.....	21
3.3 Μυοσκελετική Καταπόνηση Καρπού σε Καθήκοντα Συναρμολόγησης .....	22
3.4 Η εργονομική αξιολόγηση RULA.....	23
4 Η Εκπαίδευση στη Συνεργασία Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P) .....	25
4.1 Η Εκπαίδευση των Εργαζομένων στη Βιομηχανία Παραγωγής.....	25
4.2 Η Αναγκαιότητα Εκπαίδευσης στη Συνεργασία A-P .....	26
4.3 Η χρήση της Εικονικής Πραγματικότητας ως Εκπαιδευτικό Μέσο .....	27
5 Ανάλυση του Προβλήματος και Υποθέσεις Επίλυσης.....	29
5.1 Ερευνητικά Ερωτήματα και Υποθέσεις .....	29
5.1.1 ΕΠε ως Εργαλεία Εργονομικού Σχεδιασμού για τη Συνεργασία A-P σε Καθήκοντα Συναρμολόγησης .....	29
5.1.2 Αποτελεσματικότητα της ΕΠ στην Εκπαίδευση σε Συνεργατικά Καθήκοντα Συναρμολόγησης .....	30

5.2	Οι Περιπτώσεις Εφαρμογής (Use Cases).....	31
5.2.1	Προσομοίωση Συναρμολόγησης σε ΕΠ .....	32
5.2.2	Προσομοίωση Συνεργατικής Συναρμολόγησης σε ΕΠ.....	32
5.2.3	Συνεργατική Συναρμολόγηση στο Φυσικό Περιβάλλον.....	33
6	Υλοποίηση Εικονικού και Φυσικού Περιβάλλοντος.....	34
6.1	Το Πεδίο Εφαρμογής.....	34
6.2	Η Συγκρότηση του Συστήματος (Setup).....	37
6.3	Η Εικονική Σκηνή.....	40
6.4	Το Σενάριο Συνεργασίας A-P .....	42
6.5	Το Περιβάλλον Unity 3d.....	43
6.6	Ο Ρομποτικός Βραχίονας Stäubli RX90L.....	45
6.7	Η Κάσκα Στερεοσκοπίας Oculus Rift DK2 .....	47
6.8	Ο Αισθητήρας Κίνησης Leap Motion™ .....	48
7	Πειραματικές Δοκιμές και Αποτελέσματα .....	52
7.1	Κλίμακα Βαθμολόγησης Μυοσκελετικής Καταπόνησης του Καρπού.....	52
7.2	Ερωτηματολόγια Αξιολόγησης Εκπαίδευσης.....	53
7.3	Αποτελέσματα Δοκιμής Σεναρίου Συναρμολόγησης σε ΕΠε χωρίς Ρομπότ.....	56
7.4	Αποτελέσματα Δοκιμής Συνεργατικού Σεναρίου Συναρμολόγησης σε ΕΠε με Χρήση Ρομπότ.....	58
7.5	Αποτελέσματα Δοκιμής Συνεργατικού Σεναρίου στο Φυσικό Περιβάλλον .....	64
8	Σύγκριση Αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα .....	68
8.1	Συγκριτική Αξιολόγηση της Καταπόνησης του Καρπού των Σεναρίων ΕΠ.....	68
8.2	Συγκριτική Αξιολόγηση της Εκπαίδευσης μέσω ΕΠε και Φυσικού Περιβάλλοντος..	69
8.3	Προβληματισμοί – Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....	71
	Βιβλιογραφία.....	73
	Παράρτημα Α: Κώδικες C#.....	76
	Παράρτημα Β: Κώδικας V+ .....	85
	Παράρτημα Γ: Εικονογραφημένες Οδηγίες Συναρμολόγησης .....	86
	Παράρτημα Δ: Test Procedure.....	89

# Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 6-1: Διάγραμμα ροής καθηκόντων για την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης... 37	37
Διάγραμμα 6-2: Διάγραμμα ροής καθηκόντων για την ολοκλήρωση της συνεργατικής συναρμολόγησης..... 43	43
Διάγραμμα 7-1: Η βαθμολογία των καθηκόντων συναρμολόγησης χωρίς ρομπότ ..... 58	58
Διάγραμμα 7-2: Η χρονομέτρηση των καθηκόντων συναρμολόγησης χωρίς ρομπότ..... 58	58
Διάγραμμα 7-3: Η βαθμολογία των καθηκόντων συναρμολόγησης με συνεργασία ρομπότ.. 59	59
Διάγραμμα 7-4: Η χρονομέτρηση των καθηκόντων συνεργατικής συναρμολόγησης..... 61	61
Διάγραμμα 7-5: Συγκεντρωτικό διάγραμμα προόδου εκπαίδευσης VR..... 62	62
Διάγραμμα 7-6: Μέσοι όροι εμπύθισης στο ΕΠε..... 63	63
Διάγραμμα 7-7: VR Training Feedback – Μέσοι όροι ..... 64	64
Διάγραμμα 7-8: Συγκεντρωτικό διάγραμμα προόδου εκπαίδευσης VR..... 66	66
Διάγραμμα 7-9: IRL Training Feedback – Μέσοι όροι..... 67	67
Διάγραμμα 8-1: Σύγκριση εργονομικής αξιολόγησης ανά επιμέρους καθήκον..... 68	68
Διάγραμμα 8-2: Μέσος μετρούμενος χρόνος ανά βήμα συναρμολόγησης..... 69	69
Διάγραμμα 8-3: Μέσος χρόνος εκτέλεσης της συναρμολόγησης κατά την αξιολόγηση των εκπαιδευόμενων ..... 70	70
Διάγραμμα 8-4: Μέσος χρόνος προόδου ανά επανάληψη των εκπαιδευόμενων..... 71	71

# Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1: Συνεργασία Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P) στην εκτέλεση συναρμολόγησης .....	5
Εικόνα 1-2: Τα ρομπότ και η αυτοματοποίηση στη βιομηχανική παραγωγή .....	7
Εικόνα 1-3: 3D σχεδιασμός αμαξώματος μέσω ΕΠε .....	9
Εικόνα 2-1: Η συνεργασία A-P στη βιομηχανία .....	11
Εικόνα 2-2: Πλαίσιο ασφαλείας συνεργατικών ρομπότ .....	13
Εικόνα 2-3: Χώρος εργασίας ρομπότ και ανθρώπου .....	13
Εικόνα 2-4: Συνεργατικά ρομπότ με τη σειρά από αριστερά προς δεξιά Systeme KR SI, Fanuc CR-35iA, ABB YuMi, UR5, KUKA LBR iiwa .....	16
Εικόνα 2-5: Τοποθέτηση βαλβίδων ανάφλεξης σε εργοστάσιο της Volkswagen .....	17
Εικόνα 2-6: Συνεργασία SKODA AUTO και KUKA LBR iiwa .....	18
Εικόνα 3-1: Το φυλλάδιο αξιολόγησης RULA .....	24
Εικόνα 4-1: Πλεονεκτήματα της χρήσης ΕΠ στην εκπαίδευση .....	28
Εικόνα 4-2: Χειρουργική εκπαίδευση μέσω ΕΠ .....	28
Εικόνα 6-1: Στο αριστερό μέρος εικονίζεται η αρχική πρωτότυπη κεφαλή τύλιξης ινών ενώ στο δεξί μέρος εικονίζεται το αντίστοιχο CAD μοντέλο.....	34
Εικόνα 6-2: Μηχανισμός στερέωσης της ανέμης. Αριστερά: ο αρχικός. Δεξιά: ο Νέος μεγαλύτερης σταθερότητας.....	35
Εικόνα 6-3: Τελική πρωτότυπη κεφαλή τύλιξης ινών. Αριστερά: φυσικό μοντέλο μετά τις αλλαγές. Δεξιά: το αντίστοιχο CAD μοντέλο. ....	36
Εικόνα 6-4: Ανάπτυγμα εξαρτημάτων της κεφαλής προς συναρμολόγηση.....	36
Εικόνα 6-5: Εικονογραφημένες οδηγίες για το βήμα 9 της συναρμολόγησης.....	37
Εικόνα 6-6: Ροή δεδομένων κατά την εικονική προσομοίωση .....	38
Εικόνα 6-7: Τυπική διάταξη συστήματος κατά τις δοκιμές ΕΠ .....	39
Εικόνα 6-8: Διάταξη συστήματος στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ	39
Εικόνα 6-9: Η διάταξη της εικονικής σκηνής της συνεργατικής συναρμολόγησης.....	40
Εικόνα 6-10: Το avatar του ζεύγους χεριών και η επιφάνεια εργασίας με τα εργαλεία και τα εξαρτήματα προς συναρμολόγηση .....	41
Εικόνα 6-11: Ενδεικτική λίστα components προσαρτημένα στην κύρια κάμερα της σκηνής	44
Εικόνα 6-12: Παράδειγμα απλού πρωτότυπου κώδικα C# που δημιουργήθηκε για την πλήρωση μπάρας φόρτωσης καθήκοντος.....	45
Εικόνα 6-13: Ο ρομποτικός βραχίονας Stäubli™ RX 90L στο εργαστήριο και στο ΕΠε .....	46
Εικόνα 6-14: Η ιεραρχία των αρθρώσεων στο GameObject του ρομπότ στο ΕΠε.....	46
Εικόνα 6-15: Το σετ της Oculus Rift DK2 .....	47
Εικόνα 6-16: Οι φακοί εντός της κάσκας Oculus .....	47
Εικόνα 6-17: Στερεοσκοπική προβολή της εικόνας στο χρήστη .....	48
Εικόνα 6-18: το εσωτερικό του αισθητήρα Leap Motion.....	48
Εικόνα 6-19: Ανίχνευση σκελετού των χεριών .....	49
Εικόνα 6-20: Γυναικείο και ανδρικό μοντέλο γραφικών του αριστερού χεριού .....	49
Εικόνα 6-21: Χώρος δυνατότητας αντίληψης αλληλεπίδρασης όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή.....	50
Εικόνα 6-22: Χώρος βέλτιστου εντοπισμού κίνησης του αισθητήρα Leap Motion.....	50
Εικόνα 7-1: Τα βήματα 3,4 της μεθόδου RULA και οι γωνίες yaw, pitch και roll της κίνησης.	52
Εικόνα 7-2: Τα βήματα 5 έως 8 της μεθόδου RULA.....	52



# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5-1: Περιληπτική κατανομή στοιχείων ανά περίπτωση εφαρμογής .....	32
Πίνακας 7-1: Κατάταξη ρίσκου ανάλογα με τη βαθμολογία του καθήκοντος .....	53
Πίνακας 7-2: Παράδειγμα βαθμολόγησης καθήκοντος.....	53
Πίνακας 7-3: 1 <sup>η</sup> Ενότητα Ερωτηματολογίου.....	54
Πίνακας 7-4: 2 <sup>η</sup> Ενότητα Ερωτηματολογίου.....	54
Πίνακας 7-5: 3 <sup>η</sup> Ενότητα Ερωτηματολογίου.....	55
Πίνακας 7-6: 4 <sup>η</sup> Ενότητα Ερωτηματολογίου.....	55
Πίνακας 7-7: Συνοπτική παρουσίαση της βαθμολογίας των καθηκόντων συναρμολόγησης .	56
Πίνακας 7-8: Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων χρονισμού πρώτου σεναρίου.....	57
Πίνακας 7-9: Συνοπτική παρουσίαση της βαθμολογίας των καθηκόντων συνεργατικής συναρμολόγησης.....	60
Πίνακας 7-10: Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων χρονισμού δεύτερου σεναρίου.....	61
Πίνακας 7-11: Συγκεντρωτικός πίνακας προόδου εκπαίδευσης VR .....	62
Πίνακας 7-12: Πίνακας αξιολόγησης αφομοίωσης της VR εκπαίδευσης .....	64
Πίνακας 7-13: Συγκεντρωτικός πίνακας προόδου εκπαίδευσης IRL .....	65
Πίνακας 7-14: Πίνακας αξιολόγησης αφομοίωσης της IRL εκπαίδευσης.....	67
Πίνακας 8-1: Συνολικός αριθμός λαθών στην αξιολόγηση της εκπαίδευσης .....	71

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Για την παρούσα διπλωματική εργασία αναζητήθηκαν και μελετήθηκαν πολλά άρθρα, βιβλία, επιστημονικές μελέτες και ιστοσελίδες με σκοπό την διερεύνηση του ρόλου της εικονικής πραγματικότητας στη βιομηχανική παραγωγή, του τρόπου συνεργασίας ανθρώπου – ρομπότ σε καθήκοντα συναρμολόγησης και τα εργονομικά οφέλη και την αναγκαιότητα εκπαίδευσης που προκύπτουν ως συνέπεια αυτής. Το περιεχόμενό τους συνοψίζεται σε αυτήν την ενότητα.

Οι K. Strabala, M. K. Lee, A. Dragan, J. Forlizzi και S. S. Srinivasa ερεύνησαν τη συνεργασία ανθρώπων σε διαδικασίες συντονισμένης μεταφοράς και μεταβίβασης αντικειμένων με σκοπό του σχεδιασμού της αντίστοιχης ρομποτικής εφαρμογής. Μέσω των πειραματικών δοκιμών που σχεδίασαν και έφεραν εις πέρας αξιολογήθηκαν τα καθήκοντα μεταβίβασης και τα συμπεράσματα των πειραματικών αποτελεσμάτων για το σχεδιασμό απρόσκοπτων αλληλεπιδράσεων ανθρώπου-ρομπότ (Strabala et al., 2013).

Στην έρευνα των C. M. Huang, M. Cakmak και B. Mutlu προκύπτουν πρότυπα μοντελοποίησης καθηκόντων μεταβίβασης (handover) μεταξύ ρομπότ και ανθρώπου. Συγκεκριμένα, οι μελετητές προσδιόρισαν τους παράγοντες που υποβοηθούν τη συνεργασία ανθρώπου με άνθρωπο κατά τις μεταβιβάσεις, τους ενσωμάτωσαν στον προγραμματισμό του συνεργατικού ρομπότ και αξιολόγησαν τις επιδόσεις του (Huang, Cakmak, & Mutlu, 2015).

Σύμφωνα με τους M. Morioka και S. Sakakibara στον κατασκευαστικό τομέα, παρά τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας, φαίνεται ότι η βελτίωση της αποτελεσματικότητας των κυψελών συναρμολόγησης έχει οδηγηθεί σε κορεσμό. Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της αγοράς, οι συγγραφείς έχουν αναπτύξει ένα νέο σύστημα κυψέλης συναρμολόγησης με τη συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ και το παρουσιάζουν στο σχετικό άρθρο (Morioka & Sakakibara, 2010).

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η έρευνα των H. Wang, Y. Rong, H. Li, P. Shaun στη συνεισφορά της εικονικής πραγματικότητας στο σχεδιασμό κεφαλών συγκράτησης για διάφορες εφαρμογές. Συγκεκριμένα, διερευνούν την υποβοήθηση του σχεδιασμού μέσω αυτοματοποίησης της συγκέντρωσης δεδομένων διαστασιολόγησης και επιφερόμενων τάσεων (H. Wang, Y. Rong, H. Li, & P. Shaun, 2010).

Σε άρθρο των H. I. Connacher, S. Jayaram και K. W. Lyons τονίζεται η αξιοποίηση της εικονικής πραγματικότητας στο σχεδιασμό προϊόντος με στόχο τη διευκόλυνση της συναρμολόγησής του. Συγκεκριμένα, αναλύουν το εικονικό περιβάλλον, τα εργαλεία, τα τεμάχια αλλά και τους αισθητήρες προσομοίωσης που βοηθούν στην ομαλή διεκπεραίωση του καθήκοντος (Jayaram, Connacher, & Lyons, 1997).

Σε μία πανεπιστημιακή μελέτη που δημοσίευσαν οι Z. Y. Ding, K. K. B. Hon και F. Shao αναλύουν τη χρήση της εικονικής πραγματικότητας για το σχεδιασμό προϊόντος και εργασιακού χώρου ώστε να διευκολυνθούν τα καθήκοντα συναρμολόγησης. Συγκεκριμένα, αναφέρονται στον εργονομικό σχεδιασμό προϊόντος και τις επιπλέον δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει η εικονική πραγματικότητα στην υλοποίησή του (Ding, Hon, & Shao, 2011).

Οι S. Jayaram, U. Jayaram, Y. Jun και K. C. DeChenne σε δημοσίευσή τους συγκρίνουν δύο μελέτες συναρμολόγησης για να προσδιοριστεί η κατάντη αξία των εικονικών δυνατοτήτων σε ρεαλιστικά σενάρια προσομοίωσης βιομηχανικών συναρμολογήσεων. Βασικοί τομείς αξιολόγησης αποτελούν αυτοί της εργονομίας, των βιομηχανικών εγκαταστάσεων, του σχεδιασμού της αλληλουχίας των διεργασιών και, φυσικά, του σχεδιασμού προϊόντος (Jayaram et al., 2007).

Στο συμπόσιο ASME 2010 World Conference on Innovative Virtual Reality οι L. Ma, D. Chablat, F. Bennis, B. Hu και W. Zhang παρουσίασαν τη μελέτη τους για τη χρήση της εικονικής πραγματικότητας στην εργονομική αξιολόγηση με σκοπό την πρόληψη εμφάνισης μυοσκελετικών διαταραχών στην εργασία. Η σωματική κόπωση αναλύεται περαιτέρω στο επίπεδο κάθε άρθρωσης και εφαρμόζεται ένα μοντέλο ανάρρωσης βάσει παραμέτρων χειρωνακτικής εργασίας για τη διαμόρφωση της τελικής εργονομικής εκτίμησης και σχεδιασμού της διεργασίας (Ma, Chablat, Bennis, Hu & Zhang, 2010).

Οι A. Seth, J. M. Vance και J. H. Oliver σε άρθρο τους μελετούν τη χρήση της εικονικής πραγματικότητας στο σχεδιασμό της διαδικασίας συναρμολόγησης λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως ο βέλτιστος χρόνος συναρμολόγησης, η διαδοχή των διεργασιών, οι απαιτήσεις εργαλείων και εξαρτημάτων, η εργονομία και η ασφάλεια των χειριστών. Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραμέτρους αναλύουν το συνδυασμό προγραμμάτων γραφικής σχεδίασης, εικονικής προσομοίωσης και αισθητήρων απτικής, εικόνας και ήχου για τη δημιουργία ενός αξιόπιστου εικονικού περιβάλλοντος (Seth, Vance, & Oliver, 2011).

Σε άρθρο τους οι S. Jayaram, H. Connacher και K. W. Lyons μελετούν την ενσωμάτωση της τεχνολογίας της εικονικής πραγματικότητας σε μηχανολογικές εφαρμογές εστιάζοντας στο στάδιο του σχεδιασμού προϊόντος και του σχεδιασμού του χώρου εργασίας. Εξετάζουν, επιπλέον, την αξιοπιστία και τις προκλήσεις που επιφέρει ένα εικονικό περιβάλλον για προσομοίωση συναρμολόγησης και συστήνουν κάποια πρότυπα για την τυποποίηση του εικονικού περιβάλλοντος (Jayaram et al., 1997).

Οι P. Xia, A. M. Lopes και M. T. Restivo σε άρθρο τους αναλύουν την εξέλιξη εφαρμογών της εικονικής πραγματικότητας στον τομέα της παραγωγής με ιδιαίτερη έμφαση στο συνδυασμό τους με αισθητήρες αφής για εφαρμογές συναρμολόγησης από εύκαμπτα καλώδια ως στιβαρές κατασκευές. Αξιολογώντας αυτές τις εφαρμογές συμπεραίνουν ότι οι αισθητήρες αφής συνδυαστικά με την εικονική πραγματικότητα μπορούν να αξιοποιηθούν σε πολλές διαφορετικές κατεργασίες και θα αποσπάσουν μεγάλο ενδιαφέρον από επιχειρήσεις στο άμεσο μέλλον (Xia, Lopes, & Restivo, 2013).

Στην έρευνα που παρουσίασαν οι P. Dwivedi, D. Cline, C. Joe και R. Etemadpour στο 18<sup>ο</sup> IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies σχεδίασαν και υλοποίησαν ένα εικονικό περιβάλλον για την προσομοίωση της συναρμολόγησης ενός

ηλεκτρικού διαδρόμου σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας διαστημοπλοίου. Μέσω αυτής της μελέτης προσδιόρισαν τα αδύναμα σημεία της συναρμολόγησης, τις διαδικασίες εκπαίδευσης των συναρμολογητών και τις διεργασίες που θα μπορούσαν να εκτελεστούν με πιο οικονομικό και αποτελεσματικό τρόπο (Dwivedi, Cline, Joe, & Etemadpour, 2018).

Οι X. Wang, S. K. Ong και A. Y. C. Nee στην έρευνά τους μελετούν την εξέλιξη της χρήσης της επαυξημένης πραγματικότητας σε διαδικασίες συναρμολόγησης σε όλα τα στάδια της βιομηχανικής παραγωγής, από το σχεδιασμό ως τον έλεγχο ποιότητας. Σκοπός της έρευνας είναι να αναδείξει τα τεχνικά χαρακτηριστικά και το ευρύ φάσμα εφαρμογών της επαυξημένης πραγματικότητας στη βιομηχανία από το 1990 έως το 2015. Τέλος, γίνεται μία κριτική ανασκόπηση των περιορισμών της επαυξημένης πραγματικότητας και τις μελλοντικές τάσεις για την ένταξή τους στη γραμμή παραγωγής (X. Wang, Ong, & Nee, 2016).

Στο International Conference SKILLS 2011 οι Bucci et al. παρουσίασαν τις δυνατότητες που προσφέρει η ένταξη τεχνολογιών επαυξημένης πραγματικότητας σε καθήκοντα συντήρησης και συναρμολόγησης. Σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής είναι η δυνατότητα παροχής πληροφοριών θέσης αντικειμένων και οδηγιών απευθείας μπροστά στο χειριστή, με αποτέλεσμα την σαφή αύξηση της ταχύτητας περαίωσης του εκάστοτε έργου (Bucci et al., 2011).

Ο R. S. Kalawsky προτείνει ένα ειδικό ερωτηματολόγιο (VRUSE) για τη μέτρηση της χρηστικότητας ενός συστήματος εικονικής πραγματικότητας σύμφωνα με τη στάση και την αντίληψη των χρηστών του. Σε αντίθεση με τα ερωτηματολόγια που έχουν σχεδιαστεί για γενικές διεπαφές, το VRUSE έχει σχεδιαστεί ειδικά για την αξιολόγηση των εικονικών περιβαλλόντων, καθώς είναι ένα διαγνωστικό εργαλείο που παρέχει πληθώρα πληροφοριών σχετικά με την αντίληψη του χρήστη για το εικονικό περιβάλλον, την εμπύθισή του σε αυτό και την ευχρηστία του (Kalawsky, 1999).

Οι Gutierrez et al. σε άρθρο μελετούν και αξιολογούν τη χρήση εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας στην εκπαίδευση σε καθήκοντα συντήρησης. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούν ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα από ερωτηματολόγια και πειραματικές δοκιμές και καταλήγουν στην επιβεβαίωση της αξιοπιστίας της χρήσης των νέων αυτών τεχνολογιών για εκπαίδευση τεχνικού προσωπικού (Gutierrez et al., 2011).

Μέσω πειραματικών δοκιμών η BMW συνέλεξε δεδομένα για τη σύγκριση της απόδοσης της παραδοσιακής εκπαίδευσης έναντι αυτής με χρήση επαυξημένης πραγματικότητας. Τα τελικά συμπεράσματα κλίνουν υπέρ της χρήσης AR σε διδακτικά καθήκοντα καθώς οι συμμετέχοντες έκαναν 10% λιγότερα λάθη επιλογής τεμαχίων, 5% λιγότερα λάθη διαδοχής στη συναρμολόγηση και προκάλεσαν 60% λιγότερες διορθώσεις στη δουλειά τους, αλλά είναι σημαντικά πιο αργοί από αυτούς που εκπαιδεύτηκαν αυτοπροσώπως με εκπαιδευτή (Werrlich, Lorber, Nguyen, Yanez, & Notni, 2018).

Η BMW διεξήγαγε, επιπλέον, έρευνα με επικεφαλής τους S. Werrlich, P. A. Nguyen και G. Notni για να κρίνει την αξιοπιστία της επαυξημένης πραγματικότητας σαν εκπαιδευτικό μέσο για να χρησιμοποιηθεί σε συνεργατικά καθήκοντα συναρμολόγησης στα εργοστάσιά της. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι όσοι εκπαιδεύτηκαν μέσω επαυξημένης πραγματικότητας χρειάστηκαν 17% περισσότερο χρόνο αλλά έκαναν 79% λιγότερα λάθη

αλληλουχίας των διαδικασιών συγκριτικά με όσους εκπαιδεύτηκαν με παρουσία εκπαιδευτή (Werrlich, Nguyen, & Notni, 2018).

## 1.2 Ρομπότ και Ρομποτικά Συστήματα Παραγωγής

Ο όρος ρομπότ πρώτη φορά εφαρμόστηκε από τον Τσέχο συγγραφέα Karel Capek και προέρχεται από την τσεχική λέξη για την καταναγκαστική εργασία (Isaac, 1984). Ο Capek χρησιμοποίησε τη λέξη ρομπότ στο θεατρικό έργο του "R.U.R." ("Rossum's Universal Robots") που άνοιξε στην Πράγα τον Ιανουάριο του 1921 στο οποίο τα "automata" (αυτοματοποιημένες μηχανές) είναι μαζικά παραγόμενα από έναν Άγγλο με το όνομα Rossum. Σε αυτό το έργο, τα "automata", δηλαδή τα ρομπότ, προορίζονται να κάνουν όλες τις δουλειές και να συμβάλλουν σε μια καλύτερη ζωή για τα ανθρώπινα όντα, αλλά τελικά επαναστατούν, εξαλείφουν την ανθρωπότητα και ξεκινούν μια νέα νοήμονα φυλή για τον εαυτό τους. Η δημοτικότητα αυτού του θεατρικού έργου ήταν τόση ώστε αντικατέστησε τον όρο "automata" με τον όρο ρομπότ και καθιέρωσε την χρήση του σχεδόν σε όλες τις γλώσσες έως και σήμερα.

Σήμερα, ως ρομπότ ορίζουμε «μια επαναπρογραμματιζόμενη, πολυχρηστική χειριστική διάταξη, σχεδιασμένη να μετακινεί και να διαχειρίζεται υλικά, εργαλεία, εξαρτήματα και εξειδικευμένες διατάξεις, μέσω μεταβλητών, προγραμματισμένων κινήσεων για την εκτέλεση μιας σειράς εργασιών» σύμφωνα με το Σύνδεσμο Ρομποτικών Βιομηχανιών των ΗΠΑ (Robotic Industries Association, 1999). Ένα ρομπότ συγκροτείται από δύο συστήματα, το μηχανικό (στο οποίο περιλαμβάνεται το σύστημα κίνησης) και το ηλεκτρονικό (στο οποίο υπάγεται και η επαναπρογραμματιζόμενη μνήμη του). Υπάρχουν διάφορα κριτήρια διάκρισης και αντίστοιχες κατηγοριοποιήσεις των ρομπότ. Μία από αυτές είναι η διάκρισή τους σε τρεις, επί του παρόντος, "γενιές". Στην πρώτη γενιά κατατάσσονται ρομπότ με περιορισμένη ευελιξία, που διευθύνονται από τον άνθρωπο, όπως, για παράδειγμα, οι απλοί "χειριστές", σχετικά απλά εργαλεία που επιτρέπουν τη μετακίνηση επικίνδυνων αντικειμένων (π.χ. ραδιενεργών υλικών). Στη δεύτερη γενιά κατατάσσονται τα ρομπότ που είναι εφοδιασμένα με σταθερό πρόγραμμα δράσης και ρομπότ που λαμβάνουν εντολές από κάποιο σύστημα αριθμητικού ελέγχου. Στην τρίτη γενιά κατατάσσονται ρομπότ που είναι εφοδιασμένα:

- με αισθητήριες "πληροφορίες" από το περιβάλλον,
- με διάταξη επεξεργασίας των πληροφοριών και
- με κινητήριο σύστημα εκτέλεσης εργασιών.

Ευρύτατη χρήση ρομπότ γίνεται σε πάρα πολλούς παραγωγικούς τομείς και κυρίως στη βιομηχανία (βιομηχανική ρομποτική), την ιατρική, την αεροναυπηγική, την αεροδιαστημική κ.ά., γεγονός που έδωσε σημαντική ώθηση στην περαιτέρω ανάπτυξη της βιομηχανίας των ρομπότ, ιδιαίτερα στην Ιαπωνία και τις ΗΠΑ. Οι κυριότερες εφαρμογές των βιομηχανικών ρομπότ, μέχρι σήμερα, είναι οι ηλεκτροσυγκολλήσεις, οι εφαρμογές σε εργασίες πρεσαρίσματος, οι συναρμολογήσεις, οι βαφές με ψεκασμό και η επεξεργασία επιφανειών σε τροφοδοτήσεις εργαλειομηχανών, σε μορφοποιήσεις πλαστικών σε μήτρες

κ.ά. Από τα μέσα περίπου της δεκαετίας του 1980 η χρήση των ρομπότ γενικεύτηκε στο πλαίσιο της ανάπτυξης των Ολοκληρωμένων Συστημάτων Παραγωγής (Computer-Integrated Manufacturing), αυτοματοποιημένων και ευέλικτων εργοστασίων, στα οποία οι εργαλειομηχανές μπορούν να επαναπρογραμματίζονται ταχύτατα για την παραγωγή νέων ή διαφοροποιημένων προϊόντων. Πρωτοποριακά εργοστάσια ως προς την ευρύτατη χρήση ρομπότ θεωρούνται το εργοστάσιο της General Motors στο Hamtramck, το Buick City στο Flint του Michigan, το εργοστάσιο της IBM στο Lexington κ.ά.

Στα σύγχρονα συστήματα παραγωγής, έχει εντοπιστεί η ανάγκη για συνεργασία Ανθρώπου-Βιομηχανικού Ρομπότ (A-P) σε κοινό (διαμοιραζόμενο) χώρο εργασίας, για την από κοινού διεκπεραίωση βιομηχανικών καθηκόντων ή κατεργασιών. Ο σκοπός της συνύπαρξης και της συνεργασίας A-P κατά την εκτέλεση καθηκόντων που συνήθως εκτελούνται χειρωνακτικά, είναι η βελτίωση της ποιότητας της εργασίας και η αύξηση της παραγωγικότητας, εμπλουτίζοντας τις δεξιότητες, την κριτική σκέψη και τις κιναισθητικές δυνατότητες του εργαζόμενου με τη δύναμη, την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα των ρομπότ. Στην περίπτωση καθηκόντων συναρμολόγησης που μελετάμε στην παρούσα εργασία, αντί να αντικαθίσταται η ανθρώπινη εργασία από ρομπότ σε επαναλαμβανόμενα, επικίνδυνα ή αλλοτριωτικά καθήκοντα, επιλέγουμε τη συνύπαρξη A-P και τη συνεργατική υποστήριξη της ανθρώπινης εργασίας από το ρομπότ (Εικόνα 1-1), με αποτέλεσμα την πραγματοποίηση «εργασίας υψηλής προστιθέμενης αξίας» (Unhelkar & Shah, 2014).



Εικόνα 1-1: Συνεργασία Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P) στην εκτέλεση συναρμολόγησης [©Sheffield Robotics, <https://www.sheffieldrobotics.ac.uk>]

### 1.3 Η Ανάγκη Συνεργασίας Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P)

Τα ρομπότ έχουν αποδείξει την χρησιμότητά τους από την εισαγωγή τους στο χώρο της βιομηχανίας στα τέλη της δεκαετίας του 1960 (Strabala et al., 2013). Στις μηχανές, που ήδη προσέφεραν ταχύτητα, δύναμη και αντοχή, προστέθηκε η αυτοματοποίηση δίνοντας επαναληψιμότητα και ακρίβεια στα ρομπότ, επικρατώντας έτσι στην εργοστασιακή παραγωγή. Σε εργοστάσια παραγωγής μεγάλης κλίμακας, τα βιομηχανικά ρομπότ διεκπεραιώνουν κατά μέσο όρο παγκοσμίως το είκοσι εννέα τοις εκατό των εργασιών μίας τυπικής γραμμής συναρμολόγησης και προβλέπεται αυτό το ποσοστό να αυξηθεί στο σαράντα δύο τοις εκατό την επόμενη πενταετία (El Zaatari, Marei, Li, & Usman, 2019).

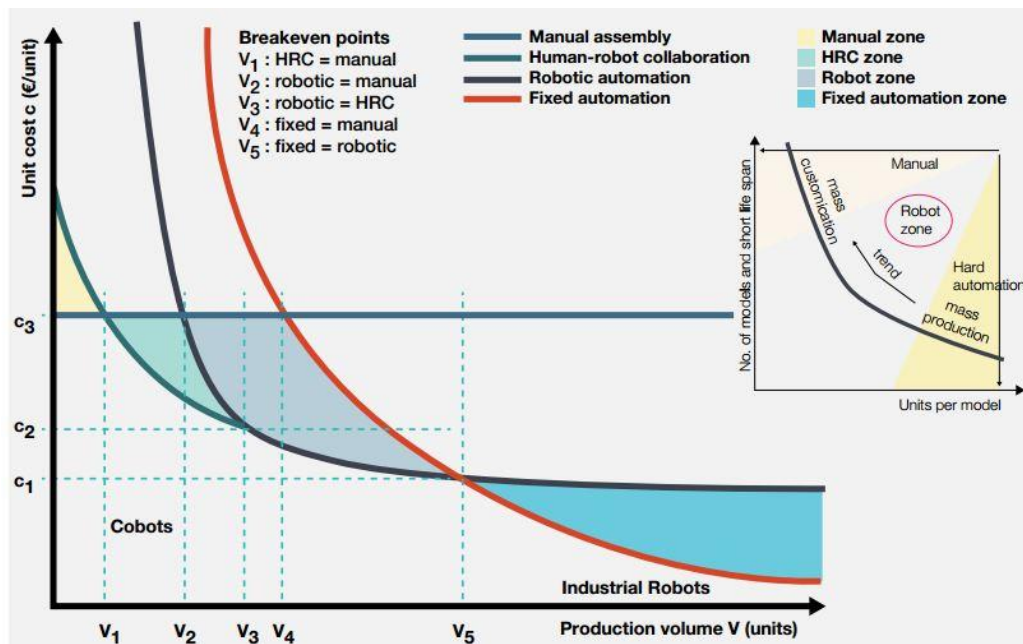
Παρά την αδιαμφισβήτητη επιτυχία των ρομπότ στη βιομηχανία, οι συμβατικές στρατηγικές βελτιστοποίησης των σταδίων παραγωγής είναι κορεσμένες. Βασική αιτία αποτελούν η διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για παραγωγή πολλαπλών παραλλαγών προϊόντων αλλά και σύνθετων συναρμολογήσεων όπου χρειάζεται η ανθρώπινη κρίση και ευελιξία. Η μελλοντική ανταγωνιστικότητα των κατασκευαστών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα προσαρμογής τους στις βασικές αυτές απαιτήσεις της αγοράς. Αυτή η προσαρμογή είναι δύσκολα εφικτή σε πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες παραγωγής.

Επιπλέον, σε περιπτώσεις μικρού όγκου παραγωγής, μεγάλης ποικιλίας πρωτοτύπων ή/και υψηλής πολυπλοκότητας εργασιών οι τρέχουσες στρατηγικές αυτοματισμού δεν είναι οικονομικά αποδοτικές (Εικόνα 1-2). Το κόστος των εξειδικευμένων ρομπότ είναι ήδη υψηλό και σε αυτό προστίθεται το κόστος της προσπάθειας εγκατάστασης, προγραμματισμού και ενσωμάτωσής τους σε γραμμές παραγωγής που εκτιμάται ότι είναι περίπου δέκα φορές μεγαλύτερο από το κόστος του ίδιου του ρομπότ (Huang et al., 2015). Παρόλο που τα ρομπότ είναι ευπροσάρμοστες και πολυχρηστικές μηχανές, η ευελιξία τους μειώνεται λόγω του στατικού προγραμματισμού εργασιών. Εάν η εργασία, το προϊόν ή το περιβάλλον αλλάξουν, οι κινήσεις τους πρέπει συχνά να επαναπρογραμματιστούν από την αρχή.

Αυτές τις προκλήσεις έρχεται να επιλύσει η συνεργασία μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ (A-P) καθώς συνδυάζει την αποτελεσματικότητα των ρομπότ με τον υψηλό βαθμό επιδεξιότητας και τις γνωστικές δυνατότητες των ανθρώπων σε ένα ευέλικτο συνολικό σύστημα. Ως συνέπεια των τρεχουσών ευέλικτων τεχνικών αυτοματισμού, συμπεριλαμβανομένων των ευέλικτων συστημάτων παραγωγής (FMS) και των συστημάτων αναδιαμόρφωσης (RMS), μία πρόσφατη τάση στη ρομποτική επικεντρώνεται στις νέες γενιές ρομπότ με ικανότητες άμεσης συνεργασίας με τον άνθρωπο. Αυτό αναμένεται να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ πλήρους αυτοματοποίησης και πλήρως χειρωνακτικών σταθμών εργασίας. Απόδειξη έρχεται να δώσει η αυξανόμενη έρευνα στον τομέα της φυσικής αλληλεπίδρασης ανθρώπου – ρομπότ (pHRI), που μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε καθήκοντα συνεργασίας μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ. Η εισαγωγή νοητικών δυνατοτήτων (machine learning) για βοηθητικά ρομποτικά συστήματα, τα νέα συστήματα ελέγχου ρομπότ και η πρόοδος στην τεχνητή αντίληψη επιτρέπουν την εξομάλυνση της συνύπαρξης και συνεργασίας ανθρώπου και ρομπότ και κοινό χώρο εργασίας. Επιπλέον, κρατώντας τον άνθρωπο στο βρόχο των διαδικασιών παραγωγής αξιοποιούνται οι δεξιότητές του λόγω των γνωστικών και αισθητηριακών πλεονεκτημάτων του και δημιουργείται μία ευέλικτη γραμμή παραγωγής και συναρμολόγησης.

Με αυτό τον τρόπο μπορεί να σχεδιαστεί ένα πιο υγιές περιβάλλον για την ανθρώπινη εργασία καθώς μεγάλο ποσοστό της εργασιακής καταπόνησης μπορεί να μειωθεί με τον εργονομικό σχεδιασμό των καθηκόντων προς εκτέλεση. Σε μελέτη της Eurostat το 1995 για την Ευρωπαϊκή Ένωση, με στόχο την ανάπτυξη μεθοδολογίας για απόκτηση συγκρίσιμων δεδομένων για τις επαγγελματικές παθήσεις στην Ε.Ε., οι μυοσκελετικές παθήσεις αναφέρονται στις 10 περισσότερο συχνές παθήσεις στην Ε.Ε. Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι εξής παθήσεις από τον ευρωπαϊκό κατάλογο των επαγγελματικών ασθενειών κατά σειρά συχνότητας εμφάνισης: παράλυση των νεύρων λόγω πίεσης, οστεοαρθρικές ασθένειες των χεριών και των καρπών που προκαλούνται από μηχανικές δονήσεις, αγγειονευρωτικές ασθένειες που προκαλούνται από μηχανικές δονήσεις, και ασθένειες των περιαρθρικών θυλάκων λόγω πίεσης (European Commission, 1999).

Η υποστήριξη των ανθρώπων από ρομποτικά συστήματα μπορεί να οδηγήσει σε πιο εργονομικούς χώρους εργασίας και σε πιο παραγωγικές διαδικασίες, με ταυτόχρονη μείωση του σταθερού κόστους παραγωγής συγκριτικά με τα μεταβλητά έξοδα. Η έρευνα για την εργασία ανθρώπου και ρομπότ ως ομάδα είναι ακόμη σε πρώιμα στάδια και χρειάζεται μία ασφαλή και αποτελεσματική υλοποίηση. Μόλις επιτευχθεί αυτό, η επακόλουθη ευελιξία και προσαρμοστικότητα αυτού του συστήματος θα επιτρέψει την πραγμάτωση σεναρίων παραγωγής σε μόνιμα μεταβαλλόμενο περιβάλλον καθώς και την κατασκευή εξατομικευμένων προϊόντων σε εργοστάσια του μέλλοντος.



Εικόνα 1-2: Τα ρομπότ και η αυτοματοποίηση στη βιομηχανική παραγωγή [©Malaysian Foresight Institute, <http://www.myforesight.my>]

## 1.4 Η Εξέλιξη του Τρόπου Επικοινωνίας Ανθρώπου- Μηχανής

Στους υπολογιστές η έννοια της διεπαφής πήρε πολλές μορφές ανά τα χρόνια και υπάρχουν αρκετά παραδείγματα. Το πληκτρολόγιο είναι το πιο κλασσικό παράδειγμα: χρησιμοποιώντας το μπορούμε να εισάγουμε στον υπολογιστή δεδομένα και εντολές σε μορφή κειμένου. Το κείμενο είναι από τους πιο δημοφιλείς και διαδεδομένους τρόπους επικοινωνίας ανθρώπου – μηχανής. Με το πληκτρολόγιο και τη χρήση του κειμένου γίνεται η εισαγωγή της πρώτης διάστασης.

Με την ανάπτυξη των πρώτων δισδιάστατων γραφικών ένα νέο ενδιαμέσο άρχισε να προσελκύει την προσοχή των επιστημόνων: η οθόνη του υπολογιστή. Η επιφάνεια της οθόνης αποτελούσε πλέον το ενδιαμέσο ανάμεσα στον κόσμο της πληροφορίας και το χρήστη. Τα πρώτα γραφικά και γενικά η χρήση της εικόνας δημιούργησαν νέους ορίζοντες στην υπολογιστική ικανότητα έκφρασης. Ο σχεδιασμός του interface ασχολήθηκε αρκετά με τον τρόπο που η οθόνη του υπολογιστή θα έδειχνε πιο αποτελεσματικές και επαρκείς



ενδείξεις για τη λειτουργία των προγραμμάτων. Το αποτέλεσμα αυτής της έρευνας ήταν τα δισδιάστατα παράθυρα, τα αυτόνομα κινούμενα γραφικά, το δισδιάστατο animation και τέλος από πλευράς υλικού το γνωστό ποντίκι. Η παράλληλη πρόοδος του υλικού όσον αφορά την ταχύτητα και το κόστος, έκανε τα συστήματα αυτά δημοφιλή και απέδειξε στους επιστήμονες ότι τα ενδιαμέσα που δημιουργούν την πιστότερη και φυσικότερη αναπαράσταση του τρόπου που χειριζόμαστε το φυσικό μας περιβάλλον είναι και τα πιο αποτελεσματικά μέσα επικοινωνίας μεταξύ ανθρώπου και υπολογιστή.

Τα τρισδιάστατα γραφικά και μάλιστα τα 3D γραφικά σε πραγματικό χρόνο, εισήγαγαν και τη διάσταση του χρόνου στην έννοια του interface. Η χρήση επίσης ηλεκτρονικό – μηχανικών κατασκευών στις διάφορες τεχνικές προσομοίωσης πτήσης έδειξε πόσο χρήσιμη μπορεί να είναι μια ολοένα πιστότερη αναπαράσταση της πραγματικότητας στους τομείς της εκμάθησης και εκπαίδευσης γενικότερα. Παρατηρούμε ότι μέχρι σήμερα η συνήθης επικοινωνία του χρήστη με τον υπολογιστή γίνεται με έναν τρόπο ο οποίος δεν ανταποκρίνεται στις συνθήκες του πραγματικού κόσμου. Οι χρήστες προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του συστήματος λογισμικού και όχι ο υπολογιστής στον πραγματικό κόσμο. Αυτήν την πιστότερη αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου με όλες τις παραμέτρους της έχει ως σκοπό η τεχνολογία της εικονικής πραγματικότητας.

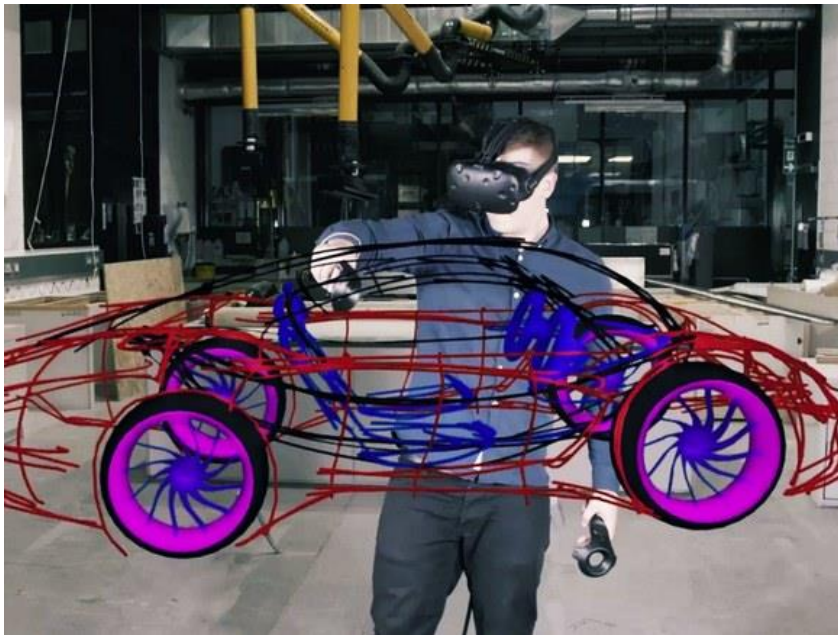
## 1.5 Η Εικονική Πραγματικότητα (ΕΠ) ως Διαδραστικό Μέσο

Η τεχνολογία της εικονικής πραγματικότητας αποτελεί τη σύγκλιση και το συγκερασμό διαφορετικών τεχνολογιών που βρήκαν σε αυτή πρόσφορο έδαφος εξέλιξης και εφαρμογής. Οι τεχνικές προσομοίωσης πτήσης, τα τρισδιάστατα γραφικά, αλλά και η πολύπλοκη τεχνολογία των βιομηχανικών βραχιόνων που χρησιμοποιείται στη ρομποτική εντάχθηκαν μέσα σε ένα ευρύτερο σχεδιασμό που χρησιμοποιεί την ηλεκτρομηχανική ανάδραση. Τα τεχνολογικά θέματα που έπρεπε να λυθούν για να είναι δυνατή η δημιουργία ενός εικονικού κόσμου, αλλά και η παρουσία και συμμετοχή του χρήστη μέσα σε αυτόν είναι:

- Η εξομοίωση της όρασης
- Η εξομοίωση της ακοής
- Η εξομοίωση των μηχανικών ικανοτήτων του χεριού
- Η εξομοίωση της αφής
- Η εξομοίωση των υπόλοιπων αισθήσεων
- Η θέση και ο προσανατολισμός στον εικονικό χώρο
- Η αλληλεπίδραση και η συμπεριφορά των εικονικών οντοτήτων
- Ο έλεγχος και ο συντονισμός (με χρήση υλικού και λογισμικού) όλων των παραπάνω συστημάτων

Μέσω της Εικονικής Πραγματικότητας (ΕΠ) επιτυγχάνεται η εμβύθιση (immersion) του χρήστη σε ένα Εικονικό Περιβάλλον (ΕΠε) και η αλληλεπίδρασή του (interaction) με αυτό με τρόπο ψευδο-φυσικό. Στον εικονικό κόσμο χρησιμοποιούνται κιναισθητικές διεπιφάνειες (sensory-motor interfaces), όπως είναι τα συστήματα προβολής με κάσκες στερεοσκοπίας (οπτική ανάδραση), για την εμβύθιση στο ΕΠε και συστήματα ανίχνευσης και καταγραφής

κίνησης (motion capture) για την εξομοίωση της κίνησης και της αλληλεπίδρασης. Ακόμη, η ρεαλιστικότητα του σεναρίου προσομοίωσης δίνει στον χρήστη την εντύπωση ότι η κίνησή του και η εξέλιξη της προσομοίωσης πραγματοποιούνται σε πραγματική κλίμακα στον εικονικό κόσμο. Η διαδραστική ΕΠ βρίσκει εφαρμογή σε πλήθος κλάδων από την ιατρική, την εκπαίδευση, τη βιομηχανία αλλά και τη διασκέδαση, όπου χρησιμοποιείται ευρύτατα τα τελευταία χρόνια. Εικόνα 1-3 (Εικόνα 1-3). Μέσω της χρήσης της ΕΠ μπορεί να προσομοιωθεί η βιομηχανική παραγωγή από το στάδιο του σχεδιασμού μέχρι την υλοποίηση και τον έλεγχο ποιότητας ενός προϊόντος.



Εικόνα 1-3: 3D σχεδιασμός αμαξώματος μέσω ΕΠε [Wired, <https://www.wired.com>]

## 1.6 Η Χρήση των ΕΠε στη Συνεργασία A-P

Η συνεργασία ανθρώπου- ρομπότ (Human Robot Collaboration – HRC) στα βιομηχανικά συστήματα παραγωγής αποτελεί ένα ερευνητικό θέμα όπου η ΕΠ μπορεί να συνεισφέρει μέσω του εύρους του δυνατοτήτων ενός εικονικού κόσμου. Τυπικές εφαρμογές στη βιομηχανική παραγωγή εκτείνονται από την προσομοίωση της παραγωγικής διαδικασίας, όπου οι προσομοιώσεις παρέχουν σε πραγματικό χρόνο ακριβείς πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για ανάλυση ή εκπαίδευση, έως το σχεδιασμό προϊόντος ή ανασχεδιασμό αυτού.

Τα ΕΠε αποτελούν ένα φθινό και πολυχρηστικό εργαλείο για τη μελέτη ανθρωποκεντρικών και διαδραστικών συστημάτων, καθώς προσφέρουν αντιληπτική και αισθητηριακή προσομοίωση, αντιστάθμιση ή διόρθωση όπου χρειάζεται. Σε εφαρμογές συνεργατικών καθηκόντων A-P, η ΕΠ δίνει τη δυνατότητα αναδόμησης της πληροφορίας, ώστε να γίνει πιο προσιτή στον εκάστοτε χειριστή, απομόνωσης ανεπιθύμητων παρεμβολών, επαναληψιμότητας με μηδενικές αλλαγές, χρήσης πολλαπλών αντιληπτικών σημάτων και

δυνατότητα εκμετάλλευσης διαφόρων αισθήσεων. Για παράδειγμα, μια οπτική πληροφορία γραπτού κειμένου μπορεί να μεταφερθεί στο χρήστη με ένα ηχητικό ερέθισμα. Έτσι, η πληθώρα διεπαφών και δυνατοτήτων των ΕΠε υψηλής διάδρασης τα καθιστά ευέλικτα και αποτελεσματικά ως προς την επικοινωνία σημάτων και νύξεων καθώς διεγείρουν τα αισθητηριακά κανάλια του χρήστη με διάφορα ερεθίσματα.

Οι προσομοιώσεις μέσω διαδραστικών ΕΠε προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι δοκιμών που εκτελούνται σε πραγματικές συνθήκες για ανάλυση της συνεργασίας A-P. Αρχικά, τα ΕΠε λειτουργούν χωρίς να προϋποθέτουν την ύπαρξη/αγορά του προσομοιωμένου ρομπότ και του περιβάλλοντος προγραμματισμού του, ενώ επιτρέπουν την άμεση και εύκολη τροποποίηση των παραμέτρων εργασίας αυτού. Ακόμη, προσφέρουν αδιαμφισβήτητη επαναληψιμότητα και αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων, ενώ μπορούν να διερευνηθούν παραλλαγές σεναρίων και να προσομοιωθούν ακραία σεναρία που θα ήταν επικίνδυνα να υλοποιηθούν σε πραγματικό περιβάλλον. Το διαδραστικό ΕΠε αναδεικνύεται σε ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την εξομάλυνση και την εξέλιξη της συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ καθώς παρέχει το βιωματική εμπειρία και την αλληλεπίδραση του χειριστή τόσο με το περιβάλλον όσο και με το ρομπότ, σε ασφαλές και ελεγχόμενες συνθήκες. Επιπλέον, ο σχεδιασμός και η εκτέλεση δοκιμών με πραγματικά ρομπότ μπορεί να είναι διαδικασία εξαιρετικά χρονοβόρα και με υψηλό κόστος, να επιφέρει επιπλέον περιορισμούς χώρου, υποδομών και ασφάλειας, κάτι που δεν συναντάται στις δοκιμές με ΕΠ.

Η ΕΠ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συνεργατικό (ανα)σχεδιασμό των συστημάτων παραγωγής κατά την ανάλυση και την αξιολόγηση αλλαγών πριν από την υλοποίηση στην πραγματικότητα. Αυτό αποτελεί τον κύριο τομέα που συναντάται σήμερα και καθιστά δυνατή την πρόληψη δαπανηρών (οικονομικά και χρονικά) σφαλμάτων σχεδιασμού και αξιοποίησης ανθρώπινου και τεχνολογικού δυναμικού. Άλλες εφαρμογές στη βιομηχανία που παρουσιάζουν αυξημένο ενδιαφέρον είναι αυτές της εκπαίδευσης μέσω ΕΠ αν και αρκετά καινούργιες. Παρόλο που ορισμένες έρευνες έχουν εξετάσει τον ανθρώπινο παράγοντα ως μέρος της βιομηχανικής διαδικασίας και έχουν προσαρμόσει την ΕΠ ώστε να συμπεριλάβει με ακρίβεια τις κινήσεις του χειριστή στην προσομοίωση, συχνά συμβαίνει ο χειριστής να μπορεί να βιώσει την ΕΠ μόνο από μια στατική θέση, π.χ. να στέκεται ακίνητος ή καθισμένος στο σημείο που αντιλαμβάνονται οι αισθητήρες εισόδου. Αυτό δείχνει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και βελτίωση στο συγκεκριμένο θέμα, πράγμα που ήδη συγκεντρώνει μεγάλο ενδιαφέρον σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας.

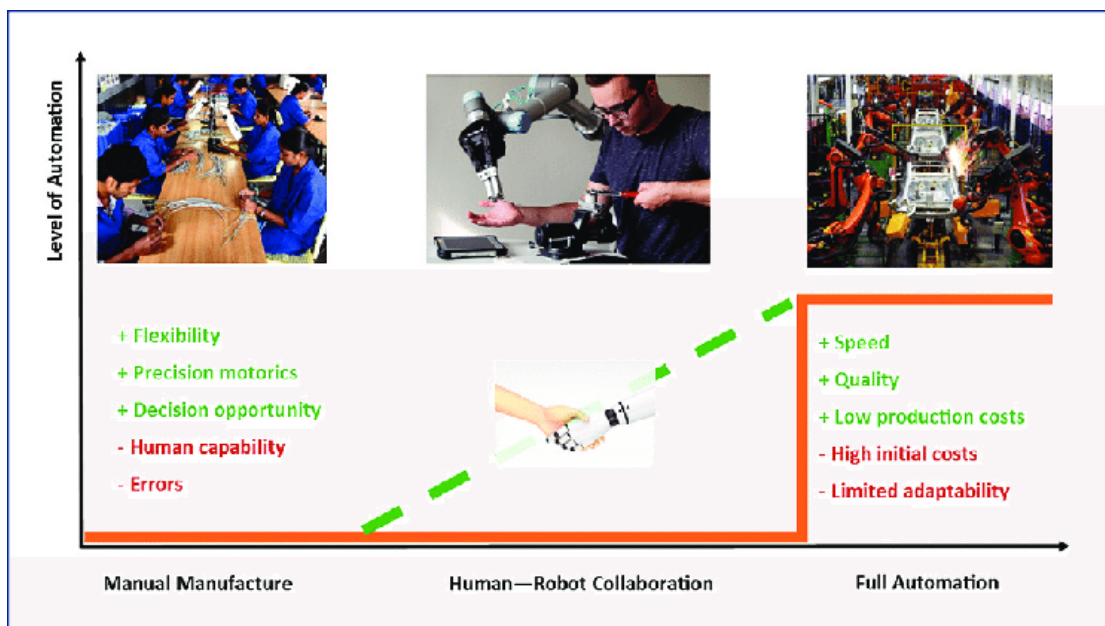
## 2 Η Συνεργασία Ανθρώπου – Βιομηχανικού Ρομπότ (A-P)

### 2.1 Τα Ρομπότ στη Βιομηχανία

Σήμερα, η βιομηχανική ρομποτική αφορά τα ρομπότ που αντικαθιστούν τους εργάτες οι οποίοι είναι επιφορτισμένοι με μη εργονομικά καθήκοντα. Για παράδειγμα, μπορούμε αναφέρουμε μια μετακίνηση μεγάλων ωφέλιμων φορτίων, χειρισμό σε θέσεις που είναι άβολες για τον εργάτη ή εργασίες που είναι επικίνδυνες, όπως χειρισμός τοξικών ή καυτών αντικείμενων. Εγκαθίστανται, επίσης, ρομπότ σε μονότονες λειτουργίες που είναι δυσάρεστα επαναλαμβανόμενες ή απαιτούν υψηλή ακρίβεια.

Τα ρομπότ είναι ανθεκτικά, γρήγορα και πολύ ακριβή μηχανήματα που μπορούν ολοκληρώσουν τα καθήκοντά τους ταχύτερα, με καλύτερη ποιότητα και χαμηλότερη τιμή από τους ανθρώπους. Γιατί λοιπόν πρέπει να κρατήσουμε τον ανθρώπινο παράγοντα στη βιομηχανία, που μπορεί να παράγει λάθη, και να ασχοληθούμε με συνεργάσιμα ρομπότ; Γιατί υπάρχουν λειτουργίες που πρέπει να μπορούν προσαρμοστούν στις πραγματικές, μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Τα ρομπότ δεν είναι ικανά κριτικής σκέψης, εκτελούν μόνο εντολές και ολοκληρώνουν προγραμματισμένες κινήσεις. Με άλλα λόγια, τα ρομπότ περιορίζονται από τον προγραμματισμό τους. Επιπλέον, τα ρομπότ χειρισμού σχεδιάζονται συνήθως για να έχουν έξι ή επτά βαθμούς ελευθερίας (άξονες κίνησης) ενώ το άνω άκρο του ανθρώπινου σώματος έχει περίπου τριάντα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα έναν άλλο περιορισμό αυτών των μηχανών που είναι ο ακριβής χειρισμός με μεγάλη εμβέλεια κίνησης.



Εικόνα 2-1: Η συνεργασία A-P στη βιομηχανία [\[https://www.researchgate.net\]](https://www.researchgate.net)

Συνεπώς, υπάρχουν δύο φράγματα μεταξύ των εργασιών που εκτελούνται από έναν ανθρώπινο εργάτη και ένα ρομπότ. Η συνεργασία A-P έρχεται να προσφέρει λύση σε αυτά τα εμπόδια και να επωφεληθεί από τα πλεονεκτήματα των μηχανών σε δύσκολες εφαρμογές με απαιτούμενη παρουσία του προσωπικού λειτουργίας (Εικόνα 2-1).

## 2.2 Τα Συνεργατικά Ρομπότ

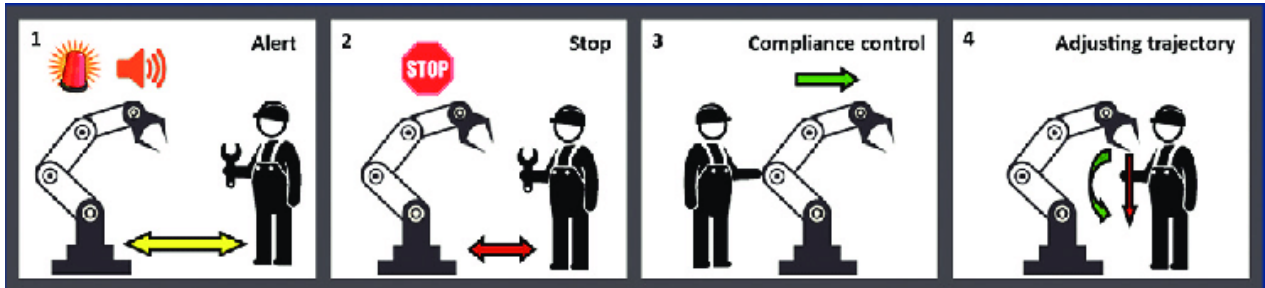
Τα συνεργατικά ρομπότ ή ρομπωτικοί βοηθοί, που συναντούνται συχνά στην αγγλική βιβλιογραφία ως *collaboration robots* ή *cobots*, περιγράφουν τα ρομπότ που προορίζονται για συνεργασία με τον άνθρωπο και δεν χρειάζεται να έχουν αυστηρά διαφορετικό σχεδιασμό από το πρότυπο βιομηχανικό ρομπότ που συμμορφώνεται με το πρότυπο ασφαλείας ISO EN 10218. Ωστόσο, το συνεργατικό ρομπότ πρέπει να είναι εξοπλισμένο με άλλα εξαρτήματα ασφαλείας, οι συστάσεις για το οποίο συνοψίζονται στην τεχνική προδιαγραφή ISO / TS 15066 (*Robots and robotic devices – Collaborative robots*).

Τα συνεργατικά ρομπότ και άλλες περιφερειακές συσκευές που βελτιώνουν την ασφάλεια των ρομπωτικών χώρων εργασίας δεν έχουν σχεδιαστεί για να υποκαταστήσουν πλήρως τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Οι ρομπωτικοί βοηθοί διευρύνουν τη γκάμα των ρομπωτικών εφαρμογών στον κλάδο και προσφέρουν αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Από την κοινωνικοοικονομική σκοπιά, η ανάπτυξη των ρομπότ βοηθά την ανταγωνιστικότητα των εταιρειών σε σύγκριση με χώρες με πολύ φθηνή ανθρώπινη εργασία. Ακόμη και μια μικρή εταιρεία μπορεί να επικεντρωθεί τις απαιτήσεις των πελατών και προσφέρουν ένα προϊόν για χαμηλότερη τιμή.
- Η επαναληπτική ακρίβεια τοποθέτησης και η συνεχής λειτουργία του ρομπότ παρέχει καλύτερη ποιότητα και χαμηλότερες απαιτήσεις για μεταποιητική επεξεργασία και έλεγχο ποιότητας.
- Τα ρομπότ μπορεί να επιταχύνουν ορισμένες λειτουργίες και επίσης να προσαρμόζονται σε ειδικές συνθήκες που μπορούν να οδηγήσουν στην αύξηση της παραγωγής.
- Ο περιορισμός της δυσάρεστης, επαναλαμβανόμενης και κουραστικής εργασίας οδηγεί σε περιορισμό της ανθρώπινης καταπόνησης που μπορεί να οδηγήσει σε επαγγελματικές νόσους.
- Υπάρχει σχέση μεταξύ της επιβάρυνσης των εργοδοτών και της εργονομίας των λειτουργιών. Η βελτίωση του εργασιακού περιβάλλοντος μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του αριθμού των επαγγελματικών τραυματισμών.
- Συνήθως η καταστρατήγηση των κανόνων ασφαλείας και η αναγκαιότητα ταχύτερης διεκπεραίωσης των διεργασιών οδηγεί σε επικίνδυνες συνθήκες στο εργασιακό περιβάλλον. Εάν υπάρχει πιο ασφαλής τεχνολογία, ο κίνδυνος τραυματισμού είναι χαμηλότερος.

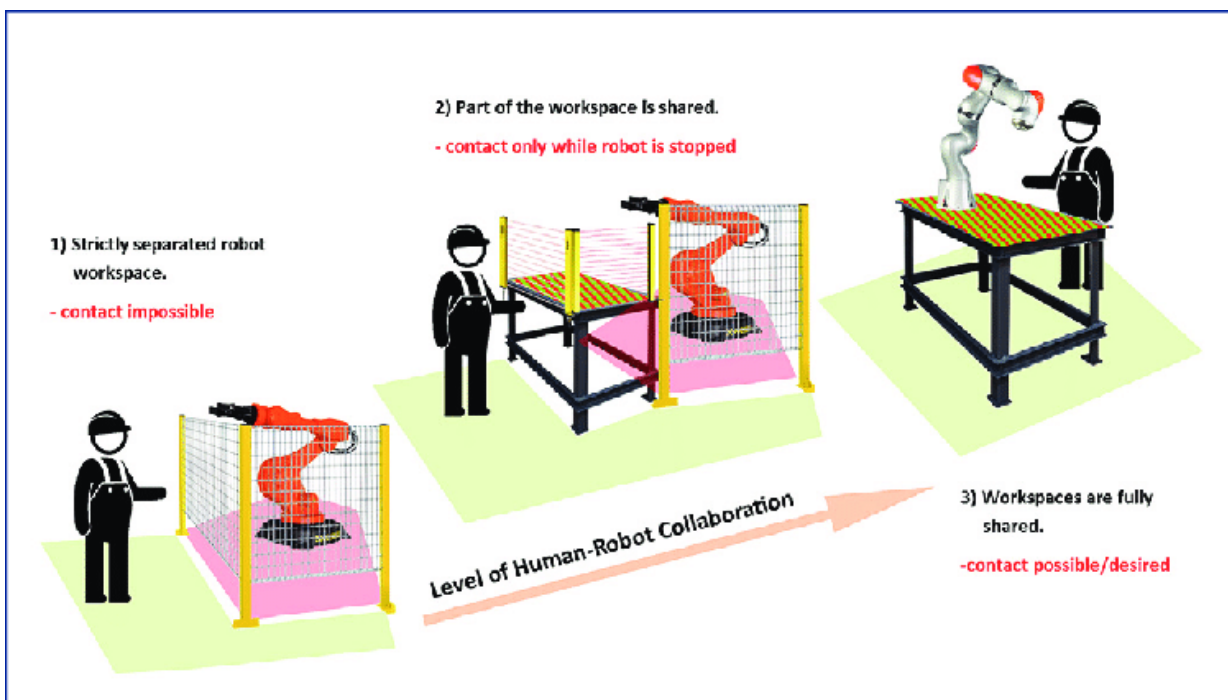
Το συνεργατικό ρομπότ πρέπει να αντιδρά με την παρουσία ξένου αντικείμενου, ενός ανθρώπου ή σε σύγκρουση με αυτό το αντικείμενο. Ο χώρος εργασίας του ρομπότ πρέπει να παρακολουθείται, ενώ η σήμανση μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το επίπεδο του

συστήματος. Στο πλαίσιο της ασφάλειας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-2, είναι απαραίτητη η ειδοποίηση με συναγερομό ήχο και φωτός (1) και να σταματήσει ο χειριστής το ρομπότ (2). Τα πιο προηγμένα συστήματα μπορούν να παρέχουν έλεγχο συμμόρφωσης (3) και να ρυθμίζουν την κίνηση μέσω αυτής. Στα πιο εξελιγμένα συστήματα είναι πλήρης η εξάλειψη της σύγκρουσης με την προσαρμογή της τροχιάς κίνησης του ρομπότ (4).



Εικόνα 2-2: Πλαίσιο ασφάλειας συνεργατικών ρομπότ [Becerra, Member, & Llata, 2017]

Με το αυξανόμενο επίπεδο συνεργασίας, ο χώρος εργασίας του ρομπότ και του εργάτη συμπίπτουν περισσότερο μέχρι τελικά να ενοποιηθούν εντελώς (Εικόνα 2-3). Η συνήθης κυψέλη ρομπότ έχει υλικό ή εικονικό φράγμα με μορφή σαρωτή ή φως κουρτίνας (1) για να αποτρέψει την ανθρώπινη επαφή με τη μηχανή. Μια ανώτερη μορφή συνεργασίας επιφέρει κοινό χώρο εργασίας με αποκλειστική κίνηση του ρομπότ υπό την προϋπόθεση ότι ο άνθρωπος δεν είναι στο χώρο εργασίας του (2). Η πιο προηγμένη είναι η ταυτόχρονη κίνηση (3).



Εικόνα 2-3: Χώρος εργασίας ρομπότ και ανθρώπου [https://www.researchgate.net]

## 2.3 Οι Τύποι της Συνεργασίας A-P

Στο πρότυπο ασφαλείας ISO EN 10218 για τα ρομπότ και τις ρομποτικές συσκευές ορίζονται τέσσερις βασικοί τύποι συνεργασίας με τον άνθρωπο. Για ορισμένους τύπους συνεργασίας είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν ειδικά συνεργατικά ρομπότ με ενσωματωμένους αισθητήρες. Άλλοι τύποι εφαρμογών αρκούνται στη χρήση συμβατικού ρομπότ με αναβαθμισμένους αισθητήρες και έλεγχο.

Η παρακολουθούμενη διακοπή λειτουργίας με βάση κριτηρίων ασφαλείας (*Safety-rated Monitored Stop*) είναι ο απλούστερος τρόπος συνεργασίας. Υπάρχουν εφαρμογές όπου το ρομπότ μοιράζεται ένα μέρος ή το σύνολο του χώρου εργασίας του με το προσωπικό λειτουργίας. Στην περίπτωση ενός εργαζομένου που εμφανίζεται στο χώρο εργασίας του ρομπότ, το μηχάνημα σταματάει και στέκεται μέχρι ο άνθρωπος να απομακρυνθεί. Στην κοινόχρηστη περιοχή το ρομπότ και ο χειριστής μπορούν να εισέρχονται αλλά όχι ταυτόχρονα.

Μπορούμε να βρούμε αυτό το είδος συνεργασίας στη χειρωνακτική εισαγωγή αντικειμένων στον τελικό τελεστή του ρομπότ ή τη θέση πρόσκρουσης από την οποία το ρομπότ συλλέγει το αντικείμενο. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η οπτική επιθεώρηση η οποία μπορεί να είναι απαραίτητη κατά τη λειτουργία. Μπορεί να υπάρχουν επιχειρήσεις όπου απαιτείται η ανθρώπινη παρουσία, όπως μια εργασία υπερβολικά σύνθετη για αυτοματοποίηση. Τα ρομπότ μπορούν επίσης να βοηθήσουν τον εργάτη με το χειρισμό των βαρύτερων ωφέλιμων φορτίων.

Στη διαδικασία δια χειρός καθοδήγησης από τον χειριστή (*Hand Guiding*), το φορτίο του ρομπότ αντισταθμίζεται για να κρατήσει τη θέση του. Ο χειριστής μπορεί ελεύθερα να κινηθεί στο χώρο χωρίς να απαιτείται η άσκηση δύναμης για τη μετακίνηση του φορτίου. Σε αυτή την περίπτωση, ο άνθρωπος έρχεται σε απευθείας επαφή με το μηχάνημα, αλλά η κίνηση του ρομπότ καθοδηγείται μόνο από τον χειριστή. Για λόγους ασφαλείας, η ταχύτητα του ρομπότ μειώνεται και το ρομπότ εφοδιάζεται με μια συσκευή παρακολούθησης του φορτίου πρόσκρουσης. Ορισμένα ρομπότ έχουν ευαίσθητα στοιχεία (όπως αισθητήρες ροπής στρέψης) ενσωματωμένα απευθείας στις αρθρώσεις τους.

Για αυτόν τον τύπο συνεργασίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα τυπικό ρομπότ. Το ρομπότ αυτό θα πρέπει να είναι εξοπλισμένο με έναν αισθητήρα που ανιχνεύει εξωτερικά φορτία. Αυτός ο αισθητήρας τοποθετείται στον καρπό του ρομπότ μεταξύ της διεπαφής εξόδου και του τελικού τελεστή. Μετράει και αξιολογεί το φορτίο και ελέγχει τη συμμόρφωση του ρομπότ. Για να αυξηθεί η ασφάλεια, υπάρχει ένα κουμπί ενεργοποίησης (διακόπτης νεκρού) στη θέση της αρπαγής. Το ρομπότ μπορεί να μετακινηθεί μόνο αν το κουμπί πιεστεί, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση το ρομπότ σταματά. Το ρομπότ μπορεί να βελτιώσει την εργονομία σε θέματα ανύψωσης και μετακίνησης μεγάλων φορτίων και το λειτουργικό προσωπικό καλείται να προσδώσει μόνο μια μικρή καθοδηγητική δύναμη. Η χειροκίνητη καθοδήγηση χρησιμοποιείται σε περίπτωση συντονισμένης κίνησης ημιαυτόματων λειτουργιών ή κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού του ρομπότ. Οι θέσεις της επιθυμητής τροχιάς δίνονται σύμφωνα με την καθοδήγηση του χειριστή.

Επόμενος τύπος συνεργασίας είναι αυτός της παρακολούθησης ταχύτητας και διαχωρισμού (*Speed and Separation monitoring*). Σε αυτή την περίπτωση, ο χώρος εργασίας

του ρομπότ χωρίζεται σε αρκετές περιοχές που παρακολουθούνται με σαρωτές ή ένα σύστημα όρασης. Οι περιοχές που δεν είναι προσβάσιμες από τον χειριστή, δηλαδή εκεί που ο χειριστής δεν έρχεται σε επαφή με το ρομπότ αλλά μπορεί να απειληθεί από ένα χειριζόμενο από το ρομπότ αντικείμενο, το ρομπότ επιβραδύνει σε μια ασφαλή ταχύτητα. Εάν ο χώρος εργασίας του ρομπότ παραβιάζεται από τον χειριστή, η λειτουργία του ρομπότ διακόπτεται. Όσο αυτές οι δύο περιοχές δεν παραβιάζονται, το ρομπότ μπορεί να λειτουργήσει με μέγιστες παραμέτρους, ενώ η ταχύτητα και η θέση του ρομπότ παρακολουθούνται συνεχώς. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα εφαρμογής μπορεί να είναι σε ένα σταθμό εργασίας όπου το ρομπότ λειτουργεί σε μέγιστη τιμή ταχύτητας αλλά το προσωπικό λειτουργίας πρέπει να εισέλθει στην περιοχή σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή π.χ. λόγω των ζητημάτων εφοδιαστικής είτε για να τοποθετήσει είτε να αφαιρέσει το προϊόν.

Τελευταίος τύπος συνεργασίας είναι ο περιορισμός της δύναμης (*Power and Force Limiting*), όπου απαιτούνται ειδικά συνεργατικά ρομπότ. Οι παράμετροι κίνησης των ρομπότ παρακολουθούνται με μεγάλη ακρίβεια και μπορεί να ανιχνευθεί ακόμη και μια μικρή απόκλιση από την πραγματική θέση σε σύγκριση με την προγραμματισμένη θέση. Οι δυνάμεις και οι ροπές μετριοούνται και αξιολογούνται με ευαίσθητους αισθητήρες ροπής στις αρθρώσεις του ρομπότ, με ανάλυση του ηλεκτρικού ρεύματος που αντλείται από ενεργοποιητές (actuators), μετρώντας τις μεταδιδόμενες αντιδράσεις στο έδαφος ή με απτικούς αισθητήρες. Το ρομπότ είναι, συνεπώς, ικανό να εντοπίσει το εμπόδιο, να αναλύσει το αντίκτυπο της σύγκρουσης και να αντιδράσει ανάλογα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Το ρομπότ μπορεί να σταματήσει αμέσως κατά τη σύγκρουση, ή να κάνει μια αντίθετη κίνηση σε αντίθετη κατεύθυνση για τη μείωση της ενέργειας σύγκρουσης όσο το δυνατόν περισσότερο.

Με τη χρήση ειδικών συνεργατικών ρομπότ μπορεί να επιτευχθεί μια πραγματική συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ. Τυπικές εφαρμογές αυτής είναι η σύνθεση και η συναρμολόγηση αντικειμένων που αποτελούνται από μικρά κομμάτια. Για παράδειγμα στη βιομηχανία ηλεκτρονικών το ρομπότ μπορεί να τοποθετήσει αντικείμενα σε ακριβείς υποδοχές και να διορθώνει τη θέση τοποθέτησης σε πραγματικό χρόνο λόγω της ευαισθησίας τους ενώ, ακόμα, είναι ικανό να ακολουθεί το περίγραμμα της επιθυμητής επιφάνειας εφαρμόζοντας καθορισμένη δύναμη.

## **2.4 Η Ασφάλεια των Συνεργατικών Ρομπότ**

Η παρουσία ανθρώπου στην περιοχή όπου κινείται ένας βαρύς ρομποτικός βραχίονας με μεγάλη ταχύτητα επιβάλλει τη λύση των ζητημάτων ασφαλείας. Τα κλασικά βιομηχανικά ρομπότ διαθέτουν προειδοποιητικά χρώματα και περιβάλλοντα από φράχτη, κάτι που δεν ισχύει για τα συνεργατικά ρομπότ. Όταν η λειτουργική εμβέλεια του ρομπότ παραβιάζεται, το ρομπότ σταματά την κίνησή του για να αποφευχθούν τραυματισμοί και βλάβες. Αν το ρομπότ μεταφέρει φορτίο που ζυγίζει έως και αρκετούς τόνους, ή κινείται με επιτάχυνση 10g, τότε είναι προφανές ότι πρέπει να διασφαλίζεται η ασφάλεια της παρουσίας του προσωπικού στο χώρο.



Για να επιτευχθεί ένα ασφαλές περιβάλλον συνεργασίας A-P πρέπει να γίνουν κάποιιο συμβιβασμοί, συμπεριλαμβανομένου του μέγιστου ωφέλιμου φορτίου που μετακινεί το ρομπότ και της ταχύτητας της κίνησής του. Έτσι, το μέγιστο φορτίο των συνεργατικών ρομπότ είναι περίπου 10 kg και η μέγιστη ταχύτητα της κίνησής του περιορίζεται στα 250 mm ανά δευτερόλεπτο. Αυτοί οι περιορισμοί συμβάλλουν στην ελαφρά κατασκευή του ρομπότ, που με τη σειρά του βοηθά τον περιορισμό των επιπτώσεων σε περίπτωση σύγκρουσης. Ωστόσο, ακόμη και αυτοί οι περιορισμοί δεν επαρκούν. Το ρομπότ πρέπει να αναβαθμιστεί με αισθητήρες ανίχνευσης, εμποδίζοντας έτσι τις συγκρούσεις.

Οι κατασκευαστές επέλεξαν διαφορετικές στρατηγικές για να εξασφαλίσουν την ασφάλειά των προϊόντων τους. Στην Εικόνα 2-4 φαίνονται μερικά παραδείγματα συνεργατικών ρομπότ. Τα πρώτα δύο από αυτά στα αριστερά είναι τροποποιημένα συμβατικά ρομπότ εξοπλισμένα με παθητικά και ενεργά στοιχεία ασφαλείας. Το ρομπότ στη μέση έχει παρόμοιο εύρος εργασίας και παραμέτρους όπως ένας εργάτης του ανθρώπινου δυναμικού. Τα τελευταία δύο είναι ειδικά ελαφριά ρομπότ με ενσωματωμένους αισθητήρες.



Εικόνα 2-4: Συνεργατικά ρομπότ με τη σειρά από αριστερά προς δεξιά Systeme KR SI, Fanuc CR-35iA, ABB YuMi, UR5, KUKA LBR iiwa

Η χρήση ενεργών στοιχείων ανίχνευσης σύγκρουσης αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο για τον περιορισμό ισχύος. Για παράδειγμα, ένας νέος αναδραστικός έλεγχος που αναπτύσσεται είναι ένα εξωτερικό περίβλημα με αισθητήρες που να λειτουργεί σαν δέρμα (Hutchinson & F. Chaumette, 2006). Ορισμένα ρομπότ περιβάλλονται από ένα κάλυμμα αισθητήρα που μπορεί να ανιχνεύσει το εμπόδιο πριν από την ίδια τη σύγκρουση λόγω των χωρικών αισθητήρων. Οι συγκρούσεις μπορούν να προβλεφθούν, επίσης, με συστήματα όρασης. Σε αυτές τις εφαρμογές είναι απαραίτητη η πολύ γρήγορη ανταπόκριση.

Σε περίπτωση σύγκρουσης, το συνεργατικό ρομπότ είναι εξοπλισμένο με παθητικά στοιχεία προστασίας και ο σχεδιασμός του είναι προσαρμοσμένος ώστε να ελαχιστοποιεί τη ζημιά. Αυτά τα ρομπότ δεν έχουν αιχμηρά άκρα και όλα τα επικίνδυνα τους μέρη είναι στρογγυλεμένα. Τα cobots δεν έχουν μέρη που θα μπορούσαν να παρασύρουν το χειριστή ως συνέπεια της περιστροφής και όλες επιφάνειες είναι καλυμμένες με μαλακά πλαστικά ή/και αφρώδη υλικά. Ακόμη, τα καλώδια τοποθετούνται σε εύκαμπτους σωλήνες πεπιεσμένου αέρα στο εσωτερικό του ρομπότ ή καλύπτονται εξωτερικά, ώστε ο κίνδυνος να μπλεχτούν και να οδηγήσουν σε κάποιο ατύχημα είναι ελάχιστος.

Από την άποψη της ασφάλειας των cobots, είναι σημαντικό να συνειδητοποιήσουμε ότι τα ενεργητικά στοιχεία ασφαλείας πρέπει να ρυθμιστούν σωστά. Σε περίπτωση λανθασμένης ρύθμισης, τα συνεργατικά ρομπότ μπορεί να εμφανίζουν ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά τυπικών ρομπότ, όπως η κίνηση με μεγάλη ταχύτητα και ενέργεια κρούσης

μεγαλύτερη από το επιτρεπτό (ασφαλές) όριο. Είναι απαραίτητο να ρυθμιστούν τα όρια σωστά κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού, ώστε αν αυτά τα όρια ξεπεραστούν το ρομπότ να αντιδρά ή να σταματά. Μια σημαντική παράμετρος είναι το πραγματικό χειριζόμενο ωφέλιμο φορτίο του ρομπότ επειδή εισέρχεται στον υπολογισμό σε ένα δυναμικό μοντέλο.

Η ασφάλεια του ρομπότ είναι στενά συνδεδεμένη με την ασφάλεια της τεχνολογίας τοποθετείται στο τέλος του. Όλα όσα είναι στερεωμένα στο ρομπότ μπορούν μειώσουν την ασφάλειά του. Αυτό ισχύει για τα καλώδια που είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια του ρομπότ επιφάνεια, το σύστημα όρασης, αλλά κυρίως ο τελικός τελεστής. Το ρομπότ γίνεται επικίνδυνο όταν χειρίζεται με αντικείμενο με αιχμηρές άκρες ή κοφτερά τμήματα. Άλλα επικίνδυνα αντικείμενα μπορεί να είναι οι κεφαλές διάτρησης ή συγκόλλησης τοποθετημένες στο ρομποτικό βραχίονα, όπου η επαφή του ανθρώπου απαγορεύεται. Επομένως, για να επιτευχθεί η ενσωμάτωση των συνεργατικών ρομπότ στην παραγωγή, είναι αναγκαίο να εκπονηθεί λεπτομερής ανάλυση κινδύνου.

## 2.5 Παραδείγματα Εφαρμογών Συνεργατικών Ρομπότ

Ακόμη και αν η τεχνολογία είναι ακόμα πρώιμα στάδια ανάπτυξης, ορισμένες εταιρείες και πανεπιστήμια έχουν ήδη προχωρήσει σε εφαρμογές με cobots. Η KUKA και το ινστιτούτο Fraunhofer συνδυάζουν μία κινητή πλατφόρμα με ένα cobot σε έναν ευκίνητο ρομποτικό βοηθό που έχει ευρύ χώρο εργασίας χάρη στην ευκινησία του. Οι εφαρμογές δοκιμάζονται τόσο στον πραγματικό όσο και στον εικονικό κόσμο και η συνύπαρξη με το ρομπότ αποτελεί ερευνητικό αντικείμενο (Ma et al., 2010).



Εικόνα 2-5: Τοποθέτηση βαλβίδων ανάφλεξης σε εργοστάσιο της Volkswagen [Robotiq, <https://robotiq.com>]

Στην αυτοκινητοβιομηχανία μπορούμε να βρούμε συνεργατικές εφαρμογές (El Zaatari et al., 2019), όπως αυτή της AUDI που ονομάζεται PART4you και περιλαμβάνει την ρομποτική εναπόθεση στοιχείων προς συναρμολόγηση από ένα κιβώτιο μπροστά στον εργαζόμενο έτσι ώστε αυτός να μην χρειάζεται να σκύψει. Στη BMW συνεργατικά ρομπότ

χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση των πορτών στο αμάξωμα σε συνεργασία με τον άνθρωπο. Άλλη εφαρμογή αποτελεί η συναρμολόγηση κινητήρα της VW όπου το ρομπότ εισάγει βαλβίδες ανάφλεξης σε κυλίνδρους δίπλα στον εργάτη (Εικόνα 2-5).

Στη SKODA AUTO υπάρχει αντίστοιχη συνεργασία A-P στο εργοστάσιο συναρμολόγησης κιβωτίων ταχυτήτων Vrchlabi (Εικόνα 2-6). Το ρομπότ χάρη στην ευαισθησία του, εισάγει το έμβολο του ενεργοποιητή (actuator) μετάδοσης κίνησης σε μια ακριβή οπή. Κατά τη βαθμονόμηση του χώρου εργασίας, ο χειριστής μπορεί να σπρώξει το ρομπότ και να παραμένει σε αναμονή μέχρι ο χώρος εργασίας να είναι πάλι άδειος. Το ρομπότ που χρησιμοποιείται είναι το KUKA LBR iiwa που είναι εξοπλισμένο με ασφαλή ακραίο τελεστή χωρίς αιχμηρές άκρες και δεν βλάπτει τον άνθρωπο με κανέναν τρόπο. Άλλη εφαρμογή που δοκιμάζεται είναι η καθοδήγηση του ρομπότ με το χέρι του χειριστή όπου το ρομπότ κρατά το αντικείμενο και προσαρμόζει τη θέση του κατάλληλα ώστε να το τοποθετήσει.



Εικόνα 2-6: Συνεργασία SKODA AUTO και KUKA LBR iiwa [International Federation of Robotics, <https://ifr.org>]

## **3 Η Εργονομία στη Συνεργασία Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P)**

### **3.1 Η Αναγκαιότητα Εργονομικού Σχεδιασμού στη Βιομηχανική Παραγωγή**

Η Εργονομία είναι η επιστήμη που προάγει τη βελτίωση της ανθρώπινης υγείας και απόδοσης μέσω της μελέτης και συμβολής στο σχεδιασμό μηχανών, εργαλείων, καθηκόντων και περιβάλλοντος δράσης. Η Εργονομία βάζει τον άνθρωπο-χρήστη στο κέντρο του σχεδιασμού και δίνει προτεραιότητα στις ανάγκες και τις δυνατότητες αυτού. Σκοπός της εργονομίας είναι η διασφάλιση της εναρμόνισης του εργασιακού περιβάλλοντος με τις ανάγκες και την εργασία των ανθρώπων που δραστηριοποιούνται σε αυτό. Ερευνά τον τρόπο με τον οποίο τα εργαλεία, τα καθήκοντα και το περιβάλλον εργασίας ανταποκρίνονται στις ικανότητες και τα σωματομετρικά χαρακτηριστικά του εργαζομένου, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει υπόψη την επιρροή στην ψυχοσύνθεσή του, ώστε να προτείνει τις κατάλληλες σχεδιαστικές αλλαγές για να προσαρμοστούν οι συνθήκες εργασίας στα μέτρα του εργαζομένου.

Τα πρώτα χρόνια που εφαρμόστηκε η εργονομία στη βιομηχανική παραγωγή στόχευε κυρίως στην αύξηση της απόδοσης της ανθρώπινης εργασίας ώστε να αυξηθεί η παραγωγικότητα. Αργότερα προστέθηκε μία σημαντική λειτουργία αυτής που στοχεύει στη βελτίωση των εργασιακών συνθηκών και, ως αποτέλεσμα, της υγείας του εργαζομένου. Η Διεθνής Ένωση Εργονομίας (IEA- International Ergonomics Assosiation) το 2000 όρισε την εργονομία ως την επιστήμη που μελετά την αλληλεπίδραση του εργαζόμενου με τα υπόλοιπα στοιχεία ενός συστήματος εργασίας, εφαρμόζοντας θεωρητικές αρχές, έρευνες, δεδομένα και μεθόδους για τον σχεδιασμό των εργασιακών καθηκόντων, με στόχο την προαγωγή της υγείας του ανθρώπινου δυναμικού και την βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης της παραγωγής.

Έχει παρατηρηθεί από τη βιβλιογραφία ότι οι εργασιακές μυοσκελετικές παθήσεις (ΕΜΣΠ) είναι κοινό φαινόμενο που εντοπίζεται σε χειρωνακτικές εργασίες, όπως είναι αυτές της συγκόλλησης και της συναρμολόγησης. Αρκετές ερευνητικές μελέτες και οι εκθέσεις της βιομηχανίας φανερώνουν ότι οι κίνδυνοι αυτοί είναι μπορούν εύκολα να μειωθούν ή και να εξαλειφθούν μέσω σχετικών εργονομικών αξιολογήσεων, διευκολύνοντας την προσαρμογή εργασίας / χώρου εργασίας. Από τη βιβλιογραφία παρατηρείται ότι το 43% των τραυματισμών χειρωνακτικού χειρισμού που σχετίζονται με το χώρο εργασίας αφορούν διαστρέμματα και καταπόνηση αρθρώσεων και γειτονικών μυών και το 33% των ΕΜΣΠ οφείλονται σε μυϊκές καταπονήσεις που προκύπτουν από την ανύψωση και το χειρισμό του βαρέων αντικείμενων. Σε γενικές γραμμές, κοινές μορφές ΕΜΣΠ όπως ο πόνος στην πλάτη και οι τραυματισμοί των αρθρώσεων συνδέονται με τη μυϊκή καταπόνηση από τα καθήκοντα της χειρωνακτικής εργασίας, επιπτώσεις από επαναλαμβανόμενα καθήκοντα, κακή στάση σώματος και κόπωση.

Είναι στο συμφέρον του εργοδότη η επένδυση στη διαμόρφωση των εργασιακών συνθηκών που ευνοούν την υγεία και την ευημερία του ανθρώπινου δυναμικού καθώς έτσι αυξάνεται η παραγωγικότητα και μειώνονται κόστη όπως άδειες λόγω τραυματισμών, αυξημένη υγειονομική περίθαλψη, αναπηρία και κόστος αποζημίωσης των εργαζομένων. Ενδεικτικά παραθέτονται κάποια στατιστικά στοιχεία που αποδεικνύουν τη συχνότητα εμφάνισης ΕΜΣΠ και την αναγκαιότητα αντιμετώπισής τους:

- Το 2001, οι εργαζόμενοι με ΕΜΣΠ έλαβαν μέση άδεια 8 ημερών από την εργασία σε σύγκριση με 5 ημέρες για όλες τις περιπτώσεις μη τραυματισμού και ασθένειας (π.χ. απώλεια ακοής, επαγγελματικές ασθένειες του δέρματος όπως δερματίτιδα, έκζεμα ή εξάνθημα).
- Οι τομείς της βιομηχανίας παραγωγής κάλυψαν περίπου το ήμισυ όλων των περιπτώσεων ΕΜΣΠ στην Αμερική για το έτος 2001.
- Οι μυοσκελετικές διαταραχές αντιπροσωπεύουν περίπου 70 εκατομμύρια ιατρικών επισκέψεων στις Ηνωμένες Πολιτείες ετησίως και εκτιμάται ότι χρειάζονται 130 εκατομμύρια συνολικών συνεδριάσεων για την υγειονομική περίθαλψη, συμπεριλαμβανομένων επισκέψεων εξωτερικών ασθενών, νοσοκομείων και επειγόντων περιστατικών.
- Το Ινστιτούτο Ιατρικής εκτιμά ότι η οικονομική επιβάρυνση των ΕΜΣΠ, όπως μετράται με το κόστος αποζημίωσης, τους χαμένους μισθούς και τη χαμένη παραγωγικότητα, είναι μεταξύ 45 και 54 δισεκατομμυρίων δολαρίων ετησίως.
- Σύμφωνα με την Liberty Mutual, το μεγαλύτερο πάροχο ασφαλιστικών αποζημιώσεων των εργαζομένων στις Ηνωμένες Πολιτείες, οι ΕΜΣΠ κοστίζουν στον εργοδότη 13,4 δισεκατομμυρίων δολαρίων ετησίως σε αποζημιώσεις εργαζομένων.

Ο σωστός εργονομικός σχεδιασμός μπορεί να ωφελήσει στη βελτίωση όλων αυτών των παραγόντων που συμβάλλουν στις ΕΜΣΠ και να μειώσει τη συχνότητα εμφάνισής τους, όπως αναφέρει και η Εθνική Ακαδημία Επιστημών των Η.Π.Α (Makrini, Merckaert, Winter, Lefeber, & Vanderborght, 2019).

Οι εργονομικές παρεμβάσεις αφορούν διάφορους τομείς της εργασίας και επηρεάζουν την προσαρμογή: τις θέσεων εργασίας, τα μηχανήματα, τα εργαλεία, τα ωράρια και τον εργασιακό χώρο ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του ανθρώπου. Διακρίνονται στα εξής τέσσερα επίπεδα:

- Σχεδιασμός των θέσεων εργασίας (σωστή στάση και τεχνική κατά την εργασία).
- Σχεδιασμός του ρυθμού εργασίας (οργάνωση των ωραρίων, των διαλειμμάτων, της διάρκειας των καθηκόντων και της κατανομής της εργασίας).
- Σχεδιασμός ή επιλογή κατάλληλου εργασιακού εξοπλισμού (σωστή εκμετάλλευση των χρησιμοποιούμενων εργαλείων και των μηχανημάτων).
- Σχεδιασμός του φυσικού περιβάλλοντος της εκτέλεσης της εργασίας (σωστή οργάνωση του χώρου).

## 3.2 Εργονομία και Συνεργατικά Ρομπότ

Στο International Digital Human Modeling Symposium τον Ιούνιο του 2016, ερευνητές του ISIR από το Παρίσι παρουσίασαν τη μελέτη της τους για την αναγκαιότητα συνεργατικών ρομπότ για τη σύγχρονη εργονομία στο χώρο εργασίας: «Οι μυοσκελετικές διαταραχές που σχετίζονται με την εργασία αποτελούν σημαντικό πρόβλημα υγείας στις ανεπτυγμένες χώρες και επηρεάζουν σχεδόν το 50% των εργαζομένων στη βιομηχανία. Η παροχή βοήθειας στους εργαζόμενους με συνεργατικά ρομπότ μπορεί να αποτελέσει λύση όταν μια εργασία είναι απαιτητική από φυσική άποψη ή/και πολύπλοκη για να είναι πλήρως αυτοματοποιημένη».

Η συνεργασία A-P είναι ένα εργαλείο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στο χώρο εργασίας για την καταπολέμηση των ΕΜΣΠ και άλλων προβλημάτων υγείας που οφείλονται στην κακή εργονομία. Είναι σημαντικό να εξεταστούν τα καθήκοντα στα οποία το ρομπότ και ο άνθρωπος αλληλεπιδρούν φυσικά μεταξύ τους, και όχι απλώς εργάζονται παράλληλα, όπως συμβαίνει με πολλά cobots. Η σωματική αλληλεπίδραση εισάγει κάποιες επιπλοκές στο σχεδιασμό: το ρομπότ λύνει προβλήματα εργονομίας στο χώρο εργασίας, αλλά μπορεί να βλάψει και τον ίδιο τον άνθρωπο εάν δεν είναι εργονομικά σχεδιασμένο. Ωστόσο, η εργονομία είναι σημαντική ακόμα και όταν τα cobots δεν αλληλεπιδρούν συνεχώς με τους εργαζόμενους.

Μπορούμε να χωρίσουμε τη συνεργατική ρομποτική εργονομία σε δύο μέρη:

- Η εργονομία του ίδιου του ρομπότ, ως προϊόν που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο.
- Τα εργονομικά ζητήματα του καθήκοντος, τα οποία επιλύονται χρησιμοποιώντας το συνεργατικό ρομπότ αντί ενός ανθρώπου.

Τα παραδοσιακά βιομηχανικά ρομπότ δεν ήταν απαραίτητο να ενσωματώνουν εργονομικούς κανόνες, καθώς δεν σχεδιάστηκαν για ανθρώπινη αλληλεπίδραση. Τα συνεργατικά ρομπότ, από την άλλη πλευρά, πρέπει να αλληλεπιδρούν φυσικά με τους ανθρώπους. Οι σχεδιαστές συνεργατικών ρομπότ ενσωματώνουν την εργονομία εξετάζοντας τα σχήματα και τις αναλογίες του ανθρώπινου σώματος. Συχνά, χρησιμοποιούν ανθρωπομετρικές βάσεις δεδομένων οι οποίες παρέχουν μέσες αναλογίες του σώματος για διαφορετικούς πληθυσμούς ανθρώπων. Υπάρχουν κάποιες βασικές παράμετροι στην εργονομική σχεδίαση:

- Ομαλή μηχανική σχεδίαση
- Μείωση επιβλαβών κραδασμών
- Αντιστάθμιση βαρύτητας
- Έλεγχος χωρίς απαιτούμενη επαφή

Όσο περισσότερο η σωματική αλληλεπίδραση γίνεται μέρος συνεργατικής ρομποτικής, τόσο περισσότερο οι σχεδιαστές θα πρέπει να ενσωματώσουν εργονομικούς παράγοντες στο σχεδιασμό του προϊόντος.

Η δεύτερη εργονομική παράμετρος για τη συνεργατική ρομποτική είναι η εργονομία του έργου που εκτελεί το ρομπότ. Οι εργασίες με επαναλαμβανόμενες κινήσεις, για παράδειγμα, είναι ιδανικές για ένα ρομπότ, επειδή είναι συχνά το είδος των καθηκόντων που μπορούν να προκαλέσουν στον άνθρωπο την ανάπτυξη ΕΜΣΠ και άλλων τραυματισμών. Η

μείωση των εργονομικών τραυματισμών είναι ένα από τα κορυφαία οφέλη της χρήσης ρομποτικής συνεργασίας, παράλληλα με τα οφέλη από την παραγωγικότητά τους.

Όπως αναφέρει η Occupational Safety and Health Administration (OSHA) σε σχετική της έκθεση «Λύσεις για την Πρόληψη των Μυοσκελετικών Τραυματισμών σε Χυτήρια», υπάρχει ένα εύρος καταγεγραμμένων καθηκόντων που μπορεί να είναι προβληματικά για τον άνθρωπο, αλλά τα οποία μπορούν να γίνουν επανειλημμένα από ένα συνεργατικό ρομπότ χωρίς πρόβλημα. Ορισμένες από τις προτάσεις περιλαμβάνουν:

- Επαναλαμβανόμενες κινήσεις χεριών ή βραχιόνων
- Δυσμενής τοποθέτηση των χεριών, ειδικά κινήσεις που απαιτούν περιέργες γωνίες
- Οι κινήσεις βραχίονα, καρπού η ώμου ψηλότερα από το επίπεδο του ώμου
- Φυσική κόπωση και καταπόνηση
- Λαβές πιασίματος από ανθρώπινο χέρι που απαιτούν δύναμη
- Χειροκίνητη ανύψωση και τοποθέτηση υλικού

### **3.3 Μυοσκελετική Καταπόνηση Καρπού σε Καθήκοντα Συναρμολόγησης**

Οι εργαζόμενοι σε γραμμές συναρμολόγησης εμφανίζουν υψηλή συχνότητα ΕΜΣΠ και ιδιαίτερα καταπόνηση του χεριού και του καρπού που οδηγούν στην εμφάνιση παθήσεων όπως το Σύνδρομο Καρπιαίου Σωλήνα (ΣΚΣ), τενοντίτιδες και αρθρίτιδες. Σε έρευνα σε γραμμή συναρμολόγησης της αυτοκινητοβιομηχανίας οι 189 εργαζόμενοι παρατηρήθηκαν στην διάρκεια ενός έτους και βρέθηκε ότι το 10% αυτών εμφάνισε ΣΚΣ (Werner et al., 2005). Σε μία άλλη έρευνα που έγινε σε δύο εργοστάσια συναρμολόγησης ηλεκτρονικών βρέθηκε ότι το 80% των εργαζόμενων στο πρώτο εργοστάσιο εμφάνισε προβλήματα στα χέρια και τους καρπούς που τους εμπόδισαν στην ομαλή εκτέλεση των καθηκόντων τους, ενώ το ποσοστό για το δεύτερο εργοστάσιο όπου είχαν παρθεί ορισμένα εργονομικά μέτρα ήταν 20% (Kumar & Muralidhar, 2015).

Ένας σημαντικός παράγοντας κινδύνου σε γραμμές συναρμολόγησης μπορεί να είναι η επαναλαμβανόμενη αδέξια στάση του εργαζόμενου στην εργασία ενώ προσπαθεί να αποκτήσει πρόσβαση σε διαφορετικά εξαρτήματα προς συναρμολόγηση. Το ΣΚΣ είναι ένας από τους συχνότερους τύπους ΕΜΣΠ που προκλήθηκαν από καταπονημένους, υπερβολικά τεταμένους μύες του βραχίονα και του χεριού, με αποτέλεσμα την απώλεια ανταπόκρισης του νεύρου εντός του καρπιαίου σωλήνα. Το ΣΚΣ εμφανίζεται συχνά σε εργασίες γραμμής συναρμολόγησης όπως η κατασκευή, το ράψιμο, το φινίρισμα, ο καθαρισμός, η συσκευασία κλπ. και είναι τρεις φορές συχνότερη η εμφάνισή του σε αυτά τα επαγγέλματα συγκριτικά με το προσωπικό εισόδου δεδομένων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (Institute of Neurological Disorders, 2012).

Μετά από έρευνες, ορισμένες συστάσεις για την εξάλειψη ή τη μείωση των παραγόντων κινδύνου ΣΚΣ σε ένα βιομηχανικό χώρο εργασίας είναι (National Institute of Neurological Disorders, 2012):

- Προσοχή στα συχνότερα χρησιμοποιούμενα τμήματα του σταθμού εργασίας που μπορούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην εμφάνιση ΣΚΣ κατά τη διάρκεια μεγάλης επανάληψης δύσκολων στάσεων, ιδιαίτερα όταν οι εργαζόμενοι ασκούν δύναμη.
- Προσαρμογή του ύψους εργασίας για επαναλαμβανόμενα καθήκοντα. Έχοντας το ύψος επιφάνειας εργασίας είτε υπερβολικά υψηλό είτε πολύ χαμηλό μπορεί να οδηγήσει στην επιλογή μιας δύσφορης στάσης του καρπού κατά την εκτέλεση εργασιών.
- Τοποθέτηση των αντικειμένων υπό γωνία έτσι ώστε όταν τα κομμάτια ανακτώνται επανειλημμένα, ο καρπός αφήνεται να παραμείνει σε ουδέτερη στάση.
- Παροχή εξαρτημάτων συγκράτησης, ώστε να μην απαιτείται η ενεργητική συγκράτηση εξαρτημάτων σε μία θέση κατά τη συναρμολόγηση, μειώνοντας την απαιτούμενη δύναμη και τις δύσκολες στάσεις.
- Παροχή κατάλληλου φωτισμού για να είναι δυνατή η επιθεώρηση του προϊόντος χωρίς να χρειαστεί ο χειροκίνητος χειρισμός μιας επιφάνειας.

### 3.4 Η εργονομική αξιολόγηση RULA

Το εργαλείο αξιολόγησης RULA (Rapid Upper Limb Assessment) αναπτύχθηκε από τους Dr. Lynn McAtamney και Dr. Nigel Corlett του Nottingham Institute of Ergonomic Occupational Ergonomics αποτελεί μία βαθμονομημένη αξιολόγηση της καταπόνησης των άνω άκρων και χρησιμοποιείται ευρέως στον εργονομικό σχεδιασμό. Περιγράφηκε για πρώτη φορά σε ένα τεύχος του 1993 του περιοδικού Applied Ergonomics (Lueder, 1996).

Αυτή η εργονομική τεχνική αξιολογεί την έκθεση των ατόμων σε στάσεις, δυνάμεις και μυϊκές δραστηριότητες που έχουν αποδειχθεί ότι συμβάλλουν στην πρόκληση επαναλαμβανόμενων τραυματισμών. Η χρήση αυτής της προσέγγισης εργονομικής αξιολόγησης οδηγεί σε βαθμολογία κινδύνου μεταξύ ενός και επτά, όπου υψηλότερες βαθμολογίες υποδηλώνουν μεγαλύτερα επίπεδα εμφανούς κινδύνου.

Μια χαμηλή βαθμολογία RULA δεν εγγυάται ότι ο χώρος εργασίας είναι χωρίς εργονομικούς κινδύνους και ένα υψηλό σκορ δεν εξασφαλίζει ότι υπάρχει σοβαρό πρόβλημα. Αναπτύχθηκε για την ανίχνευση στάσεων εργασίας ή παραγόντων κινδύνου που αξίζουν μεγαλύτερη προσοχή. Στην Εικόνα 3-1 φαίνονται τα βήματα αξιολόγησης, η βαθμολογία και η χρήση των τιμών τους για τον προσδιορισμό της επικινδυνότητας του καθήκοντος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το μέρος της αξιολόγησης RULA που αφορά στη μυοσκελετική καταπόνηση του καρπού, καθότι αυτό ήταν το τμήμα που είχε μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τα καθήκοντα συναρμολόγησης που μελετήθηκαν. Σε επόμενο κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η προσαρμογή του κριτηρίου RULA και της βαθμολογικής του κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε κατά τις δοκιμές.



### A. Arm and Wrist Analysis

**Step 1: Locate Upper Arm Position:**

Step 1a: Adjust...  
 If shoulder is raised: +1  
 If upper arm is abducted: +1  
 If arm is supported or person is leaning: -1

**3**  
Upper Arm Score

**Step 2: Locate Lower Arm Position:**

Step 2a: Adjust...  
 If either arm is working across midline or out to side of body: Add +1

**2**  
Lower Arm Score

**Step 3: Locate Wrist Position:**

Step 3a: Adjust...  
 If wrist is bent from midline: Add +1

**2**  
Wrist Twist Score

**4**  
Wrist Score

**Step 4: Wrist Twist:**  
 If wrist is twisted in mid-range: +1  
 If wrist is at or near end of range: +2

**5**  
Posture Score A

**0**  
Muscle Use Score

**2**  
Force / Load Score

**7**  
Wrist & Arm Score

**Step 5: Look-up Posture Score in Table A:**  
 Using values from steps 1-4 above, locate score in Table A.

**Step 6: Add Muscle Use Score**  
 If posture mainly static (i.e. held >10 minutes), Or if action repeated occurs 4X per minute: +1

**Step 7: Add Force/Load Score**  
 If load < 4.4 lbs. (intermittent): +0  
 If load 4.4 to 22 lbs. (intermittent): +1  
 If load 4.4 to 22 lbs. (static or repeated): +2  
 If more than 22 lbs. or repeated or shocks: +3

**Step 8: Find Row in Table C**  
 Add values from steps 5-7 to obtain Wrist and Arm Score. Find row in Table C.

### B. Neck, Trunk and Leg Analysis

**Step 9: Locate Neck Position:**

Step 9a: Adjust...  
 If neck is twisted: +1  
 If neck is side bending: +1

**3**  
Neck Score

**Step 10: Locate Trunk Position:**

Step 10a: Adjust...  
 If trunk is twisted: +1  
 If trunk is side bending: +1

**2**  
Trunk Score

**Step 11: Legs:**  
 If legs and feet are supported: +1  
 If not: +2

**1**  
Leg Score

**Table B: Trunk Posture Score**

Posture Score	Neck					
	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6
4	1	2	3	4	5	6
5	1	2	3	4	5	6
6	1	2	3	4	5	6

**Step 12: Look-up Posture Score in Table B:**  
 Using values from steps 9-11 above, locate score in Table B.

**Step 13: Add Muscle Use Score**  
 If posture mainly static (i.e. held >10 minutes), Or if action repeated occurs 4X per minute: +1

**Step 14: Add Force/Load Score**  
 If load < 4.4 lbs. (intermittent): +0  
 If load 4.4 to 22 lbs. (intermittent): +1  
 If load 4.4 to 22 lbs. (static or repeated): +2  
 If more than 22 lbs. or repeated or shocks: +3

**Step 15: Find Column in Table C**  
 Add values from steps 12-14 to obtain Neck, Trunk and Leg Score. Find Column in Table C.

### Scores

**Table A: Wrist Score**

Upper Arm	Lower Arm	Wrist Score				
		1	2	3	4	
1	1	1	2	2	3	3
1	2	2	2	2	3	3
1	3	2	3	3	3	4
1	4	2	3	3	3	4
2	1	2	3	3	3	4
2	2	3	3	3	3	4
2	3	3	3	3	3	4
2	4	3	4	4	4	5
3	1	3	4	4	4	5
3	2	3	4	4	4	5
3	3	4	4	4	4	5
3	4	4	4	4	4	5
4	1	4	4	4	4	5
4	2	4	4	4	4	5
4	3	4	4	4	4	5
4	4	4	4	4	4	5
5	1	5	5	5	5	6
5	2	5	5	5	5	6
5	3	5	5	5	5	6
5	4	5	5	5	5	6
6	1	6	6	6	6	7
6	2	6	6	6	6	7
6	3	6	6	6	6	7
6	4	6	6	6	6	7

**Table C: Neck, Trunk, Leg Score**

Wrist / Arm Score	Neck, Trunk, Leg Score		
	1	2	3
1	1	2	3
2	2	3	4
3	3	3	4
4	3	3	4
5	4	4	5
6	4	4	5
7	5	5	6
8	5	5	6
9	6	6	7
10	6	6	7

**Scoring: (final score from Table C)**  
 1-4 = acceptable posture  
 5-6 = further investigation, change may be needed  
 7-8 = further investigation, change soon  
 9-10 = investigate and implement change

**7**  
RULA Score

Εικόνα 3-1: Το φυλλάδιο αξιολόγησης RULA [\[https://ergo-plus.com/rula-assessment-tool-guide\]](https://ergo-plus.com/rula-assessment-tool-guide)

## 4 Η Εκπαίδευση στη Συνεργασία Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P)

### 4.1 Η Εκπαίδευση των Εργαζομένων στη Βιομηχανία Παραγωγής

Η αναγκαιότητα της εκπαίδευσης του ανθρώπινου δυναμικού στη βιομηχανία είναι προφανής και ισχύει τόσο για το νέο όσο και για το παλιό προσωπικό. Μετη ραγδαία ανάπτυξη και τις αλλαγές που επιφέρει η τεχνολογία τόσο στο προϊόν όσο και στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται απαιτεί την απαραίτητη εξοικείωση του προσωπικού. Αυτό είναι ακόμα πιο επιτακτικό σε περιπτώσεις χειρισμού μηχανημάτων και διεκπεραίωσης εργασιών που μπορεί να είναι επισφαλής για την ανθρώπινη υγεία. Αποτελεί ευθύνη του εργοδότη η παροχή σωστής και επαρκούς εκπαίδευσης και μετεκπαίδευσης του προσωπικού, κάτι που επιφέρει σημαντικό οικονομικό κόστος αλλά αποτελεί επένδυση στη μελλοντική παραγωγικότητα και διασφάλιση των κανόνων ασφάλειας και υγιεινής της εργασίας.

Ανάλογα με το σκοπό της εκπαίδευσης και το κοινό στο οποίο απευθύνεται υπάρχει σωρία τεχνικών που μπορούν να επιλεγθούν (Afonso, Santana, Afonso, Zanin, & Wernke, 2017):

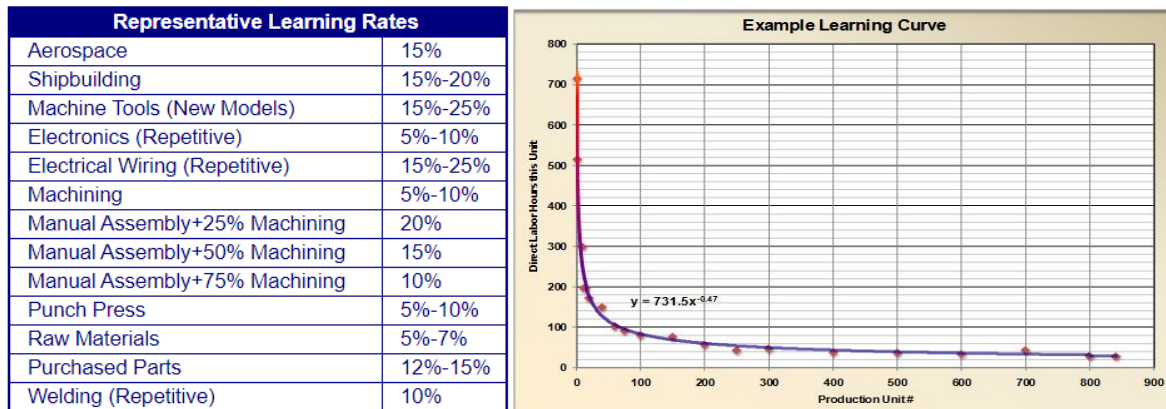
- Εκπαίδευση σε “τάξη” ή με εκπαιδευτή
- Διαδραστικές μέθοδοι (όπως π.χ. κουίζ, συνεδρίες ερωτήσεων-απαντήσεων, case studies)
- Εκπαίδευση hands-on όπου ο εκπαιδευόμενος καλείται να φέρει εις πέρας τη διαδικασία στην οποία εκπαιδεύεται
- Απομακρυσμένη εκπαίδευση μέσω υπολογιστή (Computer Based Training – CBT)
- Διαδικτυακή εκπαίδευση (e-learning)
- Συνδυασμός κάποιων από τα παραπάνω

Στην περίπτωση της εκπαίδευσης σε εργασίες συναρμολόγησης συνηθίζεται η εκπαίδευση hands-on και η εκπαίδευση με εκπαιδευτή-επιβλέποντα. Αυτές οι “παραδοσιακές” μέθοδοι τείνουν να κοστίζουν σε χρόνο και χρήμα, καθώς απαιτείται η φυσική παρουσία εκπαιδευτή και εκπαιδευόμενου (συχνά σε ατομικές συνεδρίες), η κατάληψη του εργασιακού σταθμού για εκπαίδευση, η παύση της παραγωγικότητας και συχνά το κόστος σε υλικά και τεμάχια που χρησιμοποιούνται για εκπαίδευση και τελικά απορρίπτονται. Ακόμη, αυτές οι μέθοδοι αποδεικνύονται δύσκαμπτες και δύσκολα προσαρμόσιμες σε αλλαγές, με αποτέλεσμα να πρέπει να επαναλαμβάνονται κάθε φορά που αλλάζει το προσωπικό ή η γραμμή παραγωγής ή το παραγόμενο προϊόν.

Αυτές τις δυσκολίες όπως και τις προκλήσεις που επιφέρει η συνεχώς μεταβαλλόμενη και εξελισσόμενη βιομηχανία (Industry 4.0), έρχονται να αντιμετωπίσουν νέες μορφές εκπαίδευσης που χρησιμοποιούν καινούργιες τεχνολογίες. Τέτοια είναι η περίπτωση της

χρήσης της Εικονικής Πραγματικότητας στην εκπαίδευση που θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

Η προσέγγιση της προόδου της εκπαίδευσης γίνεται με καμπύλες μάθησης (Learning Curves), που προτείνει τη χρήση κατάλληλων συντελεστών στην εξίσωση:  $T \times n^{-L}$  = χρόνος που απαιτείται για τη νιοστή επανάληψη, όπου  $T$  = χρόνος ή κόστος για την πρώτη επανάληψη,  $L$  = ρυθμός μάθησης και  $n$  = νιοστή επανάληψη. Ενδεικτικά στην Εικόνα 4-1 φαίνεται η καμπύλη μάθησης σε καθήκοντα συναρμολόγησης στην αυτοκινητοβιομηχανία με ρυθμό μάθησης 47%.



Εικόνα 4-1: Αριστερά: δείκτες ρυθμού μάθησης. Δεξιά: παράδειγμα καμπύλης μάθησης

## 4.2 Η Αναγκαιότητα Εκπαίδευσης στη Συνεργασία A-P

Η αυξανόμενη υιοθέτηση ρομπότ, ως μέρος ευρύτερων στρατηγικών αυτοματισμού, αλλάζει δραστικά το εργασιακό προφίλ και τις απαιτήσεις δεξιοτήτων στη βιομηχανική παραγωγή. Η ανάληψη καθηκόντων κυρίως επαναλαμβανόμενα, επικίνδυνα ή φορτικά για τον άνθρωπο από τα ρομπότ αντικαθιστά δεξιότητες που ήταν χρήσιμες για αυτά τα καθήκοντα με άλλες που υποβοηθούν τη συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ (όπως π.χ. είναι ο προγραμματισμός). Το προσωπικό πρέπει να είναι εκπαιδευμένο τόσο στη διεκπεραίωση του καθήκοντος όσο και στη συνύπαρξη και συνεργασία με το ρομπότ στον ίδιο εργασιακό χώρο.

Βασικό μέλημα είναι η εδραίωση και η εκπαίδευση σε πρωτόκολλα ασφαλείας. Ο εργαζόμενος πρέπει να γνωρίζει ποιο καθήκον επιτελεί το ρομπότ, το ρυθμό εκτέλεσης, τις δυνατότητες και τους περιορισμούς του καθώς και οποιοδήποτε μέτρο έκτακτης ανάγκης έχει οριστεί. Τα ρομπότ προσφέρουν μεγάλο εύρος δυνατοτήτων μέσω του δυναμικού προγραμματισμού τους και ο χειριστής πρέπει να γνωρίζει πώς να προγραμματίσει και να χρησιμοποιήσει το ρομπότ για να έχει το επιθυμητό αποτέλεσμα (International Federation of Robotics, 2018).

Η αναγκαιότητα αναδόμησης και εκπαίδευσης του εργατικού δυναμικού γύρω από την εξελισσόμενη τεχνολογία είναι προφανής. Ωστόσο, ενώ φαίνεται να υπάρχει η σχετική κίνηση για κρατικές επενδύσεις για διδακτορικές σπουδές και έρευνα σε θέματα

αυτοματοποίησης, ρομποτικής, τεχνητής νοημοσύνης και ασφάλειας, φαίνεται να υπάρχει τεράστιο χάσμα στην ανάπτυξη δεξιοτήτων μεταξύ του επιπέδου της πανεπιστημιακής εκπαίδευσης και των προπτυχιακών τίτλων (Mauil, Maull, & Brewer, 2019).

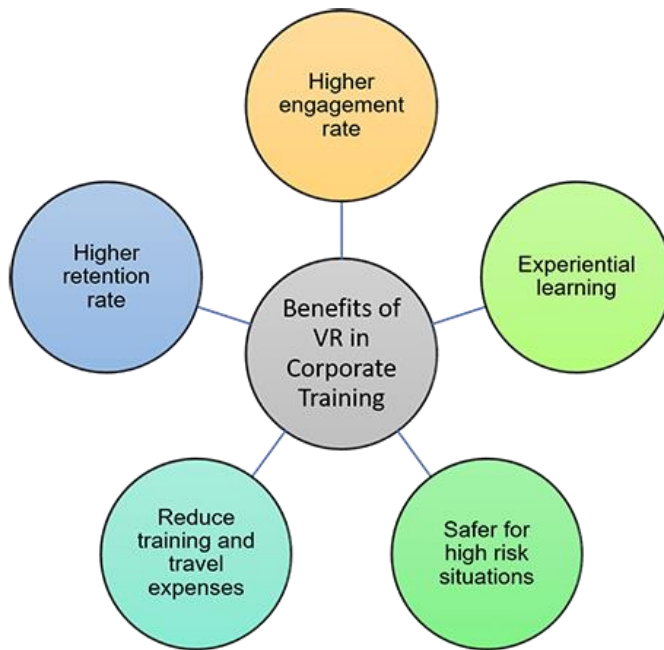
Ως εκ τούτου, ο εκπαιδευτικός ρόλος επιβαρύνει κυρίως τον εργοδότη για να διασφαλίσει τη σωστή και ασφαλή εργασία. Σε περιπτώσεις που το ίδιο το καθήκον είναι επικίνδυνο ή εξαιρετικά δαπανηρό, νέες μέθοδοι εκπαίδευσης που βασίζονται στην επαυξημένη ή την εικονική πραγματικότητα χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο.

### **4.3 Η χρήση της Εικονικής Πραγματικότητας ως Εκπαιδευτικό Μέσο**

Ο ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας της εικονικής πραγματικότητας αποτελεί όλο και συχνότερο μέρος της κατάρτισης των εργαζομένων, από τα νοσοκομεία μέχρι τα ανθρακωρυχεία και τα εργοστάσια. Πλέον, οι εργοδότες χρησιμοποιούν την Εικονική Πραγματικότητα (ΕΠ) για να βοηθήσουν στην πρόσληψη, την εκπαίδευση και την κατάρτιση εργαζομένων με προσομοιώσεις Εικονικού Περιβάλλοντος (ΕΠε). Παρέχοντας στους νέους εργαζόμενους αλλά και στους παλιούς εντυπωσιακές αλλά και νέες εμπειρίες που μοιάζουν περισσότερο με το παιχνίδι παρά με δουλειά, η ΕΠ μπορεί να εισάγει ενθουσιασμό και προσήλωση στη διδακτική, βοηθώντας τους εργαζόμενους να δουν τη δουλειά τους πιο θετικά.

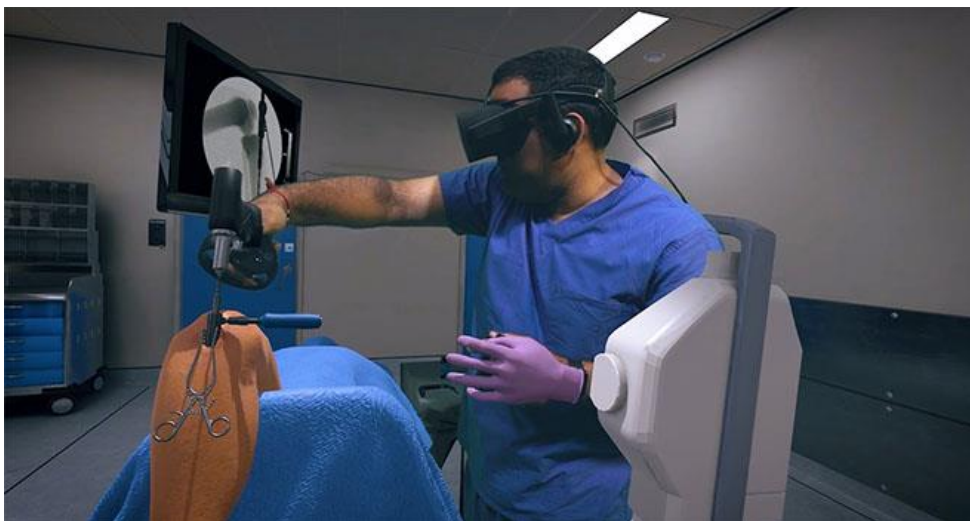
Το επιχείρημα της χρήσης ΕΠ για την εταιρική κατάρτιση είναι απλό: μπορεί να αυξήσει τα επίπεδα προσήλωσης και διατήρησης της γνώσης, ενώ οι εργαζόμενοι μπορούν να εκπαιδευτούν με ασφαλέστερο, οικονομικότερο τρόπο (Εικόνα 4-2). Επιπλέον, η ΕΠ επιτρέπει στους υπαλλήλους να μάθουν μέσω πρακτικής εμπειρίας. Η βιωματική μάθηση υποστηρίζεται ως ο πιο αποτελεσματικός τρόπος μάθησης και μελέτες έχουν δείξει ότι η μάθηση μέσω της εμπειρίας αυξάνεται η ποιότητα της μάθησης και η διατήρηση της γνώσης κατά 75-90% (Pérez-Sabater, 2011).

Ένα ακόμη πλεονέκτημα της ΕΠ είναι η επαναληψιμότητα που παρέχει, καθώς η προσομοίωση είναι προγραμματισμένη με σαφείς παραμέτρους που εγγυώνται ότι όλοι οι εκπαιδευόμενοι θα έχουν την ίδια εκπαίδευση κάθε φορά. Ακόμη, ο εύκολος επαναπρογραμματισμός με χαμηλό κόστος δίνει τη δυνατότητα εξερεύνησης σεναρίων που είναι επικίνδυνα ή δύσκολο να προσομοιωθούν στο πραγματικό περιβάλλον (π.χ. προσομοίωση εκρηκτικού μηχανισμού).



Εικόνα 4-2: Πλεονεκτήματα της χρήσης ΕΠ στην εκπαίδευση [<https://virtualspeech.com>]

Ένα επιπρόσθετο όφελος από τη χρήση της ΕΠ για εταιρική εκπαίδευση είναι ότι η ασφάλεια που δίνει στην περίπτωση λάθους μειώνει το επίπεδο άγχους του εκπαιδευόμενου και βελτιώνει την κριτική του σκέψη. Αυτό αποδεικνύεται μέσω έρευνας (Εικόνα 4-3) που έγινε από το Ινστιτούτο Johnson & Johnson για την εκπαίδευση χειρουργών ιατρών μέσω ΕΠ όπου τα αποτελέσματα έδειξαν βελτίωση στην χειρουργική απόδοση κατά 230% (Wiederhold, 2017).



Εικόνα 4-3: Χειρουργική εκπαίδευση μέσω ΕΠ [Johnson & Johnson Institute, <https://jnjinstitute.com>]

# 5 Ανάλυση του Προβλήματος και Υποθέσεις Επίλυσης

## 5.1 Ερευνητικά Ερωτήματα και Υποθέσεις

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναδείχθηκε η ανάγκη προσαρμογής των σύγχρονων συστημάτων παραγωγής για να ανταπεξέλθουν στην ανταγωνιστικότητα της αγοράς και τους κανόνες ασφάλειας και υγιεινής της εργασίας. Η συνεργασία A-P εμφανίζεται πλέον σε όλο και αυξανόμενο αριθμό γραμμών παραγωγής με αποτέλεσμα τον εκσυγχρονισμό διεργασιών, τεχνικών και προτύπων. Στο Κεφάλαιο **Error! Reference source not found.** παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι δυνατότητες των διαδραστικών ΕΠε για τη μοντελοποίηση συνεργατικών καθηκόντων A-P και τη μεταφορά της αποκτηθείσας γνώσης από το εικονικό στο φυσικό περιβάλλον. Ακόμη, στο Κεφάλαιο 3 αναλύθηκαν οι δυνατότητες εργονομικού σχεδιασμού για τη βελτίωση της εργασίας του ανθρώπινου δυναμικού με την εισαγωγή συνεργατικών ρομπότ στη γραμμή παραγωγής, ενώ στο Κεφάλαιο 4 υπογραμμίστηκε η αναγκαιότητα εκπαίδευσης για την ασφαλή συνύπαρξη A-P στον εργασιακό χώρο. Μέσω αυτών, αναδύθηκε η ανάγκη διερεύνησης της εργονομικής συμβολής των ρομπότ σε καθήκοντα συναρμολόγησης καθώς και η χρήση εικονικών εργαλείων εκμάθησης για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητάς τους στην εκπαίδευση.

### 5.1.1 ΕΠε ως Εργαλεία Εργονομικού Σχεδιασμού για τη Συνεργασία A-P σε Καθήκοντα Συναρμολόγησης

Τα καθήκοντα συναρμολόγησης, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι υπεύθυνα για την εμφάνιση μεγάλων ποσοστών εργασιακών μυοσκελετικών παθήσεων. Ο σωστός εργονομικός σχεδιασμός των καθηκόντων μπορεί να βοηθήσει στη μείωση και πρόληψη αυτών των κρουσμάτων. Στην παρούσα διπλωματική ερευνούμε πώς αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή ενός συνεργατικού ρομπότ στη γραμμή παραγωγής που θα έχει ως σκοπό την υποβοήθηση του εργαζόμενου στη συναρμολόγηση αλλάζοντας θέσεις του τεμαχίου προς συναρμολόγηση.

Η συνήθης εργονομική αξιολόγηση γίνεται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του καθήκοντος στο φυσικό περιβάλλον από έμπειρο προσωπικό που χρησιμοποιεί διάφορες κλίμακες και εργαλεία για να βαθμολογήσει και να αξιολογήσει την καταπόνηση και την κόπωση που προκαλεί το καθήκον στον εργαζόμενο. Η διαδικασία αυτή, εκτός από χρονοβόρα και με ασύμφορο κόστος, καθώς βασίζεται πάνω στον ανθρώπινο παράγοντα, εισαγάγει το μειονέκτημα του ανθρώπινου λάθους αφού βασίζεται στην εμπειρική αξιολόγηση και βαθμολόγηση έναντι αντικειμενικών μετρήσεων. Μέσω της ΕΠ και της χρήσης κατάλληλων αισθητήρων κίνησης μπορεί να προσομοιωθεί το καθήκον και να εντοπιστούν με ακρίβεια τα σημεία που χρήζουν προσαρμογής ή αντικατάστασης.

Επιπλέον, ύστερα από την εργονομική αξιολόγηση του καθήκοντος ακολουθεί η αναπροσαρμογή του για να πληροί τα απαραίτητα κριτήρια και κανόνες, διαδικασία που επιφέρει κόστος χρονικό και οικονομικό, καθώς θα πρέπει να επανεξεταστεί με πειραματικές εφαρμογές, όπως η αξιολόγηση. Τα ΕΠε επιτρέπουν την εξέταση σεναρίων με μηδενικό κόστος αναπροσαρμογής του εργασιακού περιβάλλοντος, αφού μπορεί να προσομοιώσει εξοπλισμό, εργαλεία και καθήκοντα χωρίς να απαιτεί την αγορά νέου εξοπλισμού, επαναπρογραμματισμό του υπάρχοντος εξοπλισμού και τήρηση των μέτρων ασφαλείας που αυτά επιφέρουν στο φυσικό περιβάλλον. Τέλος, η επαναληψιμότητα και η δυνατότητα εξέτασης μεγάλου εύρους ερευνητικών υποθέσεων καθιστούν τα διαδραστικά ΕΠε εξαιρετικά για τον εργονομικό σχεδιασμό στη βιομηχανική παραγωγή.

### **1<sup>η</sup> Ερευνητική Προβληματική**

*Είναι δυνατόν να αναπαραχθούν οι συνθήκες συνεργασίας A-P πειστικά στο ΕΠε και να μετρηθούν οι συντελεστές μυοσκελετικής καταπόνησης του καρπού σε καθήκοντα συναρμολόγησης; Μπορεί ένα συνεργατικό ρομπότ να βελτιώσει τις συνθήκες εργασίας χωρίς άμεση αλλαγή του καθήκοντος χωρίς να επηρεάσει αρνητικά το ρυθμό παραγωγικότητας;*

Για να απαντηθεί η παραπάνω προβληματική δημιουργήθηκαν δύο διαδραστικά ΕΠε υψηλής αλληλεπίδρασης και εμπύθισης, τα οποία λειτουργούν ως πλατφόρμα προσομοίωσης του πραγματικού καθήκοντος συναρμολόγησης και αναπαριστούν εικονικά τον εξοπλισμό, το τεμάχιο, τα επιμέρους εξαρτήματα προς συναρμολόγηση, τα εργαλεία και το εργασιακό περιβάλλον στο φυσικό κόσμο. Στο πρώτο περιβάλλον μελετάται η συναρμολόγηση και η μυοσκελετική καταπόνηση του καρπού, ενώ στο δεύτερο εισάγεται η συνεργασία με ρομπότ στην εκτέλεση της ίδιας συναρμολόγησης.

Για την εργονομική αξιολόγηση της μυοσκελετικής καταπόνησης χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις που παρέχονται από ειδικούς αισθητήρες κίνησης που προσομοιώνουν το καθήκον στο εικονικό περιβάλλον. Οι μετρήσεις αυτές οδηγούν σε μία βαθμολογία καθήκοντος σε μία προσαρμοσμένη κλίμακα, που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο, ώστε να αξιολογηθεί αντικειμενικά και με ακρίβεια το καθήκον και η αναγκαιότητα ή μη προσαρμογής του.

### **5.1.2 Αποτελεσματικότητα της ΕΠ στην Εκπαίδευση σε Συνεργατικά Καθήκοντα Συναρμολόγησης**

Όπως διατυπώθηκε στην Ενότητα 4.3, η ΕΠ προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων που την καθιστούν οικονομικό και ευέλικτο μέσο εκπαίδευσης. Πολλές εταιρείες βασίζονται τα προγράμματα εκπαίδευσης και κατάρτισης των εργαζομένων τους στην ΕΠ, ενώ έχουν δημιουργηθεί εταιρείες που ως προϊόν τους έχουν το σχεδιασμό και τη διεξαγωγή εκπαιδευτικών προγραμμάτων σε ΕΠε (Gonzalez-Franco et al., 2017).

Παρότι τα οικονομικά οφέλη είναι αδιαμφισβήτητα, η ουσιαστική αφομοίωση του διδασκόμενου καθήκοντος παραμένει ο καθοριστικός παράγοντας για την εδραίωση την εικονικής εκπαίδευσης. Ιδιαίτερα σε τμήματα της βιομηχανικής παραγωγής που συνηθίζεται η hands-on εκπαίδευση, δεν υπάρχουν ακόμα αρκετά αποτελέσματα ερευνών που να αποδεικνύουν την υπεροχή της βιωματικής εκπαίδευσης ή της εικονικής. Παρότι η ΕΠ μπορεί

να προσφέρει πληθώρα οπτικοακουστικών βοηθημάτων κατά την εκπαίδευση και να διευκολύνει έτσι την κατανόηση και την διεκπεραίωση των καθηκόντων, παραμένει αναπάντητο το ερώτημα πώς συγκρίνεται με την εκπαίδευση στο φυσικό κόσμο.

## **2<sup>η</sup> Ερευνητική Προβληματική**

*Μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ΕΠε για την εκπαίδευση σε συνεργατικά καθήκοντα συναρμολόγησης; Πώς επηρεάζει η εικονική εκπαίδευση τη συνεργασία A-P; Πώς συγκρίνεται η ταχύτητα εκμάθησης και η αφομοίωση του καθήκοντος στην ΕΠ έναντι αυτής στο φυσικό περιβάλλον;*

Για να δοθεί απάντηση στο παραπάνω ερώτημα δημιουργήθηκαν δύο προγράμματα εκπαίδευσης στο ίδιο συνεργατικό καθήκον. Το ένα εξ αυτών λάμβανε χώρα στον πραγματικό κόσμο, ενώ το άλλο στον εικονικό. Στο τέλος και των δύο προγραμμάτων εκπαίδευσης ο εκπαιδευόμενος καλούταν να εφαρμόσει όσα έμαθε εκτελώντας το καθήκον στο φυσικό περιβάλλον.

Για την αξιολόγηση της εκπαίδευσης χρησιμοποιήθηκαν ερωτηματολόγια που καλούνταν να απαντήσουν οι εκπαιδευόμενοι και περιλάμβαναν τόσο ερωτήσεις αντικειμενικών μετρήσεων όσο και υποκειμενικών. Επιπλέον, οι εκπαιδευόμενοι αξιολογήθηκαν κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης με αντικειμενικά κριτήρια χρονομέτρησης και εκτίμησης σφαλμάτων, κάτι που χρησιμοποιήθηκε και κατά την τελική δοκιμασία μετά την εκπαίδευση, όπου φαίνεται τελικά και η αφομοίωση της συνεργατικής συναρμολόγησης.

## **5.2 Οι Περιπτώσεις Εφαρμογής (Use Cases)**

Για να διερευνήσουμε τις ερευνητικές προβληματικές που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, σχεδιάστηκαν και εκτελέστηκαν τρεις περιπτώσεις εφαρμογής (use cases). Οι δύο περιπτώσεις εφαρμογής αφορούν σενάρια εικονικής προσομοίωσης, ενώ η τρίτη διεξάγεται στο φυσικό κόσμο. Στο πρώτο σενάριο ΕΠ εκτελείται η συναρμολόγηση από το συμμετέχοντα χωρίς τη συμμετοχή ρομπότ, ενώ στο δεύτερο σενάριο εισάγεται η συνεργασία με ένα ρομποτικό βραχίονα για την ίδια συναρμολόγηση. Στο φυσικό κόσμο εξετάζεται ξανά η περίπτωση του δεύτερου σεναρίου, δηλαδή αυτή της συνεργασίας A-P. Τα συνεργατικά σενάρια ελέγχονται επίσης και ως προς το κομμάτι της εκπαίδευσης. Οι συμμετέχοντες σε αυτά αξιολογούνται ποιοτικά και ποσοτικά με κριτήρια χρόνου, ευχρηστίας και αφομοίωσης της πληροφορίας. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-1) συνοψίζονται αυτά τα στοιχεία για να γίνει εύκολα η διάκριση μεταξύ τους.



Περιπτώσεις Εφαρμογής	1) Προσομοίωση συναρμολόγησης σε ΕΠ	2) Προσομοίωση συνεργατικής συναρμολόγησης σε ΕΠ	3)Συνεργατική συναρμολόγηση στο φυσικό περιβάλλον
Ομάδα συμμετεχόντων	A/B	A	B
Ελάχιστος αριθμός συμμετεχόντων	10	10	10
Χρήση ΕΠ	√	√	-
Συνεργατικό καθήκον με ρομπότ	-	√	√
Εξαγωγή δεδομένων μυοσκελετικής καταπόνησης καρπού	√	√	-
Αξιολόγηση στο φυσικό περιβάλλον	-	√	√
Ερωτηματολόγια	-	√	√

Πίνακας 5-1: Περιληπτική κατανομή στοιχείων ανά περίπτωση εφαρμογής

### 5.2.1 Προσομοίωση Συναρμολόγησης σε ΕΠ

Η πρώτη περίπτωση εφαρμογής αποτελεί το πρώτο βήμα για τη διερεύνηση του πρώτου ερευνητικού ερωτήματος, δηλαδή μοντελοποιεί τη διαδικασία συναρμολόγησης σε ένα ΕΠε και συλλέγει δεδομένα από την κίνηση των χεριών. Το σενάριο εργασίας σε αυτή την περίπτωση εφαρμογής συνίσταται στη διεκπεραίωση της διαδικασίας της συναρμολόγησης όλων των επιμέρους κομματιών μίας πρωτότυπης κεφαλής τύλιξης ινών. Κατά τη διαδικασία της συναρμολόγησης συλλέγονται δεδομένα τόσο για τον χρόνο όσο και για θέση των χεριών κατά την τοποθέτηση κάθε κομματιού πάνω στην κεφαλή. Τα δεδομένα αυτά οδηγούν στη βαθμολόγηση των καθηκόντων ώστε να εξαχθεί ο συντελεστής μυοσκελετικής καταπόνησης των καρπών αλλά και ο απαιτούμενος χρόνος ως συντελεστής παραγωγικότητας. Παρότι δεν χρησιμοποιείται ρομπότ σε αυτή την περίπτωση, το ρομπότ υπάρχει μέσα στον εργασιακό χώρο, χρησιμοποιείται μόνο ως μηχανισμός πρόσδεσης-στήριξης και παραμένει ακίνητο σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Παρότι οι συμμετέχοντες σε αυτή την εφαρμογή έχουν πρώτα ολοκληρώσει την εκπαίδευσή τους σε μία από τις άλλες δύο περιπτώσεις εφαρμογής και θεωρείται ότι είναι οικείοι με τη ζητούμενη συναρμολόγηση, τους παρέχονται εικονικές εικονογραφημένες οδηγίες για την εξασφάλιση της σωστής εκτέλεσης της διεργασίας.

### 5.2.2 Προσομοίωση Συνεργατικής Συναρμολόγησης σε ΕΠ

Η δεύτερη εφαρμογή αφορά και τα δύο ερευνητικά προβλήματα που τέθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Σε αυτή την περίπτωση εφαρμογής χρησιμοποιείται η ΕΠ για την προσομοίωση της συνεργασίας με ρομποτικό βραχίονα για τη συναρμολόγηση της ίδιας πρωτότυπης κεφαλής τύλιξης ινών με την πρώτη περίπτωση. Ο συμμετέχων καλείται να ολοκληρώσει τη συναρμολόγηση τρεις φορές ακολουθώντας εικονογραφημένες οδηγίες που του δίνονται στο εικονικό περιβάλλον ως μέρος της εκπαίδευσής του πάνω στη διαδικασία της συναρμολόγησης. Στο τέλος της εκπαίδευσης ο συμμετέχων καλείται να συμπληρώσει το τμήμα του ερωτηματολογίου που αφορά την εκμάθηση της συναρμολόγησης και της

εμβύθισης στην ΕΠ. Τέλος, ο συμμετέχων αξιολογείται στο φυσικό περιβάλλον στη συναρμολόγηση που διδάχτηκε αλλά και στην ποιότητα συνεργασίας του με το φυσικό ρομπότ και απαντά το τελευταίο τμήμα του ερωτηματολογίου που βασίζεται στην υποκειμενική του κρίση.

Κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης συλλέγονται δεδομένα για την εκμάθηση της συναρμολόγησης και το χρόνο διεκπεραίωσής της. Ακόμη, κατά την τρίτη επανάληψη, όπου ο συμμετέχων θεωρείται οικείος με τη συναρμολόγηση, συλλέγονται επιπλέον δεδομένα για τη θέση των χεριών κατά την τοποθέτηση κάθε κομματιού πάνω στην κεφαλή. Τα δεδομένα αυτά οδηγούν στη βαθμολόγηση των καθηκόντων ώστε να εξαχθεί ο συντελεστής μυοσκελετικής καταπόνησης των καρπών όπως στην πρώτη περίπτωση εφαρμογής.

### **5.2.3 Συνεργατική Συναρμολόγηση στο Φυσικό Περιβάλλον**

Αυτή η εφαρμογή χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της δεύτερης προβληματικής, όπου συγκρίνεται με τα αποτελέσματα από τη δεύτερη use case. Ο συμμετέχων καλείται να ολοκληρώσει τρεις φορές την ίδια συνεργατική συναρμολόγηση με τη δεύτερη εφαρμογή ακολουθώντας τις ίδιες εικονογραφημένες οδηγίες που του δίνονται στο φυσικό περιβάλλον ως μέρος της εκπαίδευσής του πάνω στη διαδικασία της συναρμολόγησης. Στο τέλος της εκπαίδευσης ο συμμετέχων καλείται να συμπληρώσει το τμήμα του ερωτηματολογίου που αφορά την εκμάθηση της συναρμολόγησης. Έπειτα, ο συμμετέχων αξιολογείται στο φυσικό περιβάλλον στη συναρμολόγηση που διδάχτηκε αλλά και στην ποιότητα συνεργασίας του με το ρομπότ και απαντά το τελευταίο τμήμα του ερωτηματολογίου που βασίζεται στην υποκειμενική του κρίση.

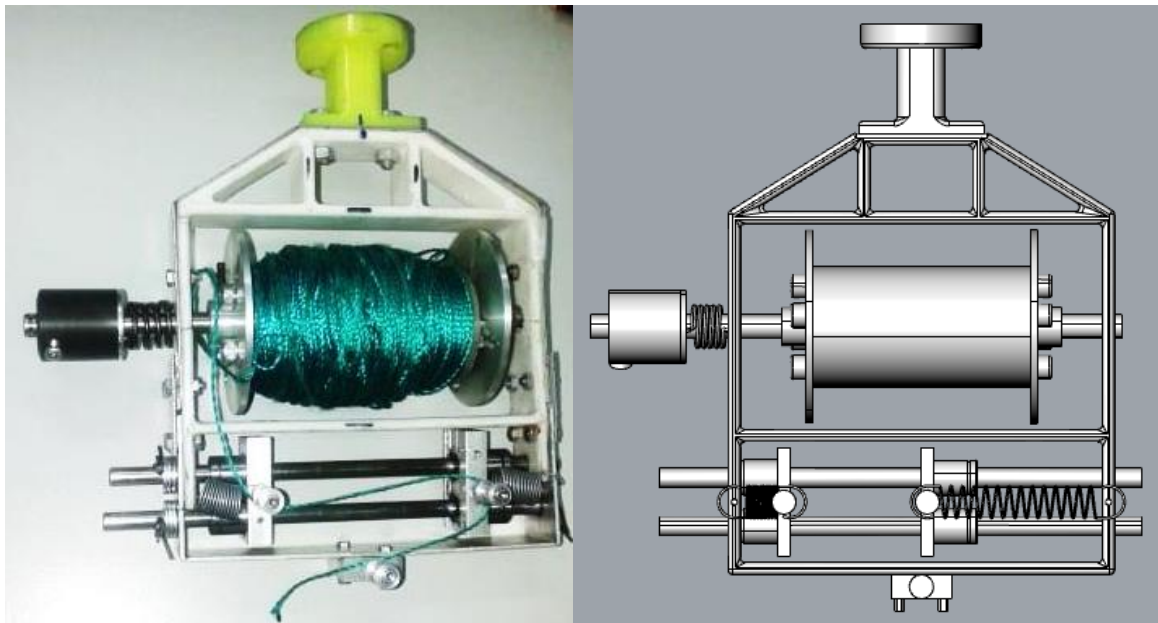
Κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης συλλέγονται δεδομένα για την εκμάθηση της συναρμολόγησης και το χρόνο διεκπεραίωσής της. Τα δεδομένα αυτά οδηγούν στην αξιολόγηση της εκπαίδευσης συγκριτικά με τα αποτελέσματα της δεύτερης περίπτωσης εφαρμογής.

## 6 Υλοποίηση Εικονικού και Φυσικού Περιβάλλοντος

### 6.1 Το Πεδίο Εφαρμογής

Όλες οι περιπτώσεις εφαρμογής που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο αφορούν τη διεκπεραίωση της συναρμολόγησης μίας πρωτότυπης κεφαλής τύλιξης ινών. Συνεπώς, το πεδίο εφαρμογής είναι η διαδικασία της συναρμολόγησης υποβοηθούμενης ή μη από το ρομπότ. Όλα τα εξαρτήματα που χρειάζονται για τη συναρμολόγηση πρέπει να συναρμολογηθούν στη σωστή θέση και με τη σωστή σειρά.

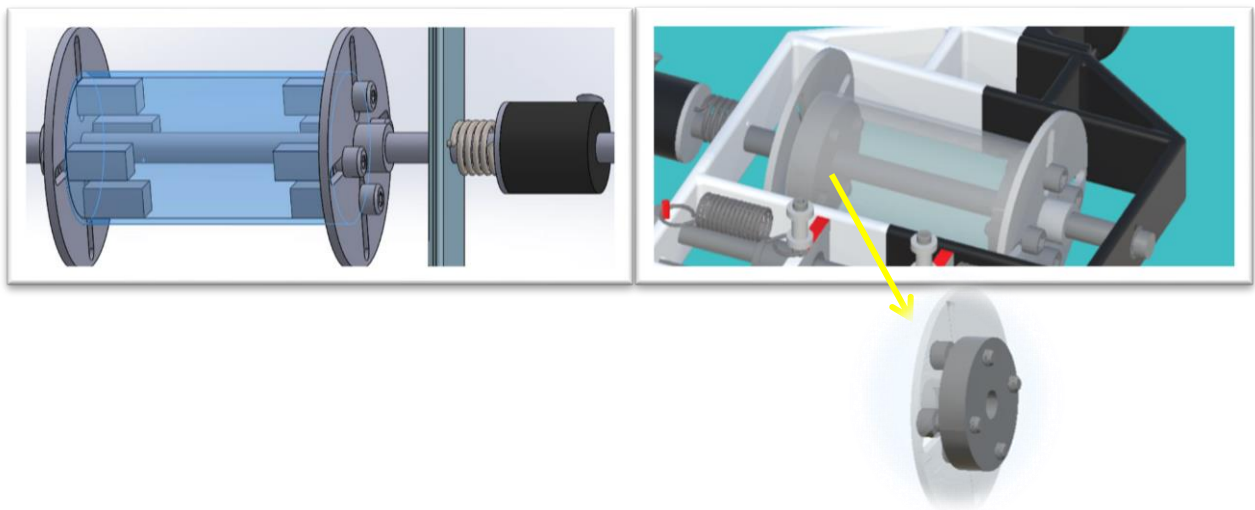
Αντικείμενο της συναρμολόγησης, όπως αναφέρθηκε, είναι μία πρωτότυπη ρομποτική κεφαλή τύλιξης ινών που έχει κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ ως αποτέλεσμα της Διπλωματικής Εργασίας της Ισαβέλλας Κούστα (Κούστα, 2016). Στην Εικόνα 6-1 φαίνεται το πρωτότυπο μοντέλο όπως ήταν αρχικά κατασκευασμένο και τα επιμέρους κομμάτια του. Καθότι αυτή η κατασκευή δημιουργήθηκε με γνώμονα την τελική λειτουργίας της και όχι την επαναλαμβανόμενη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγησης της που χρειάστηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, κρίθηκε απαραίτητο να γίνουν κάποιες αλλαγές στο φυσικό μοντέλο. Επιπλέον, τα τμήματα της κεφαλής βάφθηκαν με χαρακτηριστικά χρώματα ώστε να διευκολύνεται η διαδικασία της εκπαίδευσης και του προγραμματισμού του ΕΠε. Τέλος, αναδομήθηκε από την αρχή το CAD μοντέλο ώστε να αντικατοπτρίζει την πραγματική κατασκευή μετά τις αλλαγές για διευκόλυνση της συναρμολόγησης και της εκπαίδευσης, αλλά και τις αλλαγές που είχαν γίνει λόγω φθορών και υλικών περιορισμών του εργαστηρίου.



Εικόνα 6-1: Στο αριστερό μέρος εικονίζεται η αρχική πρωτότυπη κεφαλή τύλιξης ινών ενώ στο δεξί μέρος εικονίζεται το αντίστοιχο CAD μοντέλο.

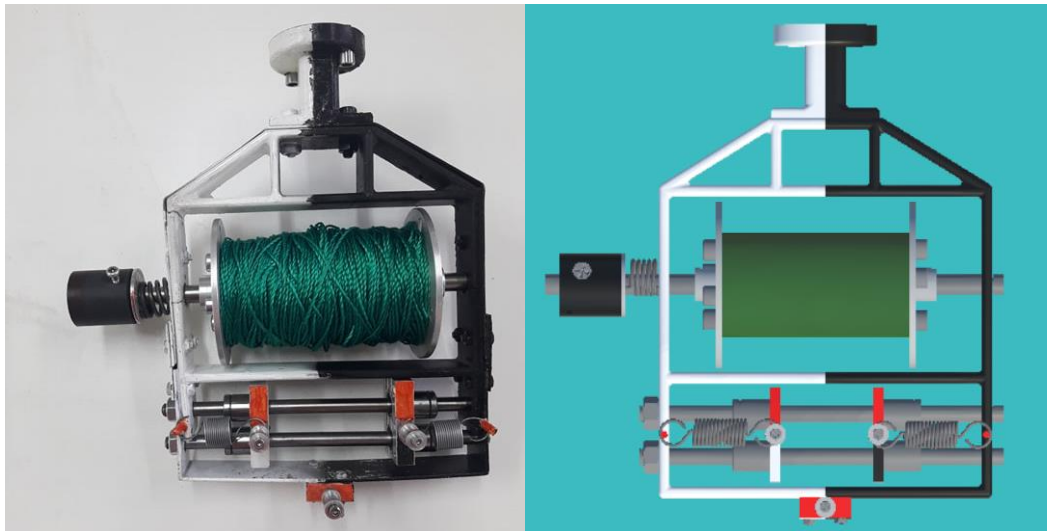
Οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στο φυσικό μοντέλο:

- Αντικατάσταση εσωτερικού μηχανισμού στερέωσης της ανέμης με δίσκους συγκράτησης για εξασφάλιση ευθυγράμμισης των οπών που περνά ο κεντρικός άξονας (Εικόνα 6-2)
- Αντικατάσταση της στερέωσης των δευτερευόντων αξόνων με παξιμάδια και δημιουργία σπειρώματος σε αυτούς
- Αντικατάσταση του μηχανισμού συγκράτησης της τετράγωνης βάσης τροχαλίας για να είναι δυνατή η συναρμολόγηση σε μη οριζόντιο σταθερό επίπεδο
- Προσθήκη πύρων συγκράτησης ελατηρίων
- Διάτρηση μεγαλύτερων οπών και λείανση των αξόνων για διευκόλυνση της συναρμολόγησης
- Βαφή του πλαισίου της κεφαλής με δύο χρώματα για αν ξεχωρίζει οπτικά η δεξιά από την αριστερή πλευρά
- Βαφή των θηκών ρουλεμάν και της τετράγωνης βάσης τροχαλίας για να είναι σαφής ποια είναι η πάνω όψη κατά τη συναρμολόγηση



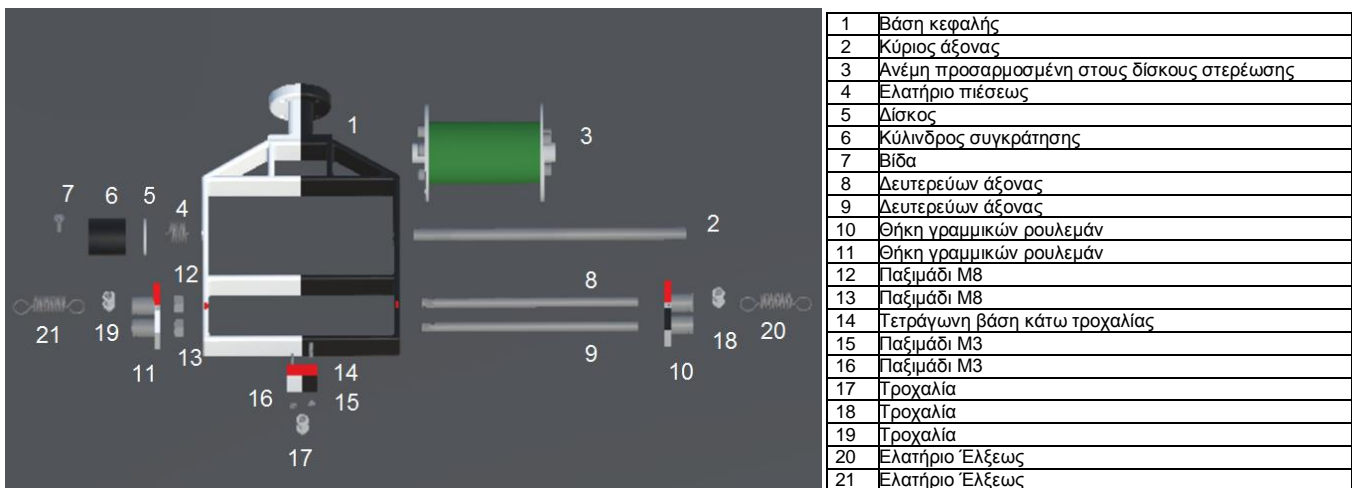
Εικόνα 6-2: Μηχανισμός στερέωσης της ανέμης. Αριστερά: ο αρχικός. Δεξιά: ο Νέος μεγαλύτερης σταθερότητας

Το τελικό φυσικό πρωτότυπο και μοντέλο CAD εικονίζονται στην Εικόνα 6-3. Για το σχεδιασμό του μοντέλου CAD χρησιμοποιήθηκε αρχικά το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks, όμως η ασυμβατότητα της μορφής αρχείων με το πρόγραμμα του σχεδιασμού του ΕΠε λόγω της κωδικοποίησης των επιφανειών οδήγησε στη μετατροπή των αρχείων μέσω του σχεδιαστικού λογισμικού Rhino3D.



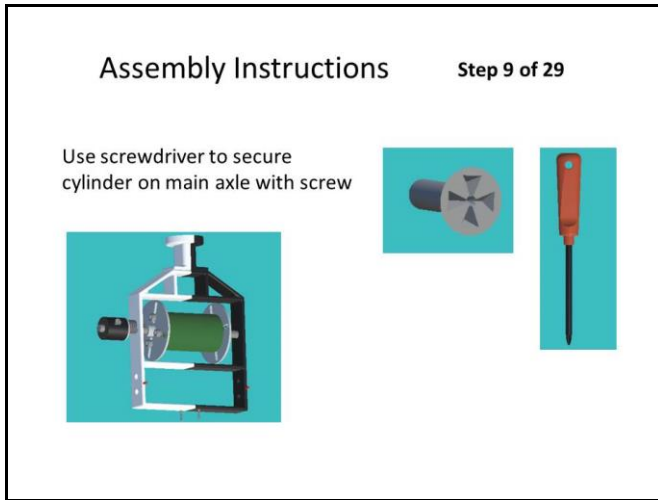
Εικόνα 6-3: Τελική πρωτότυπη κεφαλή τύλιξης ινών. Αριστερά: φυσικό μοντέλο μετά τις αλλαγές. Δεξιά: το αντίστοιχο CAD μοντέλο.

Για τη διαδικασία της συναρμολόγησης, καθότι το ενδιαφέρον της παρούσας μελέτης ήταν για τη συναρμολόγηση των κομματιών πάνω στο πλαίσιο της κεφαλής, θεωρήθηκε ότι η ανέμη προϋπάρχει προσαρμοσμένη στους πλαϊνούς της δίσκους και τα ρουλεμάν είναι τοποθετημένα σε ειδικά φτιαγμένες θήκες ώστε να τοποθετηθούν οι τροχαλίες πάνω τους (Εικόνα 6-4). Η σειρά της συναρμολόγησης των επιμέρους κομματιών καθορίστηκε αρχικά από ένα πλαίσιο αναγκαιότητας, δηλαδή από την αναγκαιότητα συναρμολόγησης κάποιων κομματιών πριν από κάποια άλλα. Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε ένα πλαίσιο λογικής, όπου ομαδοποιούνται παρεμφερή καθήκοντα ή διαδικασίες που πρέπει να γίνουν σειριακά.

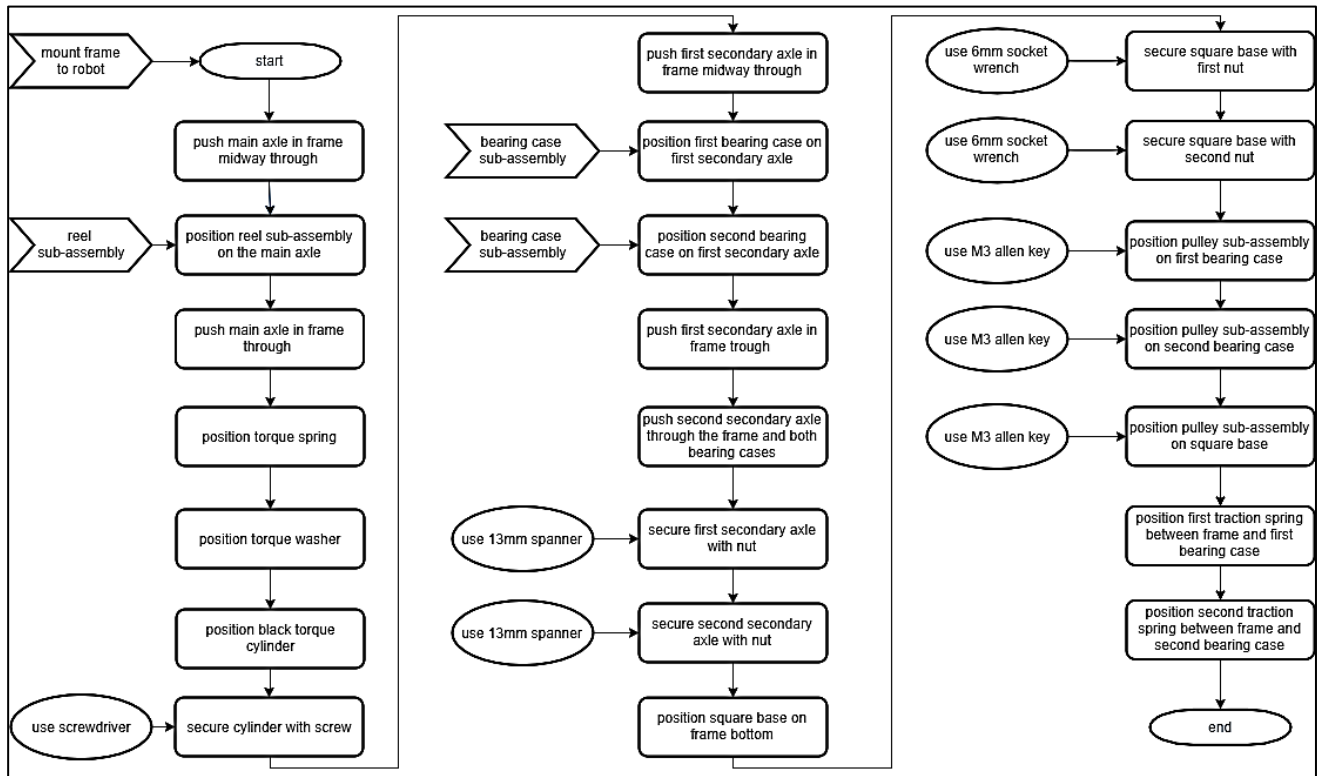


Εικόνα 6-4: Ανάπτυγμα εξαρτημάτων της κεφαλής προς συναρμολόγηση

Στα πλαίσια της εκπαίδευσης δημιουργήθηκαν εικονογραφημένες οδηγίες βήμα προς βήμα σε μορφή εγχειριδίου. Σε κάθε σελίδα περιγράφεται περιφραστικά το καθήκον που πρέπει να εκτελεστεί στο εκάστοτε βήμα, στο δεξί τμήμα εικονίζονται τα αντικείμενα προς συναρμολόγηση και τα απαιτούμενα εργαλεία, ενώ στο αριστερό τμήμα εικονίζεται η μορφή του συναρμολογούμενου τεμαχίου που πρέπει να έχει με το πέρας του βήματος (π.χ. η Εικόνα 6-5 παρουσιάζει τις οδηγίες για το βήμα 9). Στο διάγραμμα ροής (Διάγραμμα 6-1) της συναρμολόγησης φαίνεται η σειρά με την οποία συναρμολογούνται όλα τα τμήματα του μοντέλου.



Εικόνα 6-5: Εικονογραφημένες οδηγίες για το βήμα 9 της συναρμολόγησης

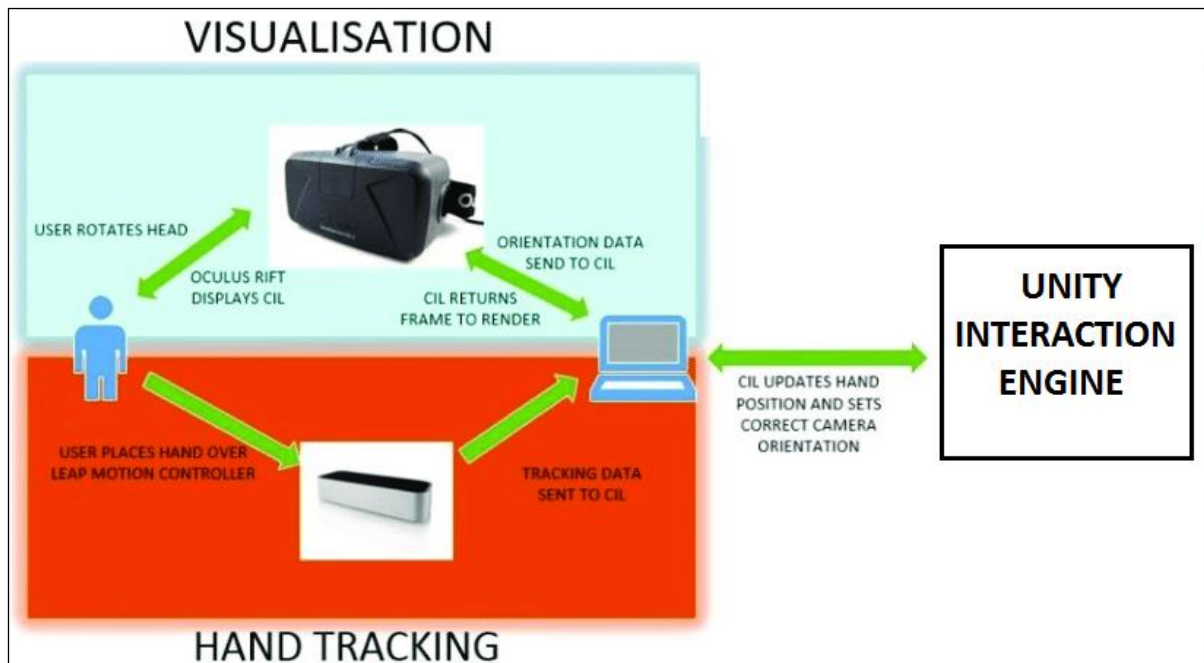


Διάγραμμα 6-1: Διάγραμμα ροής καθηκόντων για την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης

## 6.2 Η Συγκρότηση του Συστήματος (Setup)

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, αναπτύχθηκαν τρεις περιπτώσεις εφαρμογής, εκ των οποίων δύο σε ΕΠε και μία στο φυσικό περιβάλλον. Οι δύο εικονικές

προσομοιώσεις διέφεραν ως προς το σενάριο συναρμολόγησης καθώς στη δεύτερη περίπτωση υπήρχε συνεργασία A-P. Η εφαρμογή στο φυσικό περιβάλλον αποτελεί τη μεταφορά του δεύτερου εικονικού σεναρίου στον πραγματικό κόσμο.



Εικόνα 6-6: Ροή δεδομένων κατά την εικονική προσομοίωση

Για τις εικονικές προσομοιώσεις τα ΕΠε δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον του Unity 3d™ και εκτελούνται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή με λειτουργικό λογισμικό Windows 8.1™ 64-bit και κάρτα γραφικών AMD Radeon R9 290 series. Το σύστημα αποτελείται από έναν Η/Υ, έναν αισθητήρα κίνησης Leap Motion™ και μία κάσκα στερεοσκοπίας Oculus Rift DK2™ με δυνατότητα ανίχνευσης κίνησης κεφαλής. Τα δεδομένα εισόδου από τον αισθητήρα Leap Motion και την κάσκα Oculus μεταφέρονται στον Η/Υ μέσω καλωδίων και θυρών USB και προβάλλονται σε πραγματικό χρόνο στην οθόνη του υπολογιστή, ώστε ο παρατηρητής να βλέπει ό,τι εμφανίζεται και στο συμμετέχοντα μέσω της κάσκας. Η στερεοσκοπική εικόνα μεταφέρεται και προβάλλεται στην κάσκα μέσω καλωδίου HDMI σε πραγματικό χρόνο. Η επικοινωνία με τον αισθητήρα Leap Motion στο περιβάλλον του Unity υλοποιήθηκε με το SDK 3.1.3 της κατασκευάστριας εταιρείας. Η ροή των δεδομένων παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 6-6. Στην Εικόνα 6-7 παρουσιάζεται η διάταξη υλικού κατά τις δοκιμές των εφαρμογών: ο χρήστης φορά την στερεοσκοπική κάσκα Oculus, πάνω στην οποία είναι στερεωμένος ο αισθητήρας Leap Motion, και πραγματοποιεί καθήκοντα εμπυθισμένος στο ΕΠε, ενώ μπροστά του διακρίνεται και ο αισθητήρας ανίχνευσης κίνησης της κεφαλής Oculus.



**Εικόνα 6-7: Τυπική διάταξη συστήματος κατά τις δοκιμές ΕΠ**

Στο φυσικό περιβάλλον η συγκρότηση του περιβάλλοντος περιλαμβάνει το ρομποτικό βραχίονα Stäubli™ RX 90L που επικοινωνεί με τον Η/Υ με λογισμικό Windows XP™ 32-bit μέσω καλωδίου στη θύρα COM, ενώ για το χειρισμό του χρησιμοποιείται το λογισμικό Tera Term™. Ακόμη, στην Εικόνα 6-8 φαίνεται η τοποθέτηση της κάμερας SONY DSC-W830™ καταγραφής βίντεο και τα εξαρτήματα προς συναρμολόγηση τοποθετημένα στην επιφάνεια εργασίας μπροστά στο ρομπότ.



**Εικόνα 6-8: Διάταξη συστήματος στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ**



### 6.3 Η Εικονική Σκηνή

Η εικονική σκηνή του ΕΠε είναι πρωτότυπη και σχεδιάστηκε ώστε να αντικατοπτρίζει το χώρο εργασίας του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών, συμπεριλαμβάνοντας μόνο τα τμήματα που χρησιμοποιούνται στις προαναφερθείσες περιπτώσεις εφαρμογής (Εικόνα 6-9). Να σημειωθεί, σε αυτό το σημείο, ότι και στα δύο σενάρια που εξετάστηκαν σε ΕΠε χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη της σκηνής, με τη διαφορά ότι στο μη συνεργατικό σενάριο το ρομπότ παρέμενε ακίνητο και χρησιμοποιούνταν μόνο σαν στήριγμα θέσης. Ο χώρος εργασίας του ΕΠε μπορεί να προσαρμόζεται εύκολα για να εξετάζονται διαφορετικά συνεργατικά σενάρια.



Εικόνα 6-9: Η διάταξη της εικονικής σκηνής της συνεργατικής συναρμολόγησης

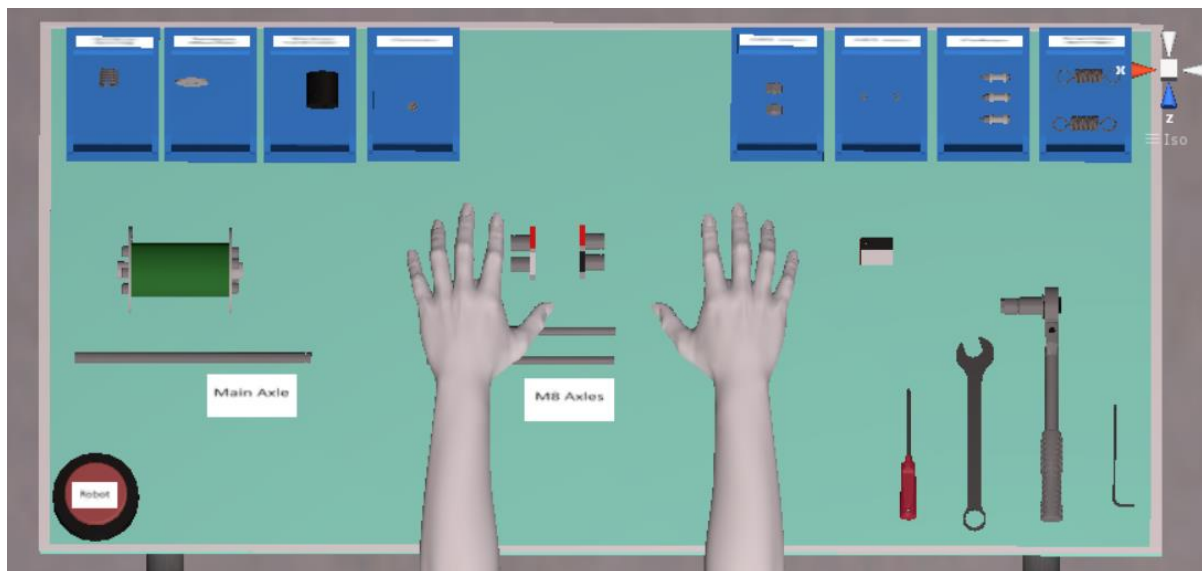
Το ΕΠε περιλαμβάνει:

- τη συναρμολόγηση πρωτότυπου τρισδιάστατου μοντέλου κεφαλής τύλιξης ινών
- το μοντέλο (γραφικό και κινηματικό) ενός ρομποτικού βραχίονα Staubli™ RX90L
- το λειτουργικό μοντέλο ενός ανθρωποειδούς ζεύγους χεριών (avatar), που εμφανίζονται στη σκηνή μόνο όσο βρίσκονται εντός του πεδίου αναγνώρισης από τον αισθητήρα Leap Motion
- ανταλλαγή δεδομένων με τη στεροσκοπική κάσκα και τους αισθητήρες κίνησης σε πραγματικό χρόνο
- κώδικες συμπεριφοράς κι αλληλεπίδρασης σε C# του Unity
- δυναμικό φωτισμό και φωτορεαλιστική απόδοση σε πραγματικό χρόνο
- υφές εικόνες που παρουσιάζουν βηματικά τις οδηγίες συναρμολόγησης σε ένα καμβά

Η πλατφόρμα του Unity, πέρα από την εικονική αναπαράσταση της τρισδιάστατης διάταξης, παρέχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης κώδικα στα διάφορα αντικείμενα της σκηνής για την προσθήκη σε αυτά φυσικών ιδιοτήτων, συμπεριφοράς, κίνησης και αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιούνται στο δυναμικό προγραμματισμό και εκτέλεση του σεναρίου. Ακόμη, το

Unity παρέχει τη δυνατότητα χρήσης και επίλυσης μαθηματικών και φυσικών μοντέλων και εξαγωγή δεδομένων σε αρχείο προκειμένου να επεξεργαστούν κατάλληλα. Αυτή η ιδιότητα χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό γωνιών θέσης του καρπού του χεριού και τη χρονομέτρηση των επιμέρους καθήκοντων.

Τα τρισδιάστατα μοντέλα της πρωτότυπης κεφαλής, των εξαρτημάτων της, των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν, του καμβά προβολής, του κουμπιού χειρισμού του ρομπότ και των κουτιών αποθήκευσης των εξαρτημάτων δημιουργήθηκαν με το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks™ και επεξεργάστηκαν κατάλληλα με το πρόγραμμα Rhinoceros™ ώστε να έχουν τη συμβατή μορφή αρχείου 3ds για να αναγνωρίζονται από το Unity. Το μοντέλο του ρομποτικού βραχίονα Stäubli RX90L παρέχεται σε μορφή .stp από την κατασκευάστρια εταιρεία (Stäubli) και τροποποιήθηκε ελαφρά ώστε να αυξηθεί η αντίθεσή του με το περιβάλλοντα χώρο και να είναι πιο ευδιάκριτο εικονικά. Η κινηματική λειτουργία του ρομπότ βασίστηκε σε κώδικα μοντελοποίησης της ευθείας κινηματικής της διπλωματικής εργασίας του Σεραφείμ Μίχα (Μίχας, 2015) και τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να εξυπηρετεί το συνεργατικό καθήκον που προσομοιάζεται. Το μοντέλο του ανθρωποειδούς ζεύγους χεριών- avatar (Εικόνα 6-10) παρέχεται από την εταιρεία κατασκευής του αισθητήρα, όπου προσαρμόστηκαν υφές δέρματος γυναικείων και ανδρικών χεριών για να είναι πιο οικεία η εικόνα στον εκάστοτε συμμετέχοντα. Το μοντέλο του σκελετού του δωματίου και του Η/Υ που εμφανίζεται στην εικονική σκηνή πάρθηκαν από έτοιμη βιβλιοθήκη μοντέλων με άδεια αναπαραγωγής.



**Εικόνα 6-10: Το avatar του ζεύγους χεριών και η επιφάνεια εργασίας με τα εργαλεία και τα εξαρτήματα προς συναρμολόγηση**

Όλα τα μοντέλα εισήχθησαν στο Unity σε μορφή αρχείου «.3ds» προκειμένου να εξασφαλισθεί η συμβατότητα κωδικοποίησης τρισδιάστατων επιφανειών μεταξύ σχεδιαστικών προγραμμάτων και του Unity. Η εισαγωγή υλικών και υφών στα αντικείμενα έγινε μέσα στο περιβάλλον του Unity, όπως και η δημιουργία απλών τρισδιάστατων μοντέλων τραπεζιών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η τελική εφαρμογή .exe έχει συνολικό μέγεθος 20,3 MB συμπεριλαμβανομένων 39 πρωτότυπων αρχείων κώδικα σε C#.

Στα σενάρια ΕΠ ο συμμετέχων έχει οπτική πρώτου προσώπου μέσω της κάσας στερεοσκοπίας. Αυτό επιλέχθηκε έναντι της οπτικής τρίτου προσώπου, ώστε να αποδοθεί

καλύτερα η εμπύθιση στον εικονικό κόσμο και να δοθεί η αίσθηση ρεαλισμού και αλληλεπίδρασης του χρήστη με το ΕΠε. Η αίσθηση της εμπύθισης και της παρουσίας στο ΕΠε επιτυγχάνεται τόσο με τη στερεοσκοπική όραση, όσο και με την αναγνώριση κίνησης κεφαλής και άνω άκρων. Στην αίσθηση του ρεαλισμού συμβάλλουν, επίσης, ο φωτισμός και οι σκιάσεις σε πραγματικό χρόνο που προσφέρει το Unity.

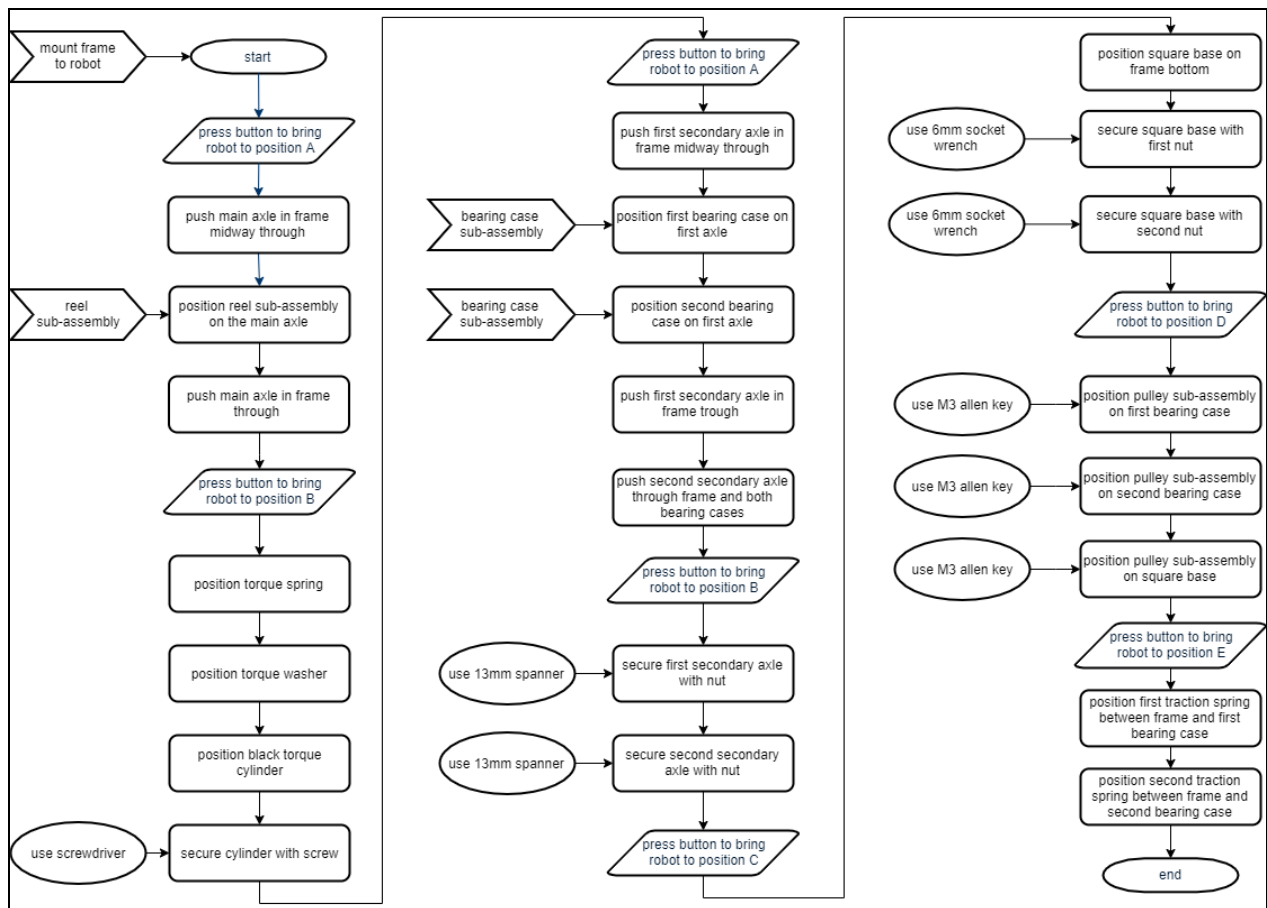
Στην αρχή εκτέλεσης κάθε εικονικού σεναρίου ο χρήστης καλούνταν να εξοικειωθεί με το περιβάλλον του και την αίσθηση κίνησης των χεριών του και να βεβαιωθεί ότι μπορεί να διαβάσει καθαρά τις οδηγίες που εμφανίζονταν εικονικά για τη διαδικασία της συναρμολόγησης. Επιπλέον, εξωτερικός παρατηρητής βεβαιωνόταν για τη σωστή τοποθέτηση της κάσκας και των καλωδίων για να αποφευχθούν ατυχήματα και να διασφαλιστεί η άνεση κίνησης του χρήστη στο χώρο.

#### **6.4 Το Σενάριο Συνεργασίας A-P**

Στη δεύτερη και τρίτη περίπτωση εφαρμογής η συναρμολόγηση γίνεται με συνεργασία A-P σε εικονικό και πραγματικό χώρο αντίστοιχα. Ο άνθρωπος συνεχίζει να έχει τον πρωταρχικό ρόλο συναρμολογώντας τα επιμέρους κομμάτια πάνω στην κεφαλή που είναι προσδεμένη στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα, ενώ το ρομπότ μετακινεί την κεφαλή ώστε να έχει τον κατάλληλο προσανατολισμό για τη μείωση της καταπόνησης του ανθρώπινου καρπού. Ο άνθρωπος χειρίζεται το ρομπότ με το πάτημα ενός κουμπιού που δίνει στο ρομπότ σήμα να μετατοπιστεί στην κατάλληλη θέση. Οι θέσεις του ρομπότ είναι σταθερές και έχουν προγραμματιστεί με κώδικα C# για το εικονικό ρομπότ στο Unity και κώδικα V+ για το φυσικό ρομπότ του εργαστηρίου. Για λόγους ασφαλείας, το κουμπί μετακίνησης του ρομπότ στο φυσικό χώρο είναι πλασματικό, δηλαδή δεν είναι λειτουργικό, αλλά υπάρχει χειριστής στον Η/Υ που δίνει το σήμα κίνησης του ρομπότ ταυτόχρονα με τον άνθρωπο που εκτελεί τη συναρμολόγηση. Ο χειριστής αυτός είναι, επίσης, υπεύθυνος για την παύση της κίνησης του ρομπότ σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

Η εισαγωγή της συνεργασίας του συνεργατικού ρομπότ στο σενάριο της συναρμολόγησης αναδιαμορφώνει το διάγραμμα ροής (Διάγραμμα 6-1) και φαίνεται στο Διάγραμμα 6-2. Οι θέσεις που παίρνει το ρομπότ κάθε φορά ορίστηκαν για τη διευκόλυνση της ανθρώπινης εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, το ρομπότ αλλάζει προσανατολισμό στο τεμάχιο που συναρμολογείται με σκοπό τη μείωση της καταπόνησης του καρπού. Με αυτό τον τρόπο ορίζονται οι θέσεις πριν τα καθήκοντα που επιφέρουν το μεγαλύτερο ρίσκο καταπόνησης και, επιπλέον, ορίζονται θέσεις επαναφοράς ώστε να συνεχιστεί η διαδικασία της συναρμολόγησης.

Οι επαναλήψεις που επιλέχθηκαν για την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης είναι τρεις, καθότι δίνουν ικανοποιητικό βαθμό εκπαίδευσης κρίνοντας με καμπύλες μάθησης (στις 3 πρώτες επαναλήψεις ο συμμετέχων αναμένεται να βελτιωθεί κατά 20% ενώ στις 10 επαναλήψεις φτάνει το 40% και υπάρχει σχετικός κορεσμός).



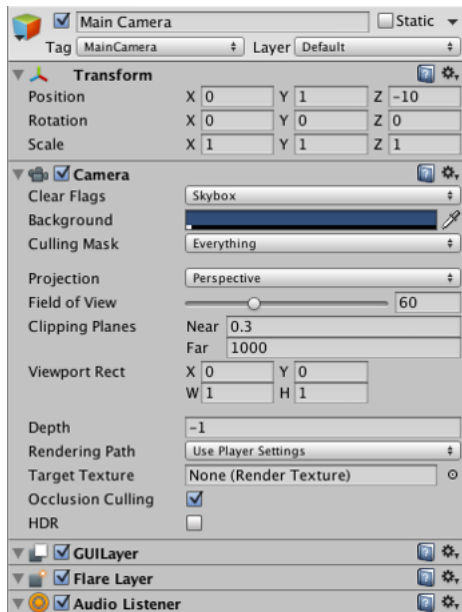
Διάγραμμα 6-2: Διάγραμμα ροής καθηκόντων για την ολοκλήρωση της συνεργατικής συναρμολόγησης

## 6.5 Το Περιβάλλον Unity 3d

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί πολύ συνοπτικά το περιβάλλον Unity 3d και τα βασικά στοιχεία του που χρησιμοποιήθηκαν στη δημιουργία των ΕΠε. Η αναλυτική παρουσίαση των δυνατοτήτων του προγράμματος και των στοιχείων που το απαρτίζουν είναι εκτός του σκοπού της παρούσας εργασίας, καθότι το περιβάλλον Unity 3d χρησιμοποιείται μόνο ως εργαλείο για την προσομοίωση των σεναρίων που αποτελούν το ερευνητικό αντικείμενο.

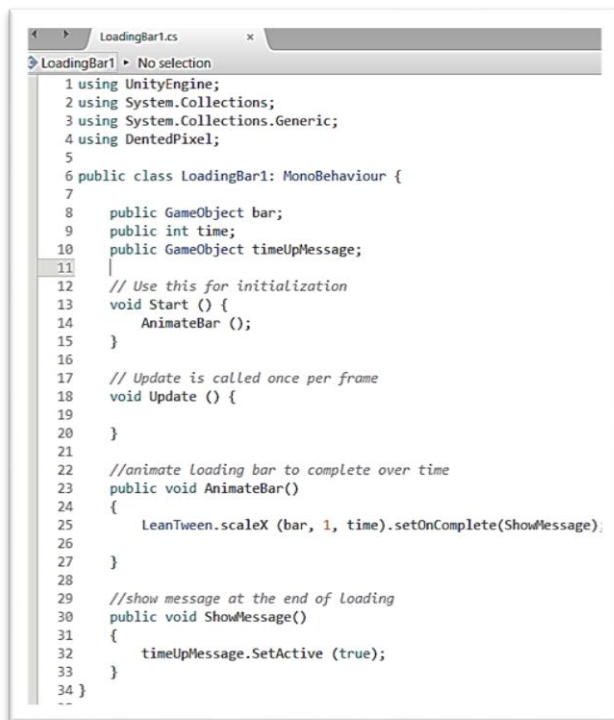
Το Unity 3d είναι μια δημοφιλής πλατφόρμα δημιουργίας 2D και 3D παιχνιδιών, η οποία περιλαμβάνει το περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) και τη μηχανή παιχνιδιού (game engine) (Goldstone, 2009). Ο προγραμματιστής καλείται να δημιουργήσει ένα project και μέσα σε αυτό τις σκηνές (scenes) όπου θα λαμβάνει χώρα ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη της εφαρμογής. Τα δομικά στοιχεία που απαιτούνται για τη δημιουργία μίας εφαρμογής προσομοίωσης (γραφικά μοντέλα, υλικά, κώδικες, βίντεο και ήχοι κλπ.) εισάγονται στο Unity ως assets και αποτελούν τα GameObjects που εισάγονται στην εκάστοτε σκηνή. Τα GameObjects αποτελούν τα θεμελιώδη αντικείμενα του Unity καθώς λειτουργούν ως σύνολα (containers) στοιχείων/χαρακτηριστικών (components) που δίνουν λειτουργικότητα. Τα

components (Εικόνα 6-11) μπορεί να περιλαμβάνουν θέση/προσανατολισμός, όρια σύγκρουσης, υλικά, στοιχεία συμπεριφοράς φυσικής ή κινηματικής (animation), ήχος ή βίντεο προς αναπαραγωγή ή καταγραφή, κώδικας που ορίζει τη συμπεριφορά του αντικειμένου (π.χ. αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο).



Εικόνα 6-11: Ενδεικτική λίστα components προσαρτημένα στην κύρια κάμερα της σκηνής [Unity 3D™, <https://docs.unity3d.com>]

Η λειτουργικότητα κάθε εφαρμογής ΕΠ βασίζεται στα στοιχεία κώδικα (scripts), όπως αυτό που εικονίζεται στην Εικόνα 6-12, τα οποία είναι πρωτότυπα στοιχεία (components) γραμμένα από το χρήστη ή παρέχονται από τις κατασκευάστριες εταιρείες αισθητήρων ώστε να μοντελοποιηθεί η λειτουργία του προϊόντος τους. Ο κώδικας προσαρτείται πάνω στο GameObject το οποίο αφορά και μπορεί να ορίζει αλληλεπιδράσεις με άλλα αντικείμενα, χρονικά γεγονότα, συμπεριφορές φυσικής, κινηματικής κλπ. Το Unity υποστηρίζει τρεις γλώσσες προγραμματισμού για τη σύνταξη scripts: (i) τη C#, (ii) τη UnityScript (σχεδόν ταυτόσημη με JavaScript) και (iii) τη Boo (παρεμφερής της Python). Σε όλους τους πρωτότυπους κώδικες που συντάχθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα C#.

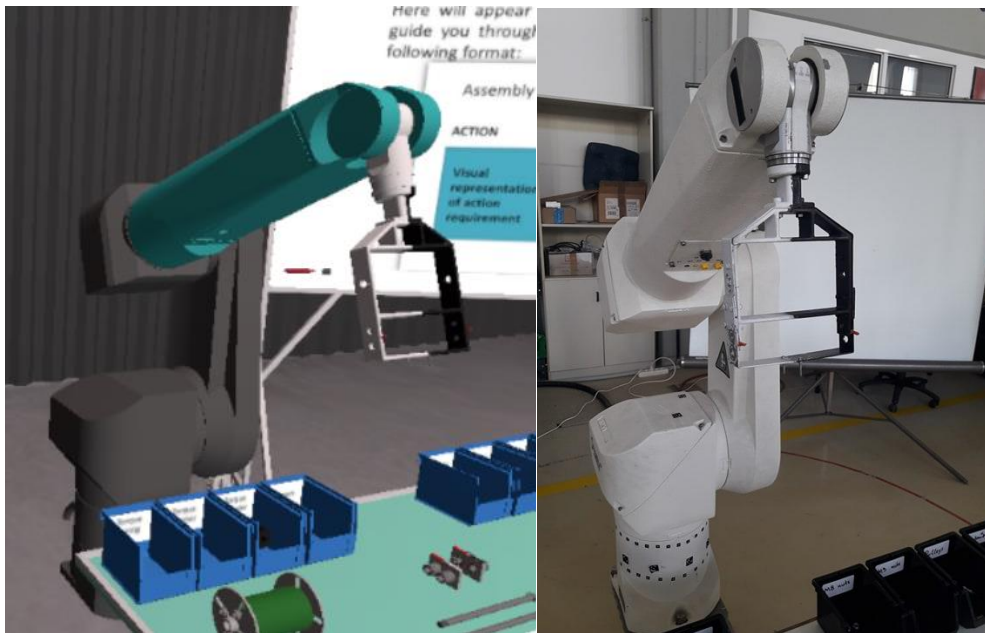


```
1 using UnityEngine;
2 using System.Collections;
3 using System.Collections.Generic;
4 using DentedPixel;
5
6 public class LoadingBar1: MonoBehaviour {
7
8     public GameObject bar;
9     public int time;
10    public GameObject timeUpMessage;
11
12    // Use this for initialization
13    void Start () {
14        AnimateBar ();
15    }
16
17    // Update is called once per frame
18    void Update () {
19
20    }
21
22    //animate loading bar to complete over time
23    public void AnimateBar()
24    {
25        LeanTween.scaleX (bar, 1, time).setOnComplete(ShowMessage);
26    }
27
28
29    //show message at the end of loading
30    public void ShowMessage()
31    {
32        timeUpMessage.SetActive (true);
33    }
34 }
--
```

Εικόνα 6-12: Παράδειγμα απλού πρωτότυπου κώδικα C# που δημιουργήθηκε για την πλήρωση μπάρας φόρτωσης καθήκοντος

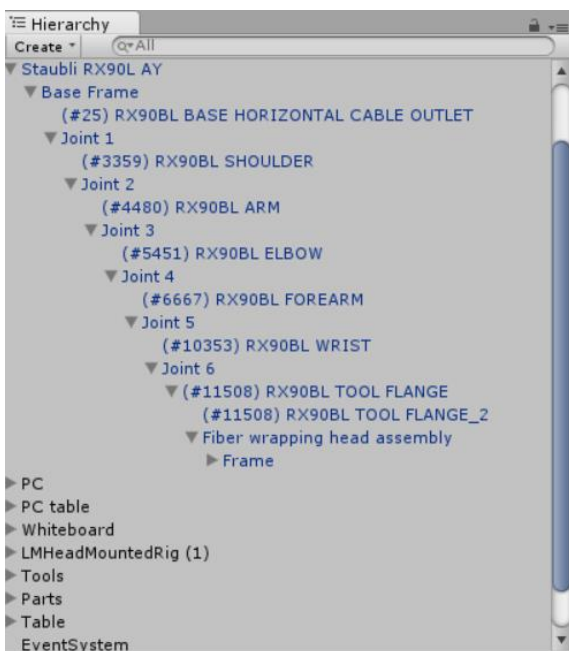
## 6.6 Ο Ρομποτικός Βραχίονας Stäubli RX90L

Στις περιπτώσεις εφαρμογής που μελετήθηκαν ως συνεργατικό ρομπότ χρησιμοποιήθηκε ο βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας Stäubli™ RX 90L που υπάρχει στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ. Πρόκειται για ένα αρθρωτό ρομπότ 6 περιστροφικών βαθμών ελευθερίας που χρησιμοποιείται κυρίως για χειρισμό ελαφρών αντικειμένων, αλληλεπίδραση με πνευματική αρπάγη, εφαρμογές βαφής ή ψεκασμού. Στα σενάρια που μελετήθηκαν, τόσο εικονικά όσο και φυσικά, στο άκρο του ρομπότ προσδένεται η βάση (frame) της κεφαλής τύλιξης ινών προκειμένου να γίνει η συναρμολόγηση (Εικόνα 6-13).



Εικόνα 6-13: Ο ρομποτικός βραχίονας Staubli™ RX 90L στο εργαστήριο και στο ΕΠε

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 6.3, το τρισδιάστατο μοντέλο του ρομποτικού βραχίονα δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρεία, ενώ τροποποιήθηκε κατάλληλα στο Rhinoceros™ για την συμβατότητά του με το Unity και του προστέθηκε κώδικας C# για να ορίζει την κινηματική συμπεριφορά του. Στο περιβάλλον του Unity, το GameObject του ρομπότ μοντελοποιείται με μία ευθεία δενδροειδή ιεραρχία, όπου τα τμήματα του ρομπότ έχουν σχέση “γονέα-παιδιού” (Εικόνα 6-14), με το μοντέλο της βάσης ως γονέα και την αλληλουχία των αρθρώσεων ως τέκνα του σε επίπεδα έτσι ώστε να αντικατοπτρίζουν την ευθεία κινηματική αλυσίδα κατά Denavit-Hartenberg. Η ιεραρχία αυτή εξασφαλίζει την κίνηση του ρομπότ ως κινηματική αλυσίδα, με αρχή την άρθρωση της βάσης (J1) και τέλος την τελευταία άρθρωση του καρπού (J6).



Εικόνα 6-14: Η ιεραρχία των αρθρώσεων στο GameObject του ρομπότ στο ΕΠε

## 6.7 Η Κάσκα Στερεοσκοπίας Oculus Rift DK2

Στην ανάπτυξη των εικονικών σεναρίων χρησιμοποιήθηκε η στερεοσκοπική κάσκα Oculus Rift DK2 (Εικόνα 6-15) ως συσκευή εξόδου τρισδιάστατης απεικόνισης αλλά και εισόδου για την αναγνώριση της κίνησης του κεφαλιού και της κίνησης στον χώρο. Η κάσκα έχει επιπλέον τη δυνατότητα αναπαραγωγής στερεοφωνικού ήχου που δε χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εφαρμογή.



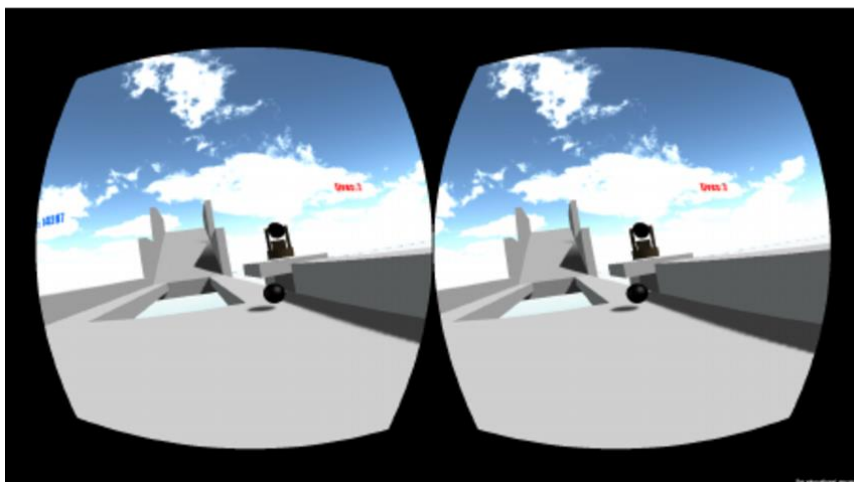
Εικόνα 6-15: Το σετ της Oculus Rift DK2

Η κάσκα Oculus Rift προσφέρει εμπύθιση μέσω της οπτικής απομόνωσης από το φυσικό περιβάλλον. Η συσκευή που τοποθετείται στο κεφάλι του χρήστη μέσω ελαστικών μιάντων περιλαμβάνει δύο οθόνες OLED υψηλής ευκρίνειας με ανάλυση 1080×1200 (μία για κάθε μάτι) και ρυθμό ανανέωσης εξόδου 90Hz. Ο χρήστης βλέπει τις δύο οθόνες μέσα από κατάλληλους φακούς (Εικόνα 6-16) που διευρύνουν το πεδίο όρασής του και του δίνουν την αίσθηση του τρισδιάστατου χώρου (Εικόνα 6-17). Η κάσκα Oculus Rift DK2 διαθέτει αισθητήρα κίνησης που μεταφράζει την κίνηση και περιστροφή σε 6 βαθμούς ελευθερίας, σε πραγματικό χρόνο και με μεγάλη ακρίβεια (μικρότερη του 1mm). Η ανίχνευση κίνησης πραγματοποιείται από μία συστοιχία υπέρυθρων LED τοποθετημένα στο πάνω μέρος εσωτερικά του καλύμματος της κάσκας που χρησιμοποιεί ως σημείο αναφοράς τη θέση του αισθητήρα αναγνώρισής τους για την αποκωδικοποίηση της κίνησης.



Εικόνα 6-16: Οι φακοί εντός της κάσκας Oculus



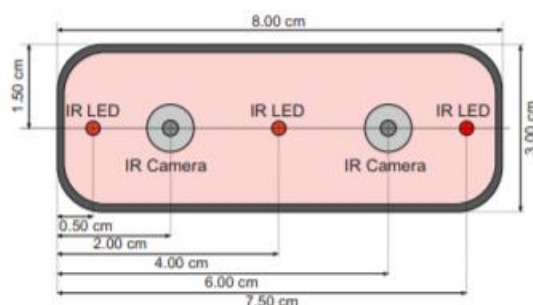


Εικόνα 6-17: Στερεοσκοπική προβολή της εικόνας στο χρήστη [<https://www.researchgate.net>]

Η κατασκευάστρια εταιρεία παρέχει το SDK για απευθείας εγκατάσταση σε Η/Υ και εισαγωγή της συσκευής στο περιβάλλον του Unity με την κωδικοποίηση της λειτουργίας της. Ακόμη, παρέχει τη δυνατότητα απευθείας προβολής της εικόνας στη συσκευή, παρακάμπτοντας τους όποιους περιορισμούς του λειτουργικού συστήματος ως προς το ρυθμό ανανέωσης. Η σύνδεση της κάσκας προϋποθέτει την τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος και επικοινωνεί με τον Η/Υ γίνεται με καλώδιο HDMI για τη μετάδοση εικόνας και καλώδιο USB για την ανίχνευση και αναπαραγωγή της κίνησης.

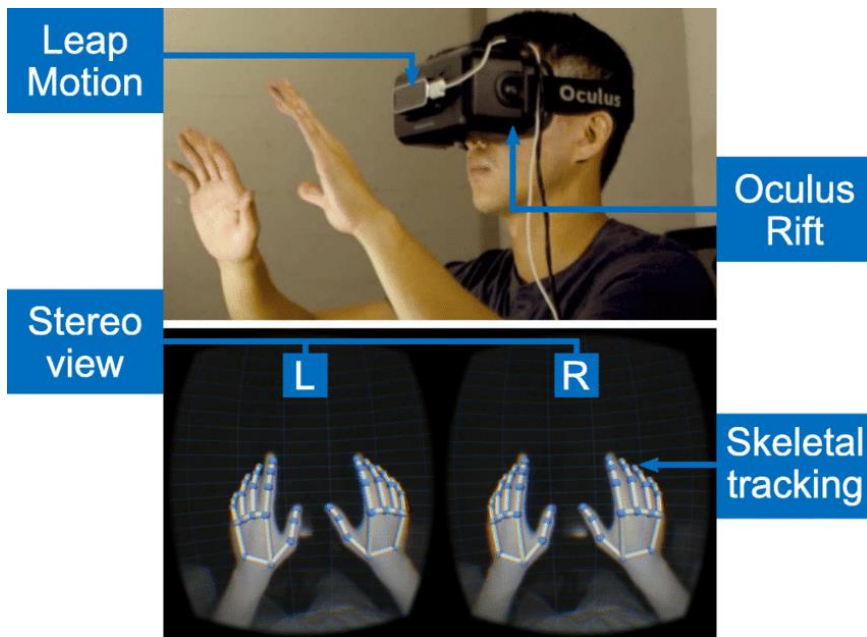
## 6.8 Ο Αισθητήρας Κίνησης Leap Motion™

Ο αισθητήρας Leap Motion εισάγει ένα σύστημα εντοπισμού κινήσεων και θέσης των χεριών με ακρίβεια 0.2mm για στατική ανίχνευση και 1mm για κίνηση (Guna, Jakus, Rogadžnik, Tomažič, & Sodnik, 2014). Ο αισθητήρας εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία μέσω 3 λαμπών LED και εντοπίζει την κίνηση των χεριών μέσω 2 υπέρυθρων καμερών (Εικόνα 6-18) από τις οποίες συνδυάζει τα δεδομένα και μοντελοποιεί την κίνηση σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων με σημείο αναφοράς το κεντρικό LED στοιχείο. Το λογισμικό για τη λειτουργία του, τη χρήση του ως συσκευή εισόδου στο Unity και οι σχετικοί κώδικες που διέπουν τη συμπεριφορά των μοντέλων είναι διαθέσιμα ηλεκτρονικά από την κατασκευάστρια εταιρεία. Η σύνδεση του αισθητήρα με τον Η/Υ γίνεται μέσω καλωδίου και θύρας USB.



Εικόνα 6-18: το εσωτερικό του αισθητήρα Leap Motion

Για τη μοντελοποίηση των ανθρωπόμορφων χεριών (avatar) ο αισθητήρας εντοπίζει τη θέση οστών και συνδέσμων του χεριού (Εικόνα 6-19) και προσαρμόζει τα δεδομένα σε προϋπάρχοντα μοντέλα τρισδιάστατης απεικόνισης των άνω άκρων που υπάρχουν στη βιβλιοθήκη του. Τα μοντέλα της γραφικής αναπαράστασης συνδυάζονται ύστερα με μοντέλα προσομοίωσης της φυσικής και της κινηματικής των ανθρώπινων χεριών. Για τις ανάγκες των σεναρίων που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο γραφικά μοντέλα χεριών, ένα ανδρικό κι ένα γυναικείο (Εικόνα 6-20), κι ένα φυσικό μοντέλο που ανιχνεύει και μεταφράζει την κίνηση από τον αγκώνα έως τις άκρες των δαχτύλων.



Εικόνα 6-19: Ανίχνευση σκελετού των χεριών [\[https://techcrunch.com\]](https://techcrunch.com)

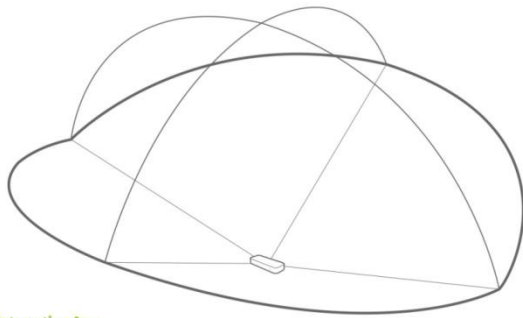


Εικόνα 6-20: Γυναικείο και ανδρικό μοντέλο γραφικών του αριστερού χεριού

Τα κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα που αξιοποιήθηκαν στα πλαίσια των δοκιμών:

- *Εύρος λειτουργίας*

Από τον κατασκευαστή δίνεται ένα εύρος εντοπισμού κινήσεων σε ανεστραμμένη πυραμίδα που είναι καθ' ύψος 25-600 mm και εκτείνεται 600 mm υπό γωνία 150° κατά μήκος και 600 mm υπό γωνία 120° κατά πλάτος γύρω απ' τον αισθητήρα, χωρίς να επηρεάζεται από την τοποθέτησή του πάνω ή κάτω από τα κινούμενα χέρια (Εικόνα 6-21).

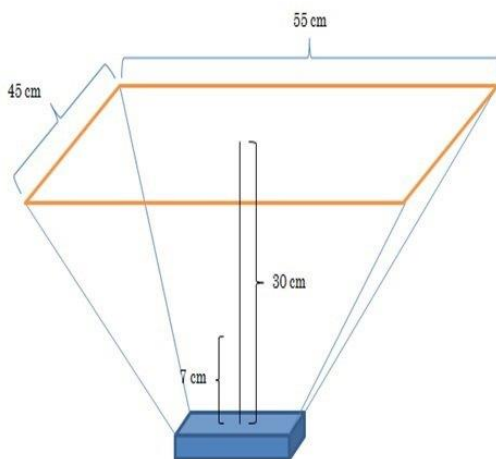


**Interaction Area**  
2 feet above the controller, by 2 feet wide on each side (150° angle), by 2 feet deep on each side (120° angle)

**Εικόνα 6-21: Χώρος δυνατότητας αντίληψης αλληλεπίδρασης όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή**

- Στην πράξη ο βέλτιστος εντοπισμός κίνησης γίνεται στον χώρο που φαίνεται στην Εικόνα 6-22.

Η τοποθέτηση σε κάσκα, ή γενικότερα η δυναμική κίνηση του αισθητήρα, επηρεάζει ελαφρώς τον εντοπισμό των κινήσεων, υπάρχει ωστόσο ειδική επιλογή στο μενού για αυτό, που αντισταθμίζει την κίνηση και βελτιώνει την απόδοση του αισθητήρα.



**Εικόνα 6-22: Χώρος βέλτιστου εντοπισμού κίνησης του αισθητήρα Leap Motion**

- *Αντιληπτές κινήσεις*

Ο αισθητήρας αναγνωρίζει και μοντελοποιεί τη μετατόπιση και περιστροφή στους 3 άξονες (6 dofs) καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Η κίνηση μεταφράζεται στο χώρο ως προς το σταθερό σημείο αναφοράς στο κέντρο του αισθητήρα.

- *Αναγνωρίσιμες χειρονομίες*

CircleGesture: Κυκλική κίνηση από δάχτυλο.

SwipeGesture: Η κίνηση σε ευθεία γραμμή του χεριού με τεντωμένα δάχτυλα.

ScreenTapGesture: Κτύπος δακτύλου (tapping) προς τα εμπρός.

KeyTapGesture: Κτύπος δακτύλου (tapping) προς τα κάτω.

- *Προκλήσεις που παρουσιάζονται*

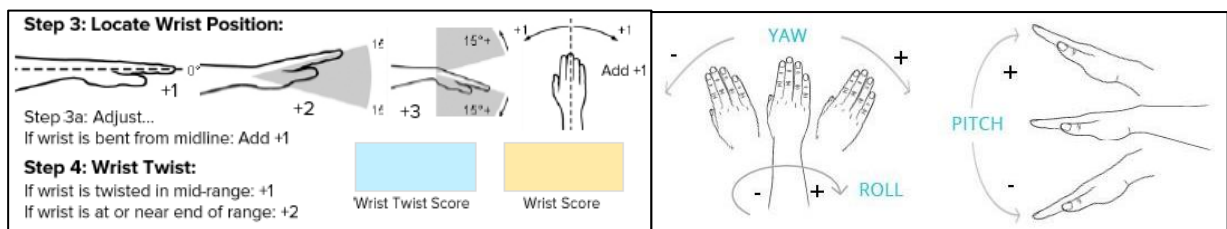
Όταν το χέρι φθάνει σε γωνία roll περίπου  $90^\circ$  (κάθετα προς την οριζόντια επιφάνεια), όπου δεν διακρίνονται τα ξεχωριστά οστά των δακτύλων ώστε να αναγνωριστούν όλα τα δάχτυλα παρουσιάζεται μία σύγχυση στις κινήσεις, καθώς το ίδιο συμβαίνει στην περίπτωση που το ένα χέρι περνάει πάνω από το άλλο.

Επίσης, κατά την χρήση του Leap Motion θα πρέπει να αποφευχθεί η πρόσπτωση φωτός, και δη ηλιακού, απευθείας πάνω στην συσκευή καθώς αυτή λειτουργεί με υπέρυθη ακτινοβολία και επηρεάζεται η δυνατότητα ανίχνευσης.

# 7 Πειραματικές Δοκιμές και Αποτελέσματα

## 7.1 Κλίμακα Βαθμολόγησης Μυοσκελετικής Καταπόνησης του Καρπού

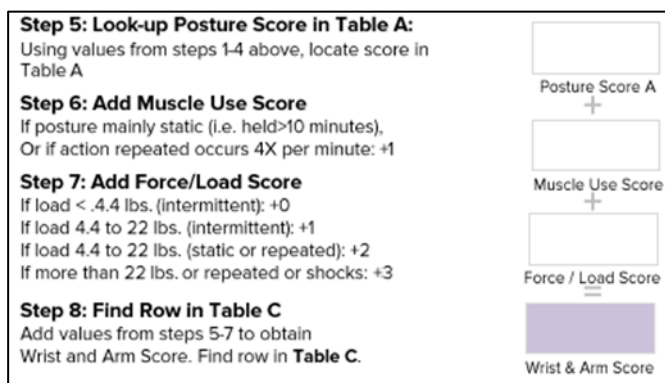
Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4, για του σκοπούς της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε μία τροποποιημένη εκδοχή της μεθόδου αξιολόγησης RULA για τη βαθμολόγηση της μυοσκελετικής καταπόνησης των καρπών των άνω άκρων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα κριτήρια των βημάτων 3 και 4, που εικονίζονται στην Εικόνα 7-1 για την αξιολόγηση των γωνιών yaw, pitch και roll της κίνησης του χεριού.



Εικόνα 7-1: Τα βήματα 3 και 4 της μεθόδου RULA και οι γωνίες yaw, pitch και roll της κίνησης

Για τις μετρήσεις των γωνιών που σχηματίζει το χέρι του χρήστη κάθε φορά λαμβάνονται δεδομένα του αισθητήρα Leap που αποδίδει τις συντεταγμένες και τις περιστροφές σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων και, έπειτα, μεταφράζονται και επεξεργάζονται, σε πραγματικό χρόνο, κατάλληλα μέσω πρωτότυπου κώδικα του Unity ώστε να δίνουν τις τιμές των ζητούμενων γωνιών σε μοίρες. Οι μετρήσεις βαθμολογούνται με τους συντελεστές που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Επόμενο βήμα της αξιολόγησης είναι η εκτίμηση της διαδικασίας της επανάληψης του καθήκοντος (π.χ. κατά το βίδωμα ή το σφίξιμο περικοχλίων η ίδια κίνηση επαναλαμβάνεται πολλές φορές) και του βάρους του αντικειμένου που συναρμολογείται. Στην περίπτωση που μελετήθηκε όλα τα εξαρτήματα ήταν κάτω του ορίου του φορτίου που τίθεται από το RULA και ο συντελεστής βαθμολογείται με 0, άρα παραλείπεται κατά την αξιολόγηση. Τέλος, οι συντελεστές προστίθενται και προκύπτει η τελική βαθμολογία του καθήκοντος (Εικόνα 7-2).



Εικόνα 7-2: Τα βήματα 5 έως 8 της μεθόδου RULA

Ανάλογα με τη συγκεντρωτική βαθμολογία κρίνεται εάν το καθήκον παρουσιάζει μεγάλο ή αποδεκτό ρίσκο βαθμό κόπωσης. Καθήκοντα με βαθμολογία άνω του 6 κρίνεται ότι χρήζουν άμεσης αλλαγής, για βαθμολογία άνω του 4 είναι επιθυμητή η αλλαγή, ενώ από 1 έως 4 το ρίσκο είναι αποδεκτό (Πίνακας 7-1).

Score Qualification	
No risk	1-2
Low Risk	3-4
Medium Risk	5-6
High Risk	7

Πίνακας 7-1: Κατάταξη ρίσκου ανάλογα με τη βαθμολογία του καθήκοντος

Στον Πίνακας 7-2 φαίνεται ένα παράδειγμα αξιολόγησης καθήκοντος με συγκεντρωτικές βαθμολογίες για κάθε χέρι. Το καθήκον χρήζει αλλαγής ανάλογα με τη μέγιστη βαθμολογία που έχει συγκεντρώσει και προσαρμόζεται ώστε να βοηθήσει το καταπονούμενο χέρι.

Wrist Assessment Scoring Table Sample				
	Left Hand		Right Hand	
	Degrees	Score	Degrees	Score
yaw	0	0	9	1
pitch	14	2	45	3
roll	5	0	5	2
range	20		60	
repeated	5	1	0	0
<b>Total</b>	3			6

Πίνακας 7-2: Παράδειγμα βαθμολόγησης καθήκοντος

## 7.2 Ερωτηματολόγιο Αξιολόγησης Εκπαίδευσης

Στις εφαρμογές σεναρίων όπου αξιολογήθηκε η εκπαίδευση σε συνεργατικά καθήκοντα, οι συμμετέχοντες καλούνταν να συμπληρώσουν ένα ερωτηματολόγιο ηλεκτρονικά μέσω Google Forms. Το ερωτηματολόγιο αυτό απαρτίζεται από 4 μέρη που παρουσιάζονται εκτενώς παρακάτω.

Η πρώτη ενότητα ερωτήσεων αφορά τα δημογραφικά στοιχεία του πληθυσμού ώστε να αξιολογηθεί η ομοιογένεια του δείγματος. Στον Πίνακας 7-3 φαίνονται οι ερωτήσεις και οι επιλογές που δίνονται για απάντηση.

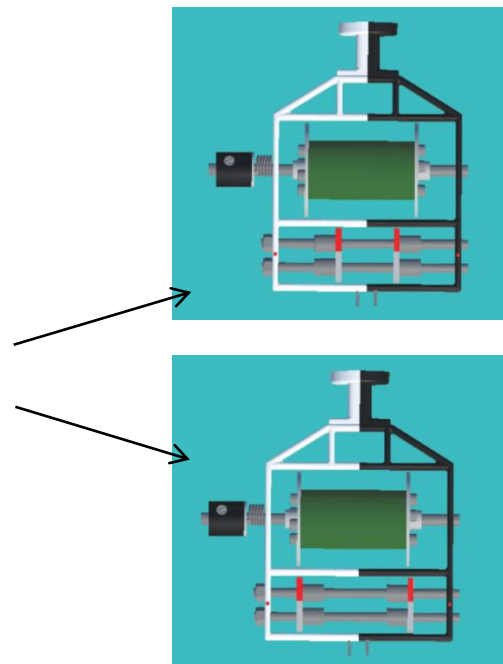
Η δεύτερη ενότητα αφορά την αφομοίωση της γνώσης που αποκτήθηκε μέσω της εκπαίδευσης και συμπληρώνεται αμέσως μετά το τέλος της εκπαίδευσης και πριν τη τελική αξιολόγηση. Οι ερωτήσεις 1 έως 3 είναι κλειστού τύπου κι έχουν μόνο μία σωστή απάντηση, ενώ η τελευταία ερώτηση ζητά την κρίση του συμμετέχοντα ως προς το επίπεδο

ικανοποίησής του από το training με βαθμολόγηση από το 1-χειρότερο έως το 5-καλύτερο (Πίνακας 7-4).

Demographics	
Gender	Male
	Female
Age	18-25
	26-30
	31-35
	36+
Mechanical Engineering Background	Undergrad
	MEng Student
	Bsc-Integrated Master
	Phd Candidate

Πίνακας 7-3: 1<sup>η</sup> Ενότητα Ερωτηματολογίου

Immediate Recall	
How many pulleys in total did you have to assembly?	2
	3
	4
	5
During the assembly which part has to be assembled before securing the two axles?	Bearing Cases
	Pulleys
	Traction Springs
Which of the following images depicts the correct position of the bearing cases?	Choice 1
	Choice 2
Were the instructions you were given during the training clear for you to follow?	1
	2
	3
	4
	5



Πίνακας 7-4: 2<sup>η</sup> Ενότητα Ερωτηματολογίου

Η τρίτη κατηγορία του ερωτηματολογίου αφορά μόνο όσους εκτέλεσαν τις δοκιμές σε ΕΠε και εκτιμά την εμπύθιση του συμμετέχοντα και το ρεαλισμό της υλοποίησης του σεναρίου. Αυτές οι ερωτήσεις αποτελούν πάγια μέθοδο αξιολόγησης εικονικών προσομοιώσεων και πρέπει να εισάγονται σε ερωτηματολόγια ασχέτως σκοπού χρήσης της ΕΠ. Όλες οι ερωτήσεις είναι κλειστού τύπου και βαθμολογούνται με κλίματα 1-καθόλου έως 5-μέγιστο (

Πίνακας 7-5).

Η τέταρτη και τελευταία ενότητα του ερωτηματολογίου απαντάται στο τέλος της αξιολόγησης της εκπαίδευσης και αποτελείται από ερωτήσεις κρίσεως ανοιχτού και κλειστού

τύπου. Τα αποτελέσματα από αυτή την ενότητα δίνουν και ιδέες για μελλοντικό σχεδιασμό ανάλογων πειραμάτων (

Πίνακας 7-6).

<b>VR Immersion</b>	
<b>Level of VR familiarisation prior to this training</b>	1
	2
	3
	4
	5
<b>Did you feel immersed in the VR environment?</b>	1
	2
	3
	4
	5
<b>During the training process did you feel dizziness or any type of discomfort?</b>	1
	2
	3
	4
	5
<b>Did your hands movement feel natural in the VR environment?</b>	1
	2
	3
	4
	5
<b>Did you feel like you actually handled different objects, even though they had no physical substance?</b>	1
	2
	3
	4
	5

Πίνακας 7-5: 3<sup>η</sup> Ενότητα Ερωτηματολογίου

<b>User Training Assessment</b>	
<b>Do you feel confident completing the assembly on the physical model without external help?</b>	1
	2
	3
	4
	5
<b>To what extent do you feel training was helpful?</b>	1
	2
	3
	4
	5
<b>Do you have any suggestions to improve the training curriculum?</b>	
<b>What do you believe was most helpful during training?</b>	

Πίνακας 7-6: 4<sup>η</sup> Ενότητα Ερωτηματολογίου



### 7.3 Αποτελέσματα Δοκιμής Σεναρίου Συναρμολόγησης σε ΕΠε χωρίς Ρομπότ

Οι συμμετέχοντες σε αυτό το σενάριο ολοκλήρωσαν τη διαδικασία συναρμολόγησης ακολουθώντας οδηγίες που την περιέγραφαν βηματικά. Σε αυτό το σενάριο δεν χρησιμοποιείται το ρομπότ για τη διαδικασία της συναρμολόγησης αλλά βρίσκεται στο ΕΠε ως μηχανισμός συγκράτησης του εξωτερικού σκελετού της κεφαλής. Το σενάριο ακολουθεί το διάγραμμα ροής που έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα (Διάγραμμα 6-1). Κατά την εκτέλεση συλλέγονται δεδομένα χρονισμού και θέσης άνω άκρων που βαθμολογούνται σύμφωνα με τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 7.1.

Από τους 12 συμμετέχοντες που συλλέχθηκαν δεδομένα, τελικά, χρησιμοποιήθηκαν τα 10 σύνολα δεδομένων καθώς απορρίφθηκαν αυτά με τη μεγαλύτερη απόκλιση. Τα δεδομένα αυτά θα συγκριθούν με αυτά που προέκυψαν από το συνεργατικό σενάριο σε επόμενη ενότητα.

Ergonomic Assessment - NO Robot											
	User 1	User 2	User 3	User 4	User 5	User 6	User 7	User 8	User 9	User 10	Average
Task 1	4	5	5	4	5	4	5	4	5	4	4.5
Task 2	2	2	2	4	2	2	2	2	2	2	2.2
Task 3	5	5	5	6	5	5	5	5	5	5	5.1
Task 4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4.1
Task 5	3	4	4	3	4	4	4	3	4	4	3.7
Task 6	3	3	3	5	3	3	3	3	3	3	3.2
Task 7	7	7	7	6	7	7	7	7	7	7	6.9
Task 8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Task 9	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Task 10	3	4	6	4	4	4	4	3	4	4	4
Task 11	4	5	5	5	5	5	5	4	5	5	4.8
Task 12	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Task 13	7	6	6	6	6	6	6	7	6	6	6.2
Task 14	7	7	6	7	7	7	7	7	7	7	6.9
Task 15	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Task 16	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Task 17	6	7	7	7	7	7	7	6	7	7	6.8
Task 18	7	5	5	5	5	5	5	7	5	5	5.4
Task 19	5	7	7	7	7	7	6	7	7	7	6.7
Task 20	7	6	6	6	6	6	6	7	6	6	6.2
Task 21	6	4	4	5	4	5	4	6	5	5	4.8
Task 22	6	6	6	6	6	6	4	6	6	6	5.8

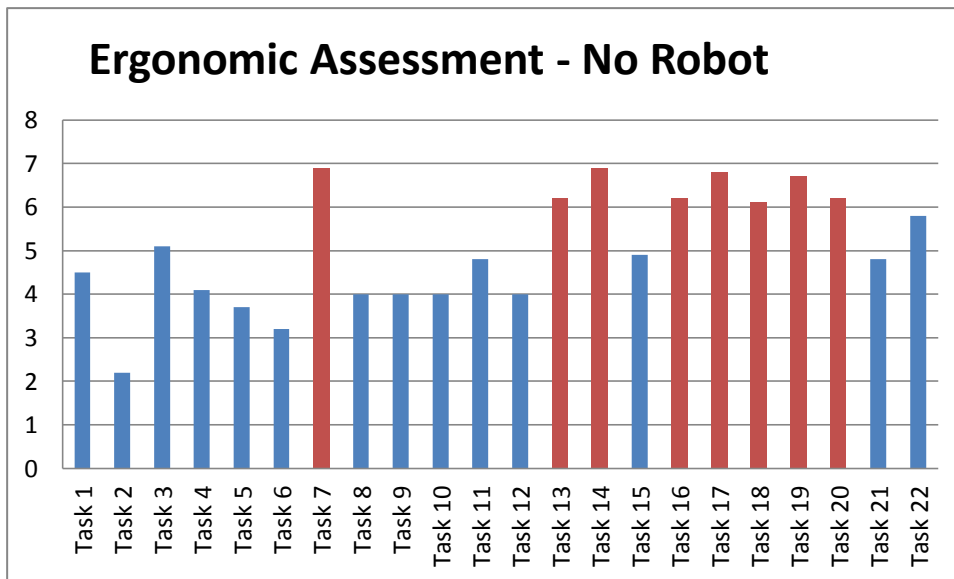
Πίνακας 7-7: Συνοπτική παρουσίαση της βαθμολογίας των καθηκόντων συναρμολόγησης

Στον Πίνακα 7-7 παρουσιάζονται συνοπτικά τα εργονομικά δεδομένα που συλλέχθηκαν. Με κόκκινο χρώμα εικονίζονται τα καθήκοντα που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ρίσκο και είναι αυτά που επιτάσσουν αλλαγές (πιο καθαρά φαίνονται στο

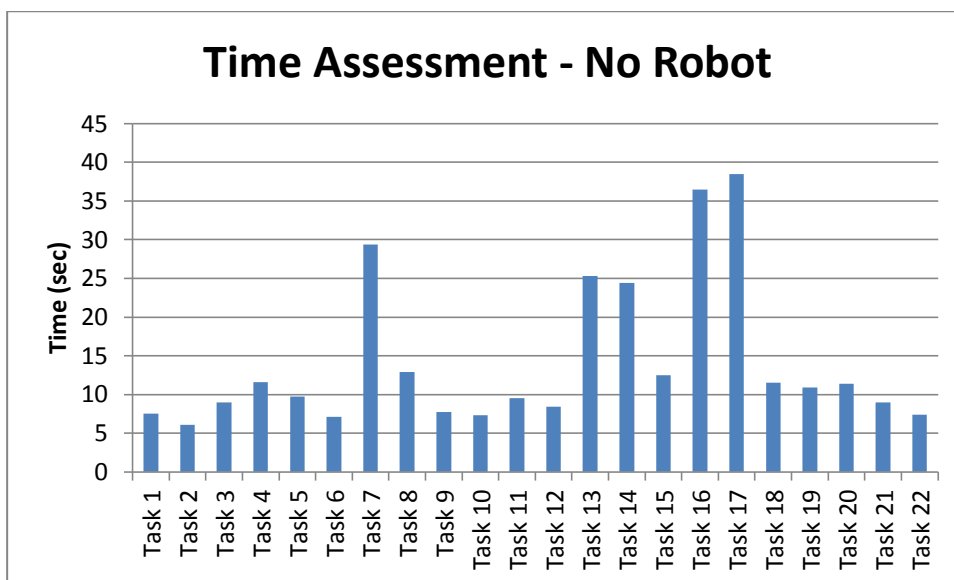
Διάγραμμα 7-1: των μέσων όρων). Τα καθήκοντα που συγκέντρωσαν τη μεγαλύτερη βαθμολογία είναι αυτά που περιλαμβάνουν επαναλαμβανόμενη στροφή του καρπού όπως είναι το βίδωμα βιδών και τροχαλιών και η σύσφιξη περικοχλίων. Ακόμη, Αυτά τα καθήκοντα είναι και τα πιο χρονοβόρα, όπως φαίνεται στον Πίνακας 7-8 και το Διάγραμμα 7-2.

	User 1	User 2	User 3	User 4	User 5	User 6	User 7	User 8	User 9	User 10	Average	StDev
	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)
Task 1	8	8	7	6	11	5	8	6	6	10	7.5	1.718879
Task 2	6	5	6	10	5	5	6	8	4	6	6.1	1.563795
Task 3	5	5	4	17	12	7	21	8	5	6	9	5.25703
Task 4	12	11	5	15	21	11	9	13	10	9	11.6	3.842348
Task 5	6	6	5	10	15	6	21	9	12	7	9.7	4.593474
Task 6	5	5	6	9	7	7	4	14	6	8	7.1	2.574349
Task 7	35	41	27	24	33	13	46	39	15	21	29.4	10.12827
Task 8	12	15	25	16	5	9	16	14	6	11	12.9	5.230157
Task 9	6	7	10	6	5	4	8	7	12	9	7.7	1.909307
Task 10	5	7	6	5	5	8	9	5	10	13	7.3	2.451345
Task 11	9	8	7	11	14	6	9	11	7	13	9.5	2.421495
Task 12	7	5	9	12	9	11	6	5	12	8	8.4	2.419617
Task 13	27	31	16	37	25	29	22	19	28	19	25.3	5.80047
Task 14	32	14	18	35	27	31	20	17	26	24	24.4	6.370386
Task 15	6	12	8	26	7	17	16	7	14	12	12.5	5.563681
Task 16	35	52	29	45	25	51	12	36	57	23	36.5	13.19952
Task 17	41	38	45	31	38	41	40	32	37	42	38.5	3.937004
Task 18	8	16	15	10	4	5	16	9	13	16	11.5	3.795931
Task 19	8	16	13	6	11	13	12	11	9	10	10.9	2.574349
Task 20	7	18	16	5	12	8	10	14	7	17	11.4	4.225464
Task 21	6	9	7	6	6	13	9	8	15	11	9	2.828427
Task 22	4	7	6	5	8	12	11	6	6	9	7.4	2.343269
<b>Total</b>	<b>290</b>	<b>336</b>	<b>290</b>	<b>347</b>	<b>308</b>	<b>315</b>	<b>331</b>	<b>298</b>	<b>317</b>	<b>304</b>	<b>313.6</b>	<b>17.61817</b>

Πίνακας 7-8: Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων χρονισμού πρώτου σεναρίου



Διάγραμμα 7-1: Η βαθμολογία των καθηκόντων συναρμολόγησης χωρίς ρομπότ



Διάγραμμα 7-2: Η χρονομέτρηση των καθηκόντων συναρμολόγησης χωρίς ρομπότ

## 7.4 Αποτελέσματα Δοκιμής Συνεργατικού Σεναρίου Συναρμολόγησης σε ΕΠε με Χρήση Ρομπότ

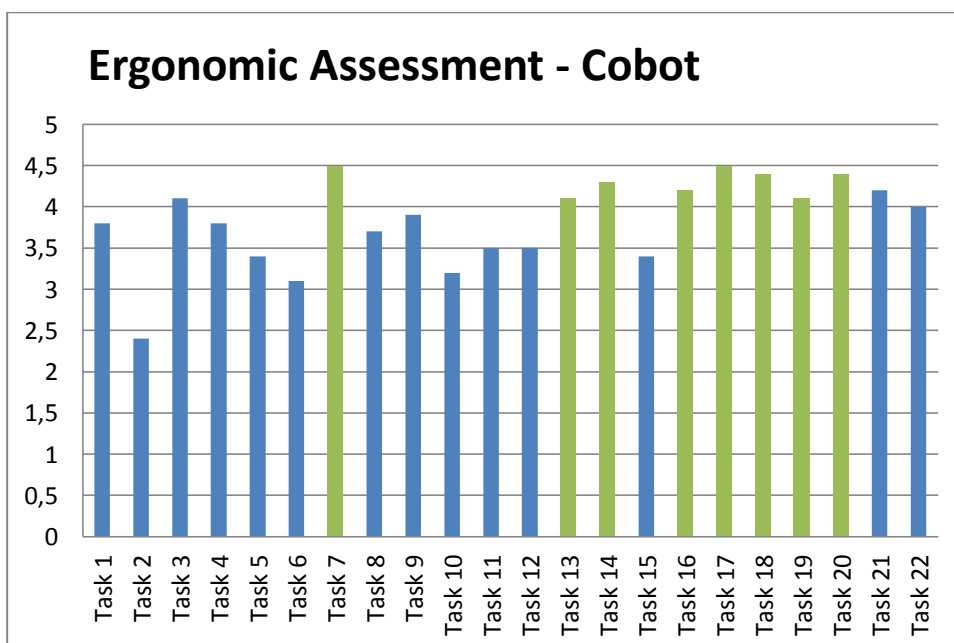
Κατά τις πειραματικές δοκιμές για τη μελέτη του προηγούμενου σεναρίου προέκυψε η ανάγκη μεταβολής κάποιων καθηκόντων ώστε να περιοριστεί η καταπόνηση των χεριών του εργαζόμενου κατά τη συναρμολόγηση. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκε ο ρομποτικός βραχίονας που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 6.6. Ο ρόλος του ρομπότ είναι να αλλάζει προσανατολισμό στη προσδεμένη σε αυτό βάση της κεφαλής ώστε να διευκολύνεται η συναρμολόγηση. Οι θέσεις του ρομπότ επιλέχθηκαν ώστε να ελαχιστοποιούν την

απαιτούμενη περιστροφή γων και την απόσταση του καθήκοντος. Με την μείωση της απόστασης μειώνεται η βαθμολόγηση κατά roll (η γωνία δεν μπορεί να μειωθεί καθώς η περιστροφή χρειάζεται για το βίδωμα και τη σύσφιξη) καθότι η καταπόνηση από τα καθήκοντα αυτά μειώνεται όταν η εργασία διεκπεραιώνεται σε μικρή απόσταση από το σώμα του εργαζομένου.

Οι συμμετέχοντες σε αυτό το σενάριο επιλέχθηκαν με κριτήριο να μην είναι οικείοι με το τεμάχιο ή τη διαδοχή των καθηκόντων της συγκεκριμένης συναρμολόγησης ώστε να πάρουν μέρος και στη διαδικασία της εκπαίδευσης. Αφού ολοκλήρωσαν τη διαδικασία συναρμολόγησης τρεις φορές, ακολουθώντας οδηγίες που την περιέγραφαν βηματικά, απάντησαν τα τμήματα 1 έως 3 του ερωτηματολογίου για να αξιολογηθεί η άμεση επαναφορά γνώσης (immediate recall). Τέλος, ολοκλήρωσαν την αξιολόγηση της εκπαίδευσης, όπου καλούνταν να συναρμολογήσουν την κεφαλή όπως εκπαιδεύτηκαν στο φυσικό πλέον κόσμο, χωρίς παρουσία οδηγιών ή άλλης βοήθειας και συμπλήρωσαν το τελευταίο κομμάτι του ερωτηματολογίου. Το σενάριο ακολουθεί το διάγραμμα ροής που έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα (Διάγραμμα 6-2). Κατά την εκτέλεση συλλέγονται δεδομένα χρονισμού και θέσης άνω άκρων που βαθμολογούνται σύμφωνα με τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 7.1.

Από τους 12 συμμετέχοντες χρησιμοποιήθηκαν τα 10 σύνολα δεδομένων που συλλέχθηκαν καθώς απορρίφθηκαν αυτά με τη μεγαλύτερη απόκλιση. Τα δεδομένα αυτά θα συγκριθούν με αυτά που προέκυψαν από το μη συνεργατικό σενάριο αλλά και με αυτά που προκύπτουν από το σενάριο της εκπαίδευσης στο φυσικό κόσμο.

Στον Πίνακα 7-9 παρουσιάζονται συνοπτικά τα εργονομικά δεδομένα που συλλέχθηκαν και εικονίζονται στο Διάγραμμα 7-3.



Διάγραμμα 7-3: Η βαθμολογία των καθηκόντων συναρμολόγησης με συνεργασία ρομπότ

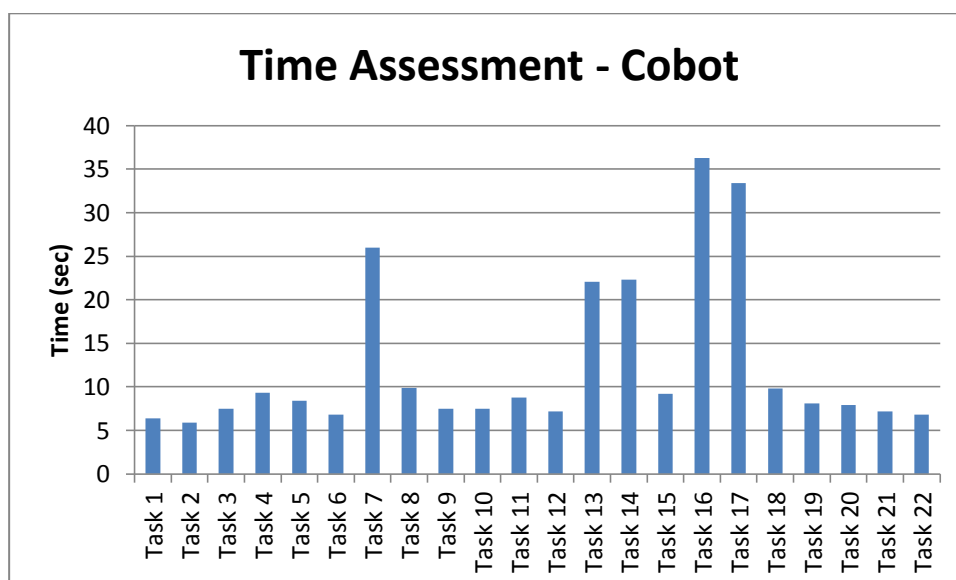
Ergonomic Assessment - Cobot (3rd training repetition)											
	User 1	User 2	User 3	User 4	User 5	User 6	User 7	User 8	User 9	User 10	Average
Task 1	3	4	3	4	5	4	4	4	3	4	3,8
Task 2	2	3	2	2	4	2	2	2	2	3	2,4
Task 3	5	4	4	4	3	3	5	6	3	4	4,1
Task 4	3	4	5	3	6	3	4	4	2	4	3,8
Task 5	2	4	3	3	3	4	4	3	4	4	3,4
Task 6	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3,1
Task 7	4	4	4	7	4	4	4	4	5	5	4,5
Task 8	3	4	5	4	4	4	4	3	3	3	3,7
Task 9	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3,9
Task 10	2	4	2	3	4	2	4	3	4	4	3,2
Task 11	4	3	4	5	5	3	3	4	2	2	3,5
Task 12	4	4	4	3	4	3	4	4	3	2	3,5
Task 13	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4,1
Task 14	5	4	4	5	4	4	4	4	5	4	4,3
Task 15	4	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3,4
Task 16	4	4	4	4	4	4	4	6	4	4	4,2
Task 17	4	5	4	4	4	4	4	6	4	6	4,5
Task 18	5	4	4	5	4	5	4	4	5	4	4,4
Task 19	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4,1
Task 20	4	4	4	4	4	5	7	4	4	4	4,4
Task 21	5	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4,2
Task 22	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Πίνακας 7-9: Συνοπτική παρουσίαση της βαθμολογίας των καθηκόντων συνεργατικής συναρμολόγησης

Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης χρονομετρήθηκαν όλες οι διεργασίες βήμα-βήμα. Τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιούν για την επίλυση τόσο της πρώτης όσο και της δεύτερης ερευνητικής προβληματικής. Παρατηρήθηκε σταδιακή βελτίωση των χρόνων των συμμετεχόντων ανά επανάληψη (Πίνακας 7-11). Στην αξιολόγηση στο φυσικό ρομπότ οι εξεταζόμενοι χρειάστηκαν ως επί των πλείστων μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για να ολοκληρώσουν τη συναρμολόγηση.

	User 1	User 2	User 3	User 4	User 5	User 6	User 7	User 8	User 9	User 10	Average
	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)
Task 1	6	5	6	8	5	4	7	6	8	9	6.4
Task 2	6	5	6	7	8	5	4	9	4	5	5.9
Task 3	5	5	8	10	9	8	11	6	6	7	7.5
Task 4	8	9	5	11	15	10	6	13	10	6	9.3
Task 5	6	4	5	8	14	6	13	9	12	7	8.4
Task 6	5	5	6	9	5	7	4	13	6	8	6.8
Task 7	29	32	26	24	35	14	19	32	28	21	26
Task 8	12	6	18	7	5	12	14	6	10	9	9.9
Task 9	6	6	5	6	9	7	10	7	12	7	7.5
Task 10	5	7	6	5	5	12	9	5	6	15	7.5
Task 11	8	7	9	6	11	10	8	9	7	13	8.8
Task 12	7	5	3	12	9	7	6	5	10	8	7.2
Task 13	21	27	31	17	15	28	30	16	22	14	22.1
Task 14	15	22	23	19	28	33	24	19	16	24	22.3
Task 15	6	8	9	7	6	13	16	5	10	12	9.2
Task 16	43	36	21	37	40	51	29	45	29	32	36.3
Task 17	25	35	26	31	29	42	39	31	35	41	33.4
Task 18	8	7	14	10	7	5	14	8	16	9	9.8
Task 19	5	9	9	5	6	11	11	8	12	5	8.1
Task 20	6	13	9	6	6	8	9	5	9	8	7.9
Task 21	4	8	5	9	6	5	9	8	10	8	7.2
Task 22	4	5	6	7	8	10	7	6	6	9	6.8
Total	240	266	256	261	281	308	299	271	284	277	274.3

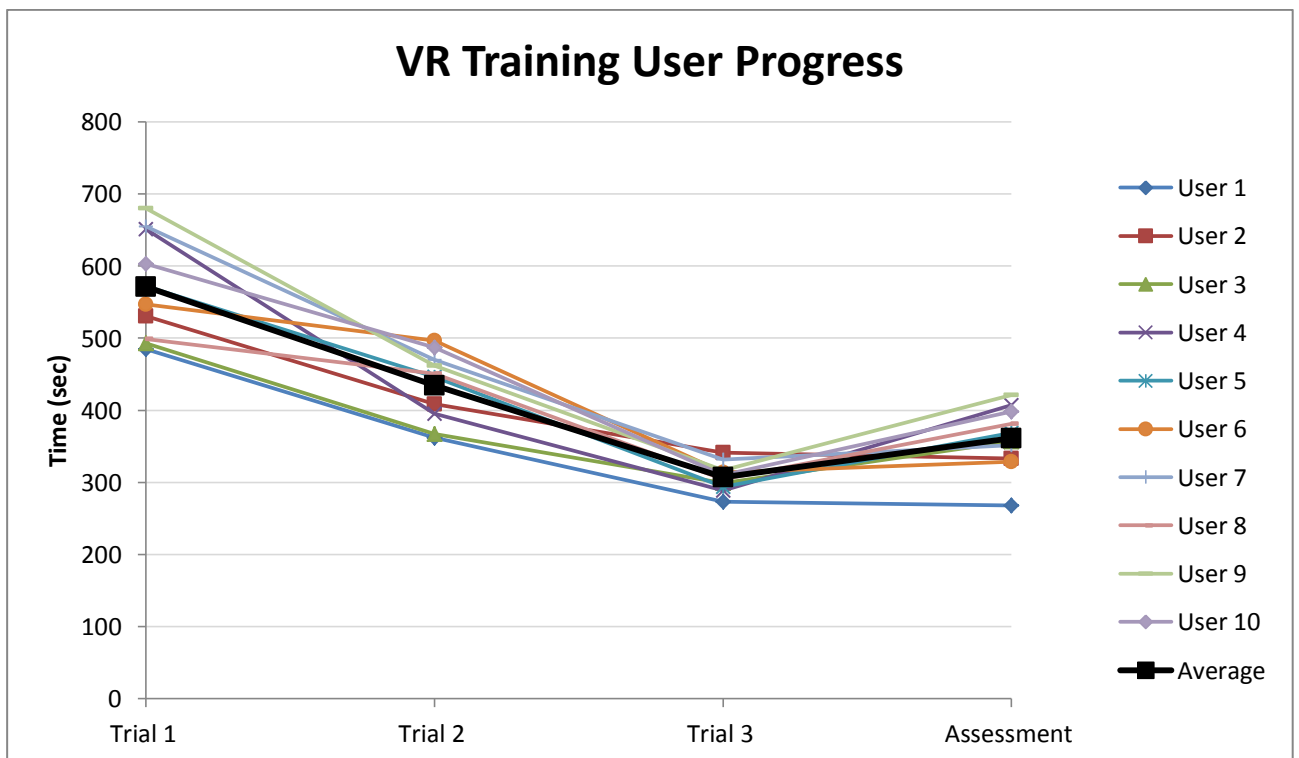
Πίνακας 7-10: Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων χρονισμού δεύτερου σεναρίου



Διάγραμμα 7-4: Η χρονομέτρηση των καθηκόντων συνεργατικής συναρμολόγησης

VR	Trial 1 (time sec)	Trial 2 (time sec)	Trial 3 (time sec)	Assessment (time sec)
User 1	485	362	273	268
User 2	531	409	341	333
User 3	493	367	299	357
User 4	651	395	289	407
User 5	572	446	294	369
User 6	547	497	314	329
User 7	655	470	332	352
User 8	499	451	304	381
User 9	680	462	317	421
User 10	603	487	310	398
<b>Average</b>	571.6	434.6	307.3	361.5
<b>StDev</b>	65.50	43.80	18.24	40.56
<b>Max</b>	680	497	341	421
<b>Min</b>	485	362	273	268

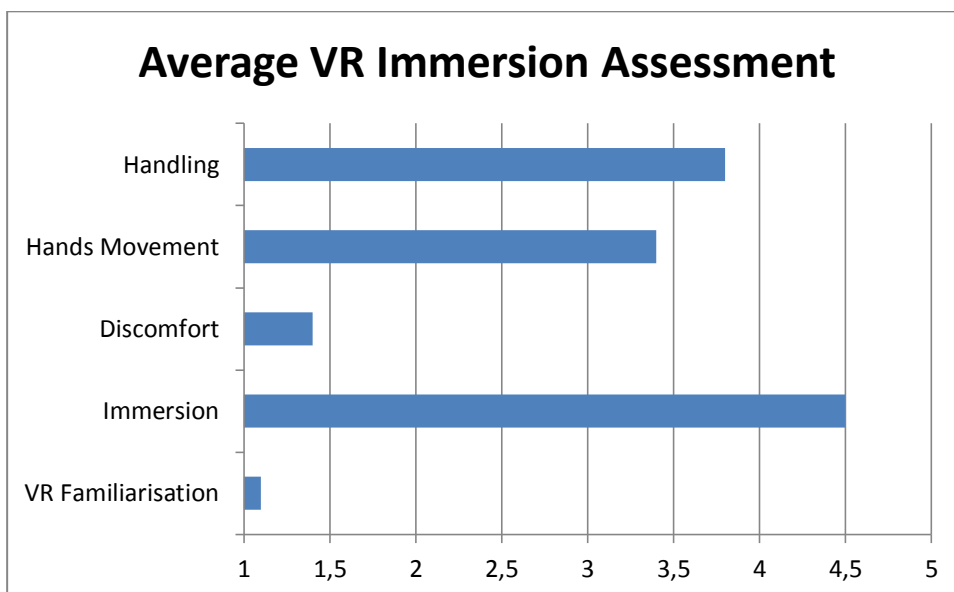
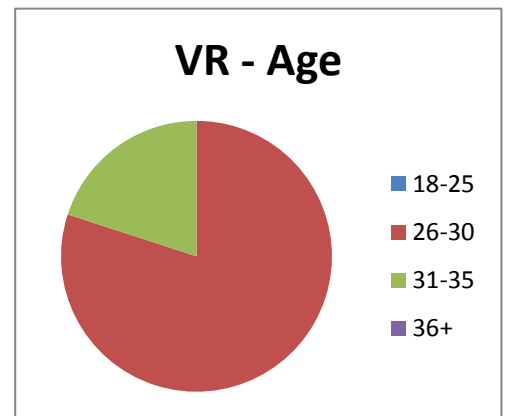
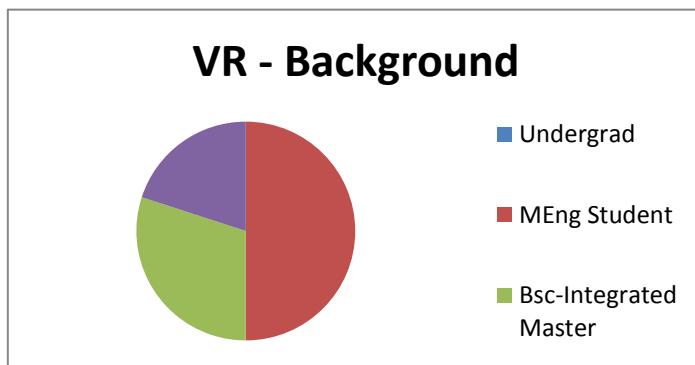
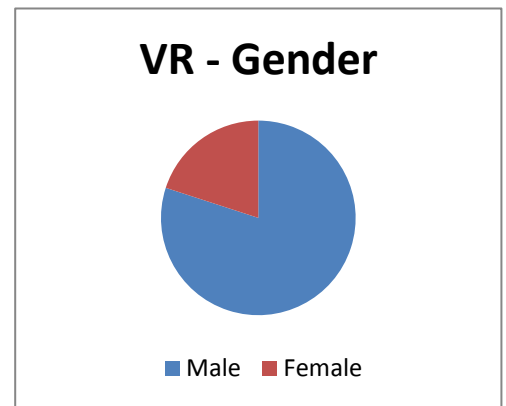
Πίνακας 7-11: Συγκεντρωτικός πίνακας προόδου εκπαίδευσης VR



Διάγραμμα 7-5: Συγκεντρωτικό διάγραμμα προόδου εκπαίδευσης VR

Οι εκπαιδευόμενοι απάντησαν στο ερωτηματολόγιο που περιγράφηκε στην Ενότητα 7.2. Παρακάτω εμφανίζονται τα αποτελέσματα:

Demographics		
Gender	Male	8
	Female	2
Age	18-25	0
	26-30	8
	31-35	2
	36+	0
Mechanical Engineering Background	Undergrad	0
	MEng Student	5
	Bsc-Integrated Master	3
	Phd Candidate	2

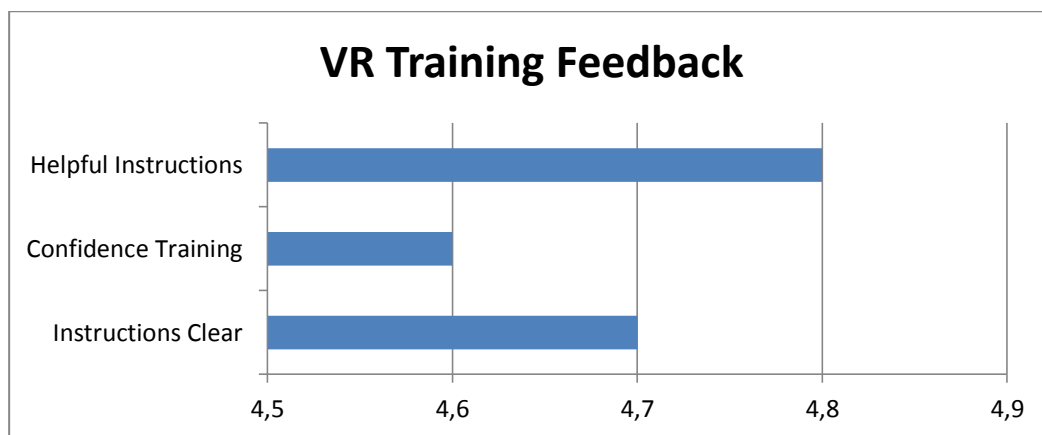


Διάγραμμα 7-6: Μέσοι όροι εμπύθισης στο ΕΠε



Immediate Recall		
How many pulleys in total did you have to assembly?	2	0
	3	10
	4	0
	5	0
During the assembly which part has to be assembled before securing the two axles?	Bearing Cases	9
	Pulleys	1
	Traction Springs	0
Which of the following images depicts the correct position of the bearing cases?	Choice 1	10
	Choice 2	0
<b>Total number of errors</b>		<b>1</b>

Πίνακας 7-12: Πίνακας αξιολόγησης αφομοίωσης της VR εκπαίδευσης



Διάγραμμα 7-7: VR Training Feedback – Μέσοι όροι

## 7.5 Αποτελέσματα Δοκιμής Συνεργατικού Σεναρίου στο Φυσικό Περιβάλλον

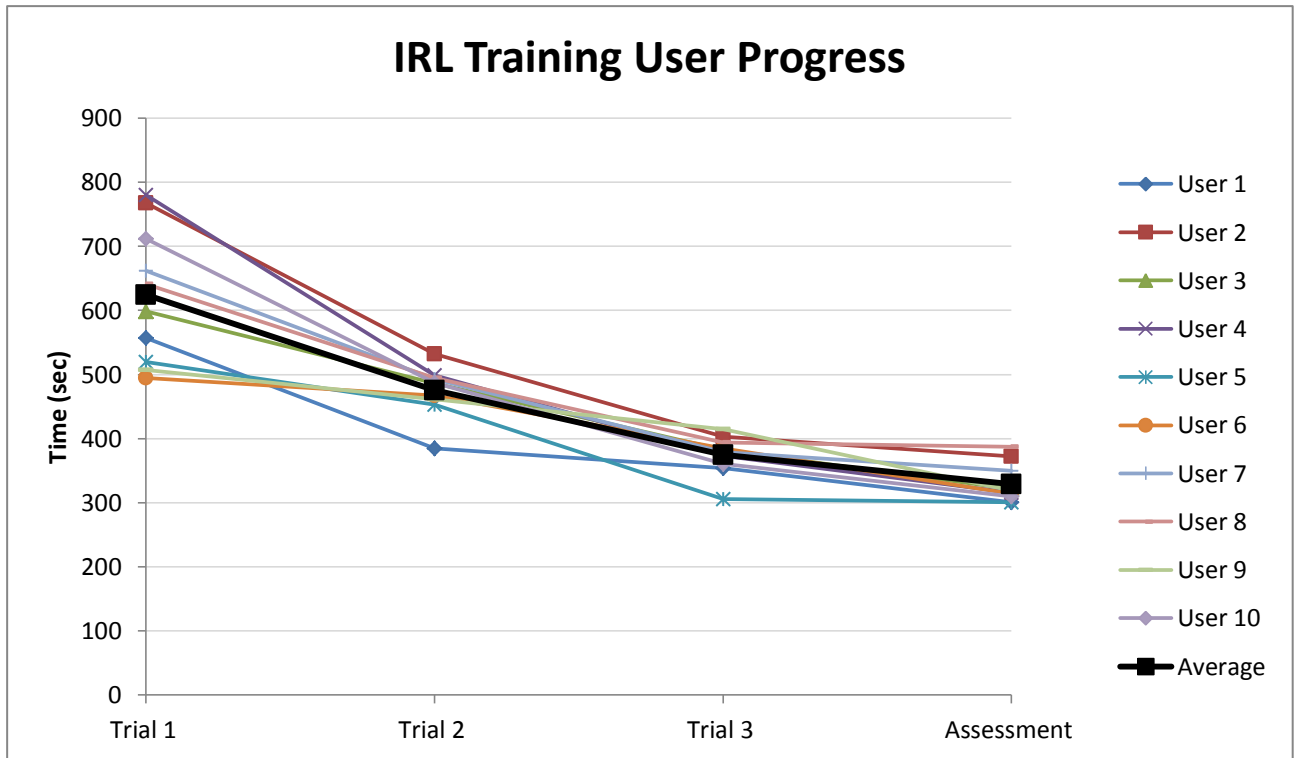
Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 5.1.2, σημαντικό ερώτημα που στοχεύει να απαντήσει αυτή η εργασία είναι η επιρροή της ΕΠ στην εκμάθηση καθηκόντων. Για το λόγο αυτό, το τρίτο σενάριο πειραμάτων που διεξήχθησαν αποτελεί τη μεταφορά του δεύτερου σεναρίου στον πραγματικό κόσμο. Η διαφορά έγκειται στα δεδομένα που συλλέγουμε, καθώς δε χρησιμοποιείται κανένας αισθητήρας κίνησης κι επομένως τα δεδομένα χρονισμού και αξιολόγησης αφορούν μόνο του κομμάτι του training και δε συνεισφέρουν στην εργονομική διερεύνηση.

Οι συμμετέχοντες σε αυτό το σενάριο ήταν υποχρεωτικά διαφορετικοί από αυτούς του προηγούμενου σεναρίου καθώς επιλέχθηκαν με κριτήριο να μην είναι οικείοι με το τεμάχιο ή τη διαδοχή των καθηκόντων της συγκεκριμένης συναρμολόγησης για να διασφαλιστεί η ακεραιότητα της διαδικασίας της εκπαίδευσης. Αφού ολοκλήρωσαν τη διαδικασία συναρμολόγησης τρεις φορές, ακολουθώντας τις ίδιες ακριβώς οδηγίες με το προηγούμενο σενάριο, απάντησαν τα τμήματα 1 και 2 του ερωτηματολογίου για να αξιολογηθεί η άμεση επαναφορά γνώσης (immediate recall). Η μόνη διαφορά ήταν στο γεγονός πως όσοι εκπαιδεύτηκαν μέσω ΕΠ ήταν υποχρεωτικά καθιστοί για λόγους ασφαλείας (πιθανή δυσφορία λόγω ΕΠ) ενώ στον πραγματικό κόσμο ήταν όρθιοι για λόγους ασφαλείας του εργαστηρίου. Τέλος, ολοκλήρωσαν την αξιολόγηση της εκπαίδευσης, όπου καλούνταν να συναρμολογήσουν την κεφαλή όπως εκπαιδεύτηκαν, χωρίς παρουσία οδηγιών ή άλλης βοήθειας και συμπλήρωσαν το τελευταίο κομμάτι του ερωτηματολογίου. Το σενάριο ακολουθεί το διάγραμμα ροής που έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα (Διάγραμμα 6-2).

Από τους 11 συμμετέχοντες χρησιμοποιήθηκαν τα 10 σύνολα δεδομένων που συλλέχθηκαν καθώς απορρίφθηκαν αυτά με τη μεγαλύτερη απόκλιση. Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης χρονομετρήθηκαν όλες οι διεργασίες βήμα-βήμα. Παρατηρήθηκε σταδιακή βελτίωση των χρόνων των συμμετεχόντων ανά επανάληψη (Πίνακας 7-13) η οποία στην πλειοψηφία των συμμετεχόντων συνεχίστηκε και κατά την αξιολόγηση.

<b>IRL</b>	<b>Trial 1 (time sec)</b>	<b>Trial 2 (time sec)</b>	<b>Trial 3 (time sec)</b>	<b>Assessment (time sec)</b>
<b>User 1</b>	557	385	354	301
<b>User 2</b>	768	532	403	372
<b>User 3</b>	599	486	382	322
<b>User 4</b>	780	499	373	316
<b>User 5</b>	520	453	306	301
<b>User 6</b>	495	467	385	314
<b>User 7</b>	662	493	379	350
<b>User 8</b>	641	495	394	387
<b>User 9</b>	507	461	415	319
<b>User 10</b>	712	487	361	310
<b>Average</b>	624,1	475,8	375,2	329,2
<b>StDev</b>	95,73	35,23	27,49	27,18
<b>Max</b>	780	532	415	387
<b>Min</b>	495	385	306	301

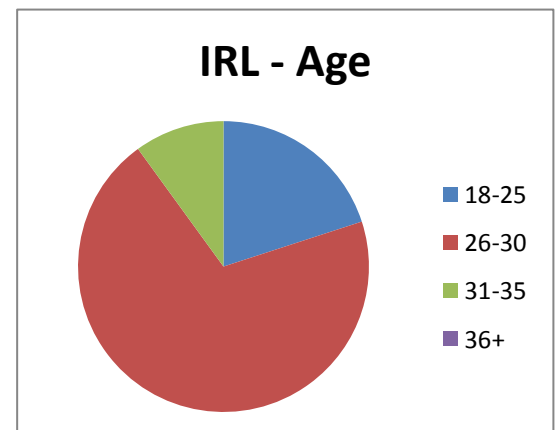
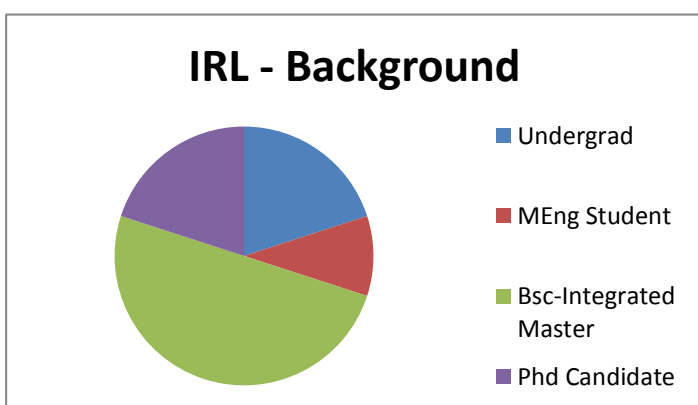
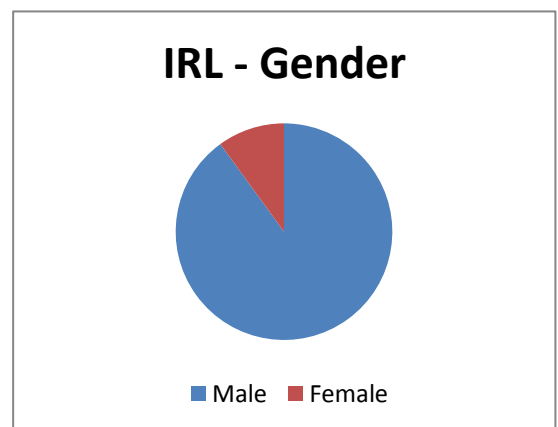
Πίνακας 7-13: Συγκεντρωτικός πίνακας προόδου εκπαίδευσης IRL



Διάγραμμα 7-8: Συγκεντρωτικό διάγραμμα προόδου εκπαίδευσης VR

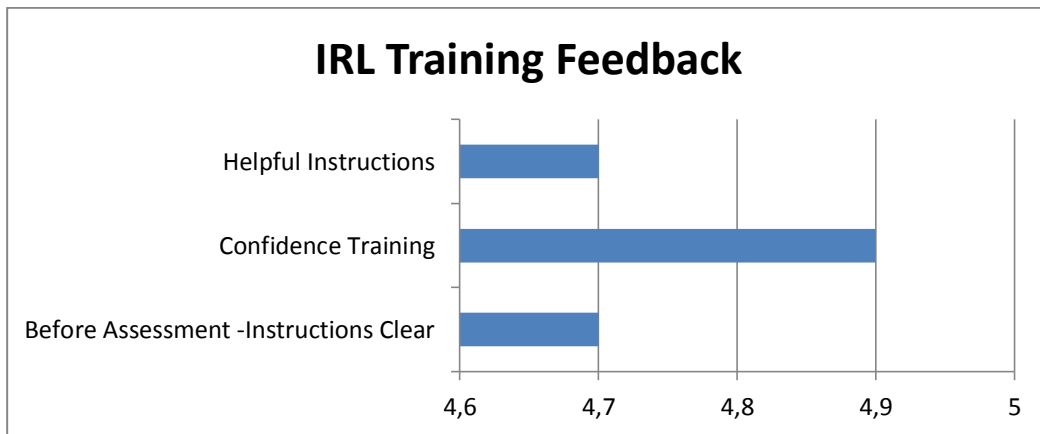
Οι εκπαιδευόμενοι απάντησαν στο ερωτηματολόγιο που περιγράφηκε στην Ενότητα 7.2. Παρακάτω εμφανίζονται τα αποτελέσματα:

Demographics		
Gender	Male	9
	Female	1
Age	18-25	2
	26-30	6
	31-35	2
	36+	0
Mechanical Engineering Background	Undergrad	2
	MEng Student	1
	Bsc-Integrated	5
	Master	5
	Phd Candidate	2



Immediate Recall		
How many pulleys in total did you have to assembly?	2	0
	3	10
	4	0
	5	0
During the assembly which part has to be assembled before securing the two axles?	Bearing Cases	8
	Pulleys	1
	Traction Springs	1
Which of the following images depicts the correct position of the bearing cases?	Choice 1	9
	Choice 2	1
<b>Total number of errors</b>		<b>3</b>

Πίνακας 7-14: Πίνακας αξιολόγησης αφομοίωσης της IRL εκπαίδευσης



Διάγραμμα 7-9: IRL Training Feedback – Μέσοι όροι

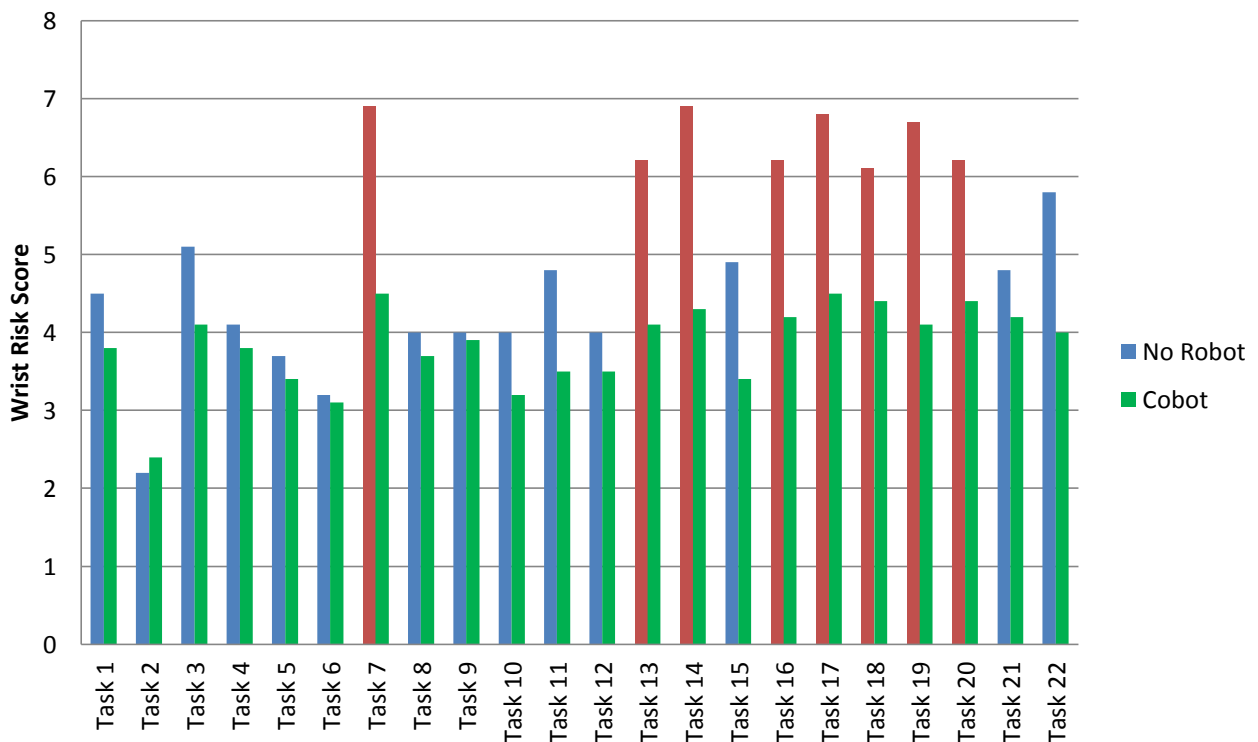
## 8 Σύγκριση Αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα

### 8.1 Συγκριτική Αξιολόγηση της Καταπόνησης του Καρπού των Σεναρίων ΕΠ

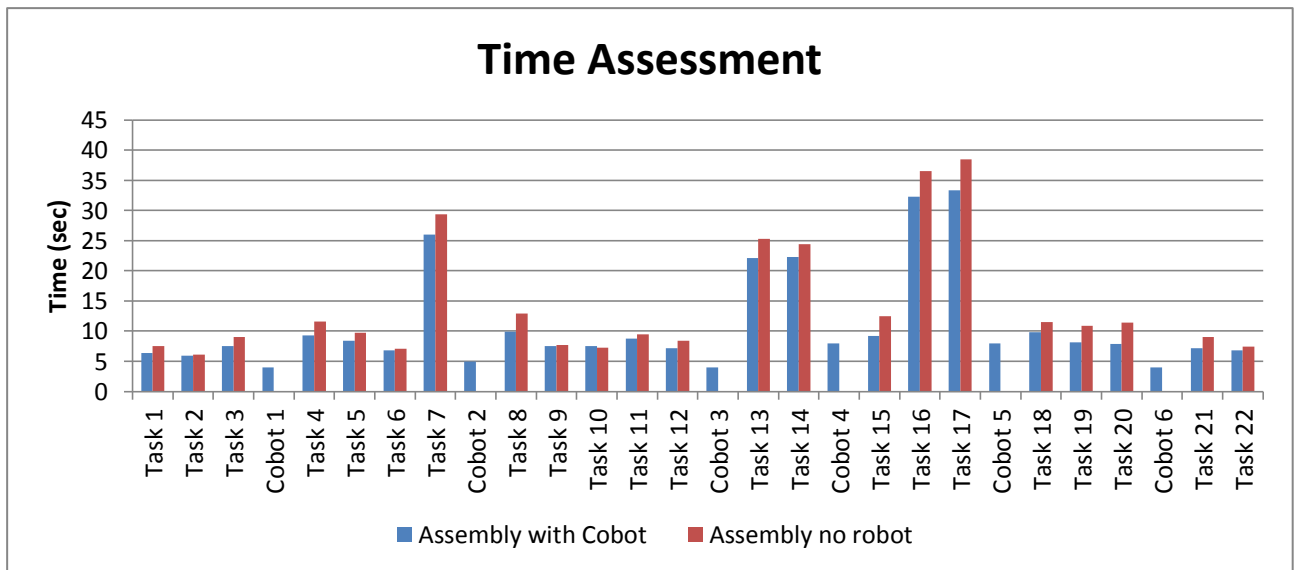
Μέσω των σεναρίων συναρμολόγησης σε ΕΠε λαμβάνουμε δεδομένα για την αξιολόγηση του εργονομικού σχεδιασμού της διαδικασίας της συναρμολόγησης και πώς ένα συνεργατικό ρομπότ που διεκπεραιώνει ένα απλό καθήκον, όπως είναι αυτό της εναλλαγής μεταξύ ορισμένων σταθερών προσανατολισμών στο χώρο, μπορεί να έχει καθοριστικό ρόλο στην ελαχιστοποίηση της εμφάνισης μυοσκελετικών παθήσεων λόγω της εργασίας.

Από τα Διαγράμματα Διάγραμμα 7-1 και Διάγραμμα 7-3 είναι προφανές ότι όλοι οι συντελεστές έχουν μειωθεί αισθητά, αλλά το κυριότερο, δεν υπάρχει πλέον μέσος συντελεστής καθήκοντος άνω του 5 που να υποδεικνύει την ύπαρξη περιοριστικού ρίσκου στο καθήκον (Διάγραμμα 8-1). Ο συνολικός μέσος συντελεστής που προκύπτει για όλη τη συναρμολόγηση εάν προστεθούν οι βαθμολογίες που έχουν υπολογιστεί ισούται με 111,1 χωρίς χρήση ρομπότ και 84,2 με συνεργατικό ρομπότ. Αυτό σημαίνει ότι η εισαγωγή του ρομπωτικού βραχίονα στη συνεργασία μειώνει κατά 24,21% την καταπόνηση του καρπού όπως μετρήθηκε και εκτιμήθηκε στην παρούσα εργασία.

### Ergonomic Assessment



Διάγραμμα 8-1: Σύγκριση εργονομικής αξιολόγησης ανά επιμέρους καθήκον

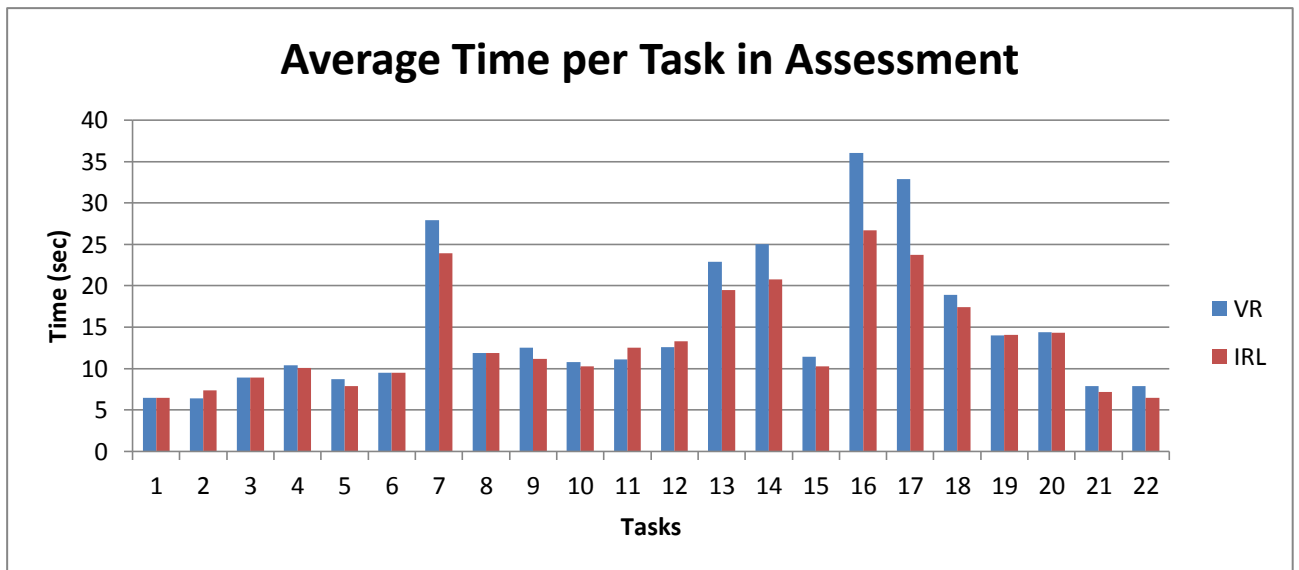


**Διάγραμμα 8-2: Μέσος μετρούμενος χρόνος ανά βήμα συναρμολόγησης**

Ο μέσος συνολικός τελικός χρόνος της συνεργατικής συναρμολόγησης είναι 303,3 δευτερόλεπτα ενώ αυτής χωρίς ρομπότ είναι 313,6. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι παρότι προστίθενται οι χρόνοι κίνησης του ρομπότ (33 δευτερόλεπτα συνολικά) η διαδικασία της συναρμολόγησης πραγματοποιείται γρηγορότερα με τη βοήθεια του ρομπότ. Επομένως, υπάρχει και χρονικό πλεονέκτημα παραγωγικότητας να αξιοποιηθεί σε μία γραμμή παραγωγής με την εισαγωγή συνεργατικών ρομπότ. Στο Διάγραμμα 8-2 φαίνεται η βελτίωση σε κάθε επιμέρους χειρωνακτικό καθήκον με τη βοήθεια του cobot.

## 8.2 Συγκριτική Αξιολόγηση της Εκπαίδευσης μέσω ΕΠε και Φυσικού Περιβάλλοντος

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, η εκπαίδευση των ατόμων μέσω ΕΠ φάνηκε να έχει ενθαρρυντικά αποτελέσματα, με τους συμμετέχοντες να βελτιώνουν τη χρονική τους απόδοση σε κάθε επανάληψη. Ωστόσο, όταν κλήθηκαν να ολοκληρώσουν την αξιολόγηση εκτελώντας το ίδιο συνεργατικό σενάριο στο φυσικό κόσμο, έγινε αισθητική η αύξηση του χρόνου διεκπεραίωσης. Τα καθήκοντα που καθυστέρησαν περισσότερο όσους είχαν εκπαιδευτεί μέσω ΕΠ ήταν όσα χρειάζονταν εργαλεία για την ολοκλήρωσή τους (Διάγραμμα 8-3), καθώς δεν είχαν συνηθίσει στη χρήση των φυσικών αντικειμένων και δεν είχαν πείρα του συνδυασμού ταχύτητας και δύναμης που χρειαζόταν για την ολοκλήρωση του καθήκοντος. Ο συνολικός χρόνος για την εκτέλεση όλων των επαναλήψεων κατά την εκπαίδευση με ΕΠ ήταν κατά 2 λεπτά και 42 δευτερόλεπτα μικρότερος (αφαιρούνται τα ενδιάμεσα διαλείμματα για ξεκούραση οφθαλμών λόγω κάσκας και αποσυναρμολόγηση και επανατοποθέτηση εξαρτημάτων στο χώρο εργασίας στο φυσικό περιβάλλον.



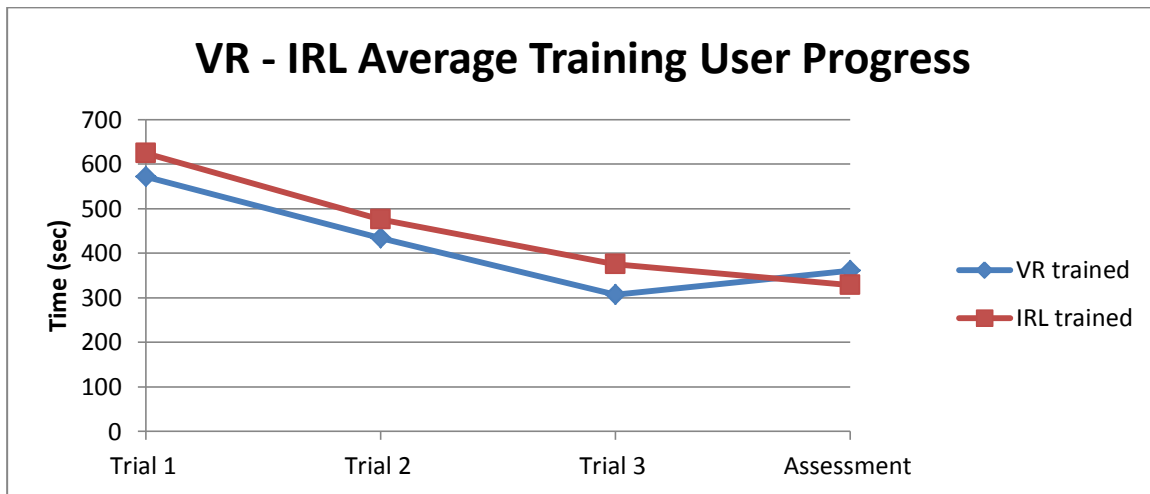
**Διάγραμμα 8-3: Μέσος χρόνος εκτέλεσης της συναρμολόγησης κατά την αξιολόγηση των εκπαιδευόμενων**

Η εκπαίδευση των ατόμων στο φυσικό περιβάλλον του εργαστηρίου έδειξε μία πολύ καλή καμπύλη μάθησης η οποία συνέχιζε να βελτιώνεται χρονικά ακόμα και κατά την αξιολόγηση. Οι συνολικοί χρόνοι στο φυσικό περιβάλλον ήταν εξ αρχής πολύ μεγαλύτεροι από αυτούς της εικονικής πραγματικότητας, χωρίς αυτό να επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της εκπαίδευσης. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο χάσμα φυσικής που υπάρχει μέσω εικονικού και φυσικού κόσμου καθώς όσο καλή και αν είναι η τεχνολογία της προσομοίωσης έχει όρια ως προς τη δυνατότητα αναπαραγωγής επίδρασης τριβών και συναρμογών στο φυσικό κόσμο. Στο Διάγραμμα 8-4 φαίνεται η μέση πρόοδος στα δύο διαφορετικά σενάρια. Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης μειώνεται και η τυπική απόκλιση που παρουσιάζεται και στις δύο ομάδες εκπαιδευόμενων. Η ομάδα της εικονικής εκπαίδευσης παρουσιάζει μικρότερη τυπική απόκλιση συγκριτικά με την άλλη ομάδα σε καθεμία από τις επαναλήψεις. Στην τελική αξιολόγηση, αντίθετα, ενώ η τυπική απόκλιση της πρώτης ομάδας (VR) διπλασιάζεται, της δεύτερης ομάδας παραμένει σταθερή και κατά πολύ μικρότερη.

Μία πολύ ενδιαφέρουσα παρατήρηση κατά την αξιολόγηση των δύο διδακτικών μεθόδων φαίνεται στον Πίνακα 8-1. Σε αυτό τον πίνακα σημειώνεται ο συνολικός αριθμός λαθών από όλους τους συμμετέχοντες που έλαβαν μέρος στην εκπαίδευση και είναι σημαντικό ότι μόλις 1 στους 10 συμμετέχοντες στην διδακτική ΕΠ απάντησε εσφαλμένα σε μία ερώτηση του ερωτηματολογίου ενώ ο αντίστοιχος αριθμός για το φυσικό σενάριο είναι 3. Ακόμη, κατά την αξιολόγηση 1 εκπαιδευόμενος από ΕΠ έκανε λάθος σε τοποθέτηση εξαρτήματος, ενώ 4 εκπαιδευόμενοι του φυσικού προσπέρασαν τα συνεργατικά με το ρομπότ βήματα. Αιτιολογία γι αυτό είναι ίσως το γεγονός ότι στο φυσικό κόσμο ο συμμετέχων αγχώνεται για τη συνεργασία του με το ρομπότ και υποσυνείδητα προσπαθεί να μειώσει την επαφή μαζί του, ενώ στο εικονικό ο συμμετέχων μαθαίνει να συνυπάρχει με το ρομπότ χωρίς άγχος για την ασφάλειά του.

Ακόμη, από την παρατήρηση των απαντήσεων των ερωτηματολογίων προκύπτει η διαφορά αυτοπεποίθησης που έχουν μετά την εκπαίδευση οι δύο ομάδες συμμετεχόντων. Όσοι εκπαιδεύτηκαν μέσω ΕΠ είναι πιο επιφυλακτικοί και αισθάνονται λιγότερο σίγουροι για

την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης στο φυσικό εργασιακό χώρο. Ωστόσο, αποδεικνύεται ότι οι συμμετέχοντες στο φυσικό training είναι πιο επιρρεπείς σε λάθη.



Διάγραμμα 8-4: Μέσος χρόνος προόδου ανά επανάληψη των εκπαιδευόμενων

Error Count Total		
VR	Questionnaire	1
	Assessment	1
IRL	Questionnaire	3
	Assessment	5

Πίνακας 8-1: Συνολικός αριθμός λαθών στην αξιολόγηση της εκπαίδευσης

### 8.3 Προβληματισμοί – Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Από τα ερωτηματολόγια που απαντήθηκαν σε προηγούμενη ενότητα κρίθηκε σκόπιμη η συλλογή υποκειμενικών απόψεων των συμμετεχόντων για μελλοντική βελτίωση της εκπαίδευσης. Σύμφωνα με την πλειοψηφία, η εικονογράφηση στις οδηγίες ήταν το πλέον βοηθητικό κομμάτι των οδηγιών καθώς και η χρωματική ένδειξη των επιμέρους εξαρτημάτων και της βάσης της κεφαλής, τόσο στις οδηγίες όσο και στο συναρμολογούμενο τεμάχιο.

Οι προτάσεις για βελτίωση της εκπαιδευτικής διαδικασίας επικεντρώνονται στο κομμάτι των οδηγιών, όπου θα ήταν επιθυμητή η μεγέθυνση κάποιων τμημάτων που περιλαμβάνουν συναρμολόγηση πολύ μικρών εξαρτημάτων και η επαναδιατύπωση κάποιων συγκεκριμένων βημάτων (αφορά τα βήματα που περιλαμβάνουν τεμάχιο και εργαλείο ώστε να αναφέρεται πρώτα το τεμάχιο προς συναρμολόγηση και ύστερα το χρησιμοποιούμενο εργαλείο). Ακόμη, οι συμμετέχοντες σε ΕΠ επιθυμούσαν την ύπαρξη κάποιου υποκατάστατου του εργαλείου που χρησιμοποιούσαν για να έχουν μία πιο φυσική αίσθηση. Μία ενδιαφέρουσα πρόταση αφορούσε βιντεοσκόπηση της διαδικασίας και προβολή του βίντεο στον εκπαιδευόμενο μετά το τέλος κάθε επανάληψης, ώστε να βλέπει ο ίδιος τα λάθη ως τρίτο πρόσωπο και να διορθώνει τον εαυτό του.



Στα πλαίσια της διεξαγωγής των πειραμάτων σε ΕΠ παρατηρήθηκε ότι η δομή του ΕΠε και της αλληλεπίδρασης του ατόμου με το εικονικό περιβάλλον συνηγορεί σε μείωση της κινητικότητας του ατόμου. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι σε κάθε επιμέρους καθήκον της συναρμολόγησης στο ΕΠε ο συμμετέχων χρησιμοποιούσε ένα χέρι, ενώ στην πραγματικότητα και τα δύο χέρια συμμετέχουν στη διαδικασία, έστω και με ρόλο συγκράτησης. Αυτό ενδεχομένως επιφέρει την είσοδο σφάλματος στα συμπεράσματα που εξήχθησαν για τον εργονομικό σχεδιασμό και προτείνεται να μελετηθεί μελλοντικά με χρήση απτικών αισθητήρων.

Ένας άλλος προβληματισμός, που συνδέεται με τον προηγούμενο, αποτελεί η σειριακή οριοθέτηση των καθηκόντων που επιβάλλει το σενάριο του ΕΠε και η ακούσια προτίμηση της χρήσης ενός χεριού των συμμετεχόντων που μπορεί να επέδρασε σε κάποιο βαθμό στο αποτέλεσμα της εκπαίδευσης. Προτείνεται, συνεπώς, η περαιτέρω μελέτη και ανάπτυξη αυτού του προβληματισμού.

Ακόμη, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, θα ήταν ενδιαφέρον να αξιοποιηθεί η αντικειμενικότητα που μπορεί να προσφέρει ένα εικονικό περιβάλλον στην πλήρη βαθμολόγηση- αξιολόγηση της στάσης, θέσης και κίνησης του σώματος με κατάλληλους αισθητήρες και να συγκριθεί με εμπειρικά δεδομένα και να συγκριθεί η αξιοπιστία κάθε μεθόδου.

Σε προηγούμενη ενότητα αναφέρεται το πλήθος οπτικοακουστικών σημάτων που μπορεί να μεταδώσει η ΕΠ μέσω στερεοσκοπικής κάσκας. Στην παρούσα εργασία μοντελοποιήθηκαν οι συνθήκες στο ΕΠε όπως ακριβώς εμφανίζονται στο φυσικό κόσμο ώστε η μόνη εξαρτημένη μεταβλητή να είναι η φύση του περιβάλλοντος. Σε μελλοντική εργασία θα μπορούσαν να διερευνηθούν και άλλα στοιχεία, όπως ηχητικά μηνύματα και animations, και να διερευνηθεί πώς αυτά βοηθούν στην εκπαίδευση.

Τέλος, όπως φάνηκε και από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση στην αρχή του πρώτου κεφαλαίου, η επαυξημένη πραγματικότητα ήδη ερευνάται σε βιομηχανικές εφαρμογές και σενάρια εκπαίδευσης. Προτείνεται, λοιπόν, ως θέμα μελλοντικής έρευνας η μελέτη και η σύγκριση εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας σε εκπαίδευση για συνεργατικά καθήκοντα συναρμολόγησης.

## Βιβλιογραφία

- Afonso, P., Santana, A., Afonso, P., Zanin, A., & Wernke, R. (2017). *Study of the training needs of industrial companies in the Barcelona Area and proposal of Training Courses and Methodologies to enhance further competitiveness*. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.159>
- Becerra, V. M., Member, S., & Llata, J. R. (2017). Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments. *Digital Object Identifier*, 5.
- Bucci, C., & Á, M. J. R. (2011). *Constraints on Spontaneous Entrainment direction change information for*. 81(May 2014), 1–4. <https://doi.org/10.1051/bioconf/201101000>
- Ding, Z., Hon, K., & Shao, F. (2011). A virtual assembly approach for product assemblability analysis and workplace design. *CIRP Design Conference*, 21, 194–198.
- Dwivedi, P., Cline, D., Joe, C., & Etemadpour, R. (2018). Manual assembly training in virtual environments. *Proceedings - IEEE 18th International Conference on Advanced Learning Technologies, ICALT 2018*, (July), 395–399. <https://doi.org/10.1109/ICALT.2018.00100>
- El Zaatari, S., Marei, M., Li, W., & Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Robotics and Autonomous Systems*, 116(June), 162–180. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.003>
- European Commission. (1999). Evaluation of the 1995 Pilot Data. *European Statistics on Occupational Diseases, Doc.OS/E3/*.
- Goldstone, W. (2009). *Unity Game Development Essentials Build fully functional, professional 3D games with realistic environments, sound, dynamic effects, and more!*
- Gonzalez-Franco, M., Pizarro, R., Cermeron, J., Li, K., Thorn, J., Hutabarat, W., ... Bermell-Garcia, P. (2017). Immersive mixed reality for manufacturing training. *Frontiers Robotics AI*, 4(FEB). <https://doi.org/10.3389/frobt.2017.00003>
- Guna, J., Jakus, G., Pogačnik, M., Tomažič, S., & Sodnik, J. (2014). An analysis of the precision and reliability of the leap motion sensor and its suitability for static and dynamic tracking. *Sensors (Switzerland)*, 14(2), 3702–3720. <https://doi.org/10.3390/s140203702>
- Gutierrez, T., Webel, S., Rodríguez, J., Gavish, N., Seco, T. G., Rodríguez, J., ... Bockholt, U. (2011). *Transfer of Skills Evaluation for Assembly and Maintenance Training*. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20110100028>
- Huang, C. M., Cakmak, M., & Mutlu, B. (2015). Adaptive coordination strategies for human-robot handovers. *Robotics: Science and Systems*, 11. <https://doi.org/10.15607/RSS.2015.XI.031>
- Hutchinson, S., & F. Chaumette. (2006). Visual Servo Control. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 4(1), 82–90.
- International Federation of Robotics, I. (2018). Robots and the Workplace of the Future. *IFR, International Federation of Robotics*, (March), 1–35. Retrieved from [https://ifr.org/downloads/papers/IFR\\_Robots\\_and\\_the\\_Workplace\\_of\\_the\\_Future\\_Positioning\\_Paper.pdf](https://ifr.org/downloads/papers/IFR_Robots_and_the_Workplace_of_the_Future_Positioning_Paper.pdf)

- Isaac, A. (1984). *Asimov's New Guide to Science*. In *Asimov's New Guide to Science* (4th ed.). New York: Basic Books.
- Jayaram, S., Connacher, H. I., & Lyons, K. W. (1997). Virtual assembly using virtual reality techniques. *CAD Computer Aided Design*, 29(8), 575–584. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(96\)00094-2](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(96)00094-2)
- Jayaram, S., Jayaram, U., Kim, Y. J., DeChenne, C., Lyons, K. W., Palmer, C., & Mitsui, T. (2007). Industry case studies in the use of immersive virtual assembly. *Virtual Reality*, 11(4), 217–228. <https://doi.org/10.1007/s10055-007-0070-x>
- Kalawsky, R. S. (1999). VRUSE - A computerised diagnostic tool: For usability evaluation of virtual/synthetic environment systems. *Applied Ergonomics*, 30(1), 11–25. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(98\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(98)00047-7)
- Kumar, S., Kumar, M., & Muralidhar, M. (2015). *Carpal Tunnel Syndrome Symptoms and Associated Risk Factors for Assembly Line Workers Engaged in Shocker Manufacturing Industries: A Study*. 15(3).
- Lueder, R. (1996). *A Proposed RULA for Computer Users Notes : ü + 1 point = Work with raised shoulders*. 24, 91–99.
- Ma, L., Chablat, D., Bennis, F., Hu, B., & Zhang, W. (2010). Integrating digital human modeling into virtual environment for ergonomic oriented design. *ASME 2010 World Conference on Innovative Virtual Reality, WINVR 2010*, 203–210. <https://doi.org/10.1115/winvr2010-3729>
- Makrini, I. El, Merckaert, K., Winter, J. De, Lefeber, D., & Vanderborght, B. (2019). Task allocation for improved ergonomics in Human-Robot Collaborative Assembly. *Interaction Studies Interaction Studies. Social Behaviour and Communication in Biological and Artificial Systems*, 20(1), 102–133. <https://doi.org/10.1075/is.18018.mak>
- Maull, R., Maull, W., & Brewer, S. (2019). *Taking control Robots and risk*. London.
- Morioka, M., & Sakakibara, S. (2010). A new cell production assembly system with human-robot cooperation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.044>
- National Institute of Neurological Disorders and Stroke. (2012). *Carpal Tunnel Syndrome Fact Sheet, (NIH Publication No. 12-4898)*. Retrieved from [http://www.ninds.nih.gov/disorders/carpal\\_tunnel/detail\\_carpal\\_tunnel.htm](http://www.ninds.nih.gov/disorders/carpal_tunnel/detail_carpal_tunnel.htm)
- Pérez-Sabater, C. (2011). Active learning to improve long-term knowledge retention. *Actas Del XII Simposio ...*, (1969), 75–79. Retrieved from [http://www.upv.es/diaal/publicaciones/comunicacion\\_social\\_cuba\\_2011.pdf](http://www.upv.es/diaal/publicaciones/comunicacion_social_cuba_2011.pdf)
- Robert A. Werner, Alfred Franzblau, Nancy M. Gell, Anne G. Hartigan, Marissa Ebersole-Wood, T. J. A. (2005). Incidence of Carpal Tunnel Syndrome Among Automobile Assembly Workers and Assessment of Risk Factors. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 47(10), 1044–1050. <https://doi.org/10.1097/01.jom.0000171065.17288.a0>
- Robotic Industries Association. (n.d.). National Robot Safety Standard.
- Seth, A., Vance, J. M., & Oliver, J. H. (2011). Virtual reality for assembly methods prototyping: A review. *Virtual Reality*, 15(1), 5–20. <https://doi.org/10.1007/s10055-009-0153-y>

- Strabala, K. W., Lee, M. K., Dragan, A. D., Forlizzi, J. L., Srinivasa, S., Cakmak, M., & Micelli, V. (2013). Towards Seamless Human-Robot Handovers. *Journal of Human-Robot Interaction*, 2(1), 112–132. <https://doi.org/10.5898/jhri.2.1.strabala>
- Unhelkar, V. V., & Shah, J. A. (2014). Comparative Performance of Human and Mobile Robotic Assistants in Collaborative Fetch-and-Deliver Tasks. *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, (December). <https://doi.org/10.1145/2559636.2559655>
- Wang, H., Rong, Y., Li, H., & Shaun, P. (2010). Computer aided fixture design: Recent research and trends. *CAD Computer Aided Design*, 42(12), 1085–1094. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.07.003>
- Wang, X., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2016). A comprehensive survey of augmented reality assembly research. *Advances in Manufacturing*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s40436-015-0131-4>
- Werrlich, S., Lorber, C., Nguyen, P. A., Yanez, C. E. F., & Notni, G. (2018). Assembly Training: Comparing the Effects of Head-Mounted Displays and Face-to-Face Training. *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, 1, 3–12. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91581-4>
- Werrlich, S., Nguyen, P. A., & Notni, G. (2018). Evaluating the training transfer of Head-Mounted Display based training for assembly tasks. *ACM International Conference Proceeding Series*, 297–302. <https://doi.org/10.1145/3197768.3201564>
- Wiederhold, B. (2017). Virtual Reality Assisted Anesthesia (VRAA) during Upper Gastrointestinal Endoscopy: Report of 115 Cases— Analysis of Physiological Responses. *Surgical Research Updates*, 5(March). <https://doi.org/10.12970/2311-9888.2017.05.01>
- Xia, P., Lopes, A. M., & Restivo, M. T. (2013). A review of virtual reality and haptics for product assembly (part 1): Rigid parts. *Assembly Automation*, 33(1), 68–77. <https://doi.org/10.1108/01445151311294784>
- Κούστα, Ι. (2016). *Ανάπτυξη Ρομποτικής Κεφαλής Τύλιξης Ινών για Κατασκευή Τεμαχίων από Σύνθετα Υλικά*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μίχας, Σ. (2015). *Προγραμματισμός Τροχιάς και Τηλεπαρακολούθηση Λειτουργίας Ρομποτικού Βραχίονα σε Περιβάλλον Εικονικής Πραγματικότητας με χρήση Αισθητήρων Ηλεκτρονικών Συσκευών Ευρείας Κατανάλωσης*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

# Παράρτημα Α: Κώδικες C#

## Κώδικας κίνησης ρομποτικού βραχίονα

```
using UnityEngine;
using System.Collections;
using System.IO;

public class RobotMover2 : MonoBehaviour
{
    public float rotationSpeed = 1f;

    //instruction board
    public MeshRenderer Board;
    public Material Pos1start;
    public Material Pos1end;
    public Material Pos2end;
    public Material Pos3end;
    public Material Pos4end;
    public Material Pos5end;
    public Material Pos6end;
    public Material Pos7end;

    //timestamp
    private int RobotPosition;

    //parts to be activated next (tag spare)
    public GameObject Main_axle_spare;//after pos1
    public Collider Main_axle_spare_col;
    public GameObject Torque_spring_spare;//after pos2
    public Collider Torque_spring_col;
    public GameObject Top_axle_halfway_spare;//after pos3
    public Collider Top_axle_halfway_spare_col;
    public GameObject M8top_spare; //after pos4
    public Collider M8top_spare_col;
    public GameObject Central_square_spare;//after pos5
    public Collider Central_square_spare_col;
    public GameObject Pulley_black_spare;//after pos6
    public Collider Pulley_black_spare_col;
    public GameObject Black_spring_spare;//after pos7
    public Collider Black_spring_spare_col;

    //bring bearings in correct place
    public GameObject Bearing1;
    public GameObject Bearing2;
    public Renderer part1;
    public Renderer part2;
    public Renderer part3;
    public Renderer part4;
    public Renderer part5;
    public Renderer part6;
    public Renderer part7;
    public Renderer part8;
    public Renderer part9;
    public Renderer part10;

    // robot joint angles irl (change only z axis to represent robot rotation)
    [Range (-160f,160f)] public float rotZ1 = 0;
    [Range (-227.5f,47.5f)] public float rotZ2 = -90;
    [Range (-52.5f,232.5f)] public float rotZ3 = 90;
    [Range (-270f,270f)] public float rotZ4 = 0;
    [Range (-105f,120f)] public float rotZ5 = 0;
    [Range (-270f,270f)] public float rotZ6 = 0;

    // position to calculate robot end effect point irl
    public Vector3 endEffectorLabPosition;
    public Vector3 referenceFrameLabPosition;

    // angles DO READY
```

```

private float rotX1 = -90f;
private float rotX2 = -90f;
private float rotX3 = 0f;
private float rotX4 = 90f;
private float rotX5 = -90f;
private float rotX6 = 90f;
private float rotYAll = 0f;
private float initRotZ1 = 0f;
private float initRotZ2 = -90f;
private float initRotZ3 = 90f;
private float initRotZ4 = 0f;
private float initRotZ5 = 0f;
private float initRotZ6 = 0f;

//angles position1
private float Pos1RotZ1 = 0f;
private float Pos1RotZ2 = -90f;
private float Pos1RotZ3 = 160f;
private float Pos1RotZ4 = 0f;
private float Pos1RotZ5 = 90f;
private float Pos1RotZ6 = -60f;

//angles position2
private float Pos2RotZ1 = 0f;
private float Pos2RotZ2 = -90f;
private float Pos2RotZ3 = 160f;
private float Pos2RotZ4 = 0f;
private float Pos2RotZ5 = 90f;
private float Pos2RotZ6 = -140f;

//angles position3
private float Pos3RotZ1 = 0f;
private float Pos3RotZ2 = -120f;
private float Pos3RotZ3 = 190f;
private float Pos3RotZ4 = 0f;
private float Pos3RotZ5 = 25f;
private float Pos3RotZ6 = -90f;

//angles position4
private float Pos4RotZ1 = 0f;
private float Pos4RotZ2 = -95f;
private float Pos4RotZ3 = 160f;
private float Pos4RotZ4 = 0f;
private float Pos4RotZ5 = 100f;
private float Pos4RotZ6 = -135f;

//angles position5
private float Pos5RotZ1 = 0f;
private float Pos5RotZ2 = -90f;
private float Pos5RotZ3 = 150f;
private float Pos5RotZ4 = 0f;
private float Pos5RotZ5 = 110f;
private float Pos5RotZ6 = -90f;

private Transform joint1;
private Transform joint2;
private Transform joint3;
private Transform joint4;
private Transform joint5;
private Transform joint6;
private Transform endEffectorUnityPosision;
private Transform referenceFrameUnityPosition;

// DO READY Rotations of joints
private Quaternion j1Def;
private Quaternion j2Def;
private Quaternion j3Def;
private Quaternion j4Def;
private Quaternion j5Def;
private Quaternion j6Def;

// Target Rotations of joints
private Quaternion j1Rot;
private Quaternion j2Rot;

```

```

private Quaternion j3Rot;
private Quaternion j4Rot;
private Quaternion j5Rot;
private Quaternion j6Rot;

void Awake ()
{
    joint1 = GameObject.Find ("Joint 1").GetComponent<Transform> ();
    joint2 = GameObject.Find ("Joint 2").GetComponent<Transform> ();
    joint3 = GameObject.Find ("Joint 3").GetComponent<Transform> ();
    joint4 = GameObject.Find ("Joint 4").GetComponent<Transform> ();
    joint5 = GameObject.Find ("Joint 5").GetComponent<Transform> ();
    joint6 = GameObject.Find ("Joint 6").GetComponent<Transform> ();
    endEffectorUnityPosition = GameObject.Find ("(#11508) RX90BL TOOL
FLANGE").GetComponent<Transform> ();
    referenceFrameUnityPosition = GameObject.Find ("Joint 2").GetComponent<Transform> ();

    j1Def = Quaternion.Euler (rotX1, rotYAll, initRotZ1);
    j2Def = Quaternion.Euler (rotX2, rotYAll, initRotZ2);
    j3Def = Quaternion.Euler (rotX3, rotYAll, initRotZ3);
    j4Def = Quaternion.Euler (rotX4, rotYAll, initRotZ4);
    j5Def = Quaternion.Euler (rotX5, rotYAll, initRotZ5);
    j6Def = Quaternion.Euler (rotX6, rotYAll, initRotZ6);
}

// void Start()
// {
//     // Initializes robot to "Do Ready" position
//     joint1.localRotation = j1Def;
//     joint2.localRotation = j2Def;
//     joint3.localRotation = j3Def;
//     joint4.localRotation = j4Def;
//     joint5.localRotation = j5Def;
//     joint6.localRotation = j6Def;
//
//     endEffectorLabPosition = CoordinateSystemChange (endEffectorUnityPosition.position);
//     referenceFrameLabPosition = CoordinateSystemChange (referenceFrameUnityPosition.position);
//
//     endEffectorLabPosition = CoordinateSystemChange (endEffectorUnityPosition.position);
//     referenceFrameLabPosition = CoordinateSystemChange (referenceFrameUnityPosition.position);
//
//     //testing here
//     Vector3 rot = new Vector3 (endEffectorUnityPosition.eulerAngles.x,
endEffectorUnityPosition.eulerAngles.y, endEffectorUnityPosition.eulerAngles.z);
//     Quaternion rotation = Quaternion.Euler (rot.x, rot.y, rot.z);
//     Matrix4x4 test = Matrix4x4.TRS (endEffectorLabPosition-referenceFrameLabPosition,rotation,new
Vector3(1,1,1));
//     Debug.Log (test);
//     //Debug.Log (endEffectorLabPosition.localToWorldMatrix);
// }

void Update()
{
    if (Input.GetKeyUp (KeyCode.Keypad0))
    {
        CalculateStandby ();
        //reveal instructions
        Board.material = Pos1start;
    }

    else if (Input.GetKeyUp (KeyCode.Keypad1))
    {
        CalculatePosition1 ();
        //reveal instructions
        Board.material = Pos1end;

        //activate part for next assembly step
        Main_axle_spare.gameObject.AddComponent<GrabbableObject> ();
        Main_axle_spare.gameObject.AddComponent<Rigidbody> ();
        Main_axle_spare_col.enabled = true;

        //write timestamp in txt
        RobotPosition = 1;
    }
}

```

```

        Writetxtfile ();
    }

else if (Input.GetKeyUp (KeyCode.Keypad2))
{
    CalculatePosition2 ();
    //reveal instructions
    Board.material = Pos2end;

    //activate part for next assembly step
    Torque_spring_spare.gameObject.AddComponent<GrabbableObject>() ;
    Torque_spring_spare.gameObject.AddComponent<Rigidbody> ();
    Torque_spring_col.enabled = true;

    //write timestamp in txt
    RobotPosition = 2;
    Writetxtfile ();
}

else if (Input.GetKeyUp (KeyCode.Keypad3))
{
    CalculatePosition1 ();
    //reveal instructions
    Board.material = Pos3end;

    //activate part for next assembly step
    Top_axle_halfway_spare.gameObject.AddComponent<GrabbableObject>() ;
    Top_axle_halfway_spare_col.enabled = true;
    Top_axle_halfway_spare.gameObject.AddComponent<Rigidbody> ();

    //write timestamp in txt
    RobotPosition = 3;
    Writetxtfile ();
}

else if (Input.GetKeyUp (KeyCode.Keypad4))
{
    CalculatePosition2 ();
    //reveal instructions
    Board.material = Pos4end;

    //activate part for next assembly step
    M8top_spare.gameObject.AddComponent<GrabbableObject>() ;
    M8top_spare_col.enabled = true;
    M8top_spare.gameObject.AddComponent<Rigidbody> ();

    //fix bearings postitions
    Destroy (Bearing1);
    Destroy (Bearing2);
    part1.enabled = true;
    part2.enabled = true;
    part3.enabled = true;
    part4.enabled = true;
    part5.enabled = true;
    part6.enabled = true;
    part7.enabled = true;
    part8.enabled = true;
    part9.enabled = true;
    part10.enabled = true;

    //write timestamp in txt
    RobotPosition = 4;
    Writetxtfile ();
}

else if (Input.GetKeyUp (KeyCode.Keypad5))
{
    CalculatePosition3 ();
    //reveal instructions
    Board.material = Pos5end;

```



```

        //activate part for next assembly step
        Central_square_spare.gameObject.AddComponent<GrabbableObject>();
        Central_square_spare_col.enabled = true;
        Central_square_spare.gameObject.AddComponent<Rigidbody> ();

        //write timestamp in txt
        RobotPosition = 5;
        Writetxtfile ();
    }

    else if (Input.GetKeyUp (KeyCode.Keypad6))
    {
        CalculatePosition4 ();
        //reveal instructions
        Board.material = Pos6end;

        //activate part for next assembly step
        Pulley_black_spare.gameObject.AddComponent<GrabbableObject>();
        Pulley_black_spare_col.enabled = true;
        Pulley_black_spare.gameObject.AddComponent<Rigidbody> ();

        //write timestamp in txt
        RobotPosition = 6;
        Writetxtfile ();
    }

    else if (Input.GetKeyUp (KeyCode.Keypad7))
    {
        CalculatePosition5 ();
        //reveal instructions
        Board.material = Pos7end;

        //activate part for next assembly step
        Black_spring_spare.gameObject.AddComponent<GrabbableObject>();
        Black_spring_spare_col.enabled = true;
        Black_spring_spare.gameObject.AddComponent<Rigidbody> ();

        //write timestamp in txt
        RobotPosition = 7;
        Writetxtfile ();
    }

    else
    {
        CalculateTarget ();
    }

    MoveToTarget ();

    endEffectorLabPosition = CoordinateSystemChange (endEffectorUnityPosition.position);
    referenceFrameLabPosition = CoordinateSystemChange (referenceFrameUnityPosition.position);

    //testing here
    Vector3 rot = new Vector3 (endEffectorUnityPosition.eulerAngles.x,
endEffectorUnityPosition.eulerAngles.y, endEffectorUnityPosition.eulerAngles.z);
    Quaternion rotation = Quaternion.Euler (rot.x, rot.y, rot.z);
    Matrix4x4 test = Matrix4x4.TRS (endEffectorLabPosition-referenceFrameLabPosition,rotation,new
Vector3(1,1,1));
    Debug.Log (test);
    //Debug.Log (endEffectorLabPosition.localToWorldMatrix);
}

// Calculates "Standby" position of the robot
void CalculateStandby()
{
    //mporoun na afairethoun oi epomenes 6 grammes sto telos!!!
    rotZ1 = initRotZ1;
    rotZ2 = initRotZ2;
    rotZ3 = initRotZ3;
    rotZ4 = initRotZ4;
    rotZ5 = initRotZ5;
    rotZ6 = initRotZ6;
}

```

```

//          j1Rot = j1Def;
//          j2Rot = j2Def;
//          j3Rot = j3Def;
//          j4Rot = j4Def;
//          j5Rot = j5Def;
//          j6Rot = j6Def;
}

void CalculatePosition1 ()
{
    rotZ1 = Pos1RotZ1;
    rotZ2 = Pos1RotZ2;
    rotZ3 = Pos1RotZ3;
    rotZ4 = Pos1RotZ4;
    rotZ5 = Pos1RotZ5;
    rotZ6 = Pos1RotZ6;
}

void CalculatePosition2 ()
{
    rotZ1 = Pos2RotZ1;
    rotZ2 = Pos2RotZ2;
    rotZ3 = Pos2RotZ3;
    rotZ4 = Pos2RotZ4;
    rotZ5 = Pos2RotZ5;
    rotZ6 = Pos2RotZ6;
}

void CalculatePosition3 ()
{
    rotZ1 = Pos3RotZ1;
    rotZ2 = Pos3RotZ2;
    rotZ3 = Pos3RotZ3;
    rotZ4 = Pos3RotZ4;
    rotZ5 = Pos3RotZ5;
    rotZ6 = Pos3RotZ6;
}

void CalculatePosition4 ()
{
    rotZ1 = Pos4RotZ1;
    rotZ2 = Pos4RotZ2;
    rotZ3 = Pos4RotZ3;
    rotZ4 = Pos4RotZ4;
    rotZ5 = Pos4RotZ5;
    rotZ6 = Pos4RotZ6;
}

void CalculatePosition5 ()
{
    rotZ1 = Pos5RotZ1;
    rotZ2 = Pos5RotZ2;
    rotZ3 = Pos5RotZ3;
    rotZ4 = Pos5RotZ4;
    rotZ5 = Pos5RotZ5;
    rotZ6 = Pos5RotZ6;
}

// Calculates target position of the robot
void CalculateTarget()
{
    //Η νέα γωνία προκύπτει από την παλιά + την διαφορά της καινούριας από την αρχική με αντίθετο πρόσημο
    //ώστε να ταιριάζει στο σύστημα του unity.
    j1Rot = Quaternion.Euler (rotX1, rotYAll, initRotZ1 -(rotZ1-initRotZ1));
    j2Rot = Quaternion.Euler (rotX2, rotYAll, initRotZ2 -(rotZ2-initRotZ2));
    j3Rot = Quaternion.Euler (rotX3, rotYAll, initRotZ3 -(rotZ3-initRotZ3));
    j4Rot = Quaternion.Euler (rotX4, rotYAll, initRotZ4 -(rotZ4-initRotZ4));
    j5Rot = Quaternion.Euler (rotX5, rotYAll, initRotZ5 -(rotZ5-initRotZ5));
    j6Rot = Quaternion.Euler (rotX6, rotYAll, initRotZ6 -(rotZ6-initRotZ6));
}

```

```

// Moves robot to next position from the previous position
void MoveToTarget()
{
    joint1.localRotation = Quaternion.Lerp (Quaternion.Euler (joint1.localEulerAngles), j1Rot,
rotationSpeed/10*Time.deltaTime);
    joint2.localRotation = Quaternion.Lerp (Quaternion.Euler (joint2.localEulerAngles), j2Rot,
rotationSpeed/10*Time.deltaTime);
    joint3.localRotation = Quaternion.Lerp (Quaternion.Euler (joint3.localEulerAngles), j3Rot,
rotationSpeed/10*Time.deltaTime);
    joint4.localRotation = Quaternion.Lerp (Quaternion.Euler (joint4.localEulerAngles), j4Rot,
rotationSpeed/10*Time.deltaTime);
    joint5.localRotation = Quaternion.Lerp (Quaternion.Euler (joint5.localEulerAngles), j5Rot,
rotationSpeed/10*Time.deltaTime);
    joint6.localRotation = Quaternion.Lerp (Quaternion.Euler (joint6.localEulerAngles), j6Rot,
rotationSpeed/10*Time.deltaTime);
}

// Calculates the lab Tool Coordinates given the Unity coordinates
public Vector3 CoordinateSystemChange(Vector3 frame)
{
    Vector3 unityFrame = frame;
    Vector3 labFrame = new Vector3 (-unityFrame.x, -unityFrame.z, unityFrame.y);
    return labFrame;
}

//log
void Writetxtfile() {

    //path file
    string path = Application.dataPath + "/Log.txt";
    //create file
    if (!File.Exists (path)) {
        File.WriteAllText (path, "Assembly timestamps and ergonomics \n\n");
        //content of file
        string content = "Robot move to position" + RobotPosition + "at: " + System.DateTime.Now +
"\n";
}
}

```

### Κώδικας συναρμολόγησης:

```

using UnityEngine;
using System.Collections;
using System.IO;

public class AssemblyStep2 : MonoBehaviour {

    //state all renderers of parts invisible to be assembled
    public Renderer Axle_main_halfway;
    public Renderer Eclip_halfway;

    //animated move speed
    private float movespeed = 3f;
    private Vector3 startpos;
    private Vector3 finalpos;
    private bool isMove;

    //part to move
    public GameObject Main_axle;
    public GameObject Main_axle_finalpos;

    //state hand parts to track
    public Transform arm;
    public Transform palm;
    public Transform wrist;
    public Transform X1;
    public Transform Y1;
    public Transform Z1;

    // private Vector3 armposvec; //local
    // private Vector3 palmposvec;
    // private Vector3 wristposvec;

    private Vector3 a;
    private Vector3 p;
    private Vector3 w;
}

```

```

private Vector3 x;
private Vector3 y;
private Vector3 wavec;
private Vector3 pwvec;
private Vector3 xavec;
private Vector3 yavec;
private Vector3 projxpwvec;
private Vector3 projypwvec;

private static float occ1angle;
private static float pitchcor;

private string armpos;
private string palmpos;
private string wristpos;
private string pitchangle;
private string pitchcorrected;

//state object for collision trigger (tag spare)
public GameObject Axle_main_spare;
//state part to be assembled next (tag spare)
public GameObject Reel_subassembly_spare;
public Collider Reel_subassembly_spare_col;

//instruction board
public MeshRenderer Board;
public Material NextStep;

void Start(){

    isMove = false;
}

//state what happens when the collision is detected
void OnTriggerEnter (Collider other) {

    if (other.tag == "spare_main_axle")
    {
        //make assembly on robot
        Axle_main_halfway.enabled=true;
        Eclip_halfway.enabled=true;

        // destroy the spare
        Destroy (Axle_main_spare);

        //move to designated position;
        isMove=true;

        //enable grabbing to next spare
        Reel_subassembly_spare.gameObject.AddComponent<GrabbableObject> ();
        Reel_subassembly_spare_col.enabled = true;
        Reel_subassembly_spare.gameObject.AddComponent<Rigidbody> ();

        //log hand data in file
        Writetxtfile ();

        //reveal instructions for next step
        Board.material = NextStep;
    }
}

void Update(){
    if (isMove == true) {
        startpos = Main_axle.transform.position;
        finalpos = Main_axle_finalpos.transform.position;
        Main_axle.transform.position = Vector3.Lerp (Main_axle.transform.position, finalpos,
movespeed/2 * Time.deltaTime);
    }
}

```

```

    }
}
void Writetxtfile() {
    //Calculate wrist ergonomics
    //get position and direction of hand movement

    a = arm.localPosition;
    p = palm.localPosition;
    w = arm.localPosition + Vector3.Scale(wrist.localPosition, arm.localScale);
    x= arm.localPosition - Vector3.Scale(X1.localPosition, arm.localScale);
    y= arm.localPosition - Vector3.Scale(Y1.localPosition, arm.localScale);
    pwvec = p - w; //vector from p to w
    wavec = w - a;

    //occ1 pitch angles
    xavec = x-a;
    projpwvec= Vector3.ProjectOnPlane(pwvec,xavec); //project pwvec on (local) plane x
    occ1angle = Vector3.Angle(wavec, projpwvec); //calculate angle between vectors on (local) plane x

    //occ2 yaw angles
    yavec = y-a;
    projpwvec= Vector3.ProjectOnPlane(pwvec,yavec); //project pwvec on (local) plane y
    occ 2angle = Vector3.Angle(wavec, projpwvec); //calculate angle between vectors on (local) plane y

    //occ3 roll
    palmposvec=palm.localRotation.z;
    occ3angle=plamosvec;
    occ3range= Vector3.Scale(wrist.localPosition, arm.localScale);

    pitchcor = occ1angle - 15;
    pitchcorrected = pitchcor.ToString ("G4");
    pitchangle = occ1angle.ToString ("G4");
    yawangle = occ2angle.ToString ("G4");
    rollangle = occ3angle.ToString ("G4");
    armpos= a.ToString("G5");
    palmpos= p.ToString("G5");
    wristpos= w.ToString ("G5");

    //path file
    string path = Application.dataPath + "/Log.txt";
    //create file
    if (!File.Exists (path)) {
        File.WriteAllText (path, "Assembly timestamps and ergonomics \n\n");
        //content of file
        string content = "Step 2 complete:" + System.DateTime.Now + "\n" ;
        //add text
        File.AppendAllText (path, content);}
    else {
        string content = "Step 2 complete:" + System.DateTime.Now + " pitchangle " + pitchangle +
        "yawangle " + yawangle+ " rollangle " + rollangle + "occ3range" + occ3range + "\n" ;

    }
}
}

```

## Παράρτημα Β: Κώδικας V+

### Κώδικας για την κίνηση του φυσικού ρομπωτικού βραχίονα

```
SET #loc0 = #PPOINT(0,-90,90,0,0,0)
SET #loc1 = #PPOINT(0,-90,160,0,90,-150)
SET #loc2 = #PPOINT(0,-90,160,0,90,-210)
SET #loc3 = #PPOINT(0,-90,160,0,90,-150)
SET #loc4 = #PPOINT(0,-90,160,0,90,-210)
SET #loc5 = #PPOINT(0,-120,190,0,25,-170)
SET #loc6 = #PPOINT(0,-75,140,0,90,-190)
SET #loc7 = #PPOINT(0,-90,150,0,110,-175)

SPEED 20 ALWAYS

PROMPT "Move to standby position? for yes press 0", ans
IF ans == 0 THEN
  MOVE #loc0
END
BREAK

PROMPT "Move to position1? for yes press 1", ans
IF ans == 1 THEN
  MOVE #loc1
END
BREAK

PROMPT "Move to position 2? for yes press 2", ans
IF ans == 2 THEN
  MOVE #loc2
END
BREAK










PROMPT "Move to position 3? for yes press 3", ans
IF ans == 3 THEN
  MOVE #loc3
END
BREAK


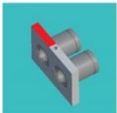




















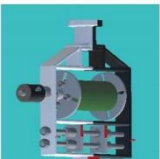

PROMPT "Move to position 4? for yes press 4", ans
IF ans == 4 THEN
  MOVE #loc4
END
BREAK

PROMPT "Move to position 5? for yes press 5", ans
IF ans == 5 THEN
  MOVE #loc5
END
BREAK

PROMPT "Move to position 6? for yes press 6", ans
IF ans == 6 THEN
  MOVE #loc6
END
END
```

# Παράρτημα Γ: Εικονογραφημένες Οδηγίες Συναρμολόγησης

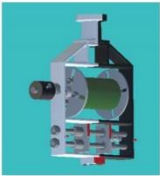
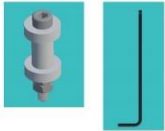
<p><b>Assembly Instructions</b></p> <p>Here will appear a step-by-step guide that will guide you through the assembly process in the following format:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <p>Assembly Instructions Step x of 29</p> <p><b>ACTION</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="background-color: #00a0c0; color: white; padding: 5px; width: 40%;">             Visual representation of action requirement         </div> <div style="background-color: #00a0c0; color: white; padding: 5px; width: 40%;">             •Part (and tool where applicable),              •Button, or              •Subassembly stage         </div> </div> </div>	<p><b>Assembly Instructions</b> <span style="float: right;">Step 1 of 29</span></p> <p>Press button to bring robot to position 1</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>	<p><b>Assembly Instructions</b> <span style="float: right;">Step 2 of 29</span></p> <p>Push main axle in frame midway through</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>
<p><b>Assembly Instructions</b> <span style="float: right;">Step 3 of 29</span></p> <p>Position reel sub-assembly on the main axle</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>	<p><b>Assembly Instructions</b> <span style="float: right;">Step 4 of 29</span></p> <p>Push main axle in frame through</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>	<p><b>Assembly Instructions</b> <span style="float: right;">Step 5 of 29</span></p> <p>Press button to bring robot to position 2</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>
<p><b>Assembly Instructions</b> <span style="float: right;">Step 6 of 29</span></p> <p>Position torque spring on main axle outside the frame</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>	<p><b>Assembly Instructions</b> <span style="float: right;">Step 7 of 29</span></p> <p>Position torque washer on main axle outside the frame</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>	<p><b>Assembly Instructions</b> <span style="float: right;">Step 8 of 29</span></p> <p>Position black torque cylinder on main axle outside the frame</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>
<p><b>Assembly Instructions</b> <span style="float: right;">Step 9 of 29</span></p> <p>Use screwdriver to secure cylinder on main axle with screw</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">  <div style="display: flex; gap: 10px;">   </div> </div>	<p><b>Assembly Instructions</b> <span style="float: right;">Step 10 of 29</span></p> <p>Press button to bring robot to position 3</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>	<p><b>Assembly Instructions</b> <span style="float: right;">Step 11 of 29</span></p> <p>Push first axle in frame midway through</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>

<p><b>Assembly Instructions</b>      <b>Step 12 of 29</b></p> <p>Position first ball bearing case on first axle</p>  	<p><b>Assembly Instructions</b>      <b>Step 13 of 29</b></p> <p>Position second ball bearing case on first axle</p>  	<p><b>Assembly Instructions</b>      <b>Step 14 of 29</b></p> <p>Position second ball bearing case on first axle</p>  
<p><b>Assembly Instructions</b>      <b>Step 15 of 29</b></p> <p>Push second axle through the frame and both bearing cases</p>  	<p><b>Assembly Instructions</b>      <b>Step 16 of 29</b></p> <p>Press button to bring robot to position 4</p>  	<p><b>Assembly Instructions</b>      <b>Step 17 of 29</b></p> <p>Use 13mm spanner to secure first axle with M8 nut</p>  
<p><b>Assembly Instructions</b>      <b>Step 18 of 29</b></p> <p>Use 13mm spanner to secure second axle with M8 nut</p>  	<p><b>Assembly Instructions</b>      <b>Step 19 of 29</b></p> <p>Press button to bring robot to position 5</p>  	<p><b>Assembly Instructions</b>      <b>Step 20 of 29</b></p> <p>Position square base on frame bottom</p>  
<p><b>Assembly Instructions</b>      <b>Step 21 of 29</b></p> <p>Use 6mm socket wrench to secure square base with first M3 nut</p>  	<p><b>Assembly Instructions</b>      <b>Step 22 of 29</b></p> <p>Use 6mm socket wrench to secure square base with second M3 nut</p>  	<p><b>Assembly Instructions</b>      <b>Step 23 of 29</b></p> <p>Press button to bring robot to position 6</p>  




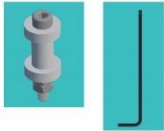
**Assembly Instructions** Step 24 of 29

Use M3 Allen key to position pulley on first bearing case

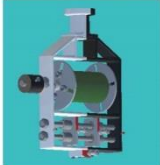
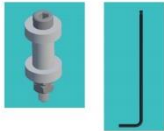
**Assembly Instructions** Step 25 of 29

Use M3 Allen key to position pulley on second bearing case

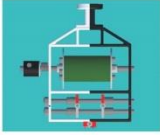

**Assembly Instructions** Step 26 of 29

Use M3 Allen key to position pulley on square base

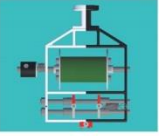

**Assembly Instructions** Step 27 of 29

Press button to bring robot to position 7

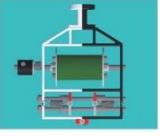

**Assembly Instructions** Step 28 of 29

Position first traction spring between frame and first bearing case

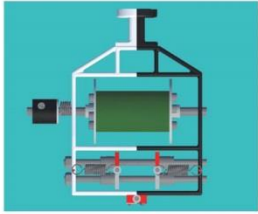



**Assembly Instructions** Step 29 of 29

Position second traction spring between frame and second bearing case

**Congratulations the assembly process has been completed!**



# Παράρτημα Δ: Test Procedure

Μέσω της χρήσης της Test Procedure διασφαλίζεται η επαναληψιμότητα και αξιοπιστία των πειραμάτων

---

## Collaborative\_Assembly\_Training

Assembly training of robotic fiber wrapping head using the robot Stäubli RX90 in the Laboratory of manufacturing Technology of NTUA (both physical and in VR)

---

Written by:

Angeliki Dimitrokalli

**Mechanical Engineer**

Approved by:

		Approval Date
Dr. Vosniakos G.-C.	Professor at NTUA	27/09/2019

BACKGROUND	2
RISK ASSESSMENT	3
OVERVIEW	3
REQUIREMENTS	3
PROCEDURE	4
VR TRAINING	4
PHYSICAL TRAINING	5

### Background

In order to assess the impact of VR in a training process it is required to test both VR and physical training on a specific assembly process. The assembly chosen for this process is a prototype of a robotic fiber wrapping head that has been designed and constructed in lab Ξ of NTUA. This assembly consists of several small parts and requires different tools to be assembled. Lastly, the prototype is assembled with the collaboration of the robotic arm Stäubli RX90.

### Risk assessment

Any competent technician trained for the assembly must have read and understood the training Risk Assessment.

<b>Risk</b>	<b>Measure Taken</b>
<b>VR overexertion of eyes VR dizziness and nausea</b>	Small duration of tests Breaks between training repeats
<b>Robot malfunction Robot collision with human</b>	Supervisor to press emergency button Participants stay behind indicative line
<b>Trips and slips near robot</b>	Secure equipment No one passes through the cable area
<b>Passersby getting injured by moving robot</b>	Testing space cut off from third parties

## Overview

The primary purpose of this document is to inform engineers and technicians about the specific test procedure when conducting the assembly training. The procedure has been written in a series of steps to be followed sequentially. This will help to ensure safe operation and consistent and reliable results.

## Requirements

A technician will require the following tools and equipment when conducting the collaborative assembly training:

- 3 mm hex bit (allen key)
- 13 mm spanner
- 6 mm socket wrench (ratchet)
- Screwdriver
- Stäubli RX90
- Robotic fiber wrapping head prototype
- PC with Tera Term Pro installed

In addition, all who take part in the VR training require:

- PC with the following programs installed
  - Unity 5.3
  - Oculus runtime 0.8
  - Leap 3.1.3
  - OBS Studio
- Oculus Development Kit 2 (plugged in PC)
- Leap motion sensor (plugged in PC)

## Procedure

### VR training

The following procedure has been split down into steps to allow easy following of all stages required to complete the training assessment.

- 1.1 Check the Risk Assessment.

- 1.2 Connect Oculus and Leap to PC.
- 1.3 Position Oculus receptor correctly.
- 1.4 Open project file in Unity 5.3.
- 1.5 Start OBS Studio and place in correct display.
- 1.6 Open Google Form for completion.
- 1.7 Explain purpose and process to participant.
  - Variables checked are time and errors.
  - The training has step by step instructions they have to follow.
  - Complete the training 3 times with breaks in between.
  - Participants have to fill 11 questions in Google Forms at the end of the training.
  - After the training they will have to complete the assembly in physical without instructions.
  - In the end, they fill another 3 questions in Google Forms.
- 1.8 Start Recording in OBS Studio.
- 1.9 Press play in Unity.
- 1.10 Participant has to wear Oculus and adjust to comfort level.
- 1.11 Give time to participant to adjust in VR, check hands movement and reach etc.
- 1.12 Start with spacebar.
- 1.13 Press 1-7 when prompted.
- 1.14 Stop program in Unity.
- 1.15 Remove Oculus – break for 2 mins (beverages and food allowed).
- 1.16 Stop recording.
- 1.17 Repeat steps 6.8 through 6.16 two times.
- 1.18 Participant has to complete Google Form part 1, 2 and 3.
- 1.19 Prepare robot in standby and necessary equipment
- 1.20 Execute file in robot PC.
- 1.21 Show to the participant the different parts and correct position in space.
- 1.22 Start camera.
- 1.23 Start assembly.
- 1.24 Press 1-7 when prompted.

- 1.25 Count mistakes (part, step, position) and times asking questions.
- 1.26 Stop camera and close.
- 1.27 Participant has to complete Google Form part 4.
- 1.28 Disassemble and put robot in standby.
- 1.29 Turn off robot and robot PC.
- 1.30 Check data from OBS and camera and move all to the appropriate folder in AY Videos from training in D disk.

## **Physical training**

The following procedure has been split down into steps to allow easy following of all stages required to complete the training assessment.

- 2.1 Check the Risk Assessment.
- 2.2 Open Google Form for completion.
- 2.3 Explain purpose and process to participant.
  - Variables checked are time and errors.
  - The training has step by step instructions they have to follow.
  - Complete the training 3 times with breaks in between.
  - Participants have to fill 6 questions in Google Forms at the end of the training.
  - After the training they will have to complete the assembly in physical without instructions.
  - In the end, they fill another 3 questions in Google Forms.
- 2.4 Prepare robot in standby and necessary equipment
- 2.5 Execute file in robot PC.
- 2.6 Show to the participant the different parts, instructions and correct position in space.
- 2.7 Start camera.
- 2.8 Start assembly.
- 2.9 Press 1-7 when prompted.
- 2.10 Stop camera and close.
- 2.11 Disassemble and put parts and tools back in correct positions.
- 2.12 Repeat steps 6.4 through 6.11 two times.

- 2.13 Participant has to complete Google Form part 1 and 2.
- 2.14 Prepare robot in standby and necessary equipment.
- 2.15 Execute file in robot PC.
- 2.16 Start camera.
- 2.17 Start assembly.
- 2.18 Count mistakes (part, step, position) and times asking questions.
- 2.19 Press 1-7 when prompted.
- 2.20 Stop camera and close.
- 2.21 Participant has to complete Google Form part 4.
- 2.22 Disassemble and put robot in standby.
- 2.23 Turn off robot and robot PC.
- 2.24 Check data from camera and move all to the appropriate folder in AY Videos from training in D disk.