



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Σχεδιασμός, Προσομοίωση και Μελέτη Ρομποτικής
Κυψέλης για Αυτοματοποιημένη Παλετοποίηση
Συσκευασμένων Βιομηχανικών Προϊόντων**

Χριστόπουλος Θεοφύλακτος

ΑΜ: 2019010177

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Δοϊτσίδης Ελευθέριος (Αναπληρωτής Καθηγητής)

ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ:

Ιψάκης Δημήτριος (Επίκουρος Καθηγητής)

Πιπερίδης Σάββας (ΕΔΙΠ)

Χανιά, Ιούνιος 2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού ABB Robotstudio. Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την εταιρία ABB για την δωρεάν παραχώρηση του λογισμικού. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Δοϊτσίδα Ελευθέριο για την καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου προσέφερε του καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και φυσικά τους γονείς μου οι οποίοι με στήριξαν απεριόριστα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την προσομοίωση και μελέτη ενός ρομποτικού κελιού εργασίας, σε μια εικονική βιομηχανική μονάδα. Δίνεται έμφαση στη διαδικασία παλετοποίησης προϊόντων με σταθερές διαστάσεις και βάρος. Η προσομοίωση υλοποιείται με χρήση του λογισμικού τρισδιάστατης προσομοίωσης ρομποτικών συστημάτων ABB RobotStudio.

Αρχικά μελετήθηκαν οι ισχύουσες διατάξεις και τα σχετικά πρότυπα που αφορούν την σχεδίαση ρομποτικών κελιών εργασίας στη βιομηχανία και στη συνέχεια θα σχεδιαστεί το εικονικό ρομποτικό κελί. Προκειμένου να μελετηθούν διαφορετικά σενάρια λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά τους, σχεδιάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια λειτουργίας και μελετήθηκε η επίδραση της χρήσης διαφορετικών ρομποτικών βραχιόνων.

Η μελέτη περιλαμβάνει τη χρήση τριών διαφορετικών ρομποτικών βραχιόνων, οι οποίοι διαφοροποιούνται ως προς τα βασικά τεχνικά τους χαρακτηριστικά, καθώς και δύο διαφορετικών άκρων εργασίας με λειτουργία εργαλείων αναρρόφησης αέρα (vacuum grippers). Ο σχεδιασμός της ρομποτικής κυψέλης πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τα απαραίτητα πρότυπα ασφαλείας.

Κατά τη ανάλυση των σεναρίων μελετήθηκαν: (i) οι κινήσεις του κάθε ρομποτικού βραχίονα, (ii) ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των συστημάτων, (iii) ποιοι παράμετροι έχουν τη μεγαλύτερη βαρύτητα για μία διεργασία παλετοποίησης και (iv) ποιοι παράγοντες επηρεάζουν τη συχνότητα της συντήρησης για κάθε σενάριο.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, θα εξαχθούν συμπεράσματα ως προς τη βέλτιστη ρύθμιση του ρομποτικού κελιού. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των σεναρίων με στόχο την ανάδειξη του καταλληλότερου, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως το συνολικό κόστος εγκατάστασης, το λειτουργικό κόστος και την καταπόνηση του ρομπότ, ενώ εξαχθηκαν και γενικά συμπεράσματα που αφορούν την ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με τα σενάρια που διαμορφώθηκαν.

.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
Κεφάλαιο 2	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΡΟΜΠΟΤ	9
2.1 Ρομποτικοί Βραχίονες	10
2.1.1 Μηχανική Δομή	10
2.1.2 Σύστημα Χειρισμού	10
2.1.3 Αισθητήρες	11
2.1.4 Ελεγκτής (Controller)	11
2.2 Ταξινόμηση Βιομηχανικών Ρομπότ	12
2.3 Πλεονεκτήματα	18
2.4 Εργαλεία αρπάγης (Grippers)	18
2.5 4^η Βιομηχανική επανάσταση (Industry 4.0)	19
2.5.1 Βασικοί πυλώνες	20
2.5.1 Τεχνητή Νοημοσύνη	22
2.5.2 Προσαρμογή των Βιομηχανικών Ρομπότ	23
Κεφάλαιο 3	25
ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ	25
3.1 Πρότυπο τύπου A	25
3.2 Πρότυπο τύπου B1	26
3.2.1 EN ISO 13855	26
3.2.2 EN ISO 13857	27
3.3 Πρότυπο τύπου B2	29
3.3.1 EN ISO 14120	29
3.4 Πρότυπο τύπου C	30
3.4.1 EN ISO 10218-1	30
3.4.2 EN ISO 10218-2	31
Κεφάλαιο 4	32
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΡΟΜΠΟΤ	32
4.1 Κριτήρια επιλογής βιομηχανικού ρομπότ	32
4.3 Ενεργειακή κατανάλωση κατά τη φάση λειτουργίας	33
4.3.1 Ενεργειακή κατανάλωση των κινητήρων	35

4.3.2 Μέθοδοι βελτιστοποίησης	36
4.4 Συντήρηση Βιομηχανικού ρομπότ	38
4.4.1 Λειτουργίες και είδη συντήρησης.....	39
4.4.2 Επιρροή χρονικού κύκλου και βάρος φορτίου	39
Κεφάλαιο 5.....	42
Εργαλεία	42
5.1 ABB RobotStudio	42
5.1.1 Εισαγωγή στο ABB RobotStudio	43
5.1.2 Palletizing PowerPac	45
5.2 Ρομποτικοί Βραχίονες	45
5.2.1 Ρομποτικός βραχίονας IRB 460.....	45
5.2.2 Ρομποτικός βραχίονας IRB 660.....	46
5.2.3 Ρομποτικός βραχίονας IRB 760.....	47
5.3 Ρομποτική αρπάγη “FlexGripper-Vacuum”	48
Κεφάλαιο 6.....	49
Προσομοίωση μοντέλου βιομηχανικής διεργασίας με τη βοήθεια ρομποτικών βραχιόνων και εργαλείων αρπάγης για παλετοποίηση βιομηχανικών προϊόντων.	49
6.1 Περιγραφή σεναρίου	49
6.2 Δομικά στοιχεία	50
6.3 Περιγραφή λειτουργίας της διεργασίας	55
6.4 Εγκατάσταση προστατευτικών φραγμάτων.....	61
6.4.1 Απόσταση προστατευτικών φραγμάτων από το τόξο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα.....	61
6.4.2 Απόσταση προστατευτικών φραγμάτων από το τόξο που δεν εργάζεται ο ρομποτικός βραχίονας.....	62
Κεφάλαιο 7.....	64
Λειτουργία σεναρίων και μετρήσεις.....	64
7.1 Πρώτο σενάριο λειτουργίας.....	64
7.1.1 Πρώτο μοντέλο	65
7.1.2 Δεύτερο μοντέλο.....	68
7.2 Δεύτερο σενάριο λειτουργίας.....	72
7.2.1 Τρίτο μοντέλο	72
7.2.2 Τέταρτο μοντέλο	73
7.3 Τρίτο σενάριο λειτουργίας	74

7.3.1 Πέμπτο μοντέλο	75
7.3.2 Έκτο μοντέλο	76
7.4 Παρατηρήσεις	78
Κεφάλαιο 8.....	83
<i>Αποτελέσματα, Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις</i>	<i>83</i>
Βιβλιογραφία	85

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρομποτική αποτελεί κλάδο που συνεχώς εξελίσσεται και προοδεύει με ταχύτατους ρυθμούς, στοχεύοντας στη δημιουργία έξυπνων συστημάτων που αναπαράγουν ή αντικαθιστούν τον ανθρώπινο παράγοντα σε διάφορους τομείς. Η είσοδος της 4^{ης} βιομηχανικής επανάστασης, προσθέτει νέες τεχνικές και δυνατότητες στη παραγωγή δημιουργώντας ευέλικτα και έξυπνα συστήματα τα οποία μπορούν να βελτιώσουν τη παραγωγικότητα τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, μειώνοντας παράλληλα το κόστος παραγωγής στο μέγιστο δυνατό. Μέσα από αυτή, τα ρομποτικά συστήματα βελτιώνουν την απόδοση τους μετατρέποντας τον άνθρωπο σε παρατηρητή και ελεγκτή της παραγωγικής διαδικασίας.

Η μετάβαση στα λεγόμενα “έξυπνα εργοστάσια” έχει βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των ρομποτικών βραχιόνων στις γραμμές παραγωγής, δημιουργώντας ένα νέο εξελιγμένο περιβάλλον όπου η τεχνητή νοημοσύνη και άλλες νέες τεχνολογίες έχουν ενταχθεί στα ρομποτικά συστήματα προσφέροντας επιπλέον ακρίβεια, ευελιξία και αποτελεσματικότητα. Για αυτό το λόγο η εγκατάσταση των ρομποτικών βραχιόνων τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει ραγδαία αύξηση. Πλέον, η αποτελεσματικότητα μίας βιομηχανίας εξαρτάται από το πόσο ικανή είναι να προσαρμόζεται στα νέα δεδομένα.

Η παραγωγική διαδικασία της παλετοποίησης συνήθως συναντάται στους τελευταίους σταθμούς μίας γραμμής παραγωγής, όπου γίνεται αυτόματα η στοίβαξη των προϊόντων σε παλέτες με την βοήθεια ρομποτικών βραχιόνων. Μέσω ταινιοδρόμων, αντικείμενα μεταφέρονται και στη συνέχεια διαλέγονται με εργαλεία αρπάγης που είναι προσαρτημένα στο άκρο των ρομποτικών βραχιόνων και τοποθετούνται στις προβλεπόμενες θέσεις με ακρίβεια και ταχύτητα. Οι ρομποτικοί βραχίονες εργάζονται αδιάκοπα και αποτελεσματικά, διασφαλίζοντας παράλληλα την ασφάλεια των εργαζομένων καθόλη τη διάρκεια της εργασίας. Με τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, γίνονται ικανοί να βελτιώνουν την απόδοση τους διαγράφοντας βελτιωμένες πορείες εξοικονομώντας τόσο χρόνο όσο και ενέργεια.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, δημιουργήθηκε και προσομοιώθηκε μία ρομποτική κυψέλη η οποία εξειδικεύεται σε μία εργασία παλετοποίησης με τη χρήση ρομποτικών βραχιόνων την εταιρίας ABB και εργαλείων αρπάγης αναρρόφησης αέρος διατηρώντας χωροταξικά την ίδια μορφή. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια, χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικούς ρομποτικούς βραχίονες οι οποίοι διαφέρουν ως προς τα βασικά χαρακτηριστικά τους και δύο εργαλεία αρπάγης. Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη σε επίπεδα που αφορά την απόδοση του κάθε συστήματος, την ενεργειακή κατανάλωση και τους παράγοντες που την επηρεάζουν, τα κινησεολογικά χαρακτηριστικά του κάθε ρομποτικού βραχίονα και τη δημιουργία μίας περίφραξης που διασφαλίζει την ασφάλεια της ρομποτικής κυψέλης.

Για την επίτευξη του στόχου της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ABB RobotStudio το οποίο αποτελεί λογισμικό προγραμματισμού εκτός σύνδεση (offline programming) που αναπτύχθηκε από την ίδια την εταιρία της ABB μέσω του οποίου μπορούν να προσομοιωθούν τα ρομπότ της εταιρίας σε διάφορες εφαρμογές. Μέσα από αυτό, εξήχθησαν συμπεράσματα που σχετίζονται με την ενεργειακή κατανάλωση του κάθε συστήματος, τον αριθμό των παλετών και των διαχωριστικών φύλλων που απαιτεί το κάθε σενάριο για κάθε ώρα λειτουργίας του, αλλά και τη ταχύτητα του κάθε συστήματος κατά τη διάρκεια της εργασίας του.

Η εργασία διακρίνεται συνολικά από 8 κεφάλαια. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο μέσα από μία βιβλιογραφική επισκόπηση στο οποίο είναι βασισμένη η παρούσα διπλωματική εργασία. Αρχικά, γίνεται μία αναφορά στους ρομποτικούς βραχίονες, σε κάποια υποσυστήματα τους, πως ταξινομούνται και ποια τα πλεονεκτήματά τους, ενώ αναφέρονται συνοπτικά κάποιες πληροφορίες σχετικά με τα εργαλεία αρπάγης. Έπειτα, αναλύεται η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, οι πυλώνες της, ο ρόλος της τεχνητής νοημοσύνης και πως προσαρμόζονται τα βιομηχανικά ρομπότ σε αυτή.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφονται κάποια από τα βασικά πρότυπα ασφαλείας που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία μίας ασφαλούς ρομποτικής κυψέλης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση και τη συντήρηση των βιομηχανικών ρομπότ όπου αναφέρονται με βάση ποια κριτήρια επιλέγεται ένα βιομηχανικό ρομπότ, τα είδη συντήρησης και από ποιους παράγοντες επηρεάζεται.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφονται τόσο το λογισμικό ABB Robotstudio που χρησιμοποιήθηκε όσο και οι ρομποτικοί βραχίονες και το εργαλείο απορρόφησης αέρα “FlexGripper-Vacuum”.

Στο έκτο κεφάλαιο, περιγράφεται το σενάριο που δημιουργήθηκε αναφέροντας όλα τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν και αναλύοντας τη λογική του χωροταξικού μοντέλου. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του κάθε σεναρίου, ενώ αναλύθηκε η εγκατάσταση της προστατευτικής περιφράξης στις απαραίτητες αποστάσεις βάση του προβλεπόμενου προτύπου ασφαλείας.

Στο έβδομο κεφάλαιο, αφού αναλυθεί αναλυτικά το κάθε μοντέλο, παραθέτονται οι μετρήσεις τους και στη συνέχεια μέσα από μία σειρά παραμετροποιήσεων στη δυναμική συμπεριφορά του κάθε συστήματος επιχειρείται να δημιουργηθεί μία ομαλή πορεία κατά την εργασία εκπληρώνοντας παράλληλα τις προϋποθέσεις που έχουν οριστεί. Με την ολοκλήρωση όλων των σεναρίων συγκεντρώνονται και συγκρίνονται τα δεδομένα που εξήχθησαν και παραθέτονται παρατηρήσεις.

Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μία επισκόπηση από όλες τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν, αξιολογούνται τα σενάρια και εξάγονται συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΡΟΜΠΟΤ

Η λέξη ρομπότ χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Τσέχο σκηνοθέτη, Karel Capek σε ένα έργο που παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στο Παρίσι το 1922. Πλέον, χρησιμοποιείται για να εκφράσει ένα μηχανισμό σχεδιασμένο να επιτελεί εργασίες όπως να μεταφέρει τεμάχια, εργαλεία ή άλλες εξειδικευμένες συσκευές μέσω μεταβλητών προγραμματισμένων κινήσεων με σκοπό να υλοποιηθούν συγκεκριμένα έργα. Ο παραπάνω όρος διατυπώθηκε από το RIA (Robotic Institute of America) για να ειδικεύσει τον ορισμό του αφού στο παρελθόν έχουν δοθεί διάφορες γενικές έννοιες οι οποίες δεν καλύπτουν τις χρήσεις του [1].

Η ρομποτική βιομηχανία στην Ευρώπη ξεκίνησε την ανάπτυξη της από τη δεκαετία του 70, όπου εταιρίες όπως η ABB και η KUKA Robotics παρήγαγαν τα πρώτα τους ρομπότ. Συγκεκριμένα, η ABB με την εισαγωγή του IRB 6 στο εμπόριο ήταν από τις πρώτες εταιρίες που παρέδωσαν προϊόν προς εγκατάσταση σε γραμμή παραγωγής για εργασίες λείανσης και στίλβωσης των γωνιών σε σωλήνες [2].



Εικόνα 2-1. Ο Björn Weichbrodt με το πρώτο IRB 6 ρομπότ [3]

Πλέον, τα βιομηχανικά ρομπότ έχουν εξελιχθεί σε μηχανές οι οποίες εργάζονται σε υψηλές ταχύτητες και ειδικεύονται σε εργασίες οι οποίες είναι ανθυγιεινές για τον άνθρωπο σε σωματικό και ψυχολογικό επίπεδο είτε είναι πιο συμφέρουσα η εγκατάσταση και χρήση τους από τη πληρωμή εργατικού δυναμικού [4]. Συνηθέστερη χρήση έχουν σε διεργασίες βαφής, συναρμολόγησης, κοπής, κόλλησης, μεταφοράς τεμαχίων και άλλες, παρέχοντας υψηλή ταχύτητα, αντοχή, παραγωγικότητα και ακρίβεια [2].

2.1 Ρομποτικοί Βραχίονες

Ο πιο διαδεδομένος τύπος ρομπότ για βιομηχανικές χρήσεις είναι ο ρομποτικός βραχίονας. Αποτελεί ένα από τα συνηθέστερα συστήματα στη ρομποτική και χρησιμοποιείται για ποικίλες εφαρμογές όπως η ιατρική, η συναρμολόγηση αυτοκινήτων, η συγκόλληση και άλλα, επιτρέποντας την εκτέλεση επαναλαμβανόμενων και πολύπλοκων κινήσεων [5]. Αποτελεί ένα προγραμματιζόμενο μηχανισμό ο οποίος διακρίνεται από μία σχέση μεταξύ αρθρώσεων και συνδέσμων και η ονομασία του οφείλεται στην ομοιότητα με το ανθρώπινο χέρι [6]. Ένας ρομποτικός βραχίονα απαρτίζεται από υποσυστήματα τα οποία αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας του [1].

2.1.1 Μηχανική Δομή

Η μηχανική δομή των ρομποτικών βραχιόνων αποτελείται από τη *βάση*, τις *αρθρώσεις* και τους *συνδέσμους*. Συγκεκριμένα, η βάση είναι τοποθετημένη στο χώρο εργασίας και πάνω σε αυτή είναι στερεωμένο το σύμπλεγμα των αρθρώσεων και των συνδέσμων. Οι σύνδεσμοι είναι μέλη που διαμορφώνουν το σκελετό του βραχίονα και οι αρθρώσεις είναι οι μηχανισμοί που διασφαλίζουν τη κίνηση των συνδέσμων. Οι αρθρώσεις διακρίνονται σε *πρισματικές* και *σφαιρικές* οι οποίες αποτελούν τις δύο κύριες κατηγορίες. Οι πρώτες επιτρέπουν τη σχετική μετατόπιση δύο διαδοχικών αρθρώσεων κατά μήκος μίας ευθείας ενώ οι δεύτερες επιτρέπουν τη σχετική στροφική κίνηση μεταξύ δύο διαδοχικών συνδέσμων. Κάθε ζεύγος μεταξύ συνδέσμου και άρθρωσης αποτελεί ένα βαθμό ελευθερίας. Ανάλογα το τύπο των αρθρώσεων καθορίζεται και ο γεωμετρικός σχηματισμός του ρομπότ. Στο άλλο άκρο του μηχανισμού συναντάμε κατά κύριο λόγο το τελικό στοιχείο δράσης (end-effector) το οποίο έχει ελεύθερο ρόλο όσο αφορά τη κίνηση του στο χώρο και μπορεί να ασκεί δυνάμεις και ροπές σε αντικείμενα που χειρίζεται το ρομπότ [5], [1].

2.1.2 Σύστημα Χειρισμού

Η διαμόρφωση του απαρτίζεται από ένα μηχανικό βραχίονα (mechanical arm) ή χειριστή (manipulator) και ένα μηχανικό άκρο το οποίο αποτελεί μέλος προσάρτησης του τελικού στοιχείου δράσης (end-effector). Ο χειριστής είναι υπεύθυνος για τις κινήσεις είτε του μηχανικού άκρου είτε του τελικού στοιχείου δράσης για τη διαχείριση ενός αντικειμένου ή του εργαλείου με άξονα ένα απόλυτο σύστημα αναφοράς. Η διαχείριση και η καθοδήγηση του τελικού στοιχείου δράσης πραγματοποιείται από τον ίδιο τον χειριστή.

Ο βιομηχανικός χειριστής τείνει να αποτελείται από τέσσερις έως έξι βαθμούς ελευθερίας. Αυτό εξαρτάται πάντα από τη πολυπλοκότητα της εργασίας που πρόκειται να εκτελέσει. Οι περισσότεροι βιομηχανικοί χειριστές μπορούν να επαναπρογραμματιστούν για το συντονισμό των κινήσεων όλων των βαθμών ελευθερίας με σκοπό την υλοποίηση μίας πολύπλοκης σειράς

κινήσεων. Το μέγεθος του φορτίου που μπορεί να διαχειρισθεί ένα βιομηχανικό ρομπότ και η ακρίβεια των κινήσεων του εξαρτάται από τη κατασκευή του, τη γεωμετρία του και τη δομή του χειριστή [1].

2.1.3 Αισθητήρες

Οι αισθητήρες κατέχουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία ενός ρομπότ καθώς του επιτρέπουν να αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον του και να εκτελεί τις προβλεπόμενες κινήσεις του με ασφάλεια και ακρίβεια. Δίχως αυτούς δεν μπορεί ο ρομποτικός μηχανισμός να αποφύγει ένα πιθανό εμπόδιο που μπορεί να συναντήσει αλλά ούτε και να προσαρμόζεται στις εναλλαγές των εξωτερικών συνθηκών [7].

Οι τύποι των αισθητήρων ποικίλλουν και ταξινομούνται στους “ιδιοδεκτικούς” (proprioceptive) και στους “ετεροδεκτικούς” (exteroceptive). Οι πρώτοι αφορούν τη περίπτωση όπου η πληροφορία αφορά την εσωτερική λειτουργία του ρομπότ, ενώ οι δεύτεροι αφορούν τη πληροφορία σε περίπτωση που σχετίζεται με το περιβάλλον του. Οι “ετεροδεκτικοί” (exteroceptive) διακρίνονται στους “ενεργούς” (active) και στους “παθητικούς” (passive) αισθητήρες. Οι “ενεργοί” επηρεάζουν το περιβάλλον του ρομπότ απελευθερώνοντας ενέργεια σε αντίθεση με τους “παθητικούς” (passive) οι οποίοι δεν το επηρεάζουν [7].

Ένας αισθητήρας λαμβάνει σήματα και ανάλογα το τύπο του σήματος που συλλέγει διακρίνεται σε μίας από τις εξής κατηγορίες [7] :

- *Αισθητήρες απόστασης*: Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της απόστασης του ρομπότ και ενός αντικείμενου. Αποτελεί “ενεργό” (active) αισθητήρα και η λειτουργία του βασίζεται στην αντανάκλαση που εκπέμπει ο αισθητήρας σε σχέση με ένα αντικείμενο. Βασίζεται σε τεχνολογίες όπως η χρησιμοποίηση ηχητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας, υπέρυθρης ακτινοβολίας, εκπομπή φωτός.
- *Κάμερες*: Η χρήση τους γίνεται διότι παρέχουν αναλυτικές πληροφορίες όσο αφορά την απόσταση ενός αντικείμενου και της γωνίας του. Μέσω αυτών η αλληλοεπίδραση του ρομπότ με τον άνθρωπο είναι πιο ασφαλής καθώς γίνεται πιο κατανοητό το περιβάλλον γύρω από το ρομπότ.
- *Αισθητήρες αφής*: Χρησιμοποιούνται όταν το ρομπότ έχει μηδενική απόσταση με το αντικείμενο. Λειτουργούν σαν μηχανισμοί ασφαλείας και πολλές φορές διακόπτουν άμεσα τη λειτουργία του ρομπότ για να αποφευχθεί ένα ενδεχόμενο ατύχημα.
- *Μικρόφωνο*: Η χρήση τους σχετίζεται γίνεται για την ανίχνευση ήχων και για την αναγνώριση κάποιας ηχητικής εντολής προς το ρομπότ.

2.1.4 Ελεγκτής (Controller)

Ο ελεγκτής (controller) είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο των κινήσεων του ρομπότ όσο αφορά τη κίνηση των αρθρώσεων και την εκτέλεση προγραμματισμένων λειτουργιών. Τα ρομπότ είναι προγραμματισμένα να λειτουργούν με έλεγχο της κίνησης τους είτε ως προς το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων είτε ως προς το χώρο εργασίας που είναι εγκατεστημένα. Οι ελεγκτές (controllers) βοηθάνε στη διατήρηση της επιθυμητής τροχιάς με τη παρέμβαση στους

κινητήρες των αρθρώσεων και στα υπόλοιπα υποσυστήματα λαμβάνοντας δεδομένα από τους αισθητήρες [1].

Οι αισθητήρες συμβάλλουν καθοριστικά στις λειτουργίες χειρισμού και στον έλεγχο των κινήσεων του ρομπότ, αφού εκείνοι παρατηρούν το περιβάλλον και τα δεδομένα επικοινωνίας μεταξύ του ρομποτικού συστήματος με άλλες μηχανές ή υπολογιστές. Διορθώνουν αποκλίσεις και βελτιώνουν την αποδοτικότητα του συστήματος. Μέσω αυτών δίνεται στο ρομπότ η δυνατότητα να βελτιώνει τις ικανότητες χειρισμού του και να αλληλοεπιδρά με άλλα ρομπότ και μηχανές. Κάθε ελεγκτής (controller) διαθέτει το δικό του λογισμικό το οποίο επηρεάζει τη λειτουργικότητα του ρομπότ. Οι εντολές προς το σύστημα τείνουν να περιγράφουν κάποια λειτουργία του βραχίονα [1].

2.2 Ταξινόμηση Βιομηχανικών Ρομπότ

Όταν αναφερόμαστε σε τύπο ρομπότ μιλάμε για κατηγορίες που σχετίζονται με βάση τη γεωμετρία, το είδος των αρθρώσεων και τον τρόπο με τον οποίο κινούνται. Για την κάλυψη των αναγκών κάθε εφαρμογής έχει δημιουργηθεί μια ποικιλία διαφορετικών ρομπότ. Για την επιλογή του κατάλληλου ρομπότ για βιομηχανικά χρήση έχουν αναπτυχθεί συστήματα υποβοήθησης τα οποία εμπεριέχουν τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά. Τα κυριότερα κριτήρια έχουν να κάνουν με τα εξής :

Αρχή λειτουργίας

Η ταξινόμηση των ρομπότ γίνεται σε αυτά της σταθερής στάσης και τα σερβοελεγχόμενα ρομπότ [1]:

- (i) **Ρομπότ Σταθερής Στάσης:** Το ρομπότ ενώ έχει τον έλεγχο των σημείων στάσης δεν έχει τον έλεγχο στα ενδιάμεσα σημεία της τροχιάς κατά μήκος της οποίας κινείται. Κάθε άξονας έχει προκαθορισμένο (ή καθορισμένο από τον ελεγκτή κάθε φορά) σταθερό μηχανικό όριο στο κάθε άκρο της έκτασης του και μπορεί να σταματάει μόνο στα όρια αυτά. Τέτοιου τύπου ρομπότ είναι ειδικών εφαρμογών και δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα.
- (ii) **Σερβοελεγχόμενα Ρομπότ:** Η κίνηση τους πραγματοποιείται από σερβομηχανισμούς και το ρομπότ είναι ικανό να κινείται μέσα από έναν πρακτικά άπειρο αριθμό σημείων κατά την εκτέλεση μίας προγραμματισμένης ακολουθίας. Το σύνολο των σημείων προκύπτει από το συνδυασμό των επιτεύξεων μετατοπίσεων των αρθρώσεων. Τα σερβοελεγχόμενα ρομπότ συγκριτικά με τα ρομπότ σταθερής στάσης είναι πιο ακριβά και πιο σύνθετα ως προς τη συντήρηση και τον προγραμματισμό τους.

Μέθοδος ελέγχου κίνησης

Η ταξινόμηση τους γίνεται στα ρομπότ σημείου-προς-σημείο (point-to-point) και στα ρομπότ συνεχούς τροχιάς (continuous path) [1]:

- (i) **Ρομπότ σημείου-προς-σημείο (point-to-point Robots):** Ο προγραμματισμός του ρομπότ από ένα σημείο σε ένα άλλο πραγματοποιείται χωρίς να είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η ακολουθούμενη τροχιά. Η ταχύτητα, η τροχιά δεν αποτελεί κύριο

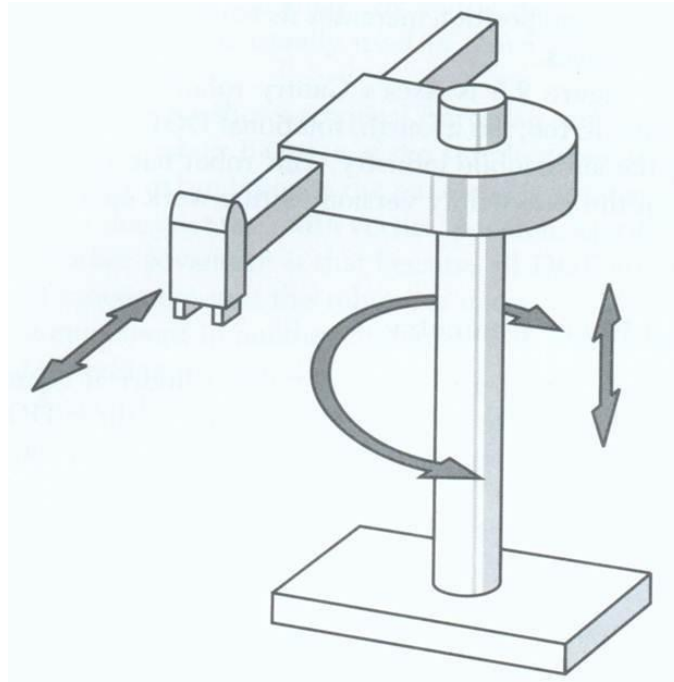
μέλημα και συνήθως δεν προγραμματίζεται καθώς αποτελεί εσωτερική λειτουργία του ελεγκτή. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμογή στα ρομπότ σταθερής στάσης και σε κάποια σερβοελεγχόμενα, ενώ ακόμα εργασίες που αφορούν το χειρισμό αντικειμένων ή εργαλείων εκτελούνται βάση αυτής της μεθόδου.

- (ii) **Ρομπότ συνεχούς τροχιάς (continuous path Robots):** Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί τύπο ρομποτικού ελέγχου κατά τον οποίο το ρομπότ έχει προγραμματιστεί να επαναλαμβάνει μία τροχιά σε διδαγμένα σημεία με μικρή απόσταση μεταξύ τους επαναλαμβανόμενα σε σταθερή χρονική βάση. Καθώς το ρομπότ διαγράφει μία επιθυμητή τροχιά διαβάζοντας τους κωδικοποιητές των αρθρώσεων (δηλαδή τη θέση του κάθε άξονα σε σταθερή χρονική βάση), τα διδαγμένα αυτά σημεία έχουν καταγραφεί από τη μονάδα ελέγχου. Έλεγχος συνεχούς τροχιάς μπορεί επίσης να επιτευχθεί με την παρεμβολή μίας επιθυμητής καμπύλης τροχιάς μεταξύ των διδαγμένων σημείων. Η τροχιά του βραχίονα προγραμματίζεται με άμεσο τρόπο (καθοδήγηση μέσα από ενδιάμεσα σημεία - lead-through) ή υπολογίζει ο ελεγκτής τη διαδρομή μεταξύ διαδοχικών σημείων. Ορισμένες εργασίες χειρισμού αντικειμένων και εργαλείων εκτελούνται κατ' αυτόν τον τρόπο. Οι λειτουργίες συνεχούς τροχιάς μπορούν να εκτελεσθούν μόνο από σερβοελεγχόμενα ρομπότ.

Γεωμετρικός σχηματισμός

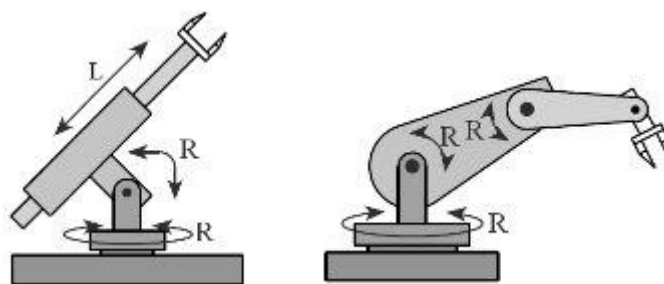
Η ταξινόμηση των ρομποτικών βραχιόνων γίνεται βάση του συστήματος συντεταγμένων που αναφέρεται στους 3 πρώτους βαθμούς ελευθερίας. Συγκεκριμένα η ταξινόμηση γίνεται ανάλογα την εικόνα και το γεωμετρικό σχηματισμό τους σε κυλινδρικά, σφαιρικά ή πολικά, αρθρωτά, καρτεσιανά ή ορθογωνικά και SCARA. Στη κατηγορία των βιομηχανικών ρομπότ επίσης εντάσσονται και τα Cobots, Gantry και τύπου Δέλτα. Το μηχανικό τμήμα των ρομπότ από αρθρώσεις και συνδέσμους οι οποίοι είναι αρμονικά συνδεδεμένοι με τρόπο ώστε να διαγράφονται πρισματικές και γραμμικές κινήσεις [8], [9], [1].

- (i) **Κυλινδρικοί Βραχίονες:** Η δημιουργία ενός κυλινδρικού βραχίονα προκύπτει όταν τοποθετείται σε μία περιστρεφόμενη βάση, μία συναρμολόγηση ενός κάθετου άξονα με έναν οριζόντιο βραχίονα. Έχει απλό μηχανικό σχεδιασμό συγκριτικά με τα καρτεσιανά ρομπότ. Τα μειονεκτήματα αυτού του τύπου βραχίονα είναι ότι η ακρίβεια θέσης του καρπού μειώνεται καθώς η οριζόντια μετατόπιση αυξάνεται και ότι ο βραχίονας περιορίζει το χώρο εργασίας [8], [1].



Εικόνα 2-2. Κυλινδρικός ρομποτικός βραχίονας [10]

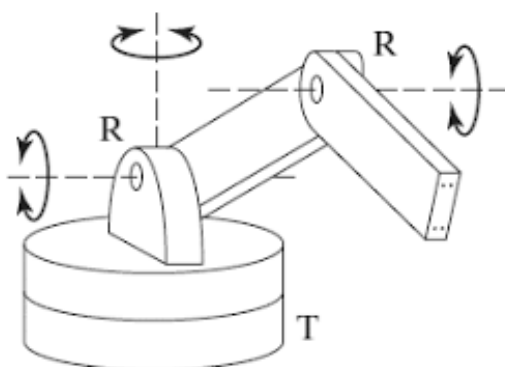
- (ii) **Σφαιρικά Ρομπότ:** Τέτοιου είδους βραχίονες είναι ικανοί να διαγράφουν περιστροφικές κινήσεις, να επεκτείνονται και να προσδίδουν κλίση στο βραχίονα σε σφαιρικούς χώρους εργασίας. Έχουν καλή διακριτική ικανότητα, μπορούν να συνεργάζονται σε ικανοποιητικό βαθμό με άλλα εργαλεία και μηχανές, ενώ ακόμα έχουν μικρή πολυπλοκότητα. Από την άλλη, τα μειονεκτήματά τους σχετίζονται με μεγάλα σφάλματα τοποθέτησης λόγω των περιστροφικών κινήσεων και με τη περιορισμένη ικανότητα του βραχίονα να αποφεύγει εμπόδια [1], [8].



Εικόνα 2-3. Σφαιρικός Ρομποτικός Βραχίονας [11]

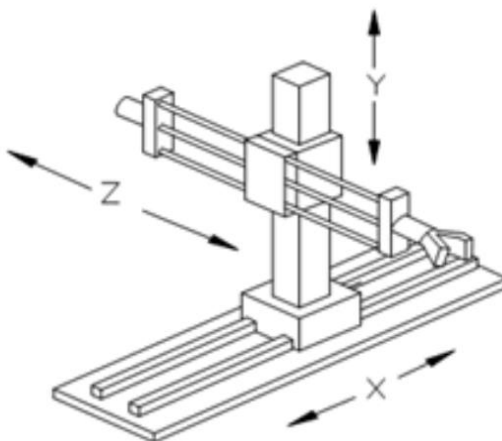
- (iii) **Αρθρωτά Ρομπότ:** Τα συγκεκριμένα ρομπότ διαγράφουν μόνο περιστροφικές κινήσεις και κινήσεις όμοιες με τις κινήσεις ενός ανθρώπου και για αυτό το λόγο ονομάζονται και ανθρωπομορφικά. Έχει περιστροφικές αρθρώσεις τοποθετημένες σε περιστρεφόμενη βάση ώστε να παρέχονται τρεις κύριοι άξονες κίνησης. Τα πλεονεκτήματά του είναι ότι είναι ευέλικτα ως προς τη

προσέγγιση πάνω ή κάτω από ένα αντικείμενο και μπορούν να συνεργάζονται σε ικανοποιητικό βαθμό με άλλα ρομπότ στον ίδιο χώρο εργασίας. Κύρια μειονεκτήματα τους είναι η χαμηλή ακρίβεια και διακριτική ικανότητα, η περιορισμένη δυνατότητα αποφυγής εμποδίων και η δημιουργία προβλημάτων εξισορρόπησης λόγω των μεγάλων και μεταβλητών ροπών στις αρθρώσεις.



Εικόνα 2-4. Αρθρωτός Ρομποτικός Βραχίονας [12]

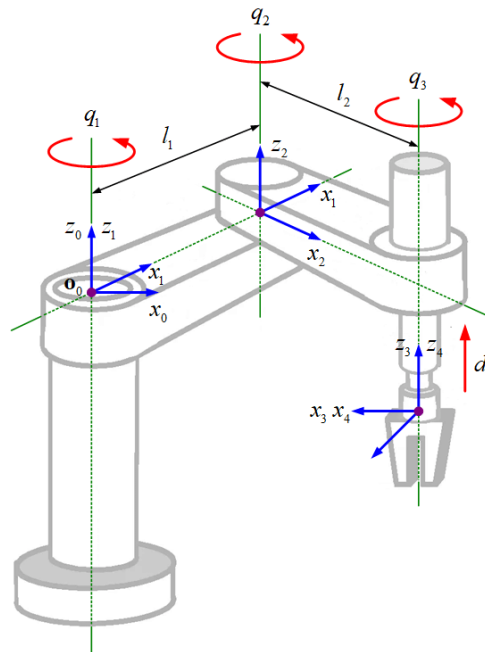
- (iv) **Καρτεσιανά ή Ορθογωνικά Ρομπότ:** Τα καρτεσιανά ρομπότ διαθέτουν τρεις διαδοχικές πρισματικές αρθρώσεις και κινούνται σε ευθείες γραμμές πάνω-κάτω και μέσα-έξω. Συνηθίζουν να μη έχουν ελεγχόμενη λογική ώστε να συντονίζεται η κίνηση των αρθρώσεων. Η ακρίβεια και ο μεγάλος βαθμός διακριτότητας αποτελεί βασικό πλεονέκτημα, ενώ μειονέκτημα αποτελεί η αδυναμία καλής συνεργατικότητάς με άλλα ρομποτικά συστήματα, η πολυπλοκότητα της μηχανικής δομής τους και η ανάγκη για ευρύ χώρο εργασίας αφού διαθέτουν αρκετά ευρύ δομικό πλαίσιο [1], [8].



Εικόνα 2-5. Καρτεσιανός Ρομποτικός Βραχίονας [9]

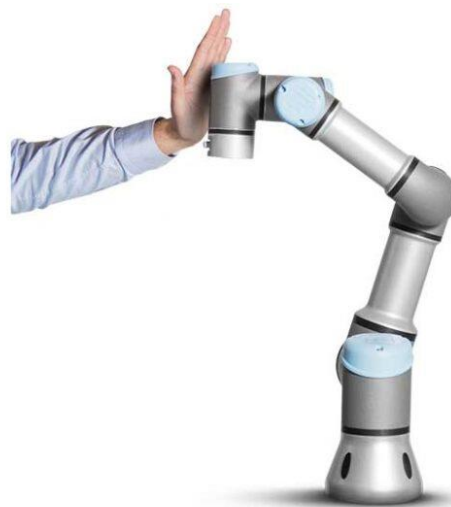
- (v) **Ρομπότ Τύπου SCARA:** Αυτός ο τύπος βραχίονα αποτελεί έναν ρομποτικό σχεδιασμό οριζόντιας περιστροφής και η μορφή του είναι ανθρωπομορφική. Αποτελείται από δύο ή τρεις οριζόντιες σερβοελεγχόμενες αρθρώσεις συνήθως και από έναν κάθετο άξονα ο οποίος είναι σερβοελεγχόμενος ή μη-σερβοελεγχόμενος. Συγκριτικά με άλλα αρθρωτά ρομπότ χρειάζονται λιγότερο χώρο και η τοποθέτησή τους δεν είναι δύσκολη. Είναι ιδιαίτερα εύχρηστα για

εργασίες pick and place αφού μπορούν να διαχειρίζονται και μεγάλα φορτία με μικρά σφάλματα τοποθέτησης [1], [9].



Εικόνα 2-6. Ρομπότ Τύπου SCARA [9]

- (vi) **Cobots:** Αποτελούν συνεργατικά ρομπότ, δηλαδή είναι σχεδιασμένα ώστε να συνεργάζονται με τον άνθρωπο και να είναι ευέλικτα για να προσαρμόζονται εύκολα στο εργασιακό περιβάλλον. Εφόσον αλληλοεπιδρούν με τον άνθρωπό, η ασφάλεια αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή τους απαιτούν άδειες και διασφαλίσεις γεγονός που μπορεί να αποφέρει περιορισμούς ως προς το σχεδιασμό και τη λειτουργία τους, ενώ η ταχύτητα λειτουργίας τους συνήθως είναι μικρότερη συγκριτικά με τους περισσότερους τύπους ρομπότ [9].



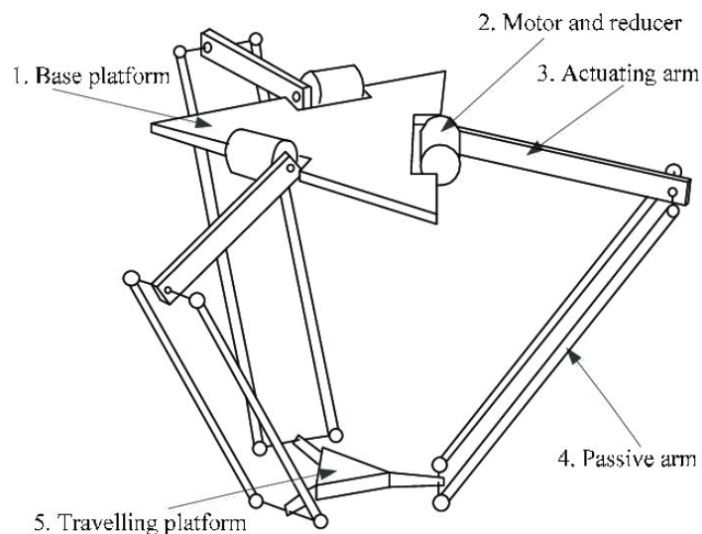
Εικόνα 2-7. Cobots [9]

- (vii) **Ρομπότ Τύπου Gantry:** Το σχήμα τους είναι ορθογωνικό και αποτελείται από τρεις έως και έξι βαθμούς ελευθερίας. Η τοποθέτηση τους γίνεται στην οροφή του χώρου εργασίας και οι κινήσεις του επιτελούνται κατά τον X και Y άξονα. Είναι ικανό να δουλεύει σε υψηλές ταχύτητες και να διανύει μεγάλες αποστάσεις, ενώ ακόμα η ακρίβεια τοποθέτησης είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική. Μπορούν να διαχειρίζονται μεγάλα φορτία και να είναι ευέλικτα στο χώρο εργασίας τους ο οποίος απαιτείται να είναι ευρύς λόγω των εκτεταμένων διαστάσεων του ρομπότ.



Εικόνα 2.8. Ρομπότ Τύπου Gantry [13]

- (viii) **Ρομπότ Τύπου Δέλτα:** Ονομάζονται και παράλληλα ρομπότ και διαθέτουν μία βάση στη κορυφή του ρομπότ στην οποία είναι προσκολλημένοι οι τρεις βραχίονες. Οι κινητήρες του ρομπότ είναι ενσωματωμένοι στη βάση του ρομπότ η οποία είναι το πιο βαρύ τμήμα του ρομπότ καθώς οι βραχίονες έχουν αρκετά μικρότερο βάρος ώστε να πραγματοποιούν γρήγορες κινήσεις στο χώρο εργασίας. Συνήθως, χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά μικρών φορτίων ή για συγκολλήσεις ή για συσκευασία προϊόντων [9].



Εικόνα 2-9. Ρομπότ Τύπου Δέλτα [9]

Κατηγορία εφαρμογής

Όσο αφορά τη κατηγορία εφαρμογής η ταξινόμηση γίνεται βάση της ρομποτικής εφαρμογής. Λόγω του αυξημένου πλέον πλήθους ρομποτικών εφαρμογών ενδεικτικές εργασίες είναι [8], [1]:

- Βαφής
- Συναρμολόγησης
- Εκπαίδευσης
- Εφαρμογών θαλάμων κενού
- Συσκευασίας
- Εγκιβωτισμού
- Παλετοποίησης
- Κοπής.

2.3 Πλεονεκτήματα

Τα βιομηχανικά ρομπότ αποτελούν καινοτόμα τεχνολογία στο τομέα της αυτοματοποίησης και με την ενσωμάτωσή τους σε εργασιακές διαδικασίες έχουν συμβάλει σε σημαντικό βαθμό στη βελτίωση της αποδοτικότητας, της ακρίβειας και της ασφάλειας στο χώρο εργασίας. Η χρήση των ρομπότ συμβάλει στην [1], [14], [15] :

- *Αυξημένη παραγωγικότητα.* Είναι ικανά να δουλεύουν αδιάκοπα χωρίς να επηρεάζονται από παράγοντες όπως η κόπωση.
- *Ασφάλεια των εργαζομένων.* Αναλαμβάνουν επίπονες εργασίες οι οποίες μπορεί να πραγματοποιούνται σε ανθυγιεινά περιβάλλοντα.
- *Μείωση κόστους παραγωγής.* Παρά το αυξημένο κόστος εγκατάστασης, τα λειτουργικά κόστη μειώνονται καθώς η ανάγκη για την ανθρώπινη εργασία περιορίζεται σημαντικά.
- *Ευελιξία και προσαρμοστικότητα.* Μπορούν να εργάζονται σε περιβάλλοντα όπου ο άνθρωπος είναι σχεδόν αδύνατον να εργαστεί όπως σε υποθαλάσσιες και διαστημικές έρευνες και επιδιορθώσεις. Ακόμα, μπορούν να προσαρμόζονται άμεσα σε αλλαγές συνθηκών και είναι ικανά να λειτουργούν υπό ασυνήθιστους προσανατολισμούς.
- *Υψηλή ακρίβεια και ποιότητα.* Λόγω του εξοπλισμού του ρομπότ με αισθητήρες και ακριβή συστήματα η πιθανότητα σφάλματος είναι ελάχιστη και η ποιότητα εργασίας ιδιαίτερα ικανοποιητική. Η ομοιομορφία της παραγωγής των προϊόντων αποτελεί χαρακτηριστικό της εργασίας των ρομπότ.

2.4 Εργαλεία αρπάγης (Grippers)

Οι ρομποτικοί βραχίονες για να αλληλοεπιδρούν αποτελεσματικά με το περιβάλλον τους, απαιτούν ειδικά εξαρτήματα, ώστε να μπορούν να υλοποιούν εργασίες όπως είναι η αρπαγή ή η συγκράτηση ενός αντικειμένου. Τα εργαλεία αρπάγης (grippers) αποτελούν τελικό τμήμα του ρομποτικού βραχίονα και γενικά είναι υποσυστήματα μηχανικού χειρισμού που παρέχουν επαφή του τεμάχιου εργασίας με το ρομποτικό μηχανισμό και διασφαλίζουν τη μετακίνηση και τοποθέτηση του στην επιθυμητή θέση. Όσο αφορά το μηχανισμό και το σχεδιασμό τους ποικίλλουν προκειμένου να επιτελούν συγκεκριμένες διεργασίες οι οποίες απαιτούν εξειδίκευση όσο αφορά το τεμάχιο εργασίας και το ρομποτικό σύστημα [16].

Η επιλογή της κατάλληλης αρπάγης εξαρτάται από το βάρος, το σχήμα, το μέγεθος και το υλικό του αντικειμένου που θα χειριστεί. Υπάρχουν τέσσερις τύποι οι οποίοι χρησιμοποιούνται συχνότερα για βιομηχανικές εργασίες.

- 1) **Αναρροφητικές Αρπάγες (Vacuum Grippers):** Οι αναρροφητικές αρπάγες χρησιμοποιούν κενό αέρα για να συγκρατούν και να πιάνουν τα αντικείμενα μέσω βεντουζών, που αποτελούνται από καουτσούκ ή πολυουρεθάνη. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν αντλίες για να δημιουργήσουν αρνητική πίεση και να προσκολλήσουν το αντικείμενο στην επιφάνεια των βεντουζών προκειμένου να γίνει η μεταφορά του. Καλύπτει ένα ευρύ φάσμα επιφανειών των αντικειμένων. Συγκεκριμένα διασφαλίζει την ακεραιότητα και την ασφαλή μεταφορά αντικειμένων με επίπεδη ή λεία επιφάνεια από ξύλο, γυαλί, μέταλλο ή πλαστικό [17].
- 2) **Πνευματικές Αρπάγες (Pneumatic Grippers):** Οι λαβές αρπάγης αυτού του συστήματος χρησιμοποιούν πεπιεσμένο αέρα που τροφοδοτεί μια ράβδο εμβόλου μέσα στο εργαλείο από ένα σύστημα παροχής αέρα για να παρέχουν την ισχύ που απαιτείται για το άνοιγμα και κλείσιμο τους. Κύριο πλεονέκτημα τους αποτελεί η δύναμη τους παρόλο που τείνουν να είναι σχετικά μικρών διαστάσεων και αποτελούν οικονομική και αποδοτική επιλογή καθώς μπορεί να εκτελεί πολλούς κύκλους εργασίας χωρίς να είναι αναγκαία η διακοπή λειτουργίας του [18], [19].
- 3) **Υδραυλικές Αρπάγες (Pneumatic Grippers):** Οι υδραυλικές λαβές συγκριτικά με τις πνευματικές λαβές παρέχουν μεγαλύτερες δυνάμεις συγκράτησης και είναι ιδιαίτερα εύχρηστες για αντικείμενα μεγάλου βάρους. Από την άλλη πλευρά, έχουν πολύπλοκη δομή και χρειάζονται διαρκή συντήρηση λόγω των λαδιών που χρησιμοποιούνται στις αντλίες και υπάρχουν κίνδυνοι για τυχόν διαρροές ,ενώ ακόμα η εγκατάσταση τους είναι ιδιαίτερα δαπανηρή [19], [20].
- 4) **Ηλεκτρικές Αρπάγες (Electric Grippers):** Χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που αφορούν φορτία χαμηλού βάρους και είναι ιδανικά για διεργασίες “pick and place”. Χρησιμοποιούνται κυρίως στα συνεργατικά ρομπότ (cobots) και έχουν δύο ή τρεις λαβές και συχνά επιλέγονται για αντικείμενα κυλινδρικά ή σφαιρικά. Βασικό πλεονέκτημα τους αποτελεί η ρύθμιση της ταχύτητας και της δύναμης της λαβής λόγω των μικροεπεξεργαστών που διαθέτουν και η ακρίβεια τους. Από την άλλη, η δύναμη της λαβής συγκριτικά με τα πνευματικά grippers είναι πολύ χαμηλότερη [19].

2.5 4^η Βιομηχανική επανάσταση (Industry 4.0)

Η 4^η βιομηχανική επανάσταση (Industry 4.0) αποτελεί τη τέταρτη βιομηχανική εξέλιξη και πήρε το όνομα της από τη τάση των τεχνολογιών παραγωγής για αυτοματοποίηση και ανταλλαγή δεδομένων. Ενισχύει τον όρο “έξυπνο εργοστάσιο” το οποίο περιγράφει ένα περιβάλλον παραγωγής που τα συστήματα εφοδιαστικής (logistics) και οι εγκαταστάσεις δομούνται με όσο το δυνατόν λιγότερη ανθρώπινη παρέμβαση [21]. Μέσα σε αυτή περιγράφεται η ανάγκη των μηχανών να μαθαίνουν τη λειτουργία τους και να βελτιώνουν την αποδοτικότητα τους αλληλοεπιδρώντας με το περιβάλλον στο οποίο εγκαθίστανται. Η μετάβαση στη τέταρτη βιομηχανική επανάσταση έχει ως στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας μέσω της συνεργασίας έξυπνων μηχανών, συστημάτων και ανθρώπων σε

ένα νέο ευέλικτο εργασιακό περιβάλλον βελτιστοποιώντας παράλληλα την ασφάλεια και την απόδοση [22].

Αν και υπάρχει σημαντική τεχνολογική πρόοδος, πολλές επιχειρήσεις έρχονται αντιμέτωπες με απότομες αλλαγές και επιχειρούν να προσαρμοστούν στα νέα δεδομένα με έκτακτες αλλαγές. Η αποτελεσματικότητα μίας βιομηχανίας εξαρτάται από το πόσο εύκολα μπορεί να προσαρμοστεί στα νέα δεδομένα. Ένα έξυπνο εργοστάσιο είναι σε θέση να δημιουργεί ένα ευέλικτο περιβάλλον προσανατολισμένο στον πελάτη που θα του εκπληρώνει τις προσδοκίες του με εύκολο και αποτελεσματικό τρόπο. Η επίτευξη ενός τέτοιου στόχου μειώνει τα εμπόδια μεταξύ πελάτη και κατασκευαστή και επικεντρώνεται στη αύξηση της παραγωγής και της παράδοσης [23].

2.5.1 Βασικοί πυλώνες

Η άφιξη της 4^{ης} βιομηχανικής επανάστασης ενισχύει την ενσωμάτωση εύχρηστων λειτουργιών στο χώρο των βιομηχανιών με συστήματα που είναι παραγωγικά και μειώνουν το κόστος λειτουργίας. Δίνει έμφαση στη δημιουργία ενός δικτύου που αποτελείται από έξυπνα συστήματα δημιουργώντας μία γέφυρα επικοινωνίας μεταξύ του εικονικού και του πραγματικού κόσμου. Η ιδέα αυτή βασίζεται σε μία αλυσίδα εννέα παραγόντων [24], [25], όπου αυτοί αναλύονται στη συνέχεια και απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 2-10:

1) Προσομοιώσεις (simulations)

Αποτελεί μοντέλο το οποίο απεικονίζει ψηφιακά σημαντικές πληροφορίες για το σχεδιασμό μίας παραγωγικής διαδικασίας. Σε ανταγωνιστικά περιβάλλοντα, χρησιμοποιούνται για να οργανώνουν νέες επιχειρηματικές τακτικές προσαρμόζοντας πολύπλοκα συστήματα και εκτιμώντας με ακρίβεια πληροφορίες με ρεαλιστικό αντίκτυπο. Συμβάλλουν σημαντικά στη βελτιστοποίηση των λειτουργιών μίας επιχείρησης αφού διασφαλίζουν μία αξιόπιστη και ακριβή έρευνα μέσω ενός υπολογιστικού μοντέλου.

2) Αυτόνομα ρομπότ (autonomous robots)

Η χρήση των ρομπότ στις βιομηχανίες γίνεται με σκοπό την υλοποίηση περίπλοκων διαδικασιών όπου ο ανθρώπινος παράγοντας αδυνατεί να ανταπεξέλθει αποτελεσματικά. Οι σύγχρονες βιομηχανίες έχουν διευκολύνει τη διεργασία δημιουργώντας μία αποδοτική συνεργατική σχέση μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ. Πλέον, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες όπου το ρομπότ μέσω της ανθρώπινης εκμάθησης και των συστημάτων νέφους (cloud) βελτιστοποιεί τόσο τον έλεγχο όσο και τη συνολική διαδικασία.

3) Ενσωμάτωση συστημάτων (systems integration)

Αποτελεί μία συνένωση συστημάτων με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ενός ευέλικτου συστήματος εντός μίας βιομηχανίας με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του. Συλλέγουν δεδομένα που αποθηκεύονται σε ένα νέφος (cloud) και μέσω αυτών επιτυγχάνεται η εύκολη παρακολούθηση της ροής της διαδικασίας.

4) Διαδίκτυο των πραγμάτων (the Internet of Things)

Το διαδίκτυο των πραγμάτων αναφέρεται στην ανταλλαγή και εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών από δεδομένα μέσα σε δίκτυα νέφους (cloud). Στο βιομηχανικό χώρο λειτουργεί

συλλέγοντας δεδομένα από φυσικά αντικείμενα σε πραγματικό χρόνο μέσω των οποίων ο υπολογιστής ή άλλες ανώτερες συσκευές λαμβάνουν αποφάσεις. Μέσω αυτού επιτυγχάνεται η ευελιξία των επιχειρήσεων να αλληλοεπιδρούν με έξυπνες συσκευές προκειμένου να έχουν πρόσβαση σε καλύτερες γνώσεις ώστε οι κινήσεις τους να είναι πιο αποτελεσματικές.

5) Κυβερνοασφάλεια (cybersecurity)

Αποτελεί μείζων ζήτημα για τη σταθερότητα μίας επιχείρησης καθώς η υποκλοπή δεδομένων και πληροφοριών μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στη λειτουργία της. Υπάρχουν πλέον λύσεις που σχετίζονται με τη πρόβλεψη επιθέσεων και την αντιμετώπιση ζητημάτων παραβίασης δεδομένων. Η πρόβλεψη των κυβερνοεπιθέσεων για μία επιχείρηση αυξάνει το συνολικό λειτουργικό κόστος μίας επιχείρησης αλλά όχι σε τόσο σημαντικό βαθμό για να κριθεί απαγορευτικό.

6) Υπολογιστικό νέφος (cloud computing)

Το υπολογιστικό νέφος αποτελεί τεχνολογία που επιτρέπει την αποθήκευση και διαχείριση δεδομένων με εύκολο τρόπο μεταξύ πελάτη και διακομιστή. Υπάρχουν τρία είδη “cloud computing”:

- Software as a Service (SaaS): όπου η πρόσβαση εξαρτάται από την αγορά του πελάτη.
- Platform as a Service (PaaS): όπου οι πελάτες μπορούν να έχουν πρόσβαση στο λογαριασμό τους στο νέφος.
- Infrastructure as a Service (IaaS): προσφέρει βασικές παροχές όπως η δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων.

Το υπολογιστικό νέφος βελτιώνει τη παροχή υπηρεσιών με την επίλυση διαφόρων ζητημάτων όπως οι καθυστερήσεις, τα πρόσθετα υπολογιστικά έξοδα και απλοποιεί την αποθήκευση καθώς όλες οι πληροφορίες αποθηκεύονται στο νέφος (cloud).

7) Προσθετική κατασκευή (additive manufacturing)

Ορίζεται και ως τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) και περιλαμβάνει τη παραγωγή προϊόντων τα οποία προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του πελάτη. Η ζήτηση της αυξάνεται ολοένα και περισσότερο λόγω της συμβολής στο περιορισμό του κόστους παραγωγής, την αύξηση της ταχύτητας παραγωγής, την επιτάχυνση της διαδικασίας και το περιορισμό των αποβλήτων κατά τη παραγωγή.

8) Επαυξημένη πραγματικότητα (augmented reality)

Ορίζεται ως διαδραστική τεχνολογία η οποία μέσω ενός εικονικού κόσμου αναλύει ρεαλιστικά το περιβάλλον του χρήστη. Ενισχύει τη τεχνολογία αλληλεπίδρασης μηχανής-ανθρώπου προσφέροντας στον χρήστη τη δυνατότητα να ελέγχει συγκεκριμένες εργασίες μέσω ενός εικονικού κόσμου που δημιουργείται από αισθητήρες προσφέροντας ρεαλιστικά γραφικά.

9) Μεγάλα δεδομένα (big data)

Τα “μεγάλα δεδομένα” εμφανίστηκαν για τη διαχείριση περίπλοκων, ανόμοιων και μεγάλων σε μέγεθος δεδομένων με σκοπό την αύξηση της καινοτομίας, της παραγωγικότητας αλλά και του ανταγωνισμού. Μπορούν να αναλυθούν σαν ένα ευρύ σύνολο δημιουργώντας

αλγόριθμους για την πρόβλεψη σφαλμάτων και δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη σε τομείς όπως το μάρκετινγκ, στους τομείς που δραστηριοποιείται η επιχείρηση και στις σχέσεις της με τους πελάτες.



Εικόνα 2-10. Οι 9 βασικοί πυλώνες της 4^{ης} βιομηχανικής επανάστασης [22]

2.5.1 Τεχνητή Νοημοσύνη

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) ορίζεται ως η ικανότητα των υπολογιστικών συστημάτων να επιτελούν διεργασίες οι οποίες βασίζονται στην ανθρώπινη νοημοσύνη. Αποτελεί λογισμικό που μέσω της εκμάθησης και της αντίληψης, τα υπολογιστικά συστήματα αναπτύσσουν και μελετάνε μεθοδικά πληροφορίες για να δίνουν λύσεις σε προβλήματα. Η χρήση της έχει επεκταθεί σε πολλούς κλάδους όπως η ιατρική, τα οικονομικά, τα μαθηματικά, η ψυχαγωγία και άλλα. Πολλές φορές η άντληση αυτών των πληροφοριών μπορεί να εγείρει ανησυχίες καθώς γίνεται παρεμβολή σε δεδομένα χωρίς την απαραίτητη εξουσιοδότηση [26].

Όταν η τεχνητή νοημοσύνη αναφέρεται σε βιομηχανικό επίπεδο ή σε επιχειρήσεις δεν σχετίζεται άμεσα με το γενικό της ορισμό. Πρόκειται για τεχνολογία η οποία ερευνά και ασχολείται με τομείς που σχετίζονται με την αύξηση της παραγωγικότητας, την ικανοποίηση των αναγκών του πελάτη, τη μείωση των εξόδων, τη πρόβλεψη και γενικότερα τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και την ευημερία μίας επιχείρησης. Με τη χρήση αισθητήρων καταγράφονται συνεχώς δειγματοληπτικά δεδομένα τα οποία στη συνέχεια αναλύονται από υπολογιστές. Η χρήση εικονικού περιβάλλοντος προβλέπεται για την επαλήθευση μίας διαδικασίας και το πόσο αποδοτική θα μπορούσε να είναι σε πραγματικό περιβάλλον [27].

Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) στις διεργασίες των τομέων της παραγωγής συμπεριλαμβανομένων εφαρμογών όπως η ασφάλεια, ο αυτοματισμός, ο έλεγχος, η πρόβλεψη και άλλες σημαντικές διαδικασίες, αποσκοπούν στην επίτευξη των βιομηχανικών στόχων μίας επιχείρησης. Χρησιμοποιώντας τη μηχανική εκμάθηση, συνδυάζει δεδομένα προκειμένου να εντοπίζει προβλήματα και να δομεί τη λύση τους [28].

Η ρομποτική με την ενσωμάτωση τη τεχνητής νοημοσύνης (AI) έχει μεταβεί σε μία νέα γενιά όπου η συνεργασία με τον ανθρώπινο παράγοντα έχει δώσει τη δυνατότητα τα ρομπότ να μπορούν να προγραμματίζονται πιο εύκολα και αποτελεσματικά. Τα ρομπότ έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν τη πορεία τους, να βελτιώνουν την ακρίβεια τους και την απόδοση τους περιορίζοντας το κόστος λειτουργίας τους. Μέσω της συνεχόμενης επαναληψιμότητας των κινήσεων τους είναι ικανά να μαθαίνουν από τα λάθη τους και να βελτιώνουν την απόδοση τους. Πιο συγκεκριμένα η παρουσία της τεχνητής νοημοσύνης στη βιομηχανική ρομποτική έχει βελτιώσει [29]:

- την έξυπνη χωροθέτηση.
- το σύστημα όρασης (vision system). Χάρη στη μηχανική μάθηση έχει βελτιωθεί η εικονική αναγνώριση και η κατανόηση του περιβάλλοντος.
- Την επεκτασιμότητα (scalability). Μετά από εκπαίδευση, το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μπορεί να αναγνωρίζει αυτόματα ένα αντικείμενο στην εικόνα.

2.5.2 Προσαρμογή των Βιομηχανικών Ρομπότ

Η είσοδος της 4^{ης} βιομηχανικής επανάστασης σηματοδοτεί μία νέα εποχή στο βιομηχανικό τομέα. Η ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών και ο εξοπλισμός των εργοστασίων με ευφυή συστήματα επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ ρομπότ και ανθρώπων με ασφάλεια και την ανταλλαγή γνώσεων βελτιώνοντας τη παραγωγικότητα και δημιουργώντας ένα “έξυπνο” περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, η εισαγωγή αισθητήρων και μηχανών δίνουν τη δυνατότητα για αυτοβελτίωση των συστημάτων και αυτοματοποίηση περίπλοκων διαδικασιών παραγωγής περιορίζοντας ταυτόχρονα το συνολικό κόστος [30].

Τα κύριο χαρακτηριστικό της τεχνολογικής αυτής εξέλιξης είναι η εισαγωγή των μεγάλων δεδομένων και δικτύων στα ρομπότ και η σύνδεση μεταξύ τους. Η αποδοτικότητα των βιομηχανιών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ρομποτική πρόοδο. Πλέον, έχει δημιουργηθεί μία μεγάλη γκάμα ρομποτικών συστημάτων μέσα από την οποία οι βιομηχανίες μπορούν να συγκεντρώνουν και να αποθηκεύουν δεδομένα με ασφάλεια και να δημιουργούν προγνωστικά παρέχοντας πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της παραγωγικότητας. Διεργασίες όπως η βαφή, η συγκόλληση και η κοπή έχουν πλέον εξελιχθεί σε επίπεδο όπου το ρομποτικό σύστημα είναι ικανό να αναγνωρίζει τότε να αδρανοποιείται ώστε να αποφευχθεί κάποιο ενδεχόμενο σφάλμα [31].

Εξίσου μεγάλη είναι και η πρόοδος των αισθητήρων. Με τη παρουσία τους ανιχνεύονται ανώμαλες συμπεριφορές και διορθώνονται προλαμβάνοντας σφάλματα. Η χρήση πολλών αισθητήρων έχει ενισχύσει την απόδοση των ρομπότ μετατρέποντας τα, σε αδιάκοπης λειτουργίας μηχανές, οι οποίες είναι σε θέση να αναγνωρίζουν το περιβάλλον τους και να βελτιώνουν την ακρίβεια τους. Καθοριστικά έχει συμβάλει και η εισαγωγή της τεχνητής νοημοσύνης και των υπολογιστικών συστημάτων. Το επίπεδο των γνώσεων που προσφέρουν αφορά συνθήκες, όπως η θέση του ρομποτικού βραχίονα, του εργαλείου αρπάγης, τους κραδασμούς, τη θερμοκρασία του κινητήρα και άλλα. Για τη μέγιστη αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης είναι αναγκαία η κατανόηση των δεδομένων από τους μηχανικούς [31].

Ο ρόλος των ρομπότ στο τομέα της παραγωγής έχει βελτιώσει την αυτοματοποίηση και έχει επιτρέψει την τοποθέτηση τους σε εξατομικευμένα περιβάλλοντα εργασίας. Σημαντικό

τομέα στη τρέχουσα βιομηχανική εξέλιξη αποτελεί και η συνεργατική ρομποτική (collaborative robots ή cobots). Οι συνεργατικοί βραχίονες είναι ικανοί να αλληλοεπιδρούν με ανθρώπους παραμένοντας αποτελεσματικοί και διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την ασφάλεια των εργαζομένων. Μέσω του ανθρώπινου παράγοντα προγραμματίζονται στις ανάγκες της κάθε εργασίας και με την ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης μέσω αλγορίθμων μπορούν να δημιουργούν ακριβέστερα μοτίβα κίνησης, ταχύτερους χρόνους απόκρισης και ταχύτερη λήψη αποφάσεων [31].

Η μετάβαση στα λεγόμενα “έξυπνα εργοστάσια” έχει συντελέσει στη δημιουργία μεγάλων συστημάτων επικοινωνίας μέσω του διαδικτύου των πραγμάτων (Internet Of Things) εντάσσοντας τα ρομπότ σε ευρύτερα δίκτυα. Οι δυνατότητες της ρομποτικής επεκτείνονται προσφέροντας επιπλέον ακρίβεια, ευελιξία και αποτελεσματικότητα και για αυτό το λόγο η εγκατάσταση των ρομπότ στις βιομηχανίες διαγράφει ραγδαία αύξηση. Βέβαια, η μετάβαση αυτή δεν περιορίζεται μόνο στη τεχνολογική διάσταση αλλά και στον κοινωνικό και εργασιακό αντίκτυπο. Η αυξημένη αυτοματοποίηση προκαλεί ανησυχίες σχετικά με την αντικατάσταση των ανθρωπίνων θέσεων εργασίας καθώς επιτελούν εργασίες με πολύ μεγαλύτερο βαθμό αποδοτικότητας. Ωστόσο, πολλές είναι οι εταιρίες οι οποίες έχουν ανάγκη από προσωπικότητες με φαντασία και ευρηματικότητα. Η εγκατάσταση των ρομπότ εκτός ότι αποτελεί μεγάλη επένδυση, απαιτεί το συνυπολογισμό πολλών δεδομένων όπως ο προγραμματισμός, η συντήρηση και ο σχεδιασμός ευφών συστημάτων. Επομένως, η στελέχωση εξειδικευμένων υπαλλήλων με ανάλογες δεξιότητες αποτελεί πρόκληση για την σύγχρονη κοινωνία. Η εκπαίδευση του εργατικού δυναμικού στις απαιτήσεις της ψηφιακής εποχής ώστε να μπορεί να συνεργάζεται με μηχανές αποτελεί το μέλλον της εργασίας σε αυτό το τομέα [31].

Κεφάλαιο 3

ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ

Προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία μίας ρομποτικής κυψέλης είναι απαραίτητο να γίνει μία μελέτη εκτίμησης κινδύνων που αφορά τόσο τα συστήματα ασφαλείας όσο και το ίδιο το ρομπότ. Ο προστατευτικός εξοπλισμός επιλέγεται με βάση τη συχνότητα της πρόσβασης του προσωπικού στο χώρο εργασίας, την ορατότητα ως προς τη κυψέλη, το πως μπορεί ο ίδιος ο εξοπλισμός να επηρεάσει την λειτουργικότητα της εργασίας και τις περιπτώσεις σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της εργασίας [32]. Η ασφάλεια των μηχανών βασίζεται σε τρεις τύπους προτύπων που είναι βασισμένα στο πρότυπο EN ISO 12100 το οποίο αποτελεί διεθνές ευρωπαϊκό πρότυπο. Η γνώση αυτού είναι βασική ώστε να επιτευχθεί η ασφάλεια τόσο των μηχανών όσο και της συνολικής εγκατάστασης της κυψέλης. Το πρότυπο EN ISO 12100 αφορά τις μηχανές και θεμέλιο των παρακάτω 3 προτύπων [33]:

- Τύπου A.
- Τύπου B (B1 και B2).
- Τύπου C.



Εικόνα 3-1. Πρότυπα ασφάλειας A-B-C [33]

3.1 Πρότυπο τύπου A

Το πρότυπο τύπου A βασίζεται στο πρότυπο EN ISO 12100 και αφορά γενικές και βασικές έννοιες που έχουν να κάνουν με την ασφάλεια των μηχανών και σκοπός του είναι να παρέχει μια γενική καθοδήγηση για την ασφαλή λειτουργία και χρήση ενός μηχανήματος. Βάση αυτού καθορίζεται μία μεθοδολογία η οποία έχει ως σκοπό την εκτίμηση πιθανών κινδύνων και το περιορισμό τους στο μέγιστο δυνατό βαθμό ή ακόμα και στην εξάλειψη τους.

Τα δύο στάδια σχετίζονται με το μηχάνημα και το πρόσωπο που αλληλοεπιδρά με αυτό, συνυπολογίζοντας παραμέτρους όπως είναι ο μηχανισμός και η λειτουργία της μηχανής, τα υλικά που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν και το περιβάλλον με το οποίο αλληλοεπιδρά το μηχάνημα. Η λήψη μέτρων προστασίας εμπεριέχει την εγκατάσταση προστατευτικών διατάξεων η οποία ενδείκνυται για περιπτώσεις που αφορούν μία εργασία με χρήση ρομπότ. Η λειτουργία τους αφορά τη παρεμπόδιση της πρόσβασης σε χώρο επικίνδυνο για τον εργαζόμενο, τη συγκράτηση υλικών και θραυσμάτων που ενδέχεται να εκτοξευθούν χωρίς να επηρεάζουν τη λειτουργία της μηχανής. Αναγκαία είναι επίσης η εγκατάσταση ενός συστήματος ελέγχου ασφαλείας που εμπεριέχει αισθητήρες και λογικά συστήματα τα οποία μπορούν να διακόψουν την διεργασία σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης [33].

3.2 Πρότυπο τύπου B1

Το B1 εμπεριέχει γενικές αρχές ασφάλειας όπως είναι ο σχεδιασμός και η επιλογή κατάλληλου προστατευτικού εξοπλισμού στις απαραίτητες αποστάσεις. Το συγκεκριμένο πρότυπο πραγματεύεται συγκεκριμένους κλάδους της ασφάλειας όπως οι αποστάσεις ασφαλείας, ο θόρυβος και μέθοδοι αξιολόγησης κινδύνου και με βάση πραγματικά δεδομένα ορίζονται τα απαραίτητα μέτρα προστασίας. Η σωστή τοποθέτηση και επιλογή των προστατευτικών είναι σύμφωνη με πρότυπα όπως το EN ISO 13855 και το EN ISO 13850 [34].

3.2.1 EN ISO 13855

Αφορά τις κατάλληλες τοποθετήσεις συστημάτων προστασίας με βάση τις ταχύτητες μελών του ανθρώπινου σώματος. Συγκεκριμένα, μέσω αυτού διασφαλίζονται οι ελάχιστες αποστάσεις από μία ζώνη κινδύνου, από μία ζώνη ανίχνευσης και από ζώνες όπου ενεργοποιούνται συστήματα ασφαλείας. Οι τιμές που αναφέρονται είναι εφαρμοσμένες και βασίζονται στο συγκεκριμένο διεθνές πρότυπο το οποίο παρέχει καθοδήγηση για τυπικές προσεγγίσεις χωρίς να περιλαμβάνονται περιπτώσεις όπως το τρέξιμο, το άλμα, η πτώση ενός ατόμου. Η γενική εξίσωση για τον υπολογισμό της απόδοσης που σταματάει το σύστημα δίνεται από το τύπο :

$$T = t_1 + t_2, \text{ όπου :}$$

- T : είναι η συνολική απόδοση της διακοπής λειτουργίας της μηχανής.
- t_1 : είναι ο μέγιστος χρόνος μεταξύ της ενεργοποίησης προστασίας και του σήματος εξόδου.
- t_2 : είναι ο χρόνος ακινητοποίησης της μηχανής, ο μέγιστος χρόνος που είναι αναγκαίος ο τερματισμός της λειτουργίας της και στον οποίο συμπεριλαμβάνεται και ο χρόνος απόκρισης του συστήματος ελέγχου της μηχανής.

Οι χρόνοι t_1 και t_2 επηρεάζονται από συνθήκες όπως η θερμοκρασία, ο χρόνος αλλαγής των βαλβίδων και η γήρανση εξαρτημάτων.

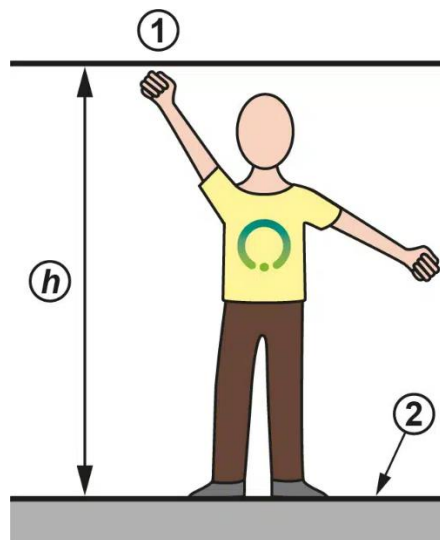
Ο χρόνος ακινητοποίησης του μηχανήματος χρειάζεται διαρκή έλεγχο καθώς με τη πάροδο του χρόνου και τη συχνότητα χρήσης της μηχανής και του συστήματος ασφαλείας ενδέχεται

να προκληθούν αποκλίσεις. Επίσης, είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη ο σχεδιασμός της μηχανής και να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις και δοκιμές ώστε να γίνει ο σωστός ορισμός των τιμών τους [35].

3.2.2 EN ISO 13857

Το EN ISO 13857 είναι ένα πρότυπο που αφορά τις αποστάσεις ασφαλείας για την αποφυγή προσεγγίσεις των επικίνδυνων ζωνών που αφορούν τα άνω και κάτω άκρα σε περιπτώσεις κάποιας απόπειρας προσέγγισης των επικίνδυνων ζωνών. Οι αποστάσεις που ορίζονται με αυτό το πρότυπο σχετίζονται με την εγκατάσταση των προστατευτικών κατασκευών και τη μέθοδο αποτροπής πρόσβασης των άκρων ενός ατόμου στις επικίνδυνες ζώνες. Καλύπτει τη προστασία ατόμων από 14 χρονών και άνω.

Το ύψος της ζώνης κινδύνου ορίζεται στα 2700mm ή παραπάνω για τη προστασία των άνω άκρων ενώ σε κάποιες περιπτώσεις όπου η πιθανότητα εμφάνισης κάποιου κινδύνου είναι χαμηλή το ύψος έχει όριο τα 2500mm [36], [37].



Εικόνα 3-2. Προσέγγιση προς τα πάνω [37].

- h : το ύψος της ζώνης κινδύνου.
- 1: ζώνη κινδύνου.
- 2: το επίπεδο αναφοράς.

Όσο αφορά την επέκταση των άνω άκρων πάνω από τα προστατευτικά ασφαλείας ισχύουν οι αποστάσεις με βάση συγκεκριμένα πρότυπα τα οποία χρησιμοποιούνται για το προσδιορισμό των ζωνών κινδύνου, το ύψος των προστατευτικών κατασκευών και την οριζόντια απόσταση ασφαλείας. Υπάρχουν 2 περιπτώσεις από τις οποίες καθορίζονται οι παραπάνω αποστάσεις [36] :

- 1) Περιπτώσεις όπου το ενδεχόμενο και το μέγεθος κάποιου τραυματισμού δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο.

Height of the hazard zone "a"	Height of the protective structure "b"								
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2500
Horizontal safety distance to hazard zone "c"									
2500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2400	100	100	100	100	100	100	100	100	0
2200	600	600	500	500	400	350	250	0	0
2000	1100	900	700	600	500	350	0	0	0
1800	1100	1000	900	900	600	0	0	0	0
1600	1300	1000	900	900	500	0	0	0	0
1400	1300	1000	900	800	100	0	0	0	0
1200	1400	1000	900	500	0	0	0	0	0
1000	1400	1000	900	300	0	0	0	0	0
800	1300	900	600	0	0	0	0	0	0
600	1200	500	0	0	0	0	0	0	0
400	1200	300	0	0	0	0	0	0	0
200	1100	200	0	0	0	0	0	0	0
0	100	200	0	0	0	0	0	0	0




Εικόνα 3-3 . Προέκταση των άκρων πάνω από τα προστατευτικά φράγματα για περιπτώσεις χαμηλού κινδύνου [37].

2) Περιπτώσεις που το πρώτο πρότυπο δεν καλύπτει τις ανάγκες της εργασίας.

Height of the hazard zone "a"	Height of the protective structure "b"									
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2500	2700
Horizontal safety distance to hazard zone "c"										
2700	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2600	900	800	700	600	600	500	400	300	100	0
2400	1100	1000	900	800	700	600	400	300	100	0
2200	1300	1200	1000	900	800	600	400	300	0	0
2000	1400	1300	1100	900	800	600	400	0	0	0
1800	1500	1400	1100	900	800	600	0	0	0	0
1600	1500	1400	1100	900	800	500	0	0	0	0
1400	1500	1400	1100	900	800	0	0	0	0	0
1200	1500	1400	1100	900	700	0	0	0	0	0
1000	1500	1400	1000	800	0	0	0	0	0	0
800	1500	1300	900	600	0	0	0	0	0	0
600	1400	1300	800	0	0	0	0	0	0	0
400	1400	1200	400	0	0	0	0	0	0	0
200	1200	900	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1100	500	0	0	0	0	0	0	0	0

Εικόνα 3-4. Προέκταση των άκρων πάνω από τα προστατευτικά φράγματα για περιπτώσεις υψηλού κινδύνου [37].

Ακόμα δίνονται αναφορές για την ασφάλεια των άνω άκρων σε περιπτώσεις προέκτασης πάνω από προστατευτικά ασφαλείας είτε και μέσα όταν αφορούν κατασκευές όπως πλέγματα [36].

Part of body	Illustration	Opening	Safety Distance, "S,"		
			Slot	Square	Round
Fingertip		$e \leq 4$	≥ 2	≥ 2	≥ 2
		$4 < e \leq 6$	≥ 10	≥ 5	≥ 5
Finger up to knuckle joint		$6 < e \leq 8$	≥ 20	≥ 15	≥ 5
		$8 < e \leq 10$	≥ 80	≥ 25	≥ 20
Hand		$10 < e \leq 12$	≥ 100	≥ 80	≥ 80
		$12 < e \leq 20$	≥ 120	≥ 120	≥ 120
		$20 < e \leq 30$	$\geq 850^a$	≥ 120	≥ 120
Arm up to junction with shoulder		$30 < e \leq 40$	≥ 850	≥ 200	≥ 120
		$40 < e \leq 120$	≥ 850	≥ 850	≥ 850

Εικόνα 3-5. Προέκταση των άκρων μέσα από ανοίγματα (ισχύει για 14 χρονών και άνω) [37].

3.3 Πρότυπο τύπου B2

Το πρότυπο B2 είναι συμπληρωματικό του B1, με πιο ειδικευμένες απαιτήσεις που σχετίζονται με μηχανισμούς ασφαλείας και προστατευτικά που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές με χρήση μηχανών, σε βιομηχανικές ή μη βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Εστιάζουν σε συγκεκριμένες διατάξεις προστασίας και συστημάτων ελέγχου, καθορίζοντας ποια φυσικά και ηλεκτρονικά μέσα διασφαλίζουν τη προστασία τόσο των εργαζομένων όσο και του εξοπλισμού [34].

3.3.1 EN ISO 14120

Το συγκεκριμένο πρότυπο καθορίζει βασικές αρχές σχεδιασμού και επιλογής προστατευτικών κατασκευών με γνώμονα τη προστασία του ατόμου από κινδύνους που σχετίζονται με τη μηχανή. Προβάλλει τους τύπους των προστατευτικών και βάση αυτού του προτύπου και προτύπων όπως το EN ISO 12100, EN ISO 13855, EN ISO 13857 και άλλων γίνεται η επιλογή του κατάλληλου προστατευτικού για την προβλεπόμενη εργασία. Βάση EN ISO 14120 καθορίζονται γενικές απαιτήσεις που αφορούν την επιλογή του κατάλληλου προστατευτικού έναντι των μηχανικών κινδύνων [38]. Η επιλογή ενός προστατευτικού καθορίζεται από παράγοντες όπως είναι [39] :

- 1) Η πιθανότητα και το μέγεθος ενός πιθανού τραυματισμού.
- 2) Από τη χρήση του μηχανήματος.
- 3) Από τη συμπεριφορά του μηχανήματος που μπορεί να οδηγήσει σε κάποιο ατύχημα.
- 4) Τη συχνότητα που κάποιος έχει πρόσβαση στο χώρο εργασίας.
- 5) Το ενδεχόμενο σε κάποια περίπτωση το προστατευτικό να μην ανταποκριθεί όπως αναμενόταν.

Είναι εξίσου σημαντικό να ληφθούν υπόψη εκτιμήσεις με τους κινδύνους που μπορεί να προκύψουν από το μηχάνημα όπως και με τα άτομα τα οποία θα εκτεθούν στο χώρο που το ίδιο επεκτείνεται. Τα προστατευτικά πρέπει να είναι σταθερά και η αφαίρεση τους πρέπει να γίνεται μόνο με τα απαραίτητα εργαλεία όταν κρίνεται απαραίτητο. Προκειμένου να γίνει η κατάλληλη τοποθέτηση των προστατευτικών στο χώρο εργασίας είναι απαραίτητο να εκτιμηθούν οι ζώνες κινδύνου [39].

3.4 Πρότυπο τύπου C

Είναι βασισμένο στο πρότυπο EN ISO 12100 και αποτελεί πιο αναλυτική συνέχεια των προτύπων A και B. Στο συγκεκριμένο πρότυπο περιλαμβάνονται αναλυτικά απαιτήσεις που αφορούν την ασφάλεια μηχανών ή ομάδες μηχανών. Στοχεύει στην υλοποίηση στόχων παρά στο σχεδιασμό των περιορισμών των κινδύνων που συναντάμε στα προηγούμενα πρότυπα [33]. Γενικά ο τύπος EN ISO 10218, αποτελεί κατηγορία τύπου C και έχει δημιουργηθεί για να περιγράφονται αναλυτικά οι κίνδυνοι που μπορούν να εκδηλώσουν τα βιομηχανικά ρομπότ συγκριτικά με τις υπόλοιπες διατάξεις τύπου A και B όσο αφορά τα πρότυπα των μηχανών.

Οι κίνδυνοι που υποδεικνύονται σχετίζονται με το τύπο του ρομπότ, τη χρήση του, το προγραμματισμό του, τη συντήρηση του, τα συστήματα ελέγχου του(πχ διακόπτες έκτακτης ανάγκης) τους περιορισμούς των κινήσεων, δηλαδή τη ταχύτητα περιστροφής και κίνησης του ρομπότ και τέλος τα συστήματα ανίχνευσης και αποτροπής σύγκρουσης σε περίπτωση που εμφανιστεί κάποιο φυσικό εμπόδιο. Ο σωστός σχεδιασμός και η ασφαλή λειτουργία διασφαλίζουν την αποδοτικότητα και την ελαχιστοποίηση των κινδύνων [40].

3.4.1 EN ISO 10218-1

Δεν περιλαμβάνει μέτρα που σχετίζονται με το θόρυβο, τη χρήση ρομποτικού συστήματος εκτός βιομηχανικού χώρου και πρότυπα που σχετίζονται με τη συνεργατικότητα ρομποτικών συστημάτων. Σκοπεύει στην ενσωμάτωση συστημάτων ασφαλείας τα οποία αποτρέπουν πιθανούς κινδύνους και αντιμετωπίζει τα ρομποτικά συστήματα ως μεμονωμένα και ημιτελή συστήματα. Θέτει τις προδιαγραφές ασφαλείας που πρέπει να τηρούνται όσο αφορά τον έλεγχο και την διαχείριση πιθανών κινδύνων. Το ρομπότ είναι απαραίτητο να διαθέτει περιορισμούς κινήσεων που αποτρέπουν την υπέρβαση των επιτρεπόμενων ταχυτήτων και περιορίζουν μία πιθανή ανεξέλεγκτη πορεία. Διασφαλίζουν ότι το ρομποτικό σύστημα είναι εξοπλισμένο με πολλαπλά επίπεδα ασφάλειας όπως είναι οι διακόπτες έκτακτης ανάγκης, ανιχνευτές που προειδοποιούν σε περίπτωση βλάβης και μηχανισμούς ασφαλής χειροκίνητης λειτουργίας σε περίπτωση που γίνεται κάποια ρύθμιση ή συντήρηση. Γενικές απαιτήσεις σχετίζονται επίσης με [40]:

- Εξαρτήματα μετάδοσης ισχύος.
- Απώλεια ή αλλαγή στη παροχή ενέργειας.
- Πηγές που δίνουν ενέργεια στο σύστημα.
- Αποθηκευμένη ενέργεια.
- Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα.
- Ηλεκτρολογικό εξοπλισμό.
- Προστασία από ακούσια λειτουργία.
- Λογισμικό συστήματος.

3.4.2 EN ISO 10218-2

Σε αντίθεση με το πρότυπο EN ISO 10218-1 καθορίζει τις απαιτήσεις ασφαλείας για τη ρύθμιση, εγκατάσταση και ενσωμάτωση βιομηχανικών ρομπότ σε αυτοματοποιημένα συστήματα παραγωγής. Αφορά δηλαδή τη συνολική εγκατάσταση του σε κάποια ρομποτική κυψέλη και το περιβάλλον λειτουργίας του και όχι την ασφάλεια του ρομπότ μεμονωμένα. Εξασφαλίζει τη σωστή σχεδίαση, εγκατάσταση και προγραμματισμό του χώρου που λειτουργεί το ρομπότ σε σχέση με το περιβάλλον που εγκαθίσταται και καλύπτει απαιτήσεις για περιμετρικά προστατευτικά μέτρα, διαδικασίες για δοκιμές ασφαλείας και συντήρησης και περιορισμού πρόσβασης σε επικίνδυνες ζώνες.

Τα όρια ασφαλείας και τα προστατευτικά πλέγματα παρέχουν περιορισμό των κινδύνων διαχωρίζοντας τη ρομποτική κυψέλη από τον υπόλοιπο χώρο εργασίας συνδυάζοντας παράλληλα επαρκή ορατότητα και έλεγχο της λειτουργίας της εργασίας. Γίνεται επίσης χρήση αισθητήρων ασφαλείας, ώστε να σταματάει η διεργασία σε περίπτωση κάποιας απρόβλεπτης εισόδου στη κυψέλη ενώ ακόμα υπάρχει συμμόρφωση όσον αφορά τη συντήρηση με βάση το πρότυπο EN ISO 10218-1. Παρέχονται ακόμα οδηγίες που σχετίζονται με άλλα συστήματα όπως είναι οι ταινιόδρομοι για το συγχρονισμό των κινήσεων ώστε να αποφεύγονται τυχόν συγκρούσεις και να εφαρμόζονται πρωτόκολλα ασφαλείας που σχετίζονται με την ασφαλή λειτουργία με άλλα συστήματα. Οι αποστάσεις των προστατευτικών καθορίζονται με βάση το πρότυπο EN ISO 13855 [41].

Κεφάλαιο 4

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΡΟΜΠΟΤ

Μέσα στα πλαίσια της 4^{ης} Βιομηχανικής επανάστασης, η απόδοση των ρομποτικών συστημάτων δεν αξιολογείται μόνο με βάση τη λειτουργικότητα τους, αλλά ως ένα ευρύ φάσμα εννοιών το οποίο περιλαμβάνει την ενεργειακή κατανάλωση και βιωσιμότητα αυτών των συστημάτων [42], [43]. Οι στρατηγικές πρόβλεψης και βελτιστοποίησης όσο αφορά την κατανάλωση ενέργειας των βιομηχανικών ρομπότ συνήθως δεν είναι ιδιαίτερα εύχρηστες και ακριβείς καθώς εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους και ευαισθησίες που μπορεί να σχετίζονται με το εργοστασιακό περιβάλλον [43]. Η ενεργειακή κατανάλωση των βιομηχανικών ρομπότ αναδεικνύεται ως ένας κρίσιμος παράγοντας που μπορεί να αποφέρει σημαντικά οφέλη σε μία βιομηχανία, όπως η μείωση του λειτουργικού κόστους, η απόδοση και η διάρκεια ζωής του ρομπότ. Με το περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης περιορίζονται εξίσου και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Οι παράγοντες που εξαρτάται η ενεργειακή κατανάλωση δεν σχετίζονται μόνο με τα μηχανικά εξαρτήματα, αλλά και το τρόπο με τον οποίο κινείται και αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον του το ρομπότ. *Παράγοντες όπως ο κινητήρας, το βάρος και το μέγεθος του ρομποτικού βραχίονα, η συντήρηση του, ο σχεδιασμός του, οι συνθήκες εργασίας του, οι κινήσεις του και η θερμοκρασία που αναπτύσσει κατά τη λειτουργία του* είναι μερικοί από αυτούς. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω κριτήρια, μια βιομηχανία μπορεί να εστιάζει στη στρατηγική οργάνωση για τη διαχείριση της βιομηχανίας, συνυπολογίζοντας τόσο το ενεργειακό όφελος όσο και την αποδοτικότητα της [44].

4.1 Κριτήρια επιλογής βιομηχανικού ρομπότ

Όταν μία βιομηχανία αναζητάει ρομπότ για μία συγκεκριμένη διεργασία, είναι σημαντικό να γίνεται μία μεθοδική ανάλυση με άξονα τις ανάγκες και τους στόχους της. Για την εξασφάλιση και τη ρύθμιση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια μίας συγκεκριμένης διεργασίας κομβικό ρόλο έχει η επιλογή του κατάλληλου βιομηχανικού ρομπότ. Μία σειρά λειτουργικών και τεχνικών χαρακτηριστικών καθορίζουν την αποδοτικότητα της διεργασίας. Οι κύριοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή ενός βιομηχανικού ρομπότ είναι οι εξής [44]:

1. **Ικανότητα ανύψωσης φορτίου:** Η επιλογή ενός ρομπότ το οποίο μπορεί να διαχειρίζεται περισσότερο βάρος από ότι είναι αναγκαίο αυξάνει τη κατανάλωση ενέργειας. Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα, όταν γίνεται η επιλογή ενός ρομπότ το

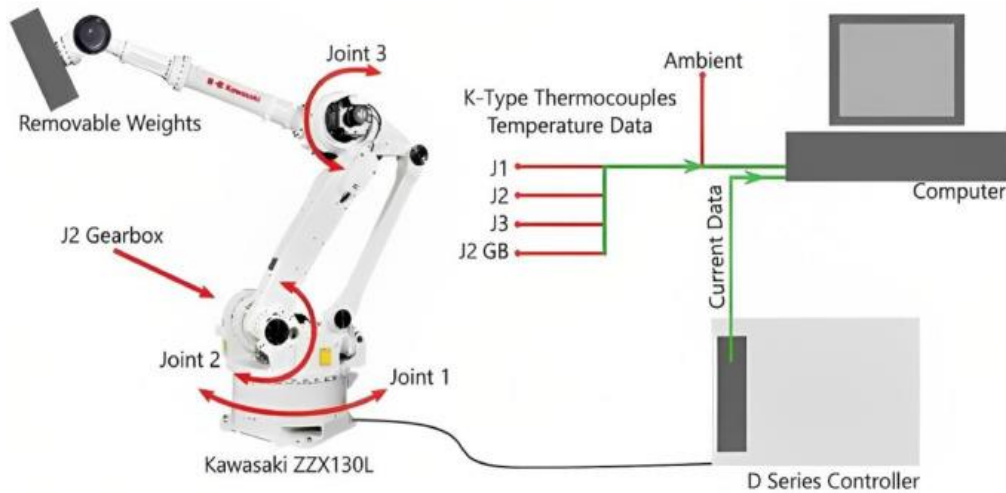
οποίο έχει μικρότερες δυνατότητες από τις αναγκαίες και αναγκάζεται να λειτουργεί υπό πίεση όταν διαχειρίζεται μεγαλύτερα φορτία.

2. **Το βάρος του ρομπότ:** Το βάρος του ρομπότ επηρεάζει σημαντικά τη κατανάλωση της ενέργειας, καθώς για τη κίνηση των μελών του βραχίονα απαιτείται περισσότερη ενέργεια.
3. **Η εμβέλεια του ρομποτικού βραχίονα:** Όταν η εμβέλεια του ρομποτικού βραχίονα είναι μεγαλύτερη από την αναγκαία, λόγω του επιπρόσθετου όγκου και βάρους αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας. Το εύρος του ρομπότ είναι απαραίτητο να προσαρμόζεται στις ανάγκες της εργασίας προκειμένου να αποφεύγονται οι περιττές κινήσεις.
4. **Η ταχύτητα του ρομποτικού βραχίονα:** Η σωστή ρύθμιση της ταχύτητας είναι αναγκαία, καθώς όταν το ρομπότ λειτουργεί σε μεγάλες ταχύτητες αυξάνεται η κατανάλωση της ενέργειας, ενώ όταν λειτουργεί σε χαμηλές ταχύτητες αυξάνονται οι κύκλοι εργασίας άρα και ο συνολικός λειτουργικός χρόνος.
5. **Τα χαρακτηριστικά της ενεργειακής απόδοσης:** Ρομπότ σχεδιασμένα με αποδοτικά χαρακτηριστικά που αφορούν την ενέργεια είναι προτιμότερα. Η *αναγεννητική πέδηση (regenerative braking)*, η *ανάκτηση ενέργειας (energy recovery)* και τα ρουλεμάν χαμηλής τριβής, αποτελούν χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας.
6. **Η συντήρηση:** Αποτελεί εξίσου σημαντικό παράγοντα, καθώς μέσω αυτής μειώνονται οι τριβές και οι απώλειες. Ένα εύκολα συντηρούμενο ρομπότ, μειώνει το κόστος και το χρόνο επισκευών και συμβάλει στην ενεργειακή αποδοτικότητα.
7. **Τα χαρακτηριστικά ανάλογα με την εφαρμογή:** Η ακρίβεια σε μία ρομποτική διεργασία ενισχύει την αποδοτικότητα. Η συμβολή συστημάτων, όπως είναι οι κάμερες και προηγμένοι αισθητήρες προσθέτουν ακρίβεια στις κινήσεις του ρομπότ αποτρέποντας το από περιττές κινήσεις.
8. **Η ευελιξία:** Μπορεί να συμβάλει μακροπρόθεσμα στην εξοικονόμηση ενέργειας. Αναφέρεται στην επιλογή ενός ρομπότ το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικές διεργασίες εξίσου αποτελεσματικά, μειώνοντας την ανάγκη αγοράς επιπρόσθετου εξοπλισμού.
9. **Η μείωση της αδράνειας της κίνησης των μελών του ρομποτικού βραχίονα:** Κατά την εναλλαγή των κινήσεων του ρομπότ μπορεί να παρατηρηθούν μικρές αδράνειας οι οποίες αυξάνουν την ενεργειακή κατανάλωση. Για την αποτροπή των μεγάλων διαστημάτων αδράνειας συμβάλει σημαντικά είτε η χρήση υλικών και συστημάτων χαμηλού βάρους είτε η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των εξαρτημάτων του ρομπότ.

4.3 Ενεργειακή κατανάλωση κατά τη φάση λειτουργίας

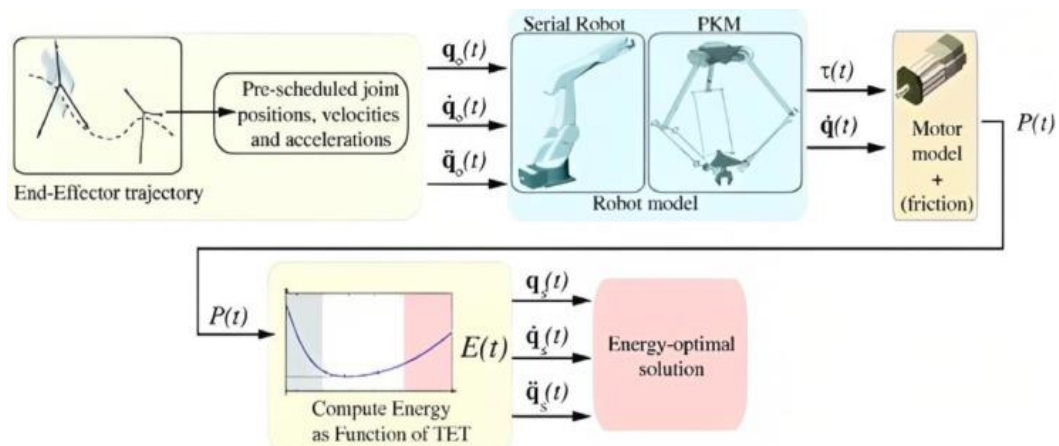
Κατά την εγκατάσταση ενός βιομηχανικού ρομπότ σε μία βιομηχανία είναι απαραίτητη η έρευνα που αφορά τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης του ρομπότ κατά τη λειτουργία του. Κατά την έρευνα αυτή πραγματοποιείται μελέτη που αφορά το σχεδιασμό της τροχιάς και των κινήσεων του ρομποτικού βραχίονα. Σε πρώτη φάση, γίνεται καταμέτρηση της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω αισθητήρων και μετρητών προκειμένου να γίνει μία αρχική εκτίμηση. Αφού συγκεντρωθούν οι μετρήσεις, τα δεδομένα αναλύονται με σκοπό να

εντοπισθούν και να εκτιμηθούν βελτιστοποιήσεις των κινήσεων του ρομπότ σε συγκεκριμένες στιγμές κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του. Ο περιορισμός περιττών κινήσεων, απότομων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στο περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας. Ο σχεδιασμός ομαλών και αποτελεσματικών κινήσεων και η βελτιστοποίηση του αλγόριθμου διαδρομών του ρομπότ συνίσταται για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης [44].



Εικόνα 4-1. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση θερμοκρασιών (αρθρώσεις 1-3, κιβώτιο ταχυτήτων άρθρωσης 2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος) και τη λήψη δεδομένων ρεύματος του κινητήρα από τον ελεγκτή του βιομηχανικού ρομπότ. [44].

Για τη μοντελοποίηση και ανάλυση συμπεριφορών των κινήσεων ενός ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν εργαλεία προσομοίωσης. Τα εργαλεία προσομοίωσης συμβάλλουν στον εντοπισμό διαστημάτων που απαιτείται αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και καθοδηγούν σε βελτιστοποιήσεις. Εξίσου σημαντικά εργαλεία είναι η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και η μηχανική μάθηση (Machine learning), όπου μέσω αυτών είναι δυνατή η κατανόηση συμπεριφορών που οδηγούν σε ενεργειακές υπερβολές. Ο αποτελεσματικός προγραμματισμός και η βελτιστοποίηση της πορείας και της ταχύτητας κίνησης του ρομπότ βοηθάει εξίσου στην ελάττωση των φθορών του ρομπότ και στη μείωση του κόστους συντήρησης [44].



Εικόνα 4-2. Μέτρηση της κατανάλωσης ενέργειας των βιομηχανικών ρομπότ [44].

4.3.1 Ενεργειακή κατανάλωση των κινητήρων

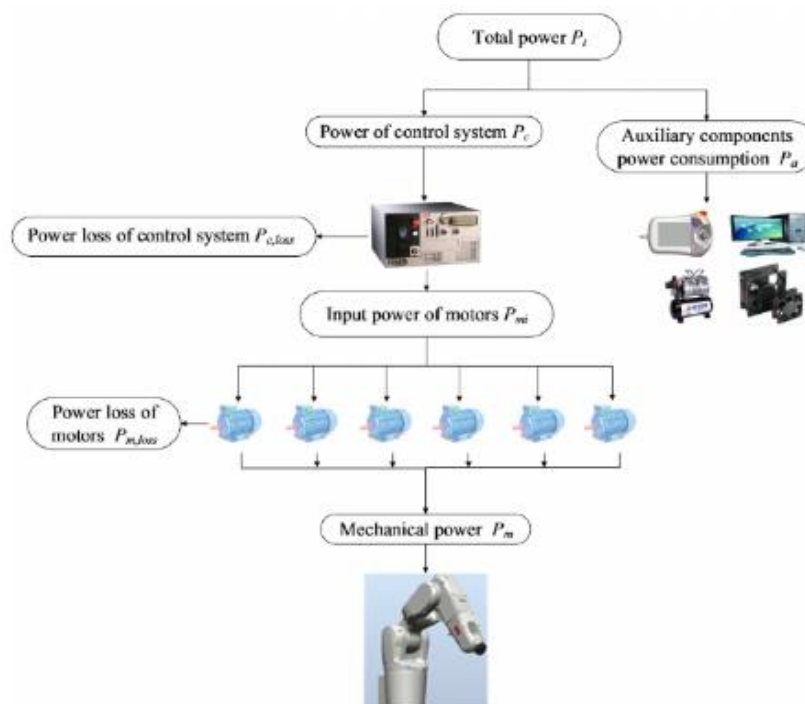
Τα βιομηχανικά ρομπότ καταναλώνουν κυρίως εναλλασσόμενο ρεύμα. Η συνολική ισχύς (P_t) διακρίνεται από το σύστημα ελέγχου (P_c) και από τα βοηθητικά εξαρτήματα (P_a). Στα βοηθητικά εξαρτήματα περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων συστήματα όπως το χειριστήριο διδασκαλίας, ο αεροσυμπιεστής για το εργαλείο αρπάγης, οι ανεμιστήρες για τη ψύξη του ελεγκτή και ο υπολογιστής που μπορεί να χρησιμοποιείται για την αλληλεπίδραση με το σύστημα ελέγχου. Η ισχύς που καταναλώνεται από αυτά τα βοηθητικά εξαρτήματα είναι γενικά σταθερή. Η ισχύς που τροφοδοτείται στο σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει και τις απώλειες ($P_{c,loss}$) (την ενέργεια που καταναλώνεται από τους μετατροπείς εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος κτλ.) καθώς και την ισχύ που τροφοδοτείται στους κινητήρες του ρομπότ (P_{mi}). Η ισχύς στους κινητήρες των ρομπότ (P_{mi}) χωρίζεται σε δύο μέρη: το πρώτο μέρος χρησιμοποιείται για τη κίνηση του κινητήρα (P_m), ενώ το δεύτερο αντιπροσωπεύει τις απώλειες ισχύος στους ίδιους τους κινητήρες ($P_{m,loss}$). [45].

Κατά κύριο λόγο οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στους βιομηχανικούς ρομποτικούς βραχίονες είναι μόνιμου μαγνήτη με απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 83% και 92%. Στη παρακάτω εξίσωση διακρίνονται οι απώλειες ισχύος στις οποίες περιλαμβάνονται οι απώλειες χαλκού (P_{copper}), οι απώλειες σιδήρου (P_{Fe}), οι μηχανικές απώλειες (P_F) και οι διάχυτες απώλειες (P_{stray}) [45]:

$$P_{m,loss} = P_{Fe} + P_{Copper} + P_F + P_{Stray} \text{ όπου:}$$

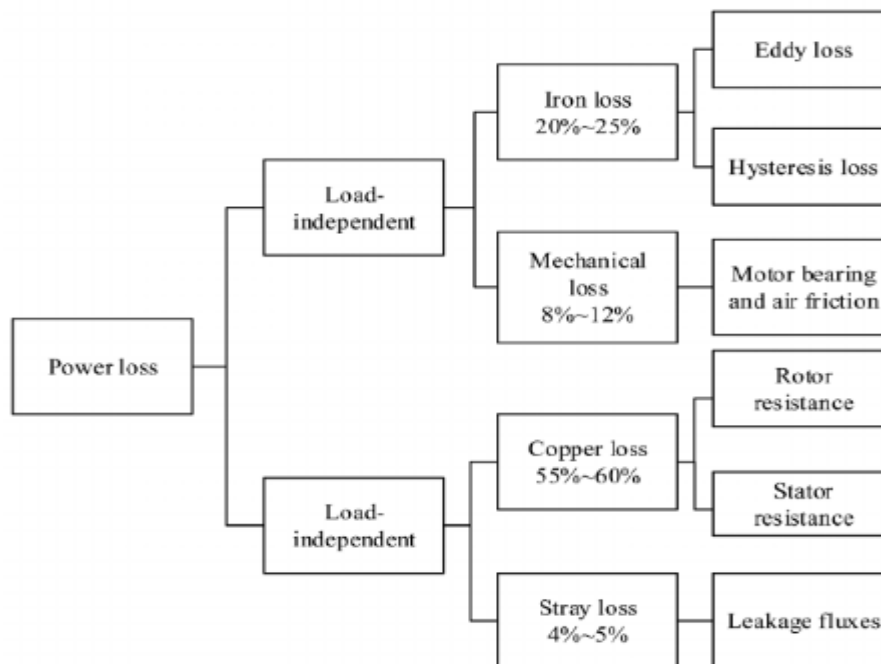
$P_{m,loss}$: η συνολική απώλεια ισχύος του κινητήρα.

Μια σχηματική απεικόνιση των παραπάνω δίνεται στην Εικόνα 4-3.



Εικόνα 4-3. Ροή ενέργειας βιομηχανικού ρομπότ [45].

Οι απώλειες σιδήρου και οι μηχανικές απώλειες τείνουν να είναι σταθερές και δεν εξαρτώνται από το φορτίο του ρομποτικού βραχίονα. Καθορίζονται από τα υλικά, τη κατασκευή και δομή του κινητήρα, τη τάση εισόδου και από άλλους παράγοντες. Όσο αφορά τις απώλειες σιδήρου προκαλούνται από επαγωγικά ρεύματα και από την υστέρηση στο στάτορα του κινητήρα, ενώ οι μηχανικές απώλειες προκαλούνται από τις τριβές του ρουλεμάν στο κινητήρα και από τη τριβή που προκαλεί ο αέρας. Οι απώλειες χαλκού και οι διάχυτες απώλειες οφείλονται στο μέγεθος του φορτίου που μεταφέρει το ρομπότ. Αυτή η απώλεια μετατρέπεται σε θερμότητα κατά τη λειτουργία. Τέλος, οι διάχυτες απώλειες προκαλούνται σε διαρροές μέσα στην αντίσταση του στάτορα [45] (Εικόνα 4-4).



Εικόνα 4-4. Απώλειες ισχύος του κινητήρα [45].

4.3.2 Μέθοδοι βελτιστοποίησης

Για την επίτευξη της βελτιστοποίησης την ενεργειακής κατανάλωσης υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι οι οποίοι μπορούν να συμβάλλουν σε αυτό. Μερικοί εξ αυτών είναι [44]:

1. Ο περιορισμός των περιττών κινήσεων: Για το περιορισμό τους συνίσταται η ελαχιστοποίηση του αριθμού που αλλάζει κατεύθυνση ή σταματά κατά τη διάρκεια της κίνησης του. Εξίσου σημαντικό είναι και η μείωση της συνολικής απόστασης που διανύει ο ρομποτικός βραχίονας.
2. Η βελτιστοποίηση της τροχιάς: Μπορεί να επιτευχθεί μέσω εργαλείων λογισμικού ή μέσω προγραμματισμού στοχεύοντας στη εύρεση της πιο αποτελεσματικής διαδρομής από το ένα σημείο στο άλλο χωρίς να διαγράφονται περιττές κινήσεις.
3. Η βελτιστοποίηση της δύναμης σύσφιξης: Όταν η δύναμη σύσφιξης είναι μεγάλη εξίσου μεγάλη είναι και η κατανάλωση της ισχύος. Με τη βοήθεια αισθητήρων και άλλων μηχανισμών μπορεί να ρυθμιστεί η εφαρμογή της κατάλληλης δύναμης σύσφιξης στο ελάχιστο αναγκαίο επίπεδο διασφαλίζοντας το περιορισμό της ενεργειακής δαπάνης.

4. Η βελτιστοποίηση της ροπής: Η προσαρμογή της διαφέρει από το τύπο εργασίας που επρόκειτο να πραγματοποιηθεί. Η επιλογή μεγαλύτερου κινητήρα από το αναγκαίο μπορεί να οδηγήσει σε άσκοπη ενεργειακή κατανάλωση παράγοντας περισσότερη ροπή από την αναγκαία. Κάθε εργασία απαιτεί την απαραίτητη εκτίμηση για την επιλογή του κινητήρα και τα επίπεδα ισχύος και ροπής.
5. Η βελτιστοποίηση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης: Η προσαρμογή των κινήσεων του ρομπότ στις απαραίτητες ταχύτητες συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης περιορίζοντας τις απότομες εναλλαγές κατευθύνσεων και τις μικρές διακοπές κινήσεων από σημείο σε σημείο.
6. Ο περιορισμός των χρονικών διαστημάτων που αδρανεί το ρομπότ. Βελτιστοποιώντας το προγραμματισμό, το ρομπότ δεν χρειάζεται να αναμένει είτε για οδηγίες είτε για τεμάχια που επρόκειτο να επέμβει, περιορίζοντας τον άσκοπο χρόνο λειτουργίας του. Η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί και με τη προσωρινή απενεργοποίηση του ρομποτικού συστήματος σε μικρά κενά αδράνειας.
7. Η χρήση αισθητήρων και συστημάτων ανάδρασης (feedback systems). Η χρήση τους μπορεί να βοηθήσει το ρομπότ στη προσαρμογή των κινήσεων του στις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον του. Αισθητήρες δύναμης συμβάλλουν στην εφαρμογή της σωστής ποσότητας δύναμης που χρειάζεται η κάθε κίνηση μειώνοντας την ενεργειακή δαπάνη.

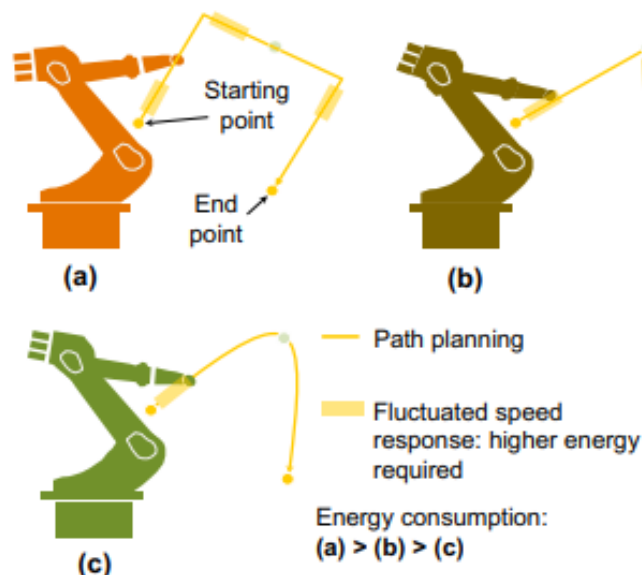
Οι R. Ruzarovsky, T. Horak και R. Bocak [46] σε έρευνα τους μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio, διαπίστωσαν ότι η στρατηγική τοποθέτηση της βάσης του ρομπότ στη κατάλληλη θέση μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τόσο την βελτιστοποίηση της χρονικής διεργασίας όσο και την ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα, κατέληξαν ότι η κατάλληλη περιοχή εργασίας του ρομπότ είναι κοντά στο 50% της μέγιστης εμβέλειας του.

Οι A. Mohammeda, B. Schmidt, L. Wang και L. Gao [47] με τη χρήση Matlab ανέπτυξαν μία μέθοδο ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας βάση των κινήσεων του ρομπότ. Διαπίστωσαν ότι εξαρτάται από τη τοποθεσία όπου ορίζεται το μονοπάτι που διαγράφει το ρομπότ. Η βέλτιστη τοποθεσία εξαρτάται από το δυναμικό μοντέλο του κάθε ρομπότ το οποίο επηρεάζεται από τις τεχνικές προδιαγραφές και τις απαιτήσεις της εργασίας.

Οι A. Liu, H. Liu, B. Yao, W. Xu και M. Yang [45] σε έρευνα τους μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio διαπίστωσαν ότι εστιάζοντας στη μοντελοποίηση του κινητήρα μπορεί να βελτιστοποιηθεί η ενεργειακή απόδοση χωρίς να γίνουν φυσικές αλλαγές στο ρομπότ. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους έδειξαν ότι η ταχύτητα του ρομπότ δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ υψηλή ούτε πολύ χαμηλή καθώς έτσι αυξάνεται και η ενεργειακή κατανάλωση. Ωστόσο, η παραγωγικότητα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ώστε να μελετηθεί ο βέλτιστος συμβιβασμός των δεδομένων.

Βάση της μελέτης των Paryanto, M. Brossog, M. Bornschlegl και J. Franke [48] αναπτύχθηκε ένα μοντέλο λειτουργίας που προβλέπει τη δυναμική συμπεριφορά του ρομπότ και τη κατανάλωση ενέργειας. Προέκυψαν από μετρήσεις και από προσεγγίσεις μοντελοποίησης, συγκεκριμένες στρατηγικές για την ενίσχυση της ενεργειακής αποδοτικότητας των βιομηχανικών ρομπότ. Το ωφέλιμο φορτίο μεταβάλλει τη ροπή του άξονα του ρομπότ για αυτό το λόγο συνίσταται η μείωση του βάρους των εργαλείων που

χρησιμοποιούνται. Η χρήση υλικών χαμηλού βάρους για τα εξαρτήματα του συστήματος εργαλείων συνεισφέρει σε αυτό. Επίσης, σημαντικό ρόλο έχει η εξομάλυνση των κινήσεων καθώς κατά τις επιταχύνσεις απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς, ενώ προτείνεται η ταχύτητα του ρομπότ κυμαίνεται σε μεσαία επίπεδα βάση των δυνατοτήτων του.



Εικόνα 4-5. Εξομάλυνση των κινήσεων του ρομποτικού βραχίονα για τη μείωση της ισχύος κατά την έναρξη [48].

4.4 Συντήρηση Βιομηχανικού ρομπότ

Η διάρκεια ζωής ενός βιομηχανικού ρομπότ εξαρτάται συνήθως από τις συνθήκες εργασίας του και από τις συνθήκες συντήρησης του. Συνήθως, η μέση διάρκεια ζωής των μηχανισμών ενός βιομηχανικού ρομπότ υπολογίζεται στα 10 με 20 χρόνια ανάλογα τη βιομηχανική του χρήση. Όμως, λόγω των εξελίξεων του λογισμικού και των εξαρτημάτων ο μέσος όρος ζωής ενός βιομηχανικού ρομπότ εκτιμάται στα 6 με 7 χρόνια. Αυτό οφείλεται στην εξέλιξη της τεχνολογίας χάρις την οποία παλαιότεροι ρομποτικοί ελεγκτές δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις νέες μεθόδους αυτοματοποίησης της παραγωγής [49].

Ένα βιομηχανικό ρομπότ είναι ευάλωτο σε παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τόσο την απόδοση του όσο και το κύκλο ζωής του. Για τη διατήρηση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας των βιομηχανικών ρομποτικών συστημάτων είναι απαραίτητη η σωστή και προγραμματισμένη συντήρηση. Κάθε βιομηχανία ακολουθεί τη δική της μέθοδο με την οποία συντηρεί τα μηχανήματα της. Τα βιομηχανικά ρομπότ είναι πολύπλοκα συστήματα και διαθέτουν εξαρτήματα μεγάλης αξίας τα οποία μπορεί να απαιτούν μεγάλα ποσά για την επιδιόρθωση τους σε περίπτωση βλάβης και για αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντική η παρακολούθηση αυτών των συστημάτων [50]. Στο βιομηχανικό χώρο η συντήρηση αποτελεί σημαντικό κομμάτι καθώς αποτελεί δαπανηρή διαδικασία, αυξάνοντας τα λειτουργικά έξοδα μίας επιχείρησης. Η αναζήτηση και η έρευνα στο τομέα της συντήρησης αλλάζει συνεχώς προσέγγιση καθώς βασίζεται σε πολλούς παράγοντες οι οποίοι χρειάζονται την ανάλογη προσοχή [51]. Η πιο παλιά μέθοδος συντήρησης είναι η διορθωτική συντήρηση (corrective maintenance). Η λογική της βασίζεται στην επιδιόρθωση ή αντικατάσταση ενός ή πολλών

εξαρτημάτων μόνο όταν προκύψει βλάβη και το σύστημα δεν μπορεί να λειτουργήσει ομαλά. Όμως, επειδή οι απροσδόκητες βλάβες συνήθως απαιτούν και μεγάλο κόστος επισκευής η διορθωτική συντήρηση εξελίχθηκε στη προληπτική [51].

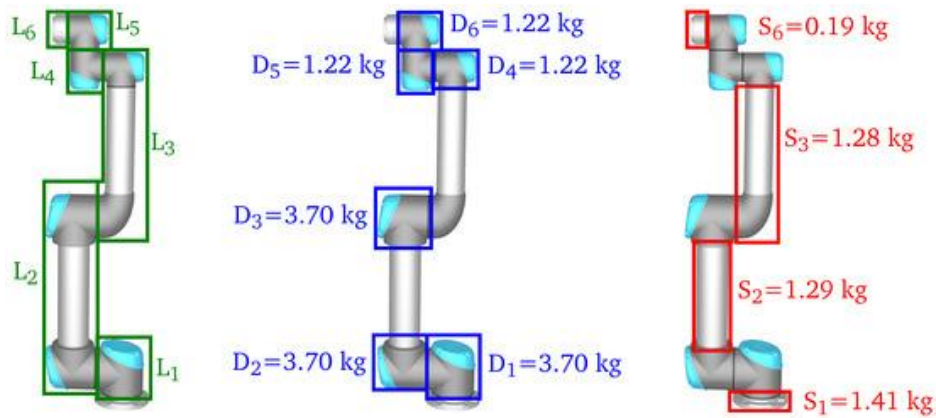
4.4.1 Λειτουργίες και είδη συντήρησης

Η προληπτική συντήρηση (preventive maintenance) παρόλο που αποτρέπει αστοχίες, απαιτεί μελέτη για να προσδιοριστεί η χρονική συχνότητα που χρειάζεται για να εκτελείται. Πολλές φορές συμβάλει στην αύξηση των εξόδων μίας βιομηχανίας και στη μείωση του κύκλου ζωής των βιομηχανικών ρομπότ λόγω της άσκοπης λειτουργίας του ρομπότ που απαιτείται για την ολοκλήρωση της μελέτης. Μία μέθοδος προληπτικού ελέγχου είναι η λειτουργία του ρομπότ στα όρια του παρακολουθώντας την κατανάλωση ενέργειας με σκοπό την επιδιόρθωση των βλαβών μόλις προκύψουν. Ωστόσο, αν ο έλεγχος είναι αποτελεσματικός μπορεί να προβλέψει έγκαιρα μία ενδεχόμενη αστοχία ακριβώς πριν αυτή προκύψει. Βασικός παράγοντας για την επιτυχημένη παρακολούθηση του συστήματος είναι η ενίσχυση του λειτουργικού συστήματος με συστήματα παρακολούθησης τα οποία θέτουν όρια. Όταν αυτά τα όρια υπερβαίνονται εντοπίζουν και προλαμβάνουν σφάλματα ενώ συμβάλλουν στον εντοπισμό των εξαρτημάτων που χρειάζεται να αντικατασταθούν [50].

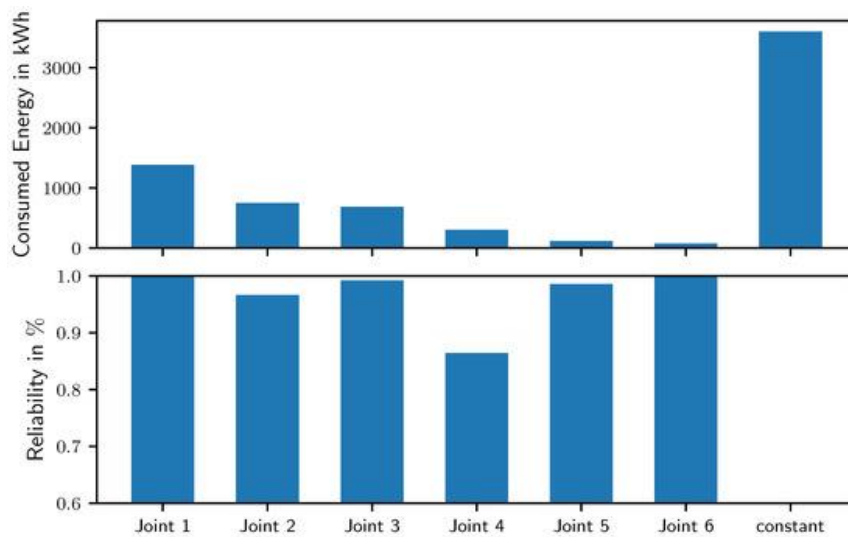
Η ανάπτυξη του διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things) και οι τεχνολογικές πρόοδοι στη 4^η βιομηχανική επανάσταση (Industry 4.0) ανέδειξαν προσεγγίσεις οι οποίες βασίζονται σε συνθήκες. Μία τέτοια προσέγγιση είναι η προγνωστική συντήρηση (predictive maintenance). Ειδικότερα, όσες επιθεωρήσεις πραγματοποιούνταν από τεχνικούς ή μηχανικούς, πλέον πραγματοποιούνται από αισθητήρες και συσκευές οι οποίες είναι σε θέση να επεξεργάζονται σήματα (signals), να μετρούν και να παρακολουθούν δεδομένα θέτοντας όρια. Έτσι, είναι δυνατή εκτίμηση μίας ενδεχόμενης αποτυχίας προγραμματίζοντας ανάλογα και τις απαραίτητες ενέργειες που προβλέπονται [51].

4.4.2 Επιρροή χρονικού κύκλου και βάρους φορτίου

Οι F. Stuhlenmiller, S. Weyand, J. Jungblut, L. Schebek, D. Clever και S. Rinderknecht [52] σε έρευνα τους μέσω μοντέλων προσομοίωσης εκτός από τη πρόβλεψη της ενεργειακής κατανάλωσης έκαναν μία εκτίμηση σε σχέση με τη συντήρηση και το συνολικό κόστος ζωής της εφαρμογής που διαπράττει το ρομπότ. Χρησιμοποιώντας ένα ρομπότ UR5 για μία εργασία διαλογής και τοποθέτησης (pick and place) διαπίστωσαν ότι μετά από 36.000 ώρες συνεχόμενες εργασίας ότι το βάρος του τεμαχίου εργασίας μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία των αρθρώσεων ενός ρομπότ και για αυτό το λόγο προτείνεται είτε η εναλλαγή της τροχιάς που ακολουθεί το ρομπότ είτε η αλλαγή του ρομποτικού βραχίονα. Ακόμα, βάση του βάρους του κάθε συνδέσμου του ρομπότ γίνεται μία εκτίμηση που αφορά την αξιοπιστία των αρθρώσεων και την κατανάλωση ενέργειας τους. Η διάρκεια της κάθε χρονικής εντολής είναι 6 δευτερόλεπτα ενώ το βάρος του τεμαχίου εργασίας είναι 2 κιλά.



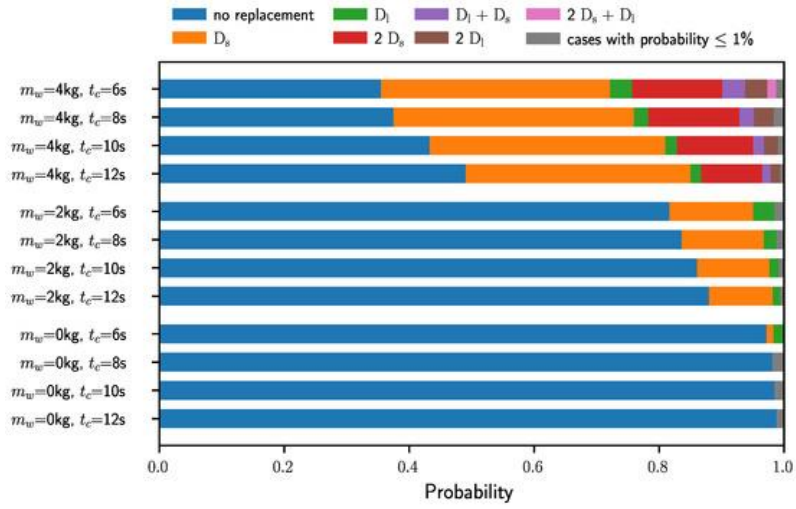
Εικόνα 4-6. Τμήματα και εκτιμώμενο βάρος του ρομπότ UR5 [52].



Εικόνα 4-7. Κατανάλωση ενέργειας και αξιοπιστία κάθε άρθρωσης έπειτα από 36.000 ώρες λειτουργίας [52].

Βάση της αξιοπιστίας της κάθε άρθρωσης και εφαρμόζοντας διορθωτική συντήρηση (corrective maintenance) διαπιστώθηκε ότι με πιθανότητα 81.6% δεν θα χρειαστεί κάποια επισκευή.

Με άξονα το άθροισμα της αξιοπιστίας των αρθρώσεων D4 και D5 πραγματοποιείται μία αντικατάσταση αρθρωτής ενότητας Ds με πιθανότητας 12.3 %. Διατηρώντας τη τροχιά και με εναλλαγή του χρόνου διεργασίας της εντολής και του βάρους του τεμαχίου εργασίας προέκυψαν κάποια αποτελέσματα σχετικά με την πιθανότητα αντικατάστασης των αρθρώσεων του ρομπότ. Βάση του φορτίου και του χρονικού κύκλου της διεργασίας προέκυψαν τα αποτελέσματα που φανερώνονται στην εικόνα 4.4.3. Διαπιστώθηκε ότι με την αύξηση του βάρους του τεμαχίου εργασίας και με την μείωση του χρονικού κύκλου αυξάνεται και η πιθανότητα μίας ενδεχόμενης βλάβης.



Εικόνα 4-8. Πιθανότητα του αριθμού των επισκευών ανάλογα του εξαρτήματος του ρομπότ κατά τη διάρκεια 36.000 ωρών λειτουργίας [52].

Κεφάλαιο 5

Εργαλεία

5.1 ABB RobotStudio

Η ABB (Asea Brown Boveri) είναι μία Σουηδική-Ελβετική πολυεθνική εταιρία με έδρα τη Ζυρίχη της Ελβετίας με σημαντική συνεισφορά στο τομέα της ρομποτικής. Δημιουργήθηκε τη 1^η Ιανουαρίου του 1988 από τη συγχώνευση της Σουηδικής εταιρίας Asea και της ελβετικής BBC (Brown Boveri & Cie). Η ABB δραστηριοποιείται σε πολλούς τομείς που σχετίζονται με τη τεχνολογία και τους αυτοματισμούς, ενώ αποτελεί τη μεγαλύτερη εταιρία κατασκευής δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας στο κόσμο. Όσο αφορά το τομέα της ρομποτικής και του αυτοματισμού η ABB ασχολείται με συστήματα αυτοματισμού τόσο εργοστασίων όσο και μηχανημάτων, μέσα τα οποία προήλθαν από την εταιρία B&R την οποία η ABB απέκτησε το 2017. Με την απόκτηση της B&R, η ABB κατείχε μία γκάμα ρομποτικών σχεδίων και εφαρμογών. Πλέον, η εταιρία έχει εγκαταστήσει περισσότερα από 300.000 ρομπότ ανά το κόσμο παρέχοντας υπηρεσίες για ευέλικτη κατασκευή και έξυπνα μηχανήματα. Η επιχείρηση κατέχει τη 2^η θέση παγκοσμίως και τη 1^η θέση στη ρομποτική, στη ταχέως αναπτυσσόμενη αγορά της Κίνας, όπου η ABB επεκτείνει τη παραγωγή και τη καινοτομία μέσω ενός νέου ρομποτικού εργοστασίου στη Σαγκάη. [53]

Το ABB RobotStudio αποτελεί λογισμικό προγραμματισμού εκτός σύνδεση (offline programming) που αναπτύχθηκε από την ίδια την εταιρία της ABB μέσω του οποίου μπορούν να προσομοιωθούν τα ρομπότ της εταιρίας σε διάφορες εφαρμογές. Τα εικονικά μοντέλα των ρομπότ είναι ενσωματωμένα και λειτουργικά στη βάση δεδομένων της εφαρμογής, ενώ διαθέτουν ένα εικονικό ελεγκτή (virtual controller) ο οποίος είναι πανομοιότυπος με πραγματικό ελεγκτή [54].

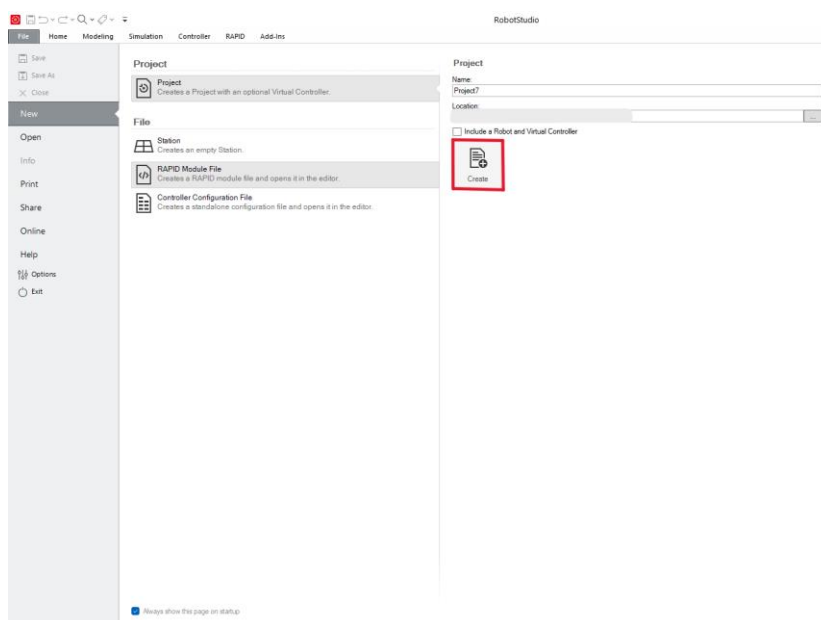
Το ABB Robotstudio επιτρέπει στους χρήστες να προγραμματίζουν κινήσεις και διεργασίες από μία γκάμα ρομπότ της εταιρίας μέσα από ένα εικονικό περιβάλλον και να παρατηρούν τις αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον και την εκτέλεση της εργασίας. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει και να διορθώνει πορείες που πιθανόν να οδηγήσουν σε κάποια σύγκρουση του ρομπότ με κάποιο αντικείμενο στο περιβάλλον εφόσον το λογισμικό διαθέτει ανιχνευτές συγκρούσεων [55]. Ακόμα, έχει τη δυνατότητα να καταγράφει σήματα που προέρχονται από το ρομπότ μέσω του “Signal Analyzer”, όπως για παράδειγμα είναι η ενεργειακή κατανάλωση και η ταχύτητα με την οποία κινείται το ρομπότ, ώστε να μπορεί να βελτιστοποιήσει τη διαδικασία. Μέσω της επεξεργασίας κειμένου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να βλέπει τυχόν σφάλματα και επισημάνσεις. Χρησιμοποιώντας το “RAPID editor path” μπορούν να γίνουν επεμβάσεις μέσω προγραμματισμού. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται από την εταιρία είναι η RAPID [56]. Η εμφάνιση της και η αίσθηση της

είναι παρόμοια με τις περισσότερες γλώσσες προγραμματισμού ST, αλλά πιο πολύ θυμίζει γλώσσα προγραμματισμού C [57].

Το λογισμικό διαθέτει εξαιρετικά ρεαλιστικά γραφικά χρησιμοποιώντας εργαλεία και κινήσεις που παρουσιάζουν με λεπτομέρεια τα οφέλη του συστήματος. Μέσω του ABB Virtual Controller διασφαλίζεται η κάθε διεργασία ότι ανταποκρίνεται σε στη πραγματικότητα, ενώ μπορούν ακόμα να προστεθούν στον εικονικό κόσμο πρότυπα CAD σε διάφορες μορφές. Η προσομοίωση που προσφέρει επιτρέπει τη λεπτομερή αναπαραγωγή της εφαρμογής [56].

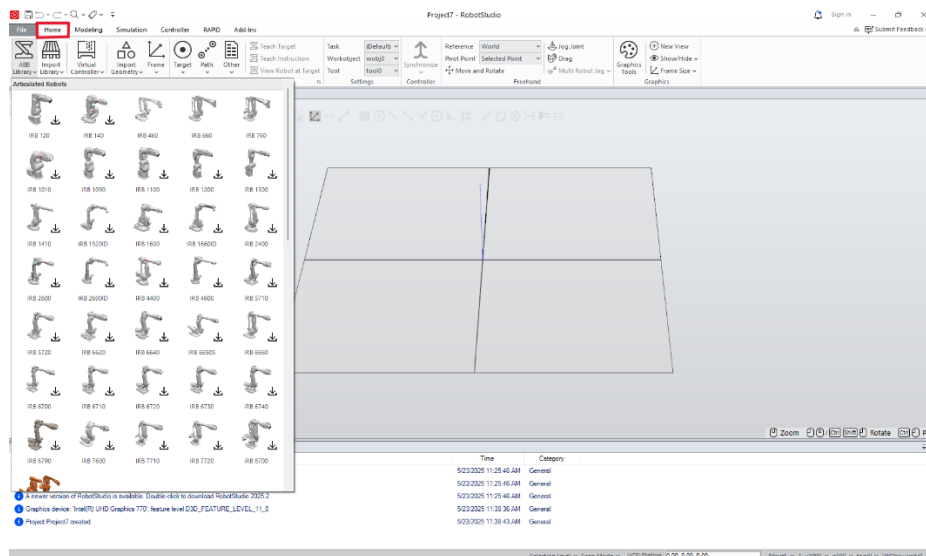
5.1.1 Εισαγωγή στο ABB RobotStudio

Αφού γίνει η εγκατάσταση του ABB RobotStudio, με την είσοδο στο λογισμικό ο χρήστης είναι πλέον σε θέση να δημιουργήσει ένα νέο σταθμό, όπου θα μπορέσει να διατελέσει την εργασία που επιθυμεί. Από την επιλογή “New”, ο χρήστης μπορεί να δώσει το όνομα που επιθυμεί στο σταθμό του και πατώντας την επιλογή “create” έχει πλέον δημιουργήσει ένα νέο κενό σταθμό εργασίας.



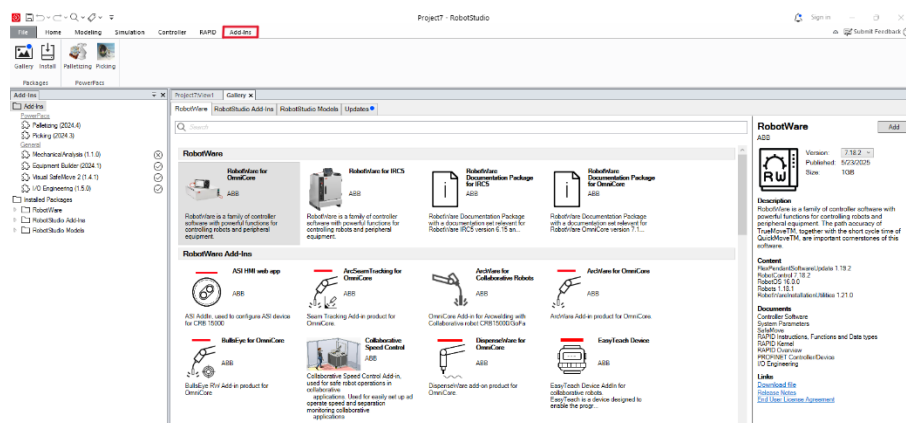
Εικόνα 5-1. Δημιουργία νέου σταθμού μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

Αφού δημιουργηθεί ο σταθμός, επόμενο είναι η εισαγωγή του ρομπότ. Από τη καρτέλα “Home” και την επιλογή “ABB Library” μέσα από μία γκάμα ρομπότ της εταιρίας ABB ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το ρομπότ της επιθυμίας του.



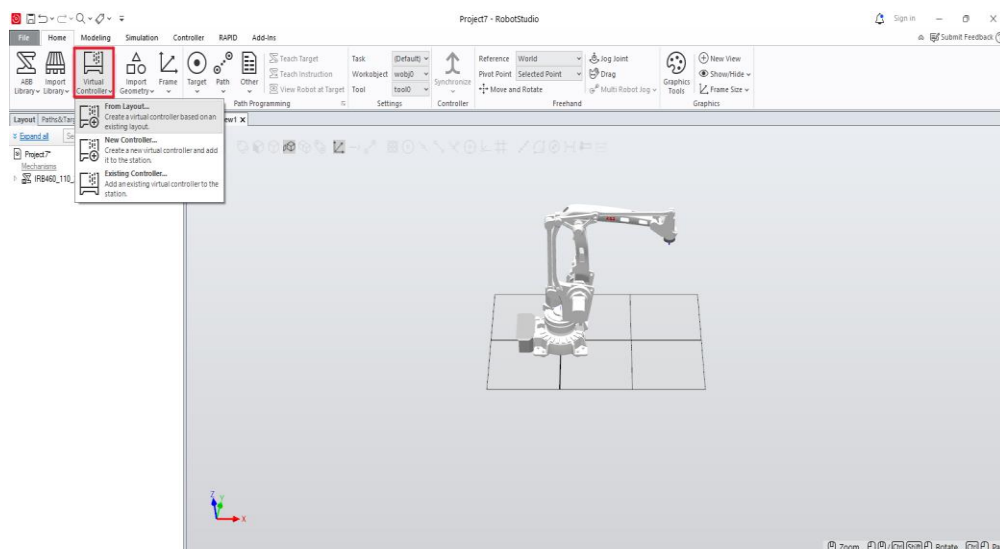
Εικόνα 5-2. Γκάμα ρομποτικών βραχιόνων της εταιρίας ABB μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

Εφόσον επελέγη το κατάλληλο ρομπότ επόμενο βήμα είναι η εγκατάσταση του κατάλληλου ελεγκτή (controller). Από τη καρτέλα “Add-Ins” μέσα από μία γκάμα εργαλείων ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την εγκατάσταση του ελεγκτή και των εργαλείων της επιλογής του.



Εικόνα 5-3. Εικόνα γκάμας εργαλείων για εγκατάσταση μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

Με την εγκατάσταση του κατάλληλου ελεγκτή, προκειμένου να κάνουμε λειτουργικό το ρομπότ, μένει να προσαρμοστεί ο ελεγκτής βάση των αναγκών της διεργασίας που επιθυμεί να υλοποιήσει ο χρήστης. Από τη καρτέλα “Home” και την επιλογή “Virtual Controller”, ο χρήστης μπορεί να συνδέσει το κατάλληλο εικονικό ελεγκτή. Με την επιλογή “From Layout” ο εικονικός ελεγκτής (virtual controller) μπορεί να ρυθμιστεί με βάση τις ανάγκες της διεργασίας. Επιλέγοντας την επιλογή “Finish” ο σταθμός μας είναι έτοιμος για εργασία.



Εικόνα 5-4. Προσαρμογή εικονικού ελεγκτή για το ρομπότ που επελέγη μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

5.1.2 Palletizing PowerPac

Ένα “PowerPac” αποτελεί προσθήκη στο ABB RobotStudio και η χρήση του προορίζεται για συγκεκριμένες εφαρμογές. Το “Palletizing PowerPac” αποτελεί λογισμικό που αφορά εργασίες παλετοποίησης και υποστηρίζει όλα τα ρομπότ παλετοποίησης της εταιρίας, αλλά και διαφορετικούς τύπους εργαλείων αρπάγης. Ο χρήστης μέσω αυτού, μπορεί να λαμβάνει μία έγκυρη και γρήγορη λύση χωρίς να χρειάζεται να γράψει κάποιο κώδικα. Με τις λειτουργίες που παρέχει το λογισμικό, μπορεί να λάβει μία αναλυτική εκτίμηση της συνολικής απόδοσης της διαδικασίας της κυψέλης προτού διαβεί στην αγορά της [58].

5.2 Ρομποτικοί Βραχίονες

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία βραχιόνων με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά. Για τις ανάγκες της εργασίας, επιλέχθηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα ρομποτικών βραχιόνων από τη βιβλιοθήκη των διαθέσιμων ρομπότ. Μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio, δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης τα οποία εμπεριέχουν τους βραχίονες, των οποίων τα βασικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στη συνέχεια.

5.2.1 Ρομποτικός βραχίονας IRB 460

Ο ρομποτικός βραχίονας IRB 460 (Εικόνα 5-5), αποτελεί το ταχύτερο βραχίονα του κόσμου με εξειδίκευση στις εργασίες παλετοποίησης. Με μέγιστη εμβέλεια τα 2,4 μέτρα και δυνατότητα ανύψωσης φορτίου έως και 110 κιλά είναι ικανός να πραγματοποιεί 2.190 κύκλους ανά ώρα με φορτίο 60 κιλών γεγονός που τον κάνει ταχύτερο από τον αμέσως επόμενο ανταγωνιστή του με διαφορά 15%. Μπορεί να διαχειρίζεται παλέτες οι οποίες είναι τοποθετημένες σε 20% μικρότερη απόσταση από ότι άλλα ρομπότ της κατηγορίας του επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας μέχρι και 3%. Πρόκειται για ρομποτικό βραχίονα αποτελούμενο από τέσσερις άξονες που χρησιμοποιεί το λογισμικό ελέγχου κίνησης της ABB (QuickMove και TrueMove) διασφαλίζοντας την ομαλότητα και την ακρίβεια των κινήσεων του κατά τη λειτουργία του και διατηρώντας την αποδοτικότητα του, ακόμα και αν διαχειρίζεται ευαίσθητα φορτία [59].



Εικόνα 5-5. Ρομποτικός βραχίονας IRB 460 [59].

Τόσο η στιβαρότητα του όσο και ο σχεδιασμός του, καθιστούν το κόστος συντήρησης σε χαμηλά πλαίσια και χάρη στην ενσωματωμένη καλωδίωση του ενισχύεται η διάρκεια ζωής του και η μείωση των φθορών του. Το βάρος του είναι 925 κιλά, με τη βάση του να έχει διαστάσεις 1000x720 mm και η ενεργειακή του κατανάλωση εκτιμάται στα 3,67 kW κατά ISO cube [59].

5.2.2 Ρομποτικός βραχίονας IRB 660

Ο ρομποτικός βραχίονας IRB 660 (Εικόνα 5-6) εξειδικεύεται σε εργασίες παλετοποίησης με ικανότητα να διαχειρίζεται φορτία μέχρι 250. Αποτελείται από τέσσερις άξονες και οι δυνατότητες του συνδυαστικά ως προς τη ταχύτητα, την εμβέλεια του και την ικανότητα να ανυψώνει τόσο μεγάλα φορτία είναι από τις καλύτερες στην κατηγορία του. Διατίθεται σε δύο εκδόσεις όπου στη πρώτη μπορεί να διαχειρίζεται φορτία βάρους έως 180 κιλά με υψηλή ταχύτητα, ενώ στη δεύτερη έκδοση μπορεί να διαχειρίζεται φορτία έως 250 κιλά εστιάζοντας στην υψηλή παραγωγικότητα. Η εμβέλεια του φτάνει τα 3,15 μέτρα και μπορεί να εξυπηρετήσει τέσσερις ταινιόδρομους εισόδου, τέσσερις ταινιόδρομους εξόδου, δύο στοίβες παλετών και μία στοίβα διαχωριστικών φύλλων [60].

Χάρη στο σχεδιασμό του και τις προδιαγραφές στεγανότητας IP67, διασφαλίζει την αποδοτικότητα του ακόμα και σε ιδιαίτερης δυσκολίας περιβάλλοντα όσο και για μεγάλα διαστήματα μεταξύ των συντηρήσεων. Η ενεργειακή του κατανάλωση κατά ISO cube είναι 2,7 kW, ενώ κατά κανονικές συνθήκες κίνησης είναι 3,2 kW. Η βάση του έχει διαστάσεις 1136 x 850 mm και το συνολικό βάρος του ρομποτικού βραχίονα είναι 1.650 κιλά [60].



Εικόνα 5-6. Ρομποτικός βραχίονας IRB 660 [60].

5.2.3 Ρομποτικός βραχίονας IRB 760

Ο ρομποτικός βραχίονας IRB 760 (Εικόνα 5-7) είναι ικανός να εργάζεται σε μεγάλες ταχύτητες με βαριά φορτία διασφαλίζοντας την ασφαλή μεταφορά των φορτίων. Αποτελείται από τέσσερις άξονες και είναι ιδανικός για να τοποθετείται σε υπάρχουσες γραμμές παραγωγής. Η εμβέλεια του φτάνει τα 3,2 μέτρα και το συνολικό βάρος που μπορεί να διαχειριστεί φτάνει τα 450 κιλά. Ο συγκεκριμένος βραχίονας είναι ικανός να πραγματοποιεί 880 κύκλους εργασίας ανά ώρα με πλήρες φορτίο. Όπως και ο ρομποτικός βραχίονας IRB 460, χρησιμοποιεί το λογισμικό ελέγχου κίνησης της ABB (QuickMove και TrueMove) διασφαλίζοντας την ομαλότητα και την ακρίβεια των κινήσεων του κατά τη λειτουργία του και διατηρώντας την αποδοτικότητα του, ακόμα και αν διαχειρίζεται ευαίσθητα φορτία. Η κατασκευή του και η ενσωματωμένη καλωδίωση ενισχύουν τη διάρκεια ζωής του ρομπότ και το περιορισμό των φθορών. Η ενεργειακή κατανάλωση κατά τη λειτουργία του είναι 2,75 kW κατά ISO cube. Οι διαστάσεις της βάσης του ρομπότ 1140 x 800 mm και το συνολικό του βάρος είναι 2.310 κιλά [61].



Εικόνα 5-7. Ρομποτικός βραχίονας IRB 760 [61].

5.3 Ρομποτική αρπάγη “FlexGripper-Vacuum”

Το εργαλείο αρπάγης FlexGripper-Vacuum (Εικόνα 5-8) αποτελεί προέκταση των ρομποτικών βραχιόνων IRB 460 και IRB 660 για εργασίες παλετοποίησης. Είναι ιδιαίτερα εύκολη τόσο η εγκατάσταση του όσο και ο προγραμματισμός της. Χρησιμοποιεί αισθητήρες για τις 10 διαφορετικές ζώνες που διαθέτει για να διαχειρίζεται τα φορτία που ανυψώνει, ενώ ακόμα διαθέτει και προαιρετικό εξάρτημα για την αρπαγή παλέτας. Το εργαλείο αρπάγης έχει βάρος 70 κιλά και είναι εξοπλισμένο με ευκάμπτους σωλήνες αέρα και καλώδια σήματος και είναι έτοιμο και λειτουργικό για όποιο ρομποτικό βραχίονα έχει επιλεγθεί. Μπορεί να διαχειριστεί έως και 10 τεμάχια μαζί με μέγιστο βάρος τα 40 κιλά [62].

Τα προϊόντα προς διαχείριση είναι απαραίτητο να έχουν πυκνή και λεία επιφάνεια, ενώ η δομή τους πρέπει να είναι άκαμπτη όπως για παράδειγμα είναι τα χαρτόκουτα. Οι μέγιστες διαστάσεις του προϊόντος πρέπει να είναι 1200 x 500 x 300 mm και οι ελάχιστες 200 x 200 x 10 mm. Σε περίπτωση που επιλεγθεί ο εξοπλισμός για τη διαχείριση διαχωριστικών φύλλων, οι διαστάσεις του πρέπει να είναι 1000 x 1200 mm. Οι παλέτες που μπορεί να διαχειριστεί πρέπει να είναι τύπου GMA/ AUS/ EUR/ ISO [62].



Εικόνα 5-8. Εργαλείο αρπάγης FlexGripper vacuum [62].

Κεφάλαιο 6

Προσομοίωση μοντέλου βιομηχανικής διεργασίας με τη βοήθεια ρομποτικών βραχιόνων και εργαλείων αρπάγης για παλετοποίηση βιομηχανικών προϊόντων.

6.1 Περιγραφή σεναρίου

Στη παρούσα εργασία προσομοιώθηκε ένα στάδιο μίας γραμμής παραγωγής που αφορά τη παλετοποίηση έτοιμων βιομηχανικών προϊόντων στο περιβάλλον ABB Robotstudio. Στα πλαίσια της εργασίας μελετήθηκαν τρεις διαφορετικοί ρομποτικοί βραχίονες της ABB και δύο διαφορετικά εργαλεία αρπάγης αναρρόφησης αέρα για τρία διαφορετικά σενάρια, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα τόσο ως προς την αποδοτικότητα των συστημάτων, αλλά και σε γενικές αρχές που αφορούν την ενεργειακή απόδοση των ρομποτικών συστημάτων.

Κατά το σχεδιασμό των σεναρίων που προσομοιώθηκαν επιλέχθηκαν εργαλεία και αντικείμενα τα οποία ανταποκρίνονται στη πραγματικότητα και ανάλογα υπάρχουν σε πραγματικές βιομηχανίες, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών. Όλα τα δεδομένα που παρήχθησαν κατά τη μελέτη της εργασίας αντιστοιχούν στη πραγματικότητα και στις πραγματικές ικανότητες του κάθε ρομποτικού βραχίονα που χρησιμοποιήθηκε.

Για τις ανάγκες της εργασίας μελετήθηκε ένα τμήμα μιας εικονικής βιομηχανίας και συγκεκριμένα το μέρος που έχει να κάνει με το τελικό σημείο της παραγωγής. Συγκεκριμένα, πολλές είναι οι βιομηχανίες οι οποίες μέσα από μία σειρά γραμμών παραγωγής καταλήγουν να εισάγουν τα προϊόντα τους εντός χαρτοκιβωτίων, τα οποία καταλήγουν στη συνέχεια μέσω ταινιοδρόμων στο σταθμό παραγωγής της παλετοποίησης.

Θεωρήθηκε ότι σε ένα βιομηχανικό χώρο 60 τετραγωνικών μέτρων είναι απαραίτητη η εγκατάσταση μίας μονάδας παραγωγής η οποία έχει ως στόχο τη παλετοποίηση 1.300 προϊόντων ανά ώρα με συνολικό χρόνο λειτουργίας ανά ημέρα τις 8 ώρες. Μέσα από μια μεγάλη γκάμα ρομποτικών βραχιόνων της ABB επιλέχθηκαν ρομποτικοί βραχίονες που θεωρητικά μπορούν να ανταπεξέλθουν στις παραπάνω απαιτήσεις και συγκεκριμένα οι:

- IRB 460
- IRB 660
- IRB 760

Οι βραχίονες επιλέχθηκαν καθώς προτείνονται από την ίδια την εταιρία ως κατάλληλοι για ανάλογες εργασίες και είναι σε ικανοί να διεκπεραιώσουν τις ανάγκες της διεργασίας με επιτυχία.

Με την ολοκλήρωση των σεναρίων παρατίθενται η ανάγκη για παλέτες και διαχωριστικά φύλλα ανά ημέρα ώστε να γίνει μία εκτίμηση του συνολικού λειτουργικού κόστους η οποία δεν εστιάζει μόνο στην ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων. Τέλος, θα γίνει μία εκτίμηση του συνολικού κόστους εγκατάστασης των εργαλείων και αντικειμένων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία της ρομποτικής κυψέλης.

6.2 Δομικά στοιχεία

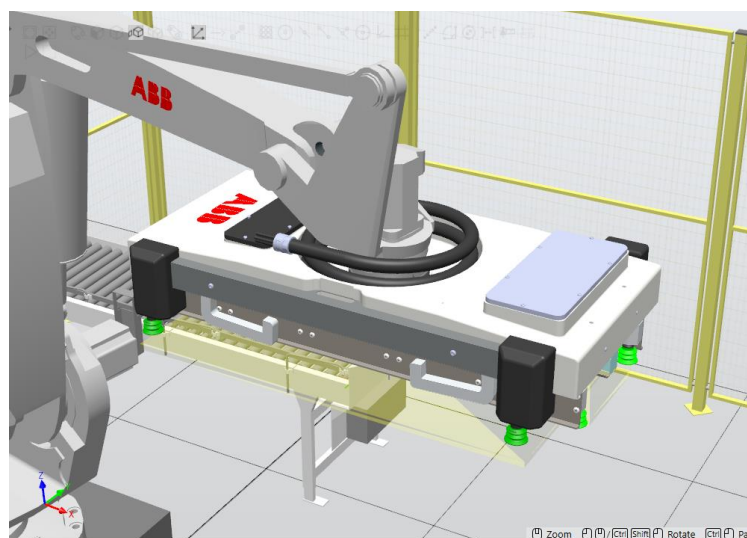
Τα αντικείμενα και τα συστήματα που συμπεριλήφθηκαν για τη δημιουργία των μοντέλων λειτουργίας μέσα από το λογισμικό του ABB RobotStudio έχουν ως σκοπό τη δημιουργία ενός εικονικού περιβάλλοντος το οποίο ανταποκρίνεται ρεαλιστικά στη πραγματικότητα. Όλα τα αντικείμενα που συμπεριλήφθηκαν δύναται να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό περιβάλλον. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα εξής εργαλεία :

- **Ρομποτικοί βραχίονες (IRB 460, IRB 660, IRB 760) :**

Η θέση των ρομποτικών βραχιόνων είναι προκαθορισμένη για κάθε σενάριο λειτουργίας. Η τοποθέτηση τους γίνεται σε περίπου στο μισό της μέγιστης προέκτασης τους από τους προβλεπόμενους σταθμούς εργασίας τους και σε ύψος λειτουργικό ώστε να συμβάλει στην μέγιστη δυνατή τοποθέτηση χαρτοκιβωτίων στη παλέτα που βρίσκεται στο ταινιόδρομο εξόδου (out-feeder conveyor). Κάθε βραχίονας διαφέρει ως προς τις δυνατότητες του και ως προς τα χαρακτηριστικά του. Το βασικό χαρακτηριστικό και για των τριών ρομποτικών βραχιόνων είναι ότι είναι κατάλληλοι για εργασίες παλετοποίησης.

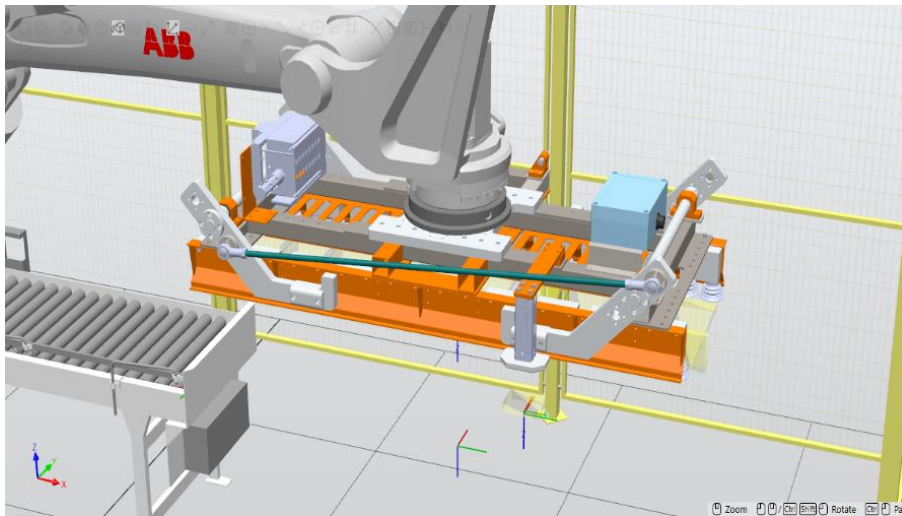
- **Ρομποτικές αρπάγες (FlexGripper Vacuum, Vacuum Gripper)**

Μελετήθηκε η προσαρμογή δύο διαφορετικών αρπάγων στους βραχίονες. Τα δύο εργαλεία αρπάγης είναι σχεδιασμένα να διαχειρίζονται φορτία με επιφάνεια όπως τα χαρτοκιβώτια, ενώ διαθέτουν εξοπλισμό τόσο για τη διαχείριση παλετών, αλλά και διαχωριστικών φύλλων. Το “FlexGripper Vacuum” είναι σχεδιασμένο να προσαρμόζεται στους ρομποτικούς βραχίονες IRB 460 και IRB 660 (Εικόνα 6-1).



Εικόνα 6-1. Εικόνα του εργαλείου αρπάγης “FlexGripper Vacuum” μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

Το “Vacuum Gripper” αποτελεί εργαλείο αρπάγης σχεδίου “CAD” το οποίο είναι τοποθετημένο στη βιβλιοθήκη του “Palletizing PowerPac” και θα χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο αρπάγης για το ρομποτικό βραχίονα IRB 760 (Εικόνα 6-2).

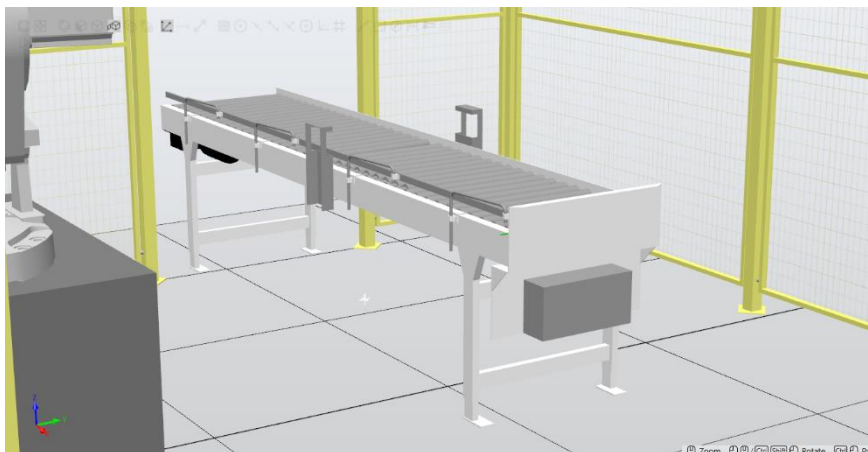


Εικόνα 6-2. Εικόνα του εργαλείου αρπάγης “Vacuum Gripper” μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

- **Ταινιόδρομοι (conveyors) :**

Αποτελούνται από κυλίνδρους μεταφοράς για την ασφαλή μεταφορά των επί μέρους προϊόντων διασφαλίζοντας παράλληλα τη συνεχή ροή τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης επιλέχθηκαν δύο ταινιόδρομοι :

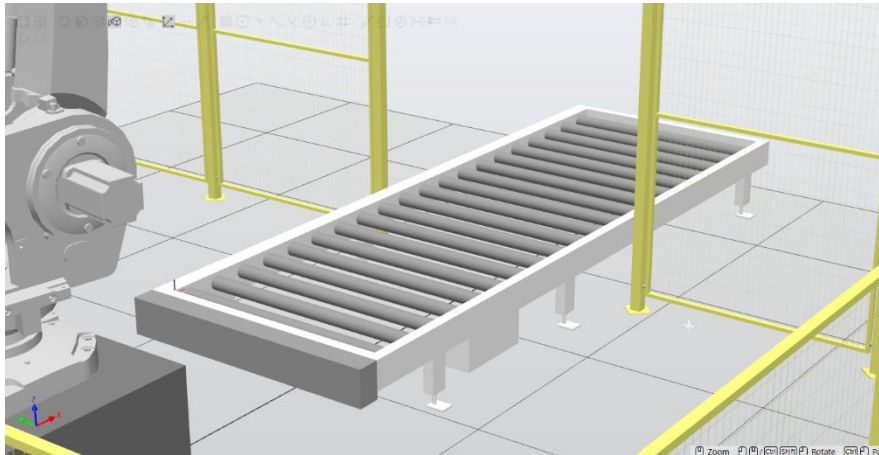
- Ταινιόδρομος εισαγωγής των προϊόντων (in-feeder conveyor): αποτελεί ζώνη μεταφοράς των χαρτοκιβωτίων στον οποίο ρυθμίζονται ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε σεναρίου πόσα τεμάχια θα καταφθάνουν στο τέλος του ταινιόδρομου. Και στις τρεις περιπτώσεις ο ρυθμός εισαγωγής των προϊόντων πραγματοποιείται ανά ένα δευτερόλεπτο.



Εικόνα 6-3. Εικόνα του ταινιόδρομου εισαγωγής των προϊόντων μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

- Ταινιόδρομος εξόδου των προϊόντων (out-feeder conveyor) : αποτελεί ζώνη μεταφοράς των χαρτοκιβωτίων τα οποία είναι στοιβαγμένα σε παλέτες. Η διαμόρφωση του διαφέρει από το πρώτο ταινιόδρομο. Η επιλογή ενός πιο ευρύ και χαμηλού

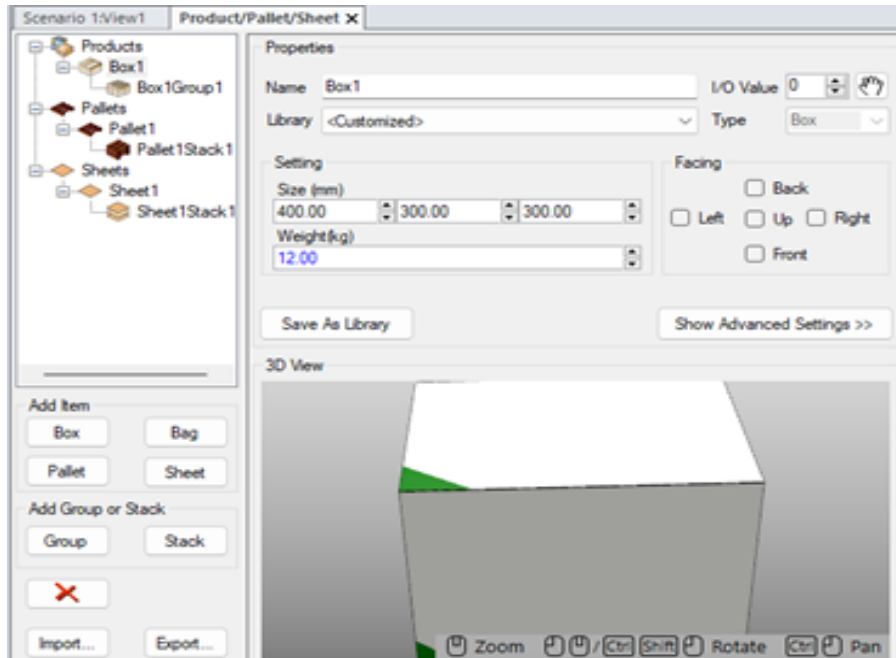
ταινιόδρομου έγινε με σκοπό να ευνοείται ο σχηματισμός όσο το δυνατόν πιο πολλών σειρών προϊόντων πάνω στη παλέτα.



Εικόνα 6-4. Εικόνα του ταινιόδρομου εξόδου των προϊόντων μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

- **Χαρτοκιβώτια :**

Είναι αποτέλεσμα, το οποίο προέρχεται θεωρητικά, από προηγούμενους σταθμούς της παραγωγής και μέσω του ταινιόδρομου εισαγωγής (in-feeder conveyor) καταφθάνουν έτοιμα για να παλετοποιηθούν. Εμφανίζονται σε ορθογωνική διάταξη με μήκος 400 mm, πλάτος 300 mm, ύψος 300 mm και βάρος 12 κιλά.

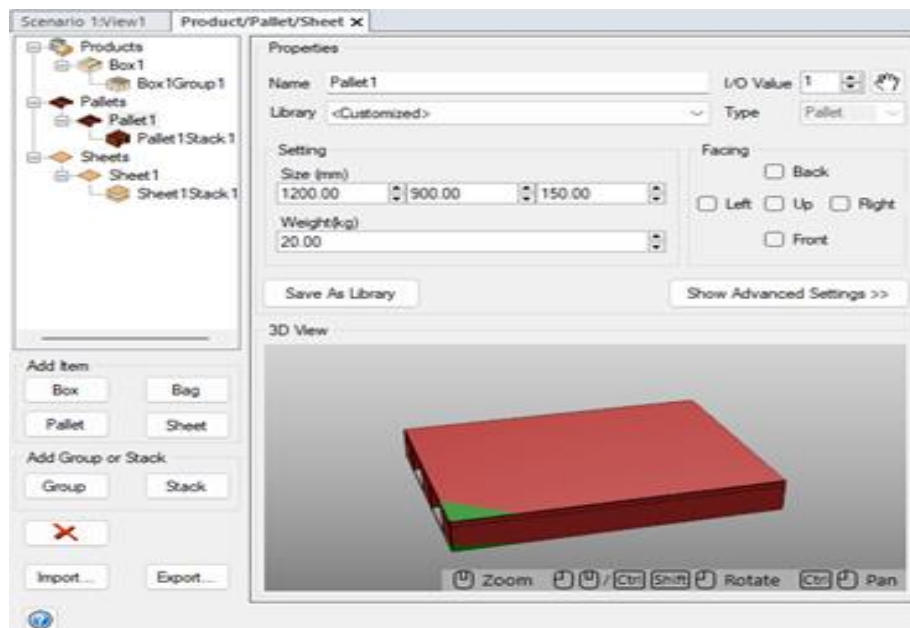


Εικόνα 6-5. Εικόνα διαμόρφωσης του χαρτοκιβωτίου μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio

- **Παλέτες :**

Διαμορφωμένη από ξύλο είναι σχεδιασμένη για να τοποθετούνται τα χαρτοκιβώτια σε σειρές πάνω σε αυτή. Οι διαστάσεις τους ορίστηκαν με άξονα τις μέγιστες διαστάσεις που μπορεί να διαχειριστεί το κάθε ρομποτικό εργαλείο αρπάγης. Το μήκος της είναι 1.200 mm, το πλάτος

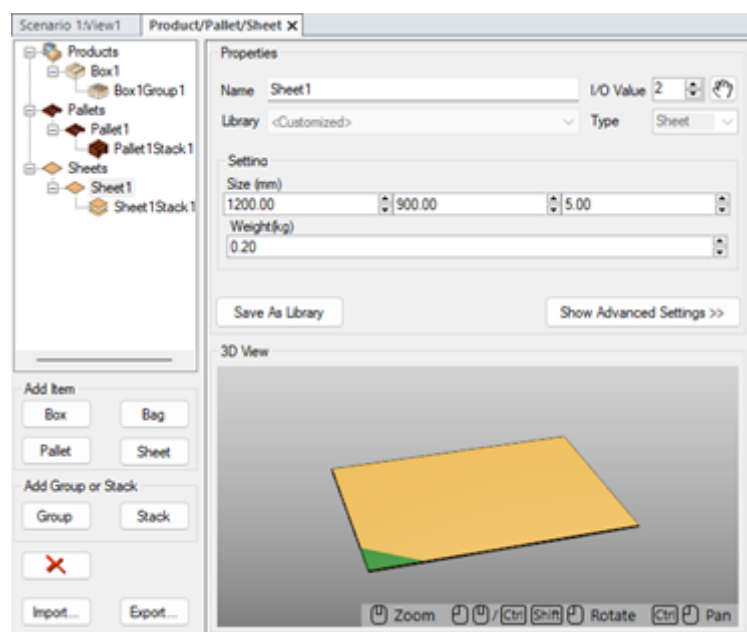
900 mm, το ύψος 150 mm με βάρος 20 κιλά για τα σενάρια που θα χρησιμοποιηθούν οι ρομποτικοί βραχίονες IRB 460 και IRB 660. Για το σενάριο που θα χρησιμοποιηθεί ο ρομποτικός βραχίονας IRB 760, οι διαστάσεις της παλέτας έχουν οριστεί με 1200 mm μήκος, 1200 mm πλάτος, 150 mm ύψος και βάρος 20 κιλά.



Εικόνα 6-6. Εικόνα διαμόρφωσης της παλέτας μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

- **Διαχωριστικά φύλλα :**

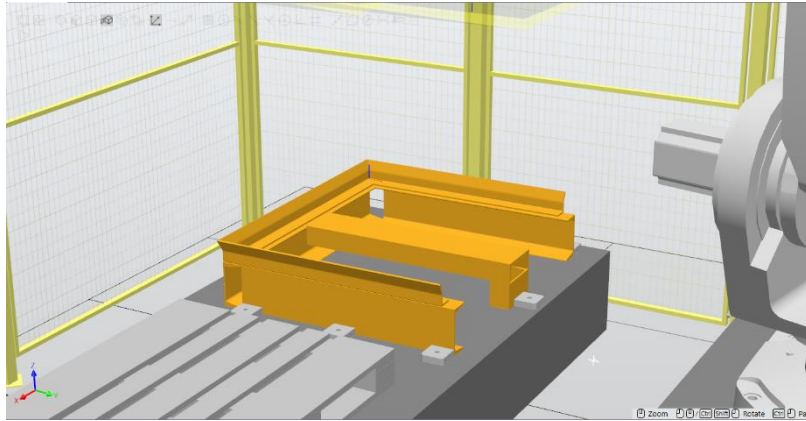
Χρησιμοποιούνται για να προστατεύουν τα χαρτοκιβώτια από τυχόν φθορές και τοποθετούνται ανάμεσα από κάθε σειρά και στη βάση της παλέτας. Οι διαστάσεις τις σε μήκος και πλάτος είναι όμοιες με της παλέτας για κάθε σενάριο με ύψος 5 mm και βάρος 0.2 κιλά για να καλύπτουν όλη την επιφάνεια των σειρών των χαρτοκιβωτίων που είναι τοποθετημένες στη παλέτα.



Εικόνα 6-7. Εικόνα διαμόρφωσης του διαχωριστικού φύλλου μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio

- **Τροφοδότης παλετών (pallet feeder) :**

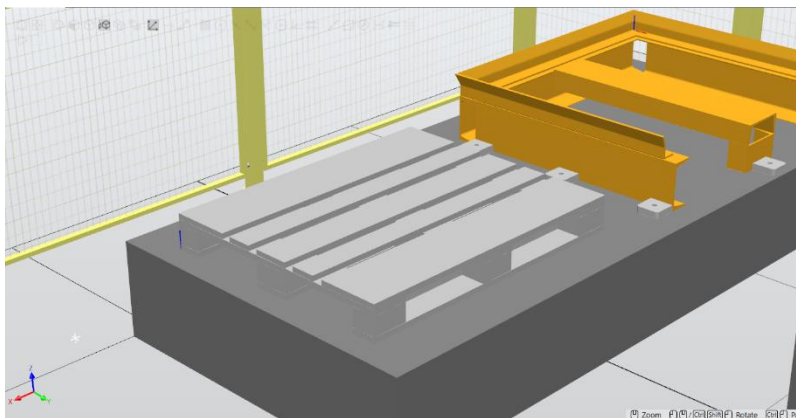
Η τροφοδοσία των παλετών στο σύστημα γίνεται μέσω ενός εργαλείου από τη συλλογή του “Palletizing PowerPac” το οποίο χρησιμοποιείται για να σταθεροποιεί τις παλέτες σε στοίβες. Αποτελεί σταθμό εργασίας του ρομποτικού βραχίονα από τον οποίο περνάει για να μεταφέρει τη παλέτα προς τον ταινιόδρομο εξόδου.



Εικόνα 6-8. Εικόνα του τροφοδότη των παλετών μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

- **Τροφοδότης διαχωριστικών φύλλων (sheet feeder) :**

Τα διαχωριστικά φύλλα τοποθετούνται σε μία σιδερένια παλέτα η οποία έχει τις διαστάσεις των διαχωριστικών φύλλων σε μήκος και πλάτος με ύψος 150 mm. Είναι ορισμένος ως σταθμός εργασίας του ρομποτικού βραχίονα, ώστε να λαμβάνει τα διαχωριστικά φύλλα και να τα τοποθετεί ανάμεσα από τις σειρές των χαρτοκιβωτίων που βρίσκονται πάνω στη παλέτα.



Εικόνα 6-9. Εικόνα του τροφοδότη των διαχωριστικών φύλλων μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

- **Προστατευτικά πλέγματα :**

Για τις ανάγκες της ασφάλειας του συστήματος είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν φυσικά εμπόδια κατά μήκος της ρομποτικής κυψέλης τα οποία θα αποτρέπουν ένα ενδεχόμενο τραυματισμό. Η τοποθέτηση των προστατευτικών πλεγμάτων είναι σύμφωνη με τα προβλεπόμενα μέτρα ασφαλείας, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο σχετικό κεφάλαιο, και με βάση το ρομποτικό βραχίονα που χρησιμοποιείται σε κάθε σενάριο καθορίζεται και η ανάλογη απόσταση τους από αυτόν.

Προκειμένου να εκτιμηθεί το συνολικό λειτουργικό κόστος για κάθε σενάριο έγινε μία μεμονωμένη εκτίμηση κάθε εργαλείου και αντικειμένου που χρησιμοποιήθηκε στα σενάρια που προσομοιώθηκαν. Οι τιμές είναι προσεγγιστικές, αντιστοιχούν σε μια μέση τιμή των κοστολογήσεων που υπάρχει στην αγορά και έχουν οριστεί ως εξής:

- Ταινιόδρομοι (conveyors) \approx \$16.000
- Τροφοδότης παλετών (pallet feeder) \approx \$300
- Σιδερένια παλέτα (Τροφοδότης των διαχωριστικών φύλλων) \approx \$150
- Προστατευτικά πλέγματα \approx \$14.400 (\$600/μέτρο)

Το συνολικό κόστος εγκατάστασης των εργαλείων και αντικειμένων που χρησιμοποιήθηκαν χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι ρομποτικοί βραχίονες και τα εργαλεία αρπάγης που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχεί σε ένα ποσό της τάξης των \$30.850.

6.3 Περιγραφή λειτουργίας της διεργασίας

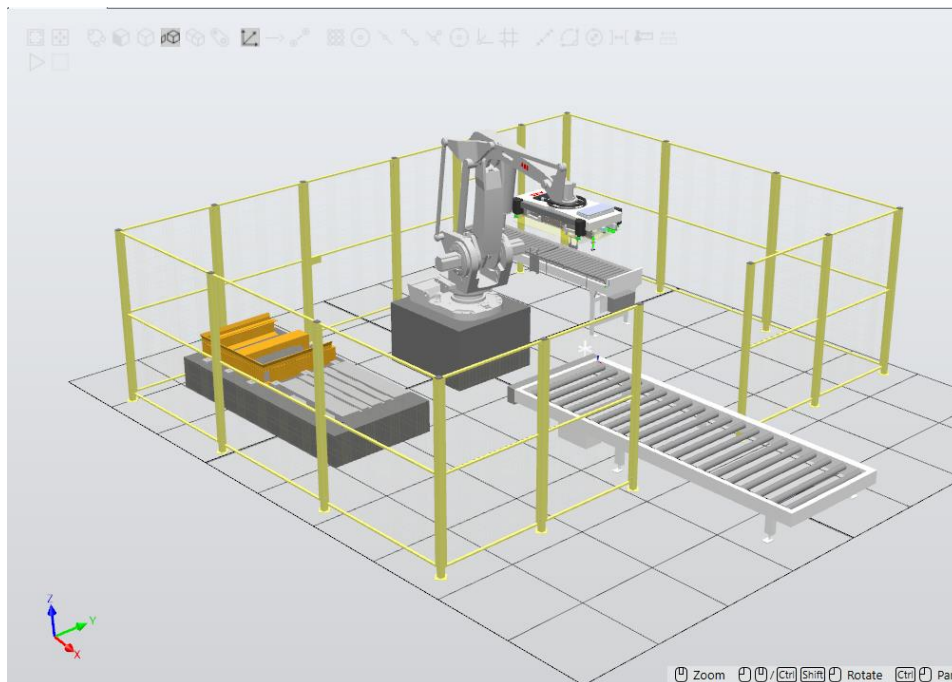
Μέσω του λογισμικού ABB RobotStudio δημιουργήθηκαν τρία σενάρια με σκοπό της προσομοίωσης μίας συγκεκριμένης παραγωγικής διαδικασίας που αφορά τη παλετοποίηση βιομηχανικών προϊόντων. Η μελέτη των τριών σεναρίων δεν διαφέρει ως προς το στόχο, αλλά ως προς την αποδοτικότητα τους. Δημιουργήθηκε ένα συγκεκριμένο χωροταξικό μοντέλο και για τις τρεις περιπτώσεις το οποίο περιφράχθηκε με τα απαραίτητα προστατευτικά φράγματα βάση των προβλεπόμενων προτύπων ασφαλείας, διευκολύνοντας και ενισχύοντας παράλληλα την αποδοτικότητα της όλης διαδικασίας. Η μόνη διαφοροποίηση στη χωροταξία των σεναρίων είναι οι αποστάσεις των δομικών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, από τον ρομποτικό βραχίονα η οποία ορίζεται με άξονα τα χαρακτηριστικά του ρομποτικού βραχίονα που χρησιμοποιείται σε κάθε σενάριο. Η τοποθέτηση τους σε κάθε περίπτωση γίνεται σε απόσταση περίπου της μισής της μέγιστης προέκτασης του κάθε ρομποτικού βραχίονα.

Στόχος της προσομοίωσης είναι η δημιουργία μίας λειτουργικής και αποδοτικής ρομποτικής κυψέλης μέσα από την οποία προκύπτουν ρεαλιστικά δεδομένα και αποτελέσματα τα οποία δύναται να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον. Για την υλοποίηση των προβλεπόμενων σεναρίων χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί ρομποτικοί βραχίονες και δύο διαφορετικά εργαλεία αρπάγης αναρρόφησης αέρα.

Αφού τοποθετήθηκαν τα δομικά στοιχεία στις προβλεπόμενες θέσεις για κάθε σενάριο, διαμορφώσαμε τον κατάλληλο εικονικό ελεγκτή (virtual controller) που προσαρμόζεται στις ανάγκες της διεργασίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τους τρεις ρομποτικούς βραχίονες που θα προσομοιωθούν. Η στρατηγική τοποθέτηση των δομικών στοιχείων αποτελεί παράγοντα που μπορεί να συμβάλει στη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας του συστήματος. Και στις τρεις περιπτώσεις διατηρείται η ομοιότητα ως προς τον προσανατολισμό τους.

Η εισαγωγή και η τοποθέτηση του ρομποτικού βραχίονα στο κατάλληλο ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία έγινε με σκοπό να βελτιστοποιηθεί τόσο η ταχύτητα υλοποίησης της διαδικασίας, η ενεργειακή κατανάλωση αλλά και το πλήθος των προϊόντων που τοποθετούνται στη παλέτα πριν από την έξοδο της από τη κυψέλη. Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκε ένας ταινιόδρομος εισόδου των προϊόντων (in-feeder conveyor), ένας ταινιόδρομος εξόδου των προϊόντων (out-feeder conveyor) σε σειρές σε παλέτα, ένας

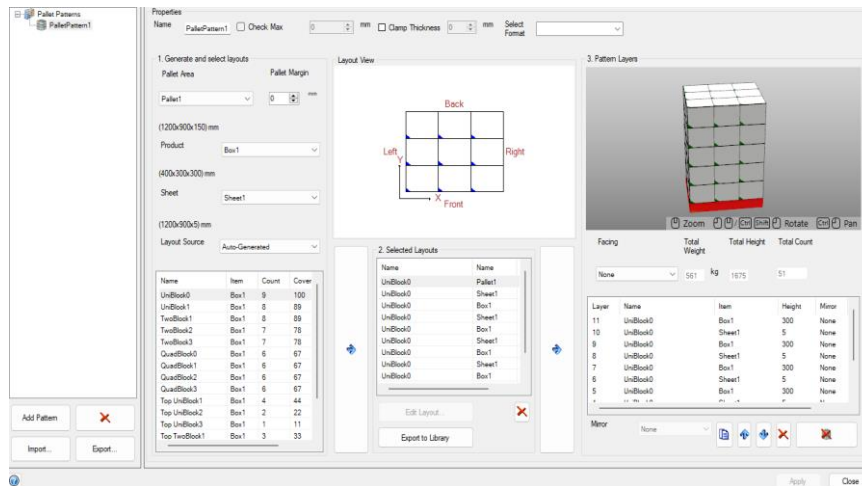
τροφοδότης παλετών (pallet feeder) και ένας τροφοδότης διαχωριστικών φύλλων (sheet feeder). Μια λεπτομερής αναπαράσταση της ρομποτικής κυψέλης, όπως αυτή διαμορφώθηκε με χρήση του λογισμικού ABB Robotstudio παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-10.



Εικόνα 6-10. Εικόνα της μορφής της ρομποτικής κυψέλης μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

Πάνω στον ταινιόδρομο τροφοδότησης των προϊόντων (in-feeder conveyor) διαμορφώθηκε ανάλογα με τις δυνατότητες του κάθε ρομποτικού βραχίονα η εισαγωγή των προϊόντων σε ομάδες. Σε όλα τα σενάρια διατηρείται ο ίδιος ρυθμός τροφοδότησης των προϊόντων. Κάθε ένα δευτερόλεπτο εισάγεται στο ταινιόδρομο μία ομάδα χαρτοκιβωτίων, η οποία ρυθμίζεται ανάλογα από τις δυνατότητες του κάθε ρομποτικού βραχίονα.

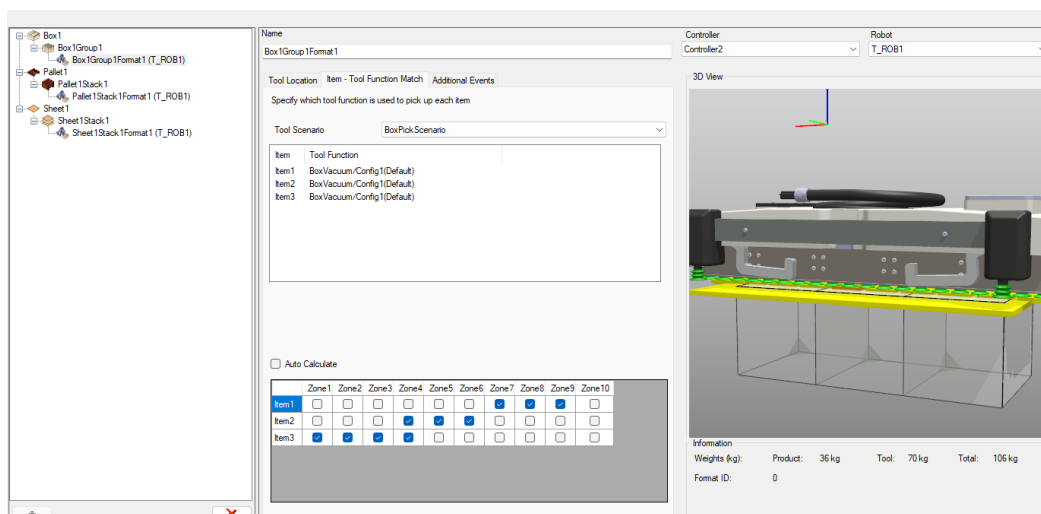
Στη συνέχεια, ρυθμίστηκε το μοτίβο τοποθέτησης των προϊόντων στη παλέτα που είναι τοποθετημένη στο ταινιόδρομο εξόδου (out-feeder conveyor). Στη καρτέλα του “Palletizing PowerPac”, στην επιλογή “Pallet Pattern” διαμορφώθηκε τόσο ο τρόπος με τον οποίο θα στοιβαχθούν τα χαρτοκιβώτια πάνω στη παλέτα (Εικόνα 6-11), αλλά και με ποια κίνηση θα μεταφερθούν από τον ταινιόδρομο εισόδου στη παλέτα. Ειδικότερα, μπορεί να ρυθμιστεί εάν ο ρομποτικός βραχίονας κατά τη μεταφορά των προϊόντων θα διαγράψει μονάχα γραμμική ή ένα συνδυασμό γραμμικής και πρισματικής κίνησης.



Εικόνα 6-11. Εικόνα της διαμόρφωσης της στοιβαξης των προϊόντων στη παλέτα μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

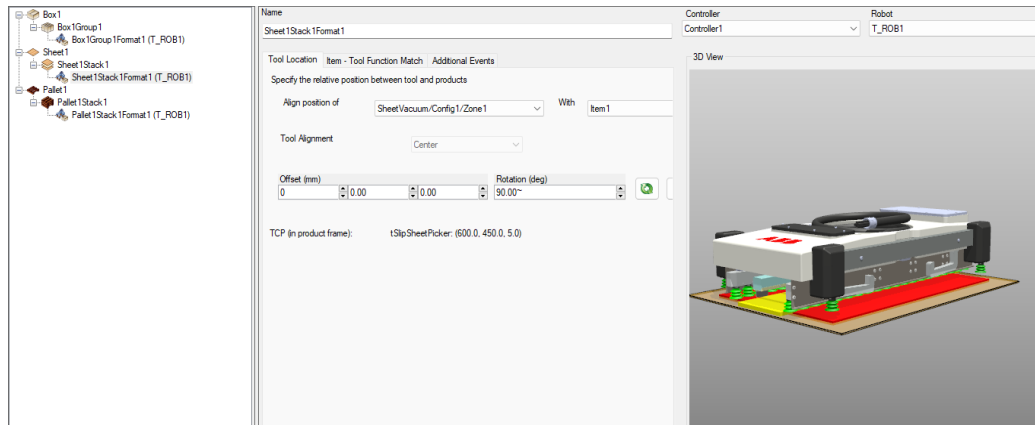
Ανάμεσα από κάθε σειρά προϊόντων, αλλά και στη βάση της παλέτας με σκοπό τη διασφάλιση της ακεραιότητας της συσκευασίας των προϊόντων τοποθετείται σε κάθε περίπτωση ένα διαχωριστικό φύλλο, με ανάλογο τρόπο με τον οποίο γίνεται και σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον. Βάση των αναγκών της διαδικασίας τόσο ο ταινιόδρομος εισαγωγής των προϊόντων όσο και ο τροφοδότης των διαχωριστικών φύλλων (sheet feeder) τοποθετήθηκαν σε κοντινή απόσταση σε σχέση με τον ταινιόδρομο εξόδου των προϊόντων με σκοπό το περιορισμό της χρονικής διαδικασίας και της περαιτέρω επιβάρυνσης του ρομποτικού βραχίονα. Σε πιο μακρινή απόσταση σε σχέση με το δεύτερο ταινιόδρομο βάση της ίδιας λογικής τοποθετήθηκε ο τροφοδότης των παλετών (pallet feeder), στον οποίο ο ρομποτικός βραχίονας σε κάθε περίπτωση διέρχεται με τη λιγότερη συχνότητα.

Με άξονα το εργαλείο αρπάγης που χρησιμοποιείται κάθε φορά ανάλογα ρυθμίζεται ο τρόπος μεταφοράς των προϊόντων. Από τη καρτέλα του “Palletizing PowerPac” και από την επιλογή “Pick Settings” μπορεί να διαμορφωθεί ο τρόπος με τον οποίο θα ενεργοποιούνται οι κατάλληλοι εξοπλισμοί του εργαλείου αρπάγης προκειμένου να ανυψώσει είτε τα χαρτοκιβώτια, είτε τα διαχωριστικά φύλλα, είτε τις παλέτες (Εικόνα 6-12).



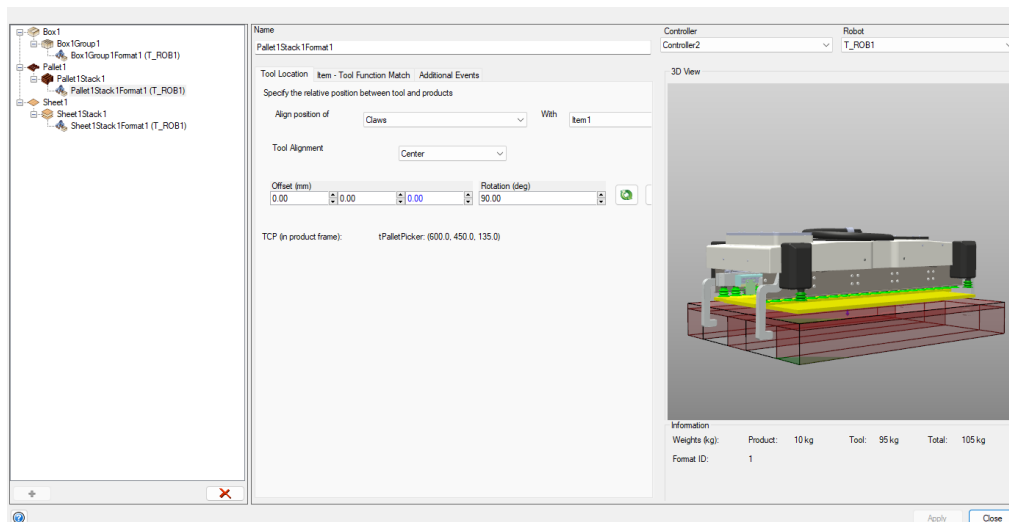
Εικόνα 6-12. Εικόνα της ενεργοποίησης των ζωνών αναρρόφησης αέρα του εργαλείου αρπάγης “FlexGripper Vacuum” για την ανύψωση των χαρτοκιβωτίων μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

Συγκεκριμένα, για την ανύψωση του κάθε προϊόντος ενεργοποιούνται οι απαραίτητες ζώνες αναρρόφησης αέρα. Το εργαλείο αρπάγης “FlexGripper Vacuum”, βάση των δυνατοτήτων του, του βάρους και των διαστάσεων των χαρτοκιβωτίων είναι ικανό να ανυψώσει και να μεταφέρει μέχρι τρία προϊόντα συνολικού βάρους 36 κιλών. Το εργαλείο αρπάγης “Vacuum Gripper” το οποίο αποτελεί σχέδιο CAD είναι ρυθμισμένο για τις ανάγκες της διεργασίας να ανυψώνει έως 80 κιλά, ενώ βάση των διαστάσεων του χαρτοκιβωτίου μπορεί να ανυψώσει συνολικά μέχρι τέσσερα προϊόντα στη σειρά συνολικού βάρους 48 κιλών.



Εικόνα 6-13. Εικόνα της ενεργοποίησης του εξοπλισμού του εργαλείου αρπάγης “FlexGripper Vacuum” για τη διαλογή των διαχωριστικών φύλλων μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

Όσο αφορά τη επιλογή της παλέτας σε κάθε σενάριο το “FlexGripper Vacuum” είναι ικανό να διαχειριστεί ορισμένων διαστάσεων παλέτες, μικρότερες σε σχέση με το “Vacuum Gripper”. Για αυτό το λόγο οι διαστάσεις των παλετών και των διαχωριστικών φύλλων διαφέρουν ανάλογα το εργαλείου αρπαγής που χρησιμοποιείται σε κάθε σενάριο.



Εικόνα 6-14. Εικόνα της διαλογής των παλετών με τις δαγκάνες του εργαλείου αρπάγης “FlexGripper Vacuum” μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio.

Αφού ολοκληρώθηκαν όλες οι προβλεπόμενες ρυθμίσεις, πριν την εκκίνηση του κάθε σεναρίου ενεργοποιήθηκαν τα απαραίτητα σήματα τα οποία θα συμβάλλουν στην αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα τα σήματα που ενεργοποιήθηκαν από την επιλογή “Signal Setup” μέσα από τη καρτέλα “Simulation” αρχικά είναι (Εικόνα 6-15):

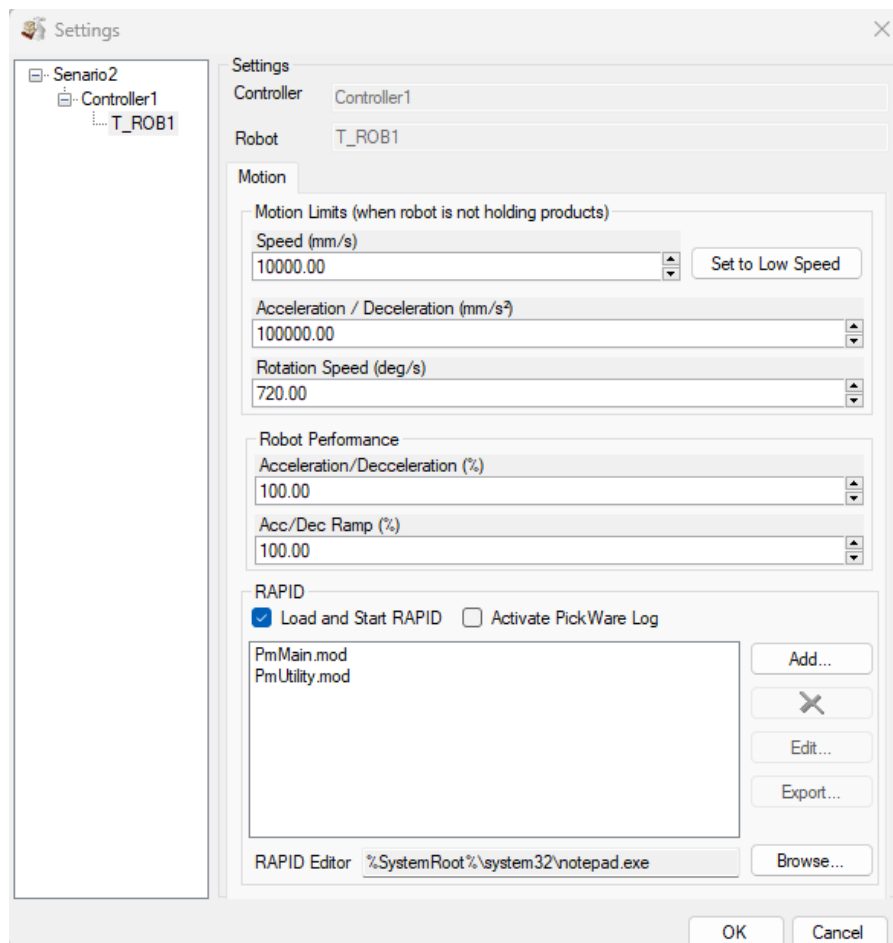
- Συνολική ενέργεια που καταναλώνει το ρομπότ (total motor energy).
- Συνολική ισχύς που καταναλώνει το ρομπότ (total motor power).
- Η γραμμική επιτάχυνση του κεντρικού σημείου αναφοράς του εργαλείου που είναι προσαρτημένο στο βραχίονα (TCP) (linear acceleration in world).
- Η ταχύτητα μετακίνησης του “TCP” (speed in current workj).
- Η γωνιακή ταχύτητα του “TCP” (orientation speed in current wobj).

Signals		Selection					
Sources		Name	Source	Source Type	Signal Type	Interpolation Type	Quantity
<div> <input type="text" value="Search"/> <input type="button" value="C"/> </div> <div> <div>Controller Signals</div> <div> <div>Controller1</div> <div>Event Log</div> <div>I/O System</div> <div>Mechanical Units</div> <div> <div>ROB_1 [IRB660_180]</div> <div> <div>Joint</div> <div>Stop Estimation</div> <div>Target</div> <div>TCP</div> </div> </div> <div> <div>Linear Acceler</div> <div>Maximum Line</div> <div>Orientation Sp</div> <div>Speed In Cure</div> <div>Orientation</div> <div>Position</div> <div>Robot Configu</div> </div> <div> <div>Total Motor Energy</div> <div>Total Motor Power</div> </div> <div>Smart Component Signals</div> </div> </div> <div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> <div><input type="checkbox"/></div> <div><input type="checkbox"/></div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> <div><input type="checkbox"/></div> <div><input type="checkbox"/></div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> <div><input type="checkbox"/></div> <div><input type="checkbox"/></div> <div><input type="checkbox"/></div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> <div><input checked="" type="checkbox"/></div> <div><input type="checkbox"/></div> </div>		<div> <div>Linear Acceleration In World</div> <div>Maximum Linear Acceleration In World</div> <div>Orientation Speed In Current Wobj</div> <div>Speed In Current Wobj</div> <div>Total Motor Energy</div> <div>Total Motor Power</div> </div>	<div> <div>Controller Signals\Controller1\Mechanical Units\ROB_1 [IRB660_180_315_01].TCP</div> <div>Controller Signals\Controller1\Mechanical Units\ROB_1 [IRB660_180_315_01].TCP</div> <div>Controller Signals\Controller1\Mechanical Units\ROB_1 [IRB660_180_315_01].TCP</div> <div>Controller Signals\Controller1\Mechanical Units\ROB_1 [IRB660_180_315_01].TCP</div> <div>Controller Signals\Controller1</div> <div>Controller Signals\Controller1</div> </div>	<div> <div>MotionSignal</div> <div>MotionSignal</div> <div>MotionSignal</div> <div>MotionSignal</div> <div>Derived</div> <div>MotionSignal</div> </div>	<div> <div>Analog</div> <div>Analog</div> <div>Analog</div> <div>Analog</div> <div>Analog</div> <div>Analog</div> </div>	<div> <div>Continuous</div> <div>Discrete</div> <div>Continuous</div> <div>Continuous</div> <div>Continuous</div> <div>Continuous</div> </div>	<div> <div>Acceleration</div> <div>Acceleration</div> <div>Angular Velocity</div> <div>Velocity</div> <div>Energy</div> <div>Power</div> </div>

Εικόνα 6-15. Εικόνα της ενεργοποίηση των σημάτων που θα μελετηθούν μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης των σεναρίων όλα τα σήματα που ενεργοποιήθηκαν αποτυπώνονται αναλυτικά μέσω γραφημάτων στο “signal analyzer”. Μέσω αυτών μπορούν να γίνουν οι απαραίτητες βελτιστοποιήσεις στις κινήσεις του ρομπότ, καθώς φανερώνονται πιθανές υπερβολές στη ταχύτητα του συστήματος ή απότομες εναλλαγές που μπορεί να οδηγούν σε υπερβολική κατανάλωση ενέργειας.

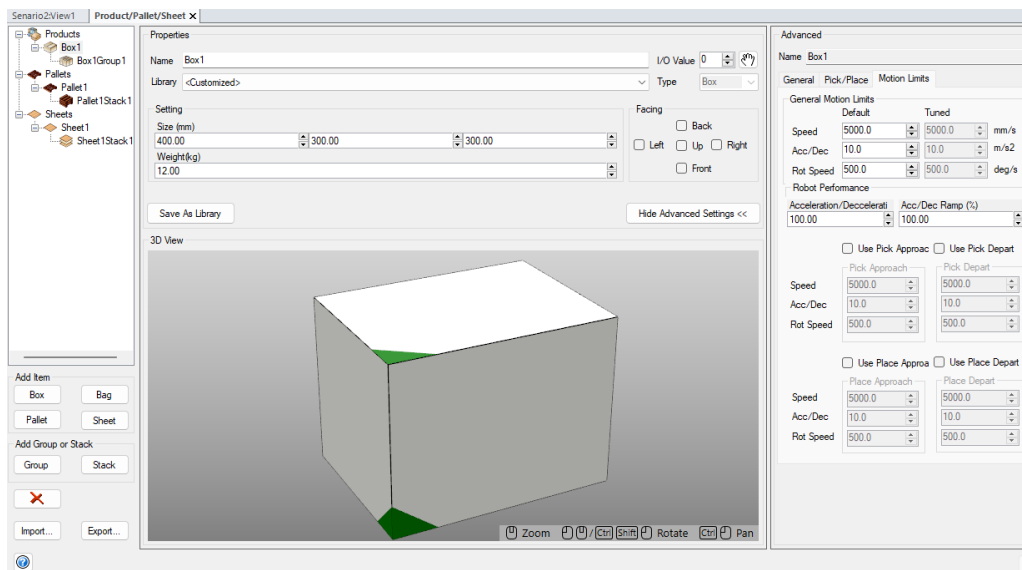
Πριν από την εκκίνηση του κάθε σεναρίου ορίζονται κάθε φορά τα όρια των τιμών με τις οποίες θα κινείται ο ρομποτικός βραχίονας. Πραγματοποιείται η ρύθμιση των ορίων ταχύτητας του ρομπότ, της επιτάχυνσης του και της ταχύτητας περιστροφής του. Προκειμένου να γίνει μία αρχική εκτίμηση της διαδικασίας, ο ρομποτικός βραχίονας ρυθμίζεται (Εικόνα 6-16), ώστε να εκτελεί τη διεργασία στο μέγιστο των δυνατοτήτων του για κάθε σενάριο οι οποίες εξαρτώνται και από τη διαρρύθμιση του χώρου και τις αποστάσεις μεταξύ των σταθμών εργασίας του ρομπότ, αλλά και από το φορτίο ανύψωσης.



Εικόνα 6-16. Εικόνα της ρύθμισης της ταχύτητας του ρομποτικού βραχίονα όταν δεν μεταφέρει κάποιο φορτίο μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio.

Εφόσον έγινε η ρύθμιση της ταχύτητας του ρομποτικού βραχίονα κατά τη διάρκεια που δεν συγκρατεί κάποιο προϊόν, θα προγραμματιστεί η ταχύτητα του ρομποτικού βραχίονα κατά τη μεταφορά των επί μέρους στοιχείων. Ο προγραμματισμός των ορίων της ταχύτητας του ρομπότ για κάθε μεταφορά κατά την οποία θα συγκρατεί κάποιο επί μέρους στοιχείο μπορεί να διαμορφωθεί από τη καρτέλα του “Palletizing Powerpac” και από την επιλογή “Product/Pallet/Sheet” (Εικόνα 6-17). Σε όλες τις περιπτώσεις ρυθμίστηκε το ίδιο όριο ταχύτητας τόσο κατά τη μεταφορά των προϊόντων όσο και όταν το ρομπότ κινείται ελεύθερα χωρίς κάποιο φορτίο.

Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης καταγράφονται οι τιμές με τις οποίες κινείται το ρομπότ και έπειτα περιορίζονται σταδιακά τα όρια του ρομπότ με σκοπό τη συνολική βελτίωση του συστήματος δημιουργώντας ένα συμβιβασμό στον οποίο εκτελείται ο προβλεπόμενος στόχος της βιομηχανίας με το ελάχιστο δυνατό κόστος και την ελάχιστη επιβάρυνση του συστήματος. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας καταγράφεται επίσης μέσω του “operator interface” η χρονική διάρκεια της διαδικασίας και το σύνολο των παλετών και των διαχωριστικών φύλλων που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν, αλλά και το σύνολο των προϊόντων που επρόκειτο να παλετοποιηθούν σε διάρκεια μίας ώρας.



Εικόνα 6-17. Εικόνα της ρύθμισης της ταχύτητας του ρομποτικού βραχίονα κατά τη διάρκεια που μεταφέρει τα χαρτοκιβώτια.

6.4 Εγκατάσταση προστατευτικών φραγμάτων

Η διασφάλιση της προστασίας των εργαζομένων στο χωροταξικό μοντέλο που διαμορφώθηκε καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την εγκατάσταση προστατευτικών φραγμάτων. Σε όλα τα σενάρια έγινε η επιλογή προστατευτικού πλέγματος για εγκατάσταση. Η απόσταση του από το κάθε ρομποτικό βραχίονα έγινε με άξονα τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες του. Και στα τρία μοντέλα οι ρομποτικοί βραχίονες τοποθετήθηκαν σε ύψος 800 mm από το έδαφος. Η περιφράξη της ρομποτικής κυψέλης αποτελείται από τέσσερις σειρές προστατευτικών πλεγμάτων σε τέσσερις πλευρές προκειμένου να εγκλειστεί ο χώρος λειτουργίας με ασφάλεια. Οι ρομποτικοί βραχίονες που προσομοιώθηκαν σε κάθε μοντέλο έχουν προγραμματιστεί να κινούνται σε ένα τόξο το οποίο εκτείνεται σε τρεις πλευρές.

6.4.1 Απόσταση προστατευτικών φραγμάτων από το τόξο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα

Για την εγκατάσταση τους έγινε αρχικά μία εκτίμηση της ζώνης κινδύνου του κάθε ρομποτικού βραχίονα ως προς το ύψος και ως προς το μήκος. Και στις τρεις περιπτώσεις η ζώνη κινδύνου κατά μήκος εκτιμήθηκε με άξονα την επικινδυνότητα της διεργασίας. Η εκτίμηση της ζώνης κινδύνου ως προς το ύψος θεωρήθηκε 2.600 mm όπως προβλέπεται βάση το πρότυπο ασφαλείας EN ISO 13857:2019 για διεργασίες υψηλού κινδύνου. Ως προς το μήκος η ζώνη κινδύνου καθορίζεται από τη μέγιστη προέκταση του κάθε ρομποτικού βραχίονα η οποία διαφέρει σε κάθε περίπτωση. Στο πίνακα 3-4 φανερώνονται οι απαραίτητες πληροφορίες, ώστε με βάση το πρότυπο ασφαλείας EN ISO 13857:2019 να γίνει η τοποθέτηση του προστατευτικού πλέγματος στη κατάλληλη απόσταση από το κάθε ρομποτικό βραχίονα. Το ύψος του ρομποτικού πλέγματος επιλέχθηκε να είναι 2.200 mm. Σε κάθε περίπτωση έγινε στρογγυλοποίηση του μήκους της ζώνης κινδύνου προς τα πάνω, το οποίο καθορίζεται από τη μέγιστη οριζόντια προέκταση του κάθε ρομποτικού βραχίονα που χρησιμοποιήθηκε (Πίνακας 6-1).

	Μέγιστη οριζόντια προέκταση (mm).	Μέγιστη κατακόρυφη προέκταση (mm).	Μήκος ζώνης κινδύνου (mm)	Απόσταση προστατευτικών από οριζόντια ζώνη κινδύνου (mm)
IRB 460	2.403	1.786	2.500	400
IRB 660	3.150	2.295	3.200	400
IRB 760	3.180	2.286	3.200	400

Πίνακας 6-1. Καθορισμός των ζωνών κινδύνου με βάση το ρομποτικό βραχίονα που χρησιμοποιήθηκε.

Με δεδομένο την απόσταση των προστατευτικών από τη ζώνη κινδύνου για κάθε σενάριο ορίστηκαν οι αποστάσεις των προστατευτικών από τους ρομποτικούς βραχίονες. Σε όλα τα σενάρια που προσομοιώθηκαν το τόξο λειτουργίας των ρομπότ είναι συγκεκριμένο. Στις πλευρές όπου το ρομπότ διεκπεραιώνει εντολές τα προστατευτικά τοποθετήθηκαν σε απόσταση ίση με το άθροισμα του μήκους της ζώνης κινδύνου και της απόστασης των προστατευτικών από τη ζώνη κινδύνου. Συγκεκριμένα στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6-2) φανερώνεται για κάθε σενάριο η απόσταση των προστατευτικών πλεγμάτων από τις πλευρές όπου εργάζεται το ρομπότ.

	Απόσταση προστατευτικών από το ρομποτικό βραχίονα στον άξονα που κινείται (mm).
IRB 460	2.900
IRB 660	3.600
IRB 760	3.500

Πίνακας 6-2. Καθορισμός της απόστασης των προστατευτικών πλεγμάτων από το κάθε ρομποτικό βραχίονα που χρησιμοποιήθηκε.

6.4.2 Απόσταση προστατευτικών φραγμάτων από το τόξο που δεν εργάζεται ο ρομποτικός βραχίονας

Όσο αφορά τους άξονες στους οποίους ο ρομποτικός βραχίονας δεν διεκπεραιώνει κάποια εργασία ισχύουν οι προϋποθέσεις του προτύπου ασφαλείας EN ISO 13857:2019 για τη προέκταση των άνω άκρων και τη προέκταση των δαχτύλων από ανοίγματα. Εφόσον στα προστατευτικά πλέγματα υπάρχει κενό στο σημείο όπου είναι τοποθετημένος ο ταινιόδρομος εισόδου των προϊόντων και επειδή τα πλέγματα έχουν μικρά κενά είναι αναγκαίο να ληφθούν επιπλέον μέτρα.

Με βάση την εικόνα 3-5, η απόσταση που μπορεί να επεκταθεί ολόκληρο το χέρι προσμετρώντας και τον ώμο κυμαίνεται από 40-120 mm. Αυτή η τιμή ισχύει για περιπτώσεις ανθρώπων 14 χρονών και άνω. Η απόσταση του προστατευτικού από τη ζώνη κινδύνου με βάση το πρότυπο ασφαλείας EN ISO 13857:2019 ορίζεται μεγαλύτερη ή ίση των 850 mm. Η απόσταση του προστατευτικού από το ρομποτικό βραχίονα και για τα τρία μοντέλα για τους

άξονες όπου δεν διεκπεραιώνει κάποια εργασία η απόσταση του προστατευτικού πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 850 mm. Μέσα στο πρότυπο EN ISO 13857:2019 προβλέπεται ο καθορισμός αποστάσεων για τη προέκταση των άνω άκρων μέσα από οπές συνθήκη που δεν απαιτεί μελέτη για τη συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς την καλύπτουν ήδη οι προηγούμενες περιπτώσεις.

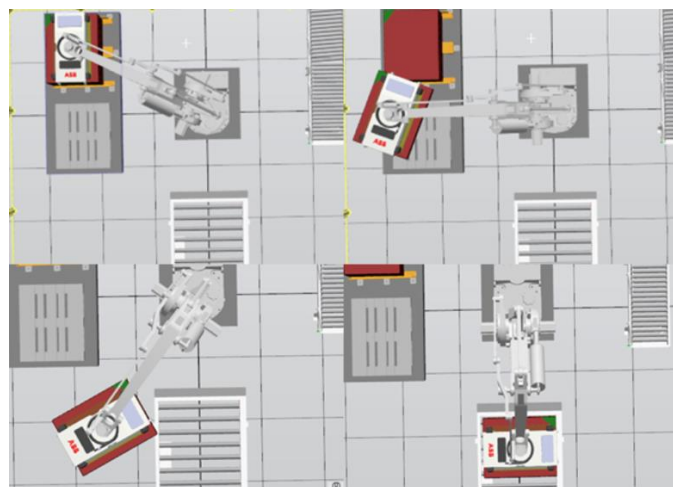
Κεφάλαιο 7

Λειτουργία σεναρίων και μετρήσεις

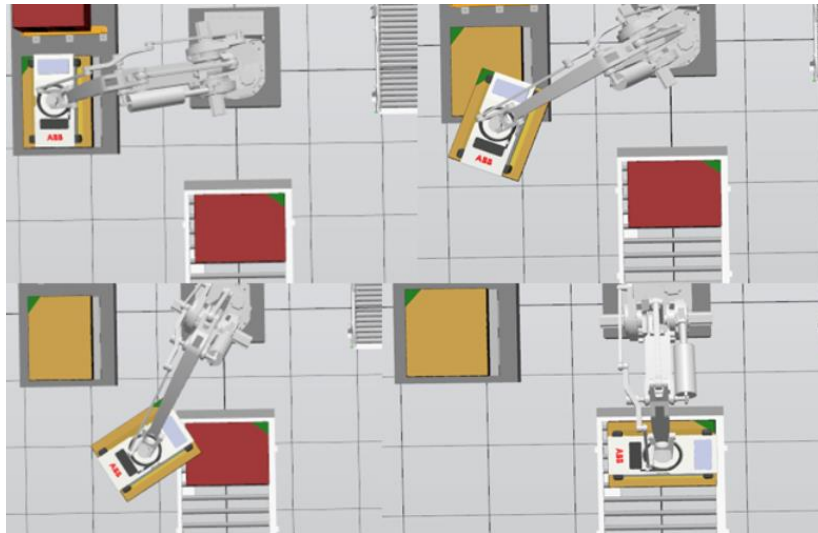
7.1 Πρώτο σενάριο λειτουργίας

Στο πρώτο σενάριο που προσομοιώθηκε επιλέχθηκε ο ρομποτικός βραχίονας IRB 460 και το εργαλείο αρπάγης αναρρόφησης αέρα “FlexGripper Vacuum”. Αφού τοποθετήθηκαν όλα τα δομικά στοιχεία σε απόσταση περίπου της μισής της μέγιστης προέκτασης του ρομπότ, δηλαδή σε περίπου 1,2 μέτρα, έπειτα έγινε η διαρρύθμιση των κινήσεων του ρομπότ στο χώρο για την διεκπεραίωση της εργασίας. Ο ρομποτικός βραχίονας IRB 460 έχει δυνατότητα διαχείρισης φορτίου έως 110 κιλά, ενώ το εργαλείο αρπάγης “FlexGripper Vacuum” έχει δυνατότητα ανύψωσης φορτίου μέχρι 40 κιλά. Βάση των δυνατοτήτων του συστήματος που ορίστηκε, διαμορφώθηκε η εισαγωγή των χαρτοκιβωτίων σε ομάδες των τριών. Το αθροιστικό βάρος του εργαλείου αρπάγης που επιλέχθηκε και το βάρος των χαρτοκιβωτίων αντιστοιχεί συνολικά σε 106 κιλά, ποσότητα ικανή να διαχειριστεί ο ρομποτικός μας βραχίονας. Ακόμα, με άξονα το μέγιστο ύψος και μήκος που είναι ικανό να εργαστεί το ρομπότ βάση συνθηκών, ορίστηκε η τοποθέτηση τριών σειρών με τρεις στήλες χαρτοκιβωτίων στη παλέτα.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ορίστηκαν συγκεκριμένες κινήσεις κατά τη μεταφορά των επί μέρους στοιχείων. Σε κάθε περίπτωση η μεταφορά τόσο της παλέτας, όσο και των διαχωριστικών φύλλων πραγματοποιείται με πρισματική και περιστροφική κίνηση γωνίας 90 μοιρών από τη στιγμή της διαλογής μέχρι και τη στιγμή της τοποθέτησης τους στις προβλεπόμενες θέσεις. Προκειμένου να εκτιμηθεί πόσο επηρεάζει ο τρόπος κίνησης την ενεργειακή κατανάλωση της διεργασίας θα δοκιμαστούν δύο διαφορετικά σενάρια λειτουργίας.



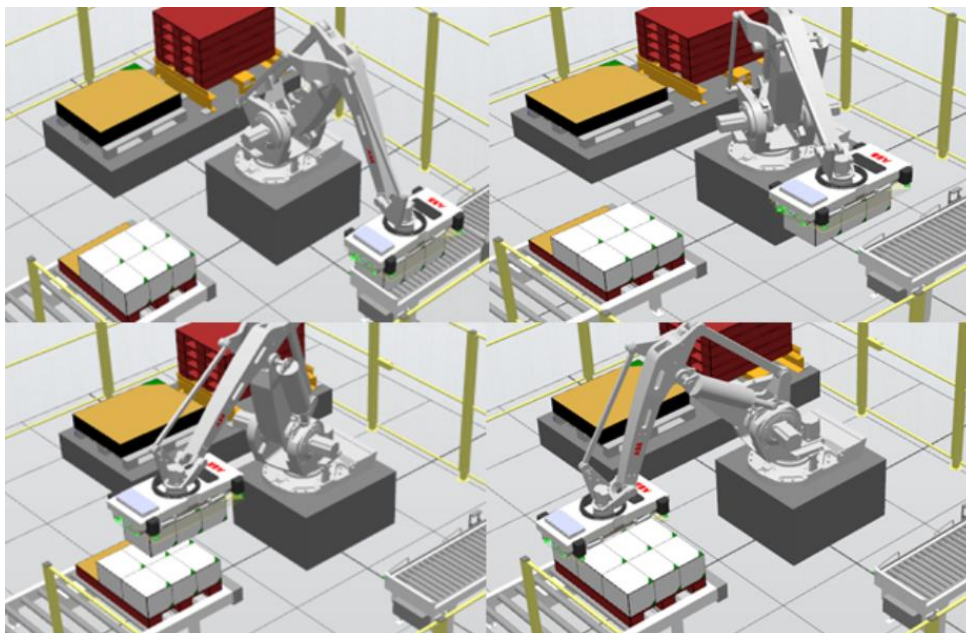
Εικόνα 7-1. Περιγραφή διαλογής και τοποθέτησης της παλέτας στο ταινιόδρομο εξόδου σε μία σειρά εικόνων μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.



Εικόνα 7-2. Περιγραφή διαλογής και τοποθέτησης των διαχωριστικών φύλλων στη παλέτα σε μία σειρά εικόνων μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

7.1.1 Πρώτο μοντέλο

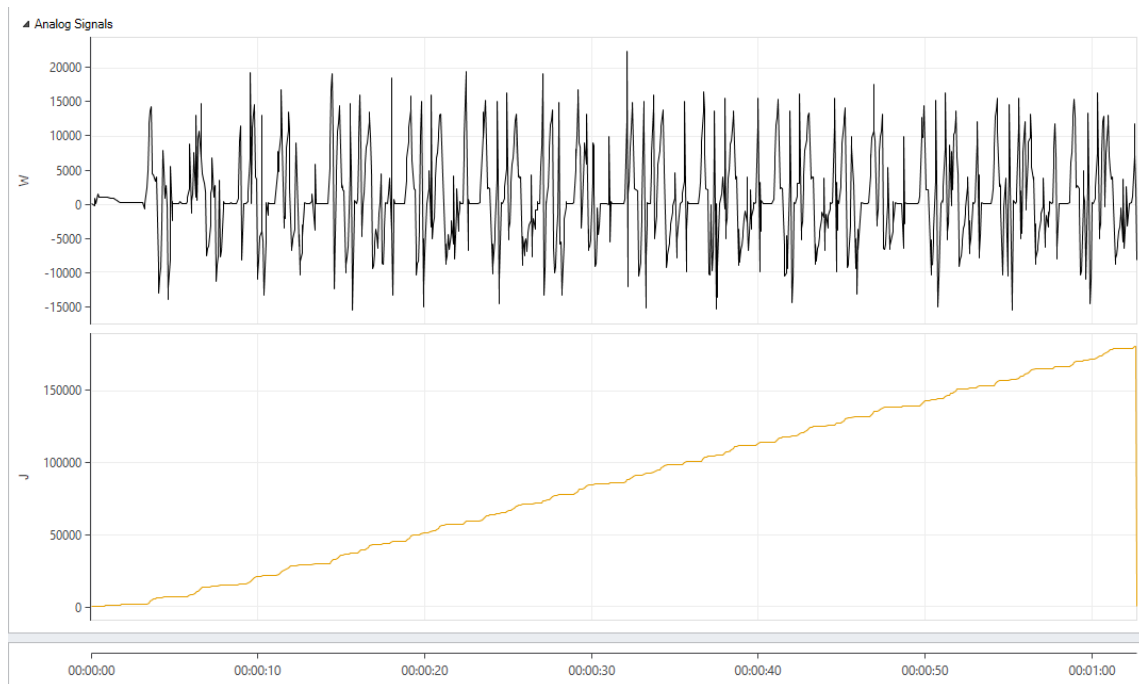
Στο πρώτο μοντέλο λειτουργίας, το εργαλείο αρπάγης θα εκτελεί μονάχα γραμμική κίνηση κατά τη μεταφορά των χαρτοκιβωτίων (εικόνα 7-3). Με σκοπό τη διεκπεραίωση της εργασίας στο ελάχιστο χρονικό διάστημα, επιτράπηκε στο σύστημα να λειτουργήσει στο μέγιστο των δυνατοτήτων του βάσει συνθηκών. Συγκεκριμένα, από τη καρτέλα του “Palletizing PowerPac” και την επιλογή “Simulation” ρυθμίστηκε η ταχύτητα στο μέγιστο δυνατό (full speed).



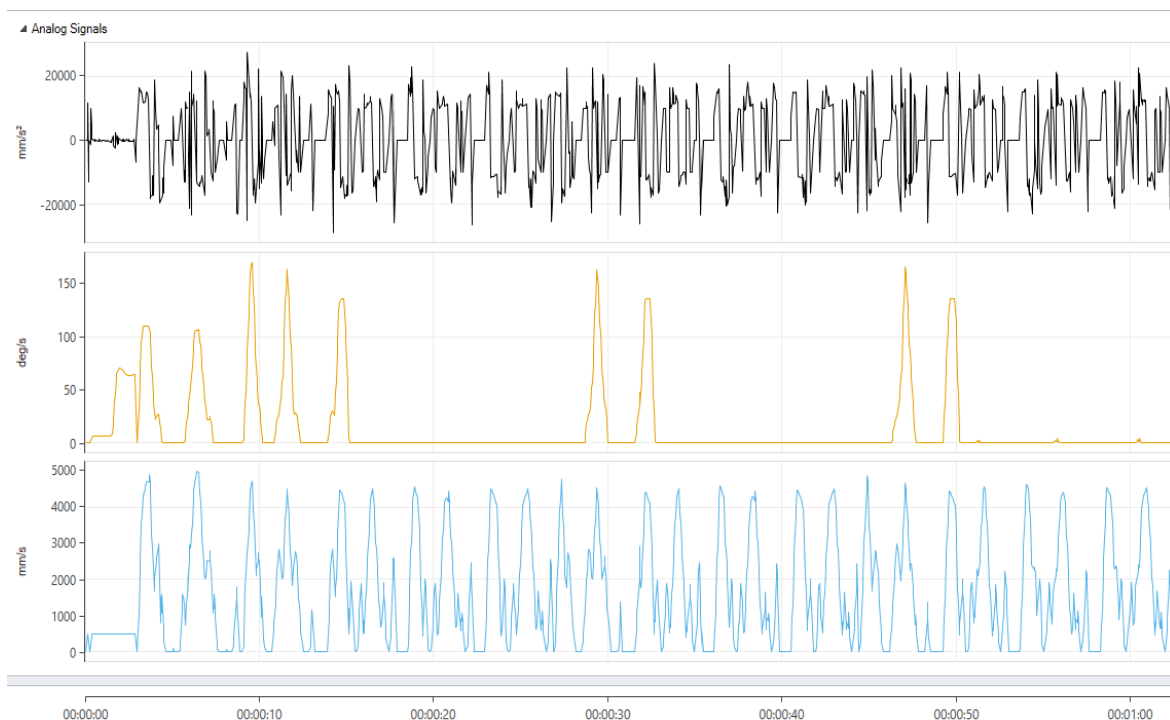
Εικόνα 7-3. Περιγραφή διαλογής και τοποθέτησης των χαρτοκιβωτίων στη παλέτα για το πρώτο μοντέλο λειτουργίας μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

Η ολοκλήρωση ενός εργασιακού κύκλου διήρκεσε συνολικά 61,9 δευτερόλεπτα και καταναλώθηκαν συνολικά 180.398,8 J. Σε διάστημα μίας ώρας μέσω του “operator interface” υπολογίστηκε ότι με αυτό το ρυθμό μπορούν να παλετοποιηθούν συνολικά 1.599 χαρτοκιβώτια χρησιμοποιώντας συνολικά 59 παλέτες και 177 διαχωριστικά φύλλα. Από την

εικόνα 7-4 αποτυπώνεται ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα.



Εικόνα 7-4. Ενεργειακό αποτύπωμα του πρώτου μοντέλου κατά τη λειτουργία του μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio.



Εικόνα 7-5. Γραφική απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς του κεντρικού σημείου αναφοράς του εργαλείου που είναι προσαρτημένο στο βραχίονα (TCP) για το πρώτο μοντέλο.

Η εικόνα 7-5 διακρίνεται από τρία διαγράμματα τα οποία αναφέρονται στο κεντρικό σημείο αναφοράς του εργαλείου που είναι προσαρτημένο στο βραχίονα (TCP). Το πρώτο αναφέρεται στην γραμμική επιτάχυνση του, το δεύτερο στη ταχύτητα με την οποία κινείται

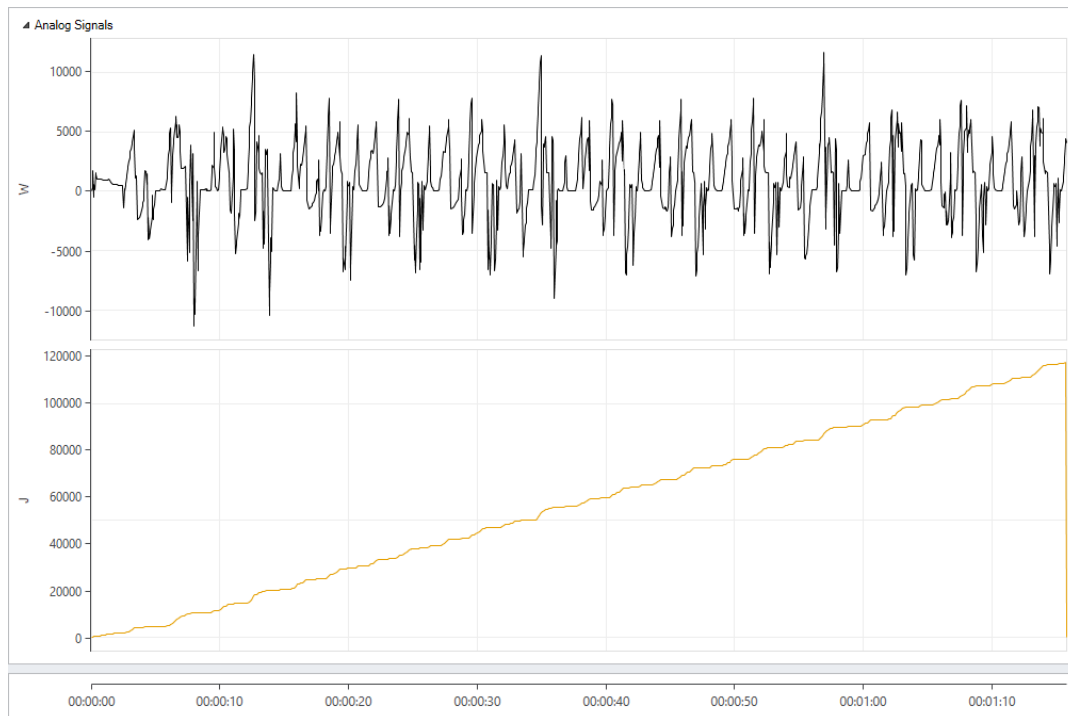
και το τρίτο περιγράφει τη γωνιακή ταχύτητα σε σχέση με το αντικείμενο εργασίας. Από τα γραφήματα φανερώνεται ότι η ταχύτητα σε στιγμές κατά τη διάρκεια της μεταφοράς των χαρτοκιβωτίων ξεπερνάει τα 4.000 mm/s με μέγιστη τιμή τα 5.000,29 mm/s, ενώ στις περιόδους όπου μεταφέρονται οι παλέτες και τα διαχωριστικά φύλλα, η ταχύτητα περιστροφής ξεπερνάει τα 100 deg/s. Η επιτάχυνση κατά τη λειτουργία του μοντέλου παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις όπως και η κατανάλωση ισχύος που φανερώνεται στο πρώτο διάγραμμα της εικόνας 7-4.

Επιχειρώντας να βελτιστοποιηθεί η ενεργειακή απόδοση εκπληρώνοντας παράλληλα τις απαιτήσεις της βιομηχανίας, πραγματοποιήθηκαν παραμετροποιήσεις, οι οποίες σταδιακά περιορίζουν τη δυναμική συμπεριφορά του ρομποτικού βραχίονα με σκοπό τον περιορισμό των απότομων εναλλαγών ταχύτητας που οδηγούν σε υπερβολικές ενεργειακές απαιτήσεις. Στο πίνακα 7-1 αποτυπώνονται οι παραμετροποιήσεις στις οποίες ορίζονται κάθε φορά τα όρια που σχετίζονται με τη ταχύτητα του συστήματος.

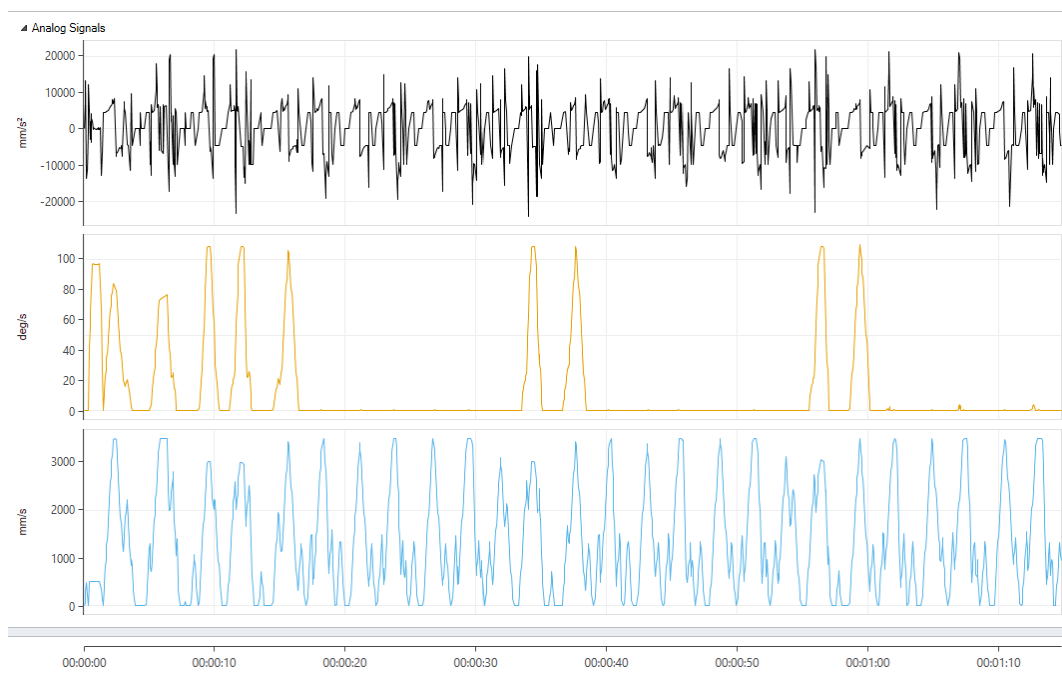
Παραμετροποιήσεις	Rotation speed (deg/s)	Acceleration (mm/s ²)	Speed (mm/s)	Χρονικός κύκλος (sec)	Ενεργειακή κατανάλωση (Joule)	Πακέτα ανά ώρα
1	250	12.000	4.600	64,2	169.771,3	1.515
2	200	8.000	4.000	66,2	144.449	1.468
3	200	5.000	3.800	72,8	123.154,6	1.334
4	200	5.000	3.500	73,2	120.424,1	1.327
5	200	4.600	3.500	74,6	115.853,9	1.301

Πίνακας 7-1. Παραμετροποιήσεις πρώτου μοντέλου για τον ρομποτικό βραχίονα IRB 460.

Περιορίζοντας σταδιακά τη δυναμική συμπεριφορά του ρομποτικού βραχίονα προέκυψε ότι για την επίτευξη της παλετοποίησης 1.300 χαρτοκιβωτίων διαμορφώθηκε ένα μοντέλο το οποίο καταναλώνει 115.853,9 J ανά 74,6 δευτερόλεπτα που διαρκεί ο πλέον χρονικός κύκλος της διεργασίας. Για τις ανάγκες της επίτευξης του συγκεκριμένου μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν 48 παλέτες και 144 διαχωριστικά φύλλα. Στην εικόνα 7-6 και 7-7 φανερώνεται η νέα ενεργειακή και δυναμική συμπεριφορά του συστήματος αντίστοιχα κατά τη λειτουργία της 5^{ης} παραμετροποίησης.



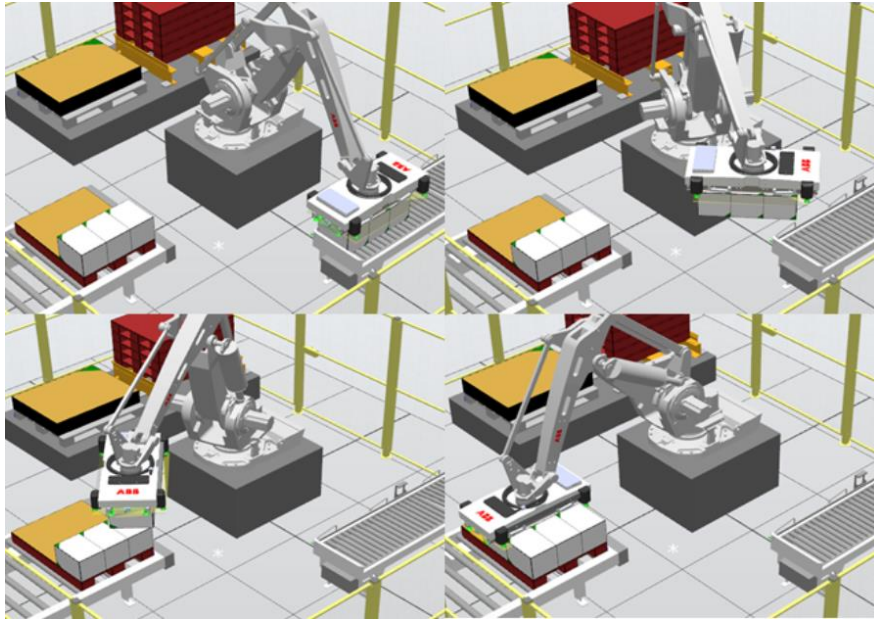
Εικόνα 7-6. Ενεργειακό αποτύπωμα του βελτιστοποιημένου πρώτου μοντέλου κατά τη λειτουργία του μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio.



Εικόνα 7-7. Γραφική απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς του κεντρικού σημείου αναφοράς του εργαλείου που είναι προσαρτημένο στο βραχίονα (TCP) για το βελτιστοποιημένο πρώτο μοντέλο.

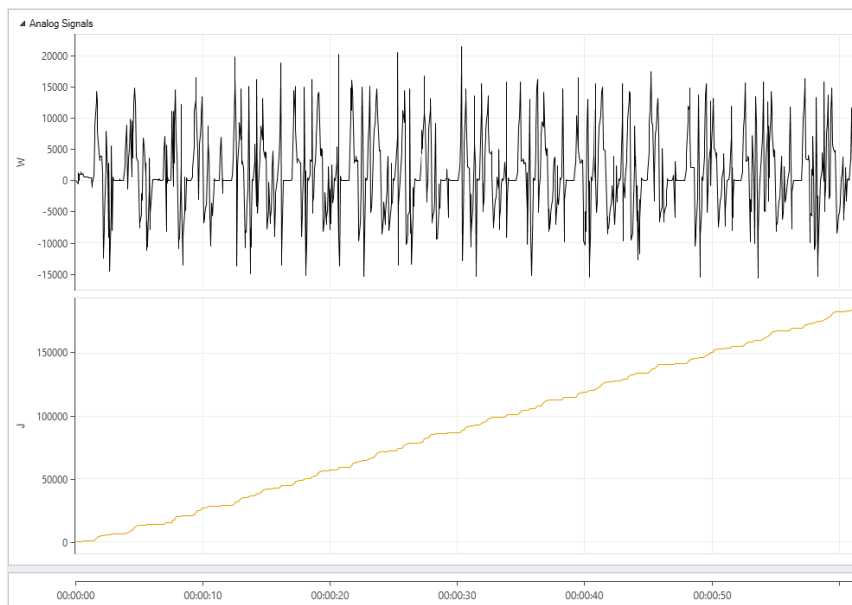
7.1.2 Δεύτερο μοντέλο

Για τη διαμόρφωση του δεύτερου μοντέλου εφαρμόστηκε η ίδια διαδικασία με τη διαφορά ότι κατά τη μεταφορά των χαρτοκιβωτίων, πλέον διαγράφεται μία πορεία πρισματικής και περιστροφικής κίνησης 180 μοιρών από τη στιγμή της διαλογής τους μέχρι τη τοποθέτηση τους στη παλέτα.

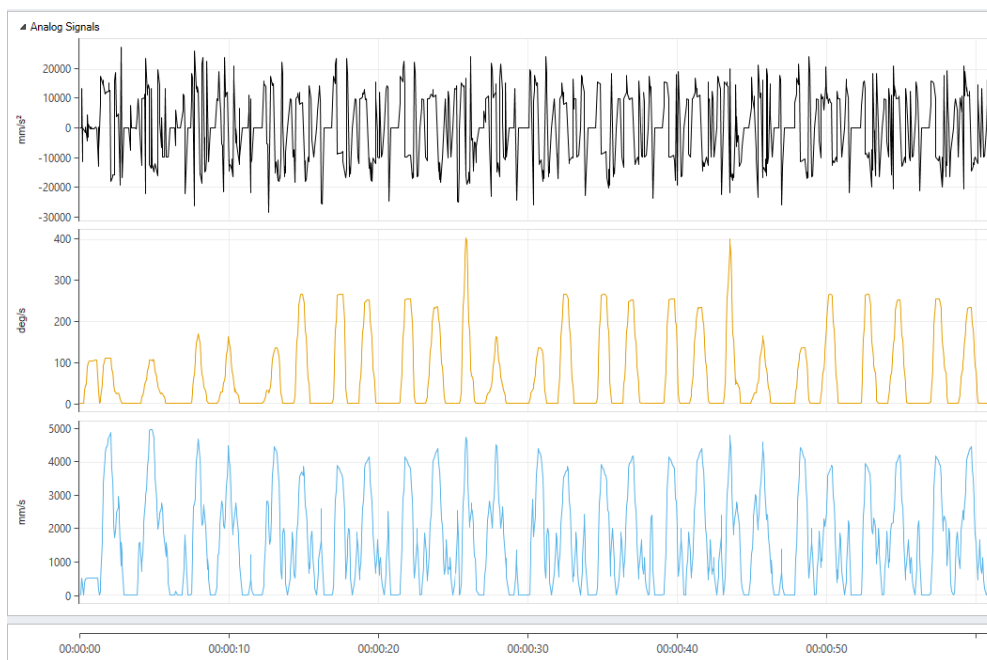


Εικόνα 7-8. Περιγραφή διαλογής και τοποθέτησης των χαρτοκιβωτίων στη παλέτα για το δεύτερο μοντέλο λειτουργίας μέσα από το λογισμικό ABB Robotstudio.

Για αρχή, επιτρέψαμε την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα στο μέγιστο της ταχύτητας του. Η ολοκλήρωση ενός εργασιακού κύκλου διήρκεσε συνολικά 61,9 δευτερόλεπτα και καταναλώθηκαν συνολικά 184.701,8 J. Σε διάστημα μίας ώρας μέσω του “operator interface” υπολογίστηκε ότι συνολικά με αυτό το ρυθμό μπορούν να παλετοποιηθούν συνολικά 1.591 χαρτοκιβώτια χρησιμοποιώντας συνολικά 58 παλέτες και 176 διαχωριστικά φύλλα. Από την εικόνα 7-10 αποτυπώνεται η δυναμική συμπεριφορά του ρομποτικού βραχίονα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, ενώ στην εικόνα 7-9 φανερώνεται πόσο ενέργεια χρειαζόταν το σύστημα για να λειτουργήσει στις συνθήκες που ορίστηκαν.



Εικόνα 7-9. Ενεργειακό αποτύπωμα του δεύτερου μοντέλου κατά τη λειτουργία του μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio



Εικόνα 7-10. Γραφική απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς του κεντρικού σημείου αναφοράς του εργαλείου που είναι προσαρτημένο στο βραχίονα (TCP) για το δεύτερο μοντέλο.

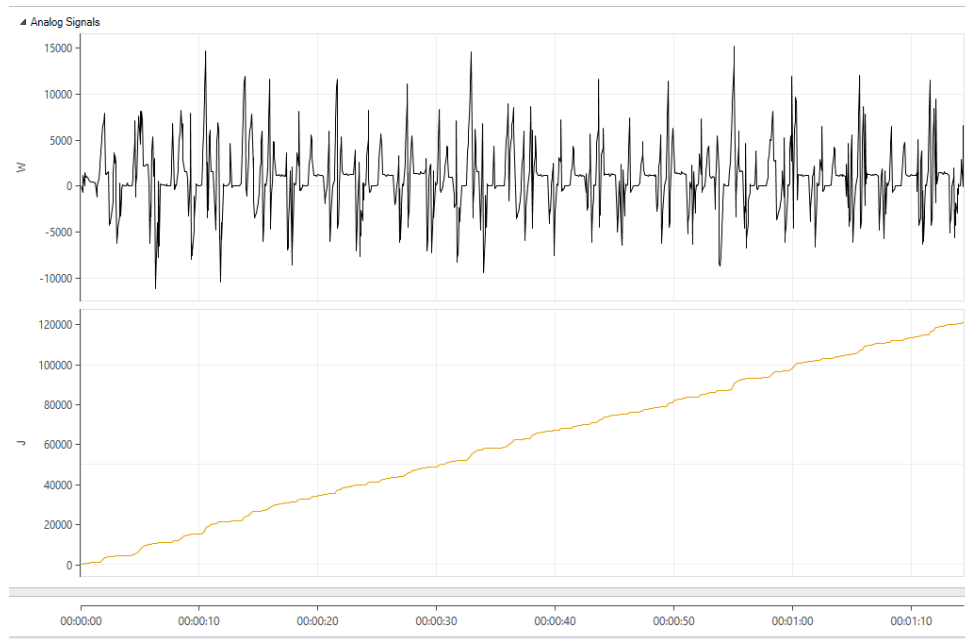
Η εικόνα 7-10 αποτελείται από τρία διαγράμματα τα οποία αναφέρονται στην επιτάχυνση, τη ταχύτητα με την οποία κινείται και το τρίτο περιγράφει τη ταχύτητα περιστροφής του κεντρικού σημείου αναφοράς του εργαλείου που είναι προσαρτημένο στο βραχίονα (TCP). Από τα γραφήματα φανερώνεται ότι η ταχύτητα σε στιγμές κατά τη διάρκεια της μεταφοράς των χαρτοκιβωτίων ξεπερνάει σε στιγμές τα 4.000 mm/s με μέγιστη τιμή τα 5.000,22 mm/s, ενώ στις περιόδους όπου μεταφέρονται τα επί μέρους στοιχεία η ταχύτητα περιστροφής ξεπερνάει τα 200 deg/s και φτάνει μέχρι 403,87 deg/s. Η επιτάχυνση κατά τη λειτουργία του συγκεκριμένου σεναρίου παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις όπως και κατανάλωση ισχύος που φανερώνεται στο πρώτο διάγραμμα της εικόνας 7-9.

Επιχειρώντας να βελτιστοποιηθεί η ενεργειακή απόδοση εκπληρώνοντας παράλληλα τις απαιτήσεις της βιομηχανίας ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με το πρώτο μοντέλο. Στο πίνακα 7-2 αποτυπώνονται οι παραμετροποιήσεις στις οποίες ορίζονται κάθε φορά τα όρια που σχετίζονται με τη ταχύτητα του συστήματος.

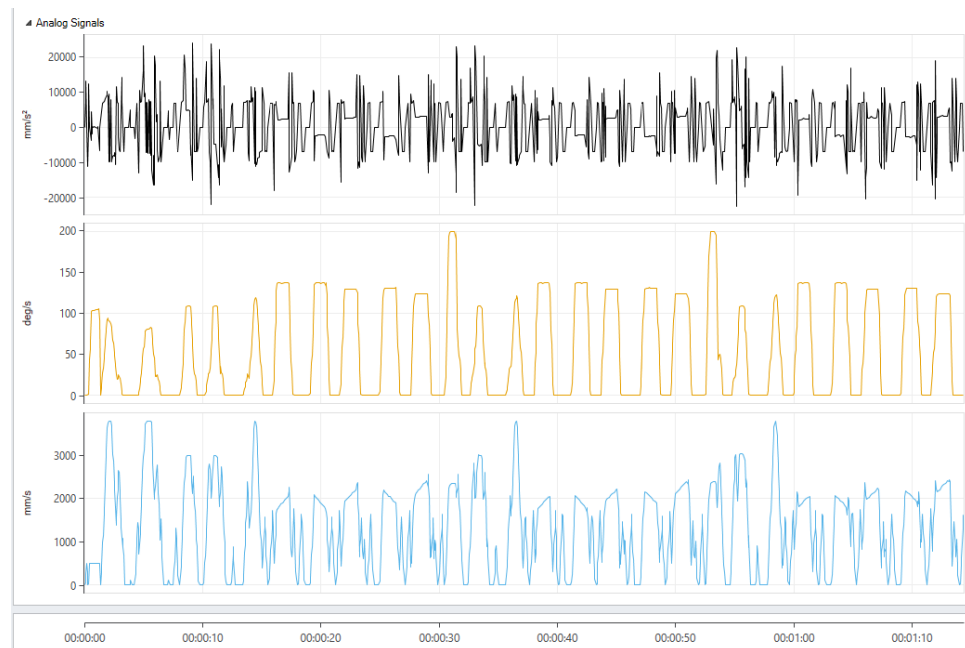
Παραμετροποιήσεις	Rotation speed (deg/s)	Acceleration (mm/s ²)	Speed (mm/s)	Χρονικός κύκλος (sec)	Ενεργειακή κατανάλωση (Joule)	Πακέτα ανά ώρα
6	250	12.000	4.500	66,8	155.925,4	1.454
7	200	10.000	4.200	71,0	133.853,5	1.367
8	200	10.000	4.000	71,4	139.471,6	1.360
9	200	9.000	3.800	72,0	129.199,1	1.349
10	200	7.000	3.800	74,4	121.239,9	1.305

Πίνακας 7-2. Παραμετροποιήσεις δεύτερου μοντέλου για τον ρομποτικό βραχίονα IRB 460

Περιορίζοντας σταδιακά τη δυναμική συμπεριφορά του ρομποτικού βραχίονα διαμορφώθηκε ένα μοντέλο το οποίο καταναλώνει 121.239,9 J ανά 74,4 δευτερόλεπτα που διαρκεί ο χρονικός κύκλος. Για τις ανάγκες της επίτευξης του συγκεκριμένου μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν 48 παλέτες και 145 διαχωριστικά φύλλα. Στην εικόνα 7-12 φανερώνεται η νέα δυναμική διακύμανση των ταχυτήτων και στη εικόνα 7-11 φανερώνεται το νέο ενεργειακό αποτύπωμα κατά τη λειτουργία για τη 10^η παραμετροποίηση.



Εικόνα 7-11. Ενεργειακό αποτύπωμα του βελτιστοποιημένου δεύτερου μοντέλου κατά τη λειτουργία του μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio.



Εικόνα 7-12. Γραφική απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς του κεντρικού σημείου αναφοράς του εργαλείου που είναι προσαρτημένο στο βραχίονα (TCP) για το βελτιστοποιημένο δεύτερο μοντέλο.

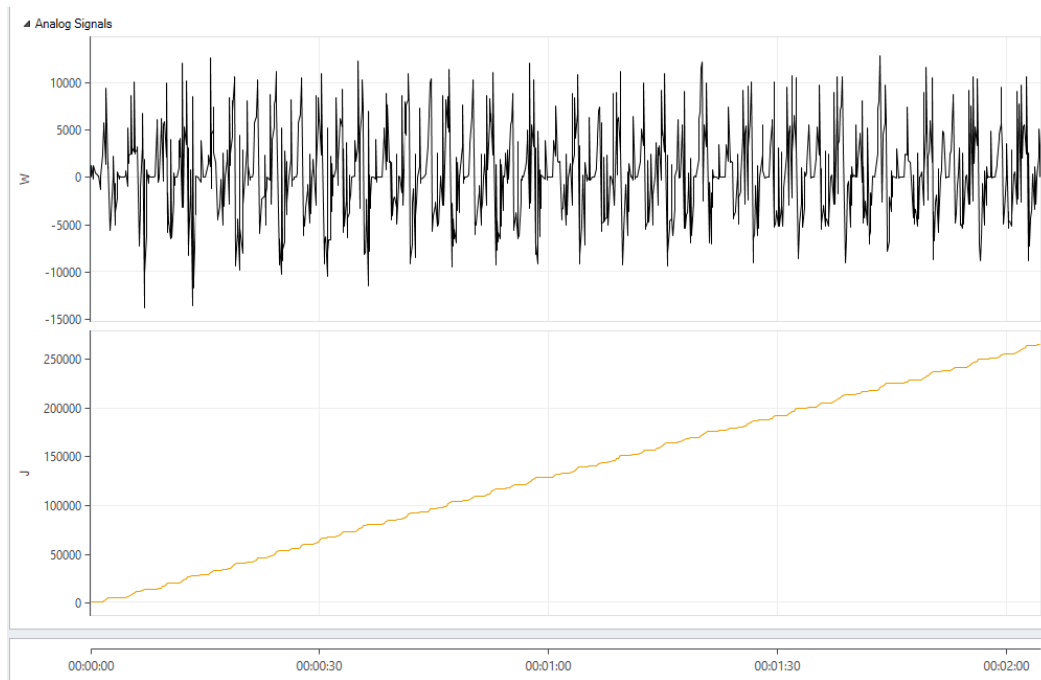
7.2 Δεύτερο σενάριο λειτουργίας

Στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας επιλέχθηκε ο ρομποτικός βραχίονας IRB 660 και το εργαλείο αρπάγης αναρρόφησης αέρα “FlexGripper Vacuum”. Η τοποθέτηση των δομικών στοιχείων και σε αυτό το σενάριο πραγματοποιήθηκε σε απόσταση περίπου της μισής της μέγιστης προέκτασης του ρομποτικού βραχίονα, δηλαδή σε απόσταση περίπου 1,6 μέτρα. Ο συγκεκριμένος ρομποτικός βραχίονας έχει δυνατότητα ανύψωσης φορτίου ίσο με 180 κιλά. Σε συνδυασμό με τον εργαλείο αρπάγης που επελέγη, το σύστημα που τοποθετήθηκε είναι ικανό να ανυψώσει συνολικά μέχρι τρία χαρτοκιβώτια για κάθε μεταφορά, οπότε η εισαγωγή των χαρτοκιβωτίων στο ταινιόδρομο εισόδου γίνεται σε ομάδες των τριών. Με βάση το μέγιστο δυνατό ύψος που μπορεί να εργαστεί ο ρομποτικός βραχίονας IRB 660 με τις συνθήκες που ορίστηκαν, ρυθμίστηκε η τοποθέτηση των χαρτοκιβωτίων σε πέντε σειρές και τρεις στήλες πάνω στη παλέτα.

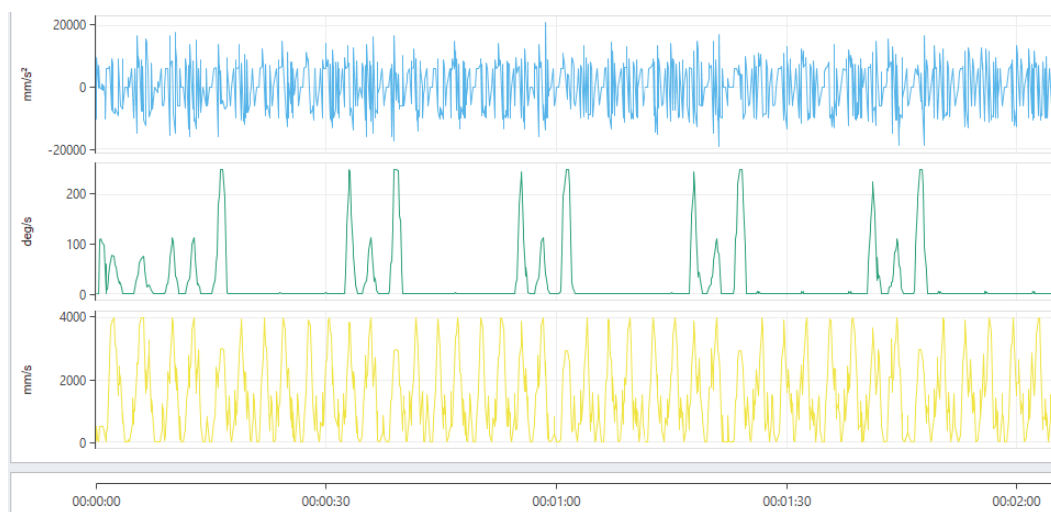
Ομοίως με το πρώτο μοντέλο η μεταφορά της παλέτας και των διαχωριστικών φύλλων πραγματοποιήθηκε με γραμμική και περισματική κίνηση 90 μοιρών του εργαλείου αρπάγης από τη στιγμή της διαλογής τους μέχρι τη τοποθέτησή τους στα προβλεπόμενα σημεία. Και αυτό το σενάριο αποτελείται από δύο μοντέλα τα οποία ακολούθησαν την ίδια λογική με τα δύο πρώτα.

7.2.1 Τρίτο μοντέλο

Το τρίτο μοντέλο λειτουργίας ως προς τα χαρακτηριστικά του είναι όμοιο με το πρώτο. Με το ρομποτικό βραχίονα IRB 660 να λειτουργεί στο μέγιστο των δυνατοτήτων του, προέκυψε ότι ένας εργασιακός κύκλος διήρκησε 114,4 δευτερόλεπτα καταναλώνοντας συνολικά 356.548,2 J. Μέσω του “operator interface” διαπιστώθηκε ότι σε μία ώρα είναι δυνατή η παλετοποίηση 1.414 χαρτοκιβωτίων με τη χρήση 30 παλετών και 153 διαχωριστικών φύλλων. Μετά από μία σειρά παραμετροποιήσεων στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, δημιουργήθηκε ένα νέο βελτιστοποιημένο μοντέλο το οποίο ολοκληρώνει ένα εργασιακό κύκλο σε διάστημα 124,8 δευτερολέπτων με συνολική κατανάλωση 266,373,8 J. Για τις ανάγκες της εργασίας συνολική απαιτήθηκαν 28 παλέτες και 144 διαχωριστικά φύλλα σε διάστημα μίας ώρας.



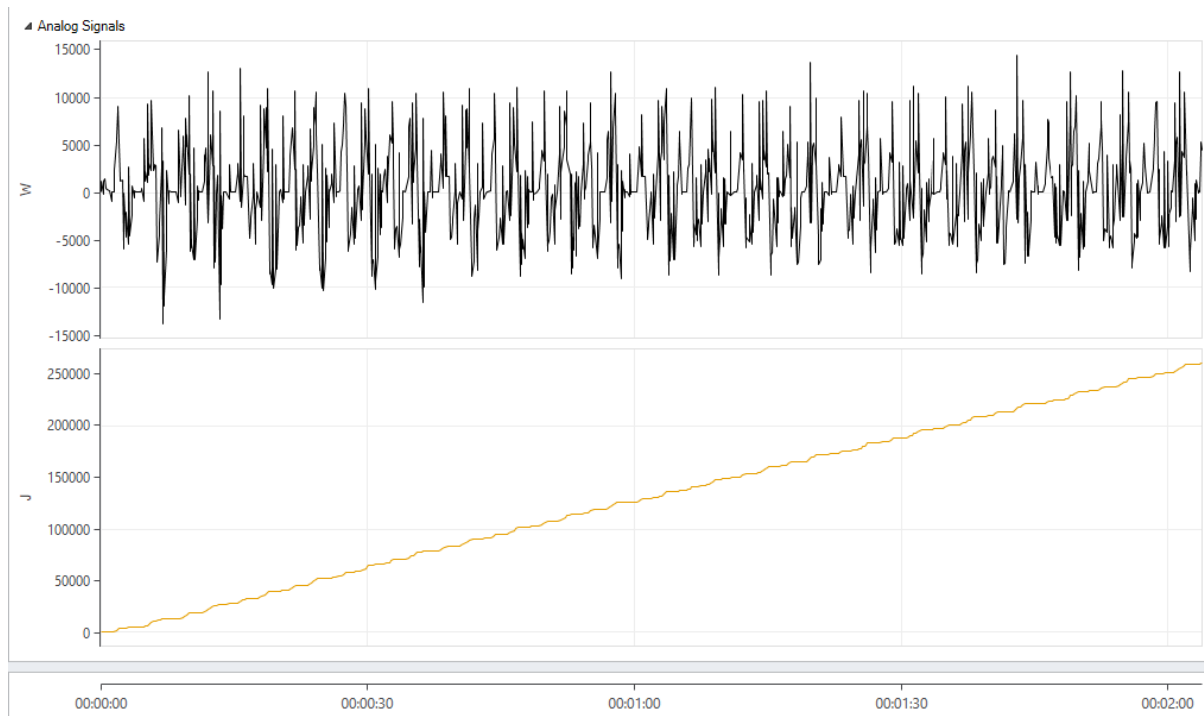
Εικόνα 7-13. Ενεργειακό αποτύπωμα του βελτιστοποιημένου τρίτου μοντέλου κατά τη λειτουργία του μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio.



Εικόνα 7-14. Γραφική απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς του κεντρικού σημείου αναφοράς του εργαλείου που είναι προσαρτημένο στο βραχίονα (TCP) για το βελτιστοποιημένο τρίτο μοντέλο.

7.2.2 Τέταρτο μοντέλο

Για τέταρτο μοντέλο το οποίο είναι όμοιο σε λειτουργία με το δεύτερο μέσα από μία σειρά παραμετροποιήσεων στο δυναμικό χαρακτήρα του συστήματος διαπιστώθηκε ότι ο κύκλος μίας διεργασίας έχει διάρκεια 124,0 δευτερόλεπτα με συνολική κατανάλωση 261.305,5 J. Σε αυτό το διάστημα για τη παλετοποίηση 1.300 χαρτοκιβωτίων απαιτήθηκαν 29 παλέτες και 145 διαχωριστικά φύλλα.



Εικόνα 7-15. Ενεργειακό αποτύπωμα του βελτιστοποιημένου τέταρτου μοντέλου κατά τη λειτουργία του μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio.



Εικόνα 7-16. Γραφική απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς του κεντρικού σημείου αναφοράς του εργαλείου που είναι προσαρτημένο στο βραχίονα (TCP) για το βελτιστοποιημένο τέταρτο μοντέλο.

7.3 Τρίτο σενάριο λειτουργίας

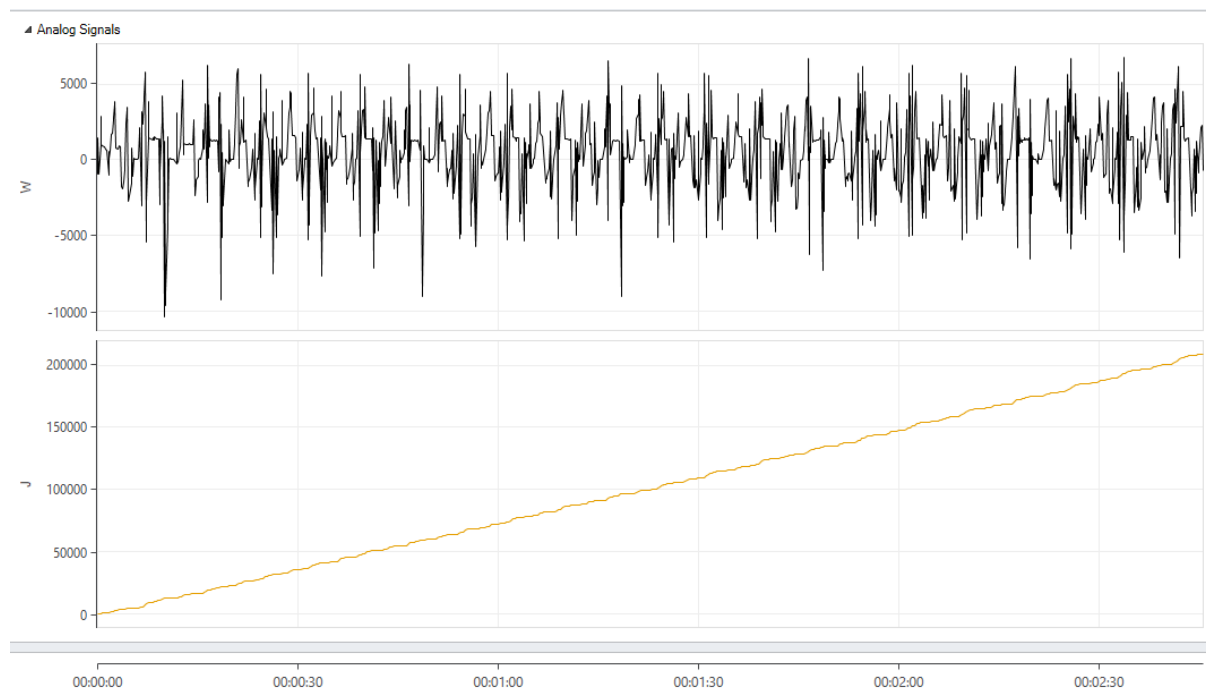
Για το τρίτο σενάριο λειτουργίας επελέγη ο ρομποτικός βραχίονας IRB 760 και ένα εργαλείο αρπάγης τύπου “CAD”, το οποίο βρίσκεται στη βιβλιοθήκη των εργαλείων στη καρτέλα του “Palletizing PowerPac”. Το συγκεκριμένο εργαλείο αρπάγης είναι αναρρόφησης αέρα με όνομα “Vacuum Gripper” και είναι παρόμοιο σε λειτουργία με το “FlexGripper

Vacuum” που χρησιμοποιήθηκε για τα προηγούμενα δύο σενάρια. Διακρίνεται από 10 ζώνες αναρρόφησης αέρα και τέσσερις δαγκάνες αρπάγης για τη παλέτα.

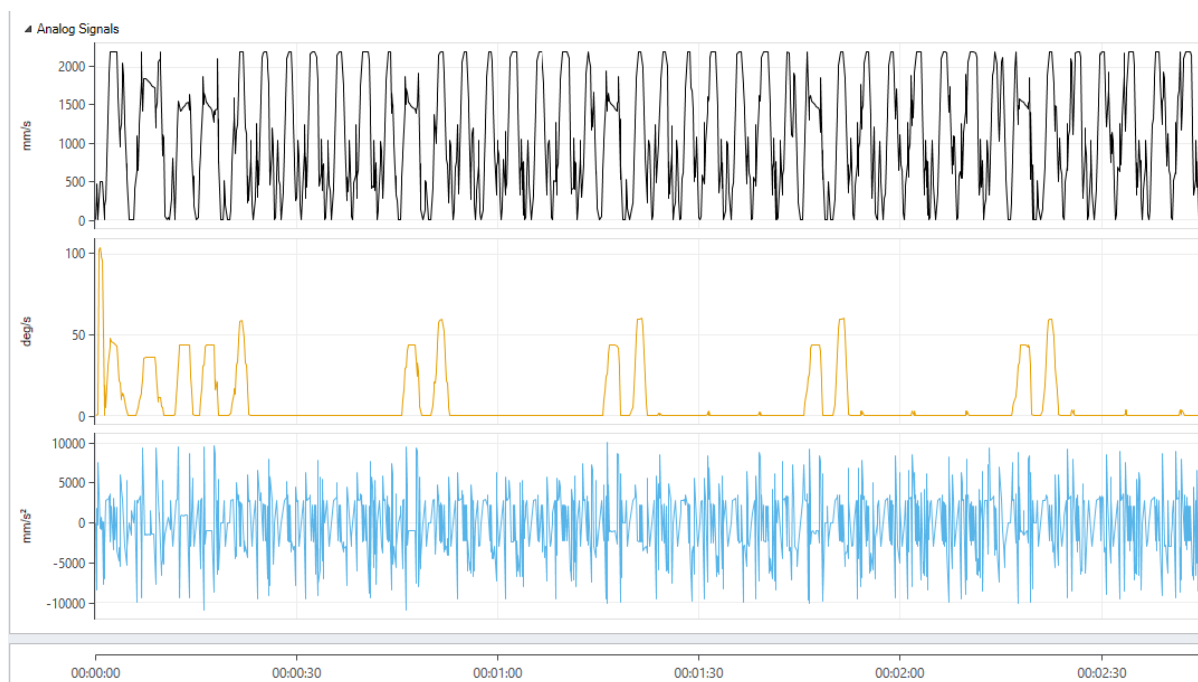
Ο ρομποτικός βραχίονας IRB 760 έχει ικανότητας ανύψωσης φορτίου 450 κιλών, φορτίο υπερδιπλάσιο συγκριτικά με το βραχίονα IRB 660. Για τη δημιουργία ενός ανταγωνιστικού σεναρίου ορίστηκαν οι δυνατότητες του εργαλείου αρπάγης. Συγκεκριμένα, το βάρος του ορίστηκε στα 140 κιλά με δυνατότητα διαχείρισης φορτίου έως 80 κιλά, μεγέθη διπλάσια συγκριτικά με το εργαλείο αρπάγης “FlexGripper Vacuum”. Με βάση τις δυνατότητες του εργαλείου αρπάγης ορίστηκε το μέγιστο δυνατό φορτίο που μπορεί να διαχειριστεί το οποίο ορίζεται στα τέσσερα χαρτοκιβώτια ανά μεταφορά. Επομένως, ο ταινιόδρομος εισόδου των χαρτοκιβωτίων (In-feeder conveyor), θα εισάγει πλέον τα χαρτοκιβώτια σε ομάδες των τεσσάρων. Η τοποθέτηση των δομικών στοιχείων πραγματοποιήθηκε σε απόσταση περίπου 1,6 μέτρα από το ρομποτικό βραχίονα IRB 760 και με βάση το μέγιστο μήκος και ύψος που μπορεί να εργαστεί, τα χαρτοκιβώτια τοποθετήθηκαν σε 5 σειρές και 4 στήλες πάνω στη παλέτα.

7.3.1 Πέμπτο μοντέλο

Όμοιο με το πρώτο και τρίτο μοντέλο, το πέμπτο μοντέλο κατά τη διάρκεια της μεταφοράς των χαρτοκιβωτίων το εργαλείο αρπάγης εκτελεί μονάχα γραμμική μεταφορά. Επιτρέποντας τη κίνηση του συστήματος στο μέγιστο των δυνατοτήτων του διαπιστώθηκε ότι σε διάστημα 135 δευτερολέπτων ολοκληρώνεται ένας εργασιακός κύκλος με συνολική κατανάλωση 322.791,6 J. Παραμετροποιώντας τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος με στόχο τον ενεργειακό περιορισμό, δημιουργήθηκε ένα νέο μοντέλο το οποίο συνολικά καταναλώνει 208.631 J για χρονικό κύκλο διάρκειας 165 δευτερολέπτων. Για τις ανάγκες του νέου μοντέλου απαιτήθηκαν συνολικά 21 παλέτες και 108 διαχωριστικά φύλλα για διάστημα μίας ώρας.



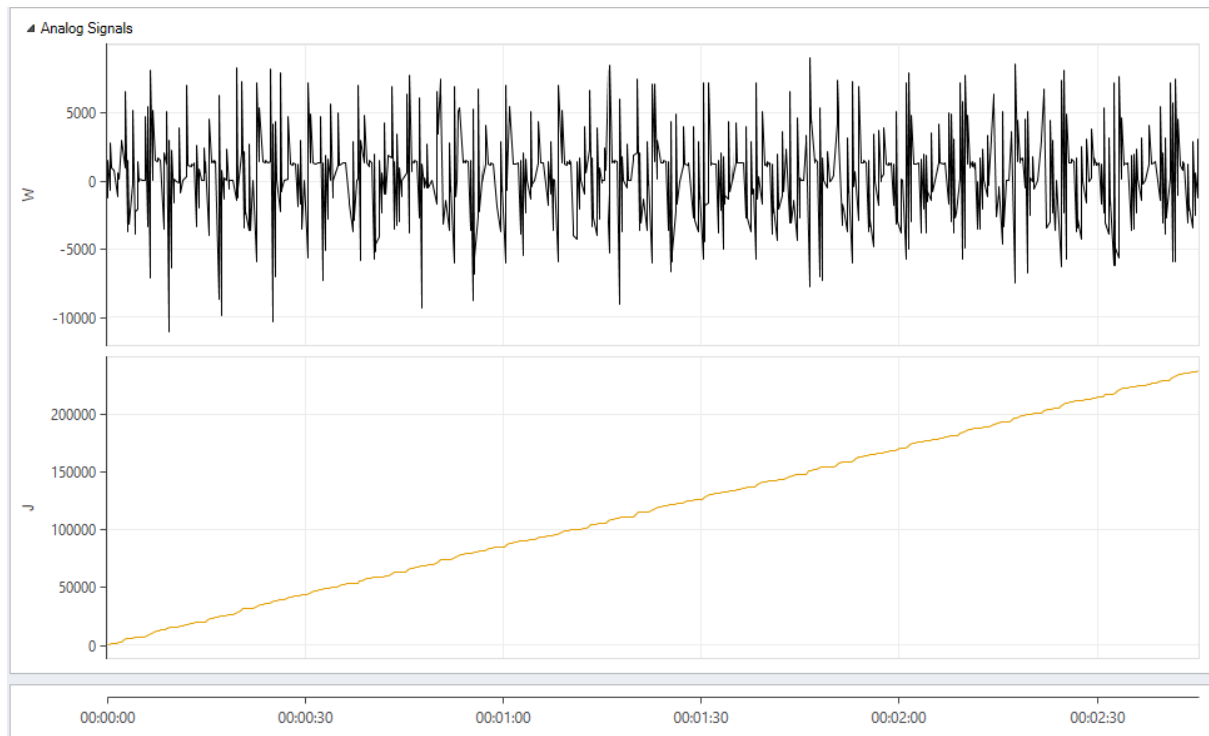
Εικόνα 7-17. Ενεργειακό αποτύπωμα του βελτιστοποιημένου πέμπτου μοντέλου κατά τη λειτουργία του μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio.



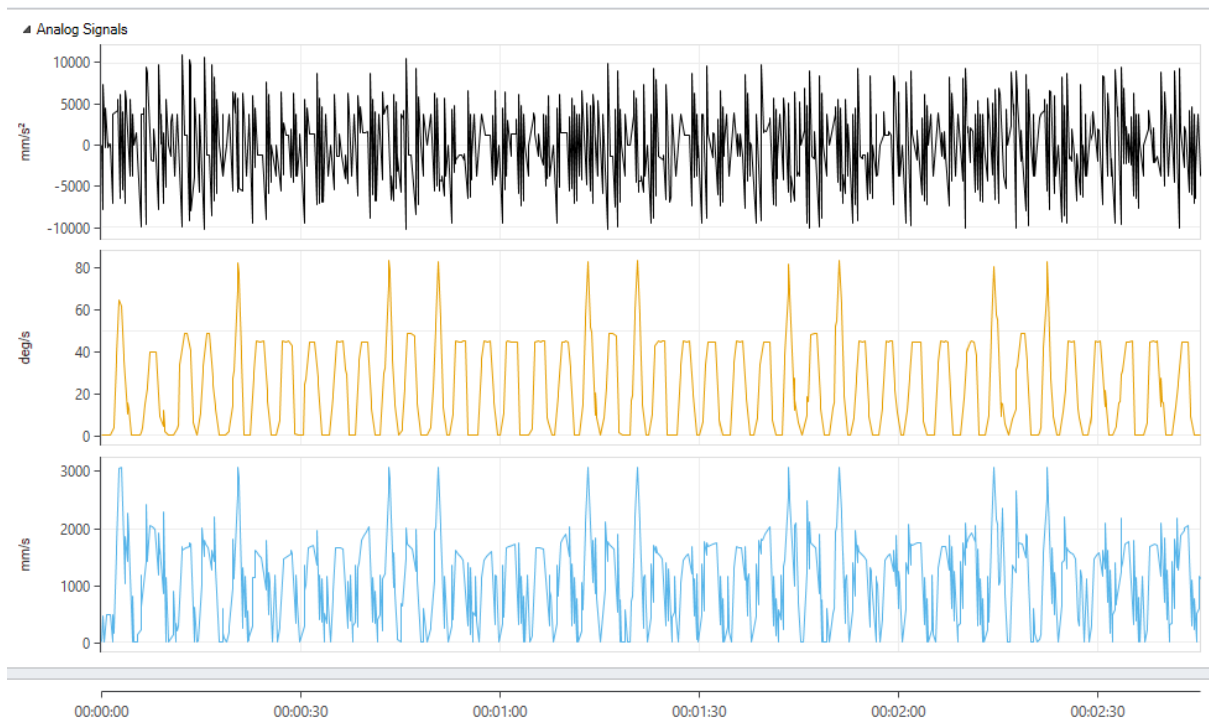
Εικόνα 7-18. Γραφική απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς του κεντρικού σημείου αναφοράς του εργαλείου που είναι προσαρτημένο στο βραχίονα (TCP) για το βελτιστοποιημένο πέμπτο μοντέλο.

7.3.2 Έκτο μοντέλο

Το έκτο μοντέλο ακολουθεί τη λογική του δεύτερου και τέταρτου μοντέλου με τη διαφορά ότι πλέον το εργαλείο αρπάγης διαγράφει γραμμική και περιστροφική κίνηση 90 μοιρών από τη στιγμή της διαλογής μέχρι τη στιγμή της τοποθέτησης των χαρτοκιβωτίων στη παλέτα. Με το σύστημα να κινείται στο μέγιστο δυνατό βάση συνθηκών, διαπιστώθηκε ότι ένας κύκλος εργασίας ολοκληρώνεται σε διάστημα 139,2 δευτερολέπτων καταναλώνοντας συνολικά 336.828,3 J. Ακολουθώντας την ίδια λογική παραμετροποίησης της δυναμικής συμπεριφοράς του μοντέλου προέκυψε ένα βελτιστοποιημένο ενεργειακά μοντέλο το οποίο παράλληλα πληροί τις προϋποθέσεις της βιομηχανίας. Συγκεκριμένα, ένας εργασιακός κύκλος πλέον διαρκεί 165,3 δευτερόλεπτα με ενεργειακή κατανάλωση 238.088,6 J. Για τις ανάγκες του μοντέλου απαραίτητη είναι η χρήση 21 παλετών και 109 διαχωριστικών φύλλων για κάθε ώρα λειτουργίας.



Εικόνα 7-19. Ενεργειακό αποτύπωμα του βελτιστοποιημένου έκτου μοντέλου κατά τη λειτουργία του μέσα από το λογισμικό ABB RobotStudio.



Εικόνα 7-20. Γραφική απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς του κεντρικού σημείου αναφοράς του εργαλείου που είναι προσαρτημένο στο βραχίονα (TCP) για το βελτιστοποιημένο έκτο μοντέλο.

7.4 Παρατηρήσεις

Προκειμένου να εκτιμηθεί το συνολικό λειτουργικό κόστος για κάθε σενάριο έγινε μία μεμονωμένη εκτίμηση κάθε αντικειμένου που χρησιμοποιήθηκε στα σενάρια που προσομοιώθηκαν. Οι τιμές είναι προσεγγιστικές και αντιστοιχούν σε μια μέση τιμή των κοστολογήσεων που υπάρχει στην αγορά.

- Παλέτα \approx \$5
- Διαχωριστικό φύλλο \approx \$0,5

Εκτός από τα κόστη των αντικειμένων που χρησιμοποιήθηκαν, θα γίνει και μία εκτίμηση ως προς το ενεργειακό κόστος κατά τη λειτουργία των σεναρίων. Για τον υπολογισμό του κόστους για κάθε σενάριο μετατρέπεται η ενεργειακή κατανάλωση από Joule σε kilowatt-hours. Ο τύπος που θα χρησιμοποιηθεί είναι :

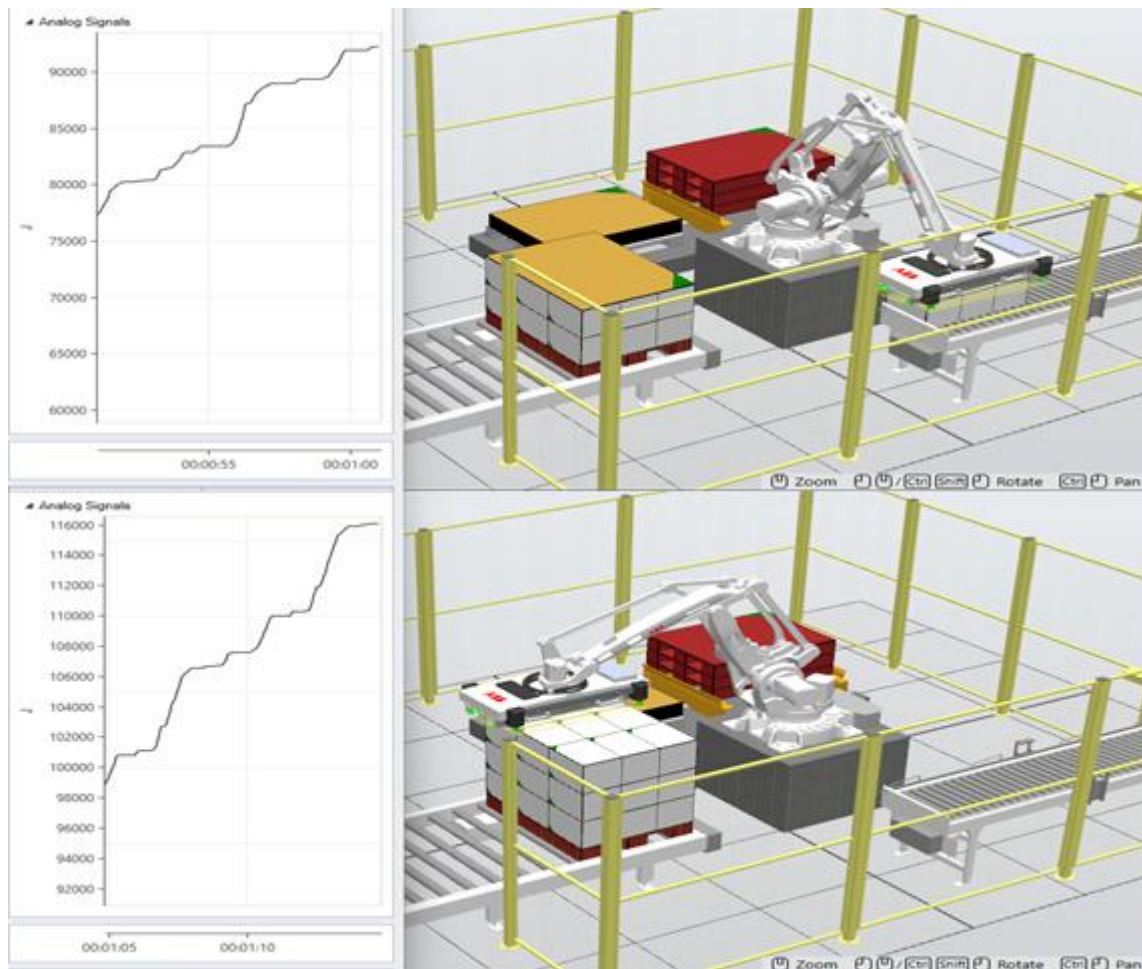
$$1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J} \quad [63]$$

Για την εκτίμηση του κόστους ενέργειας της διεργασίας που μελετήθηκε, ορίστηκε μία τιμή η οποία αντιστοιχεί στη κλίμακα του κόστους που θέτουν οι εταιρίες ενέργειας στην Ελλάδα.

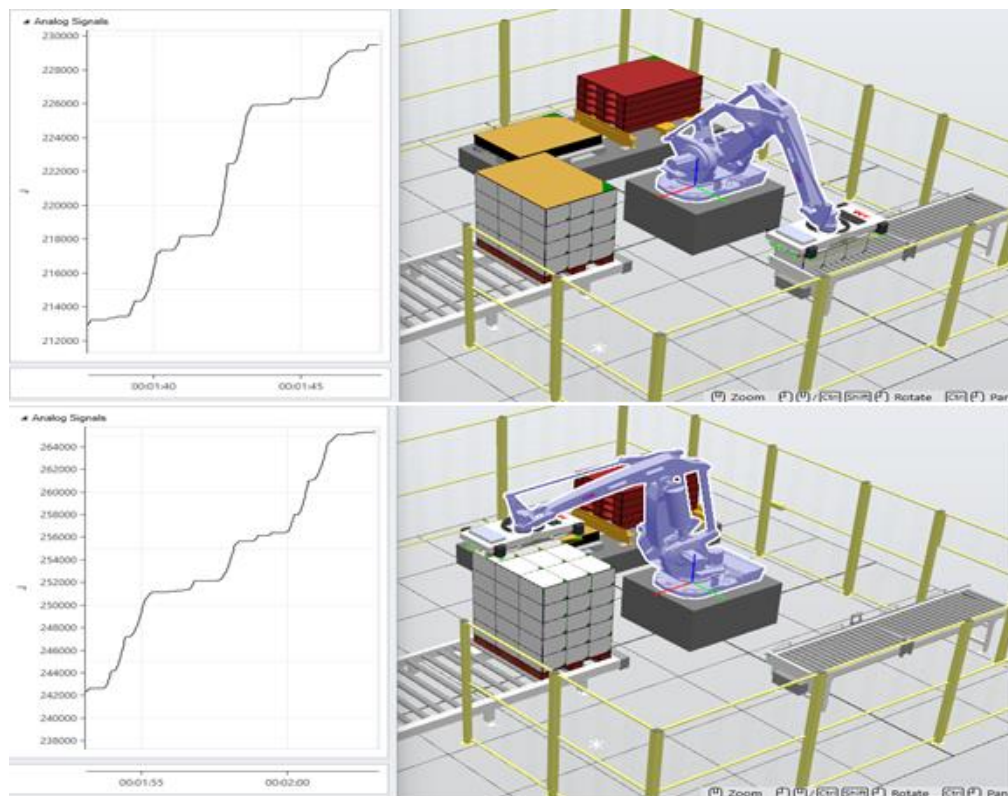
Μοντέλο	Κόστος παλετών ανά μήνα	Κόστος διαχωριστικών φύλλων ανά μήνα	Kwh ανά μήνα	Συνολικό ενεργειακό κόστος ανά μήνα (\$0,10/Kwh)
1°	\$53.760 (10.752 παλέτες)	\$16.128 (32.256 τεμ.)	347,872	\$34,78
2°	\$53.760 (10.752 παλέτες)	\$16.240 (32.480 τεμ.)	364,896	\$36,48
3°	\$31.360 (6.272 παλέτες)	\$16.128 (32.256 τεμ.)	478,016	\$47,80
4°	\$32.480 (6.496 παλέτες)	\$16.240 (32.480 τεμ.)	471,968	\$47,19
5°	\$23.520 (4.704 παλέτες)	\$12.096 (24.192 τεμ.)	283,136	\$28,31
6°	\$23.520 (4.704 παλέτες)	\$12.096 (24.416 τεμ.)	322,560	\$32,25

Πίνακας 7-3. Λειτουργικό κόστος για κάθε μοντέλο που προσομοιώθηκε.

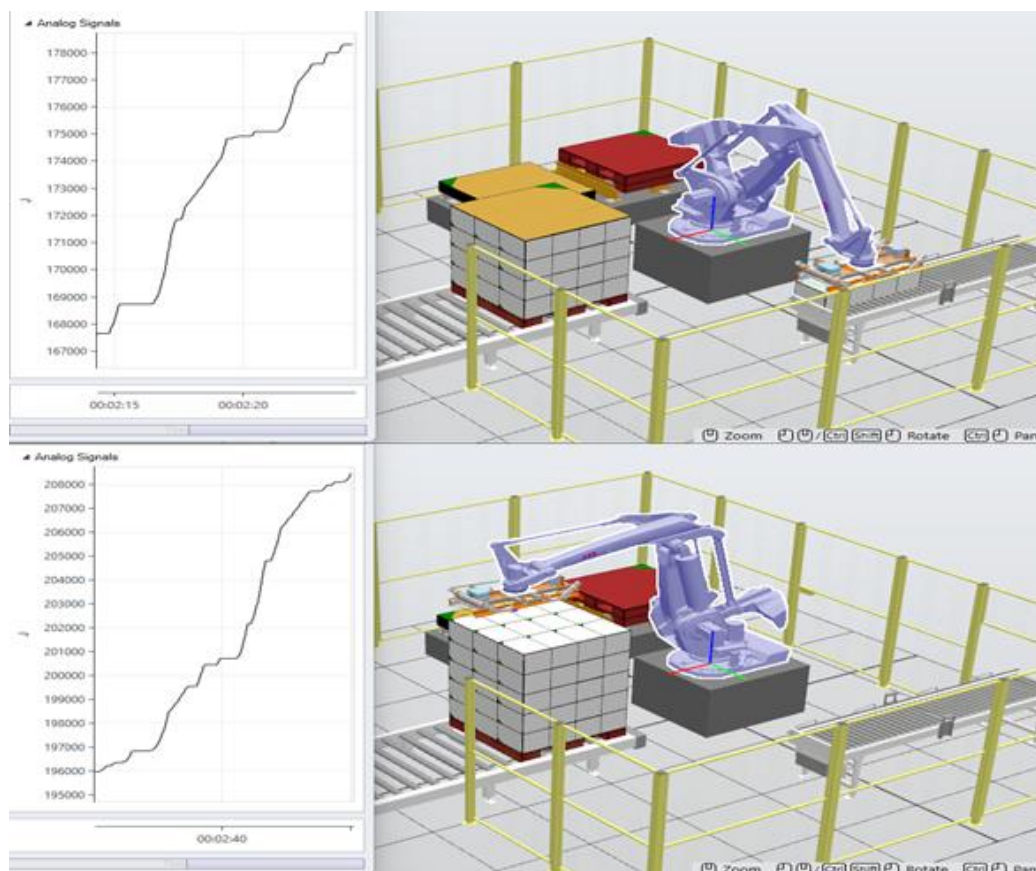
Εκτός από το λειτουργικό κόστος, πραγματοποιήθηκε μία εκτίμηση σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση του κάθε ρομποτικού βραχίονα ανάλογα το ύψος όπου εργάζεται. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε και στα τρία σενάρια ότι τις περιόδους όπου τοποθετούνταν τα χαρτοκιβώτια στη τελευταία σειρά πάνω στη παλέτα υπήρχαν και οι μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις, δηλαδή τις στιγμές που ο κάθε ρομποτικός βραχίονας εργαζόταν κοντά στο μέγιστο της δυνατής εμβέλειας του.



Εικόνα 7-21. Ενεργειακή κατανάλωση του ρομποτικού βραχίονα IRB 460 κατά τη τοποθέτηση των χαρτοκιβωτίων στη τελευταία σειρά πάνω στη παλέτα για το πρώτο μοντέλο



Εικόνα 7-22. Ενεργειακή κατανάλωση του ρομποτικού βραχίονα IRB 660 κατά τη τοποθέτηση των χαρτοκιβωτίων στη τελευταία σειρά πάνω στη παλέτα για το τρίτο μοντέλο



Εικόνα 7-23. Ενεργειακή κατανάλωση του ρομποτικού βραχίονα IRB 760 κατά τη τοποθέτηση των χαρτοκιβωτίων στη τελευταία σειρά πάνω στη παλέτα για το πέμπτο μοντέλο

Αναλυτικά παρατίθενται οι μετρήσεις της ενεργειακής κατανάλωσης ανά σειρά τοποθέτησης των χαρτοκιβωτίων στη παλέτα για κάθε σενάριο για τα μοντέλα γραμμικής μετακίνησης του εργαλείου αρπάγης για τις μεταφορές των χαρτοκιβωτίων, αφού αυτά θεωρήθηκαν ιδανικότερα ως προς τη συνολική κατανάλωση ενέργειας για κάθε σενάριο.

Σενάριο 1	Ενεργειακή κατανάλωση (Joule)
1η σειρά	23.000
2η σειρά	21.000
3η σειρά	24.000

Πίνακας 7-4. Ενεργειακή κατανάλωση του ρομποτικού βραχίονα IRB 460 για κάθε σειρά που τοποθετούσε χαρτοκιβώτια στη παλέτα για το πρώτο μοντέλο

Σενάριο 2	Ενεργειακή κατανάλωση (Joule)
1η σειρά	35.000
2η σειρά	32.000
3η σειρά	32.000
4η σειρά	33.000
5η σειρά	35.500

Πίνακας 7-5. Ενεργειακή κατανάλωση του ρομποτικού βραχίονα IRB 660 για κάθε σειρά που τοποθετούσε χαρτοκιβώτια στη παλέτα για το τρίτο μοντέλο

Σενάριο 3	Ενεργειακή κατανάλωση (Joule)
1η σειρά	24.500
2η σειρά	25.000
3η σειρά	25.000
4η σειρά	28.000
5η σειρά	30.000

Πίνακας 7-6. Ενεργειακή κατανάλωση του ρομποτικού βραχίονα IRB 760 για κάθε σειρά που τοποθετούσε χαρτοκιβώτια στη παλέτα για το πέμπτο μοντέλο

Για τις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιήθηκαν οι ρομποτικοί βραχίονες IRB 460 και IRB 660, παρατηρήθηκε ότι η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας πραγματοποιείται τις περιόδους όπου οι ρομποτικοί βραχίονες εργάζονται κοντά στο μέγιστο της δυνατής εμβέλειας τους. Συγκεκριμένα τις περιόδους όπου τοποθετούν χαρτοκιβώτια στη πρώτη και τελευταία σειρά πάνω στη παλέτα παρατηρείται ότι η ενεργειακή κατανάλωση είναι αυξημένη κατά περίπου 10% συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Όσο αφορά το ρομποτικό βραχίονα IRB 760

παρατηρήθηκε ότι όσο εργάζεται σε πιο μεγάλο ύψος τόσο αυξάνονται οι ενεργειακές του απαιτήσεις. Η αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων της τελευταίας σειράς σε σχέση με τις τρεις πρώτες είναι περίπου της τάξης του 20% και της προτελευταίας περίπου 13%.

Κεφάλαιο 8

Αποτελέσματα, Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων για κάθε μοντέλο λειτουργίας, πραγματοποιήθηκε μία σύγκριση ως προς το λειτουργικό κόστος του κάθε σεναρίου, αλλά και την συνολική αποδοτικότητα του κάθε συστήματος. Κατά τη σύγκριση των μοντέλων με άξονα τη κίνηση του εργαλείου αρπάγης, παρατηρήθηκε ότι η ενεργειακή διαφορά με την ολοκλήρωση της εργασίας δεν διαφέρει σημαντικά, με τη γραμμική κίνηση να φαίνεται με μικρή διαφορά αποδοτικότερη από τη μεικτή κίνηση (πρισματική και περιστροφική). Κατά τη λειτουργία των μοντέλων μεικτής κίνησης παρατηρήθηκαν απότομες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις του κεντρικού σημείου αναφοράς του που είναι προσαρτημένο στο ρομπότ (TCP), λόγω των συχνών περιστροφικών κινήσεων του εργαλείου αρπάγης. Από την άλλη, η ταχύτητα κυμαίνεται σε αρκετά χαμηλότερες κλίμακες συγκριτικά με τα μοντέλα γραμμικής κίνησης. Επιχειρώντας τη δημιουργία ενός συμβιβασμού στην ενεργειακή κατανάλωση, τις ανάγκες για υλικά και την ομαλή κίνηση του ρομποτικού βραχίονα, παρατηρήθηκε ότι μεγαλύτερη βαρύτητα έχει η ανάγκη σε υλικά καθώς σε διάστημα ενός μήνα το κόστος για υλικά αποτελεί τη μεγαλύτερη δαπάνη για τη διεργασία που προσομοιώθηκε.

Σχετικά με την απαίτηση των διαχωριστικών φύλλων και των παλετών σε μηνιαία βάση, παρατηρήθηκε ότι μεταξύ των μοντέλων για κάθε σενάριο δεν υπήρξαν μεγάλες διαφοροποιήσεις. Από την άλλη πλευρά, όσο αφορά τα σενάρια παρατηρήθηκε μεγάλη διαφοροποίηση ως προς τις απαιτήσεις τους σε υλικά. Συγκεκριμένα, στο τρίτο σενάριο όπου χρησιμοποιήθηκε ο ρομποτικός βραχίονας IRB 760, υπήρξαν και οι λιγότερες απαιτήσεις ως προς υλικά λόγω του μεγάλο βάρους ανύψωσης του ρομπότ, αλλά και του ανάλογου στις δυνατότητες του ρομπότ εργαλείου αρπάγης που χρησιμοποιήθηκε. Ο αριθμός των μεταφορών που υλοποιούσε ο ρομποτικός βραχίονας του τρίτου σεναρίου με αυτό του δεύτερου για κάθε κύκλο εργασίας, ενώ είναι ίδιος φαίνεται ότι η ταχύτητα του ρομπότ κάνει τη διαφορά ως προς την ενεργειακή κατανάλωση. Στο τρίτο σενάριο, πραγματοποιήθηκε μεγαλύτερος περιορισμός ως προς τη δυναμική λειτουργία του ρομπότ, αποτέλεσμα που προσέφερε ανάλογα και μεγαλύτερα ενεργειακά οφέλη στο σύστημα μας.

Ακόμα, κομβικό ρόλο για τις ανάγκες της διαδικασίας είχε το εύρος εργασίας του κάθε ρομποτικού βραχίονα. Στο πρώτο σενάριο όπου χρησιμοποιήθηκε ο ρομποτικός βραχίονας IRB 460 παρόλο που είναι ο πιο γρήγορος συγκριτικά με τους υπόλοιπους που συμπεριλήφθηκαν στα πλαίσια της εργασίας, παρατηρήθηκε ότι είχε τη μεγαλύτερη ανάγκη σε παλέτες και διαχωριστικά φύλλα γεγονός που οφείλεται στο περιορισμό της τοποθέτησης των χαρτοκιβωτίων σε περισσότερες σειρές πάνω στη παλέτα. Παρόλα αυτά, σε σύγκριση με το ρομποτικό βραχίονα IRB 660 παρατηρήθηκε ότι οι ενεργειακές του απαιτήσεις ήταν

λιγότερες. Κατά τη λειτουργία του IRB 660, η ενεργειακή κατανάλωση ήταν ιδιαίτερα αυξημένη τις στιγμές που ο ρομποτικός βραχίονας τοποθετούσε τα χαρτοκιβώτια στη 1^η και 5^η σειρά πάνω στη παλέτα. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και με το ρομποτικό βραχίονα IRB 460 για τη 1^η και τη 3^η σειρά αντίστοιχα, γεγονός που φανερώνει ότι όσο το ρομπότ εργάζεται πλησιάζοντας το μέγιστο εύρος του τόσο αυξάνονται και οι ενεργειακές του απαιτήσεις. Από την άλλη, ο ρομποτικός βραχίονας IRB 760, παρατηρήθηκε ότι όσο εργάζεται σε μεγαλύτερα ύψη τόσο αυξάνονται οι ενεργειακές του απαιτήσεις.

Συγκρίνοντας το δεύτερο και τρίτο σενάριο στα οποία χρησιμοποιήθηκαν δύο πανομοιότυποι σε ικανότητες ρομποτικοί βραχίονες διαπιστώθηκε ότι τα κύρια στοιχεία που καθόρισαν τη διαφορά στην αποδοτικότητα ήταν το εργαλείο αρπάγης που χρησιμοποιήθηκε και η ταχύτητα εργασίας του κάθε βραχίονα. Και τα δύο ρομπότ σε διάρκεια μίας ώρας επιτελούν σχεδόν τον ίδιο αριθμό κινήσεων, με το βραχίονα IRB 660 να καταναλώνει σχεδόν τη διπλάσια ποσότητα ενέργειας σε σύγκριση με το βραχίονα IRB 760 κατά τη μεταφορά των χαρτοκιβωτίων. Η ταχύτητα εργασίας φέρεται να είχε καθοριστικό ρόλο καθώς όσο πιο πολύ περιοριζόταν, ανάλογος ήταν και ο περιορισμός των ενεργειακών απαιτήσεων του συστήματος. Η ταχύτητα που κινούταν ο ρομποτικός βραχίονας IRB 760 κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του ήταν σχεδόν υποδιπλάσια από αυτή του IRB 660.

Κάθε ρομποτικός βραχίονας που χρησιμοποιήθηκε έχει το δικό του οδηγό όσο αφορά τη συντήρηση του. Στα πλαίσια της προληπτικής συντήρησης και με βάση τη μελέτη των F. Stuhlenmiller, S. Weyand, J. Jungblut, L. Schebek, D. Clever και S. Rinderknecht [52], ο ρομποτικός βραχίονας IRB 460 με βάση τις ανάγκες της διεργασίας και τις συνθήκες εργασίας του, εκτιμάται ότι θα χρειάζεται τη συχνότερη συντήρηση καθώς εργάζεται κοντά στο μέγιστο δυνατό φορτίο που μπορεί να διαχειριστεί. Σε αντίθεση, οι υπόλοιποι ρομποτικοί βραχίονες που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν με σχετική ευκολία να διαχειριστούν τα φορτία που έχουν οριστεί σε αυτούς, αποτέλεσμα που δεν προκαλεί ανησυχία για κάποιο απρόοπτο σφάλμα.

Στα πλαίσια μελλοντικής προέκτασης της παρούσας εργασίας προτείνεται, η αναλυτική μελέτη και διαμόρφωση των κινήσεων του κάθε ρομποτικού βραχίονα ορίζοντας παράλληλα τη ταχύτητα με την οποία θα κινείται κατά τη διάρκεια του κάθε “μονοπατιού” που θα διαγράφει. Ακόμα, προτείνεται η μελέτη των θέσεων των σταθμών εργασίας του κάθε ρομποτικού βραχίονα με σκοπό την εκτίμηση του μεγέθους της επιρροής που έχουν οι αποστάσεις τους από αυτόν. Για την ολοκλήρωση ενός ασφαλούς ρομποτικού κελιού προτείνεται η αναλυτική μελέτη και τοποθέτηση συστημάτων ασφαλείας με τη χρήση αισθητήρων ώστε να αποφευχθεί ένα ενδεχόμενο σφάλμα που μπορεί να οδηγήσει σε τραυματισμό.

Βιβλιογραφία

- [1] Δ. Εμίρης και Δ. Κουλουριώτης, ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ, 4η ΕΚΔΟΣΗ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2024.
- [2] Wikipedia, "Βιομηχανικά ρομπότ," 18 September 2024. [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%B9%CE%BF%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AC_%CF%81%CE%BF%CE%BC%CF%80%CF%8C%CF%84.
- [3] ABB, 17 July 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://new.abb.com/news/detail/1839/the-golden-age-of-robotics>.
- [4] Χ. Σηφάκης, Κατεργασίες με την βοήθεια ρομποτικού βραχίονα, Χανιά. Πτυχιακή εργασία: ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ, ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ.
- [5] Φ. Ν. Κουμπούλης και Β. Γ. Μέρτζιος, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ, Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2002.
- [6] Wikipedia, «Robotic arm,» 24 January 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Robotic_arm.
- [7] M. Ben-Ari and F. Mondada, Elements of Robotics, Germany: Springer International Publishing, 2017.
- [8] Α. Νταβός, Μελέτη Ρομποτικού βραχίονα με εφαρμογές στη παραγωγική διαδικασία, Πάτρα, Πτυχιακή εργασία: Τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Πάτρας, Σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, 2024.
- [9] N. Agnihotri, «What are different types of industrial robots?,» *ENGINEERS GARAGE*, 12 June 2023.
- [10] A. Alsannagh, «Data analysis and force control of a 6-DoF industrial Robot,» 3 June 2019.
- [11] All on Robots, «Spherical robots,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://allonrobots.com/spherical-robots/>.
- [12] AMIE study circle, «Manufacturing Automation, Robotics in Manufacturing,» 27 October 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://amiestudycircle.com/free-samples/ame/chapters/Robotics%20in%20Manufacturing.pdf>.
- [13] Μ. Αλέξανδρος, ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ ΓΝΩΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ, Σύρος, Πτυχιακή εργασία: Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 2010.

- [14] Α. Καρράς, Βιομηχανική Ρομποτική, Αθήνα, Διπλωματική εργασία: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ, 2019, pp. 32-34.
- [15] Μ. Ισούκης και Δ. Παυλόπουλος, «Σύγχρονη Βιομηχανική Ρομποτική και πλεονεκτήματα βιομηχανικών ρομπότ,» *ecopress*, 31 Αυγούστος 2020.
- [16] G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann and H. Schunk, *Robot Grippers*, Wiley, 2007.
- [17] B. Kumar, «VACUUM GRIPPER- AN IMPORTANT MATERIAL HANDLING TOOL,» *International Journal of Science & Technology*, 1 February 2017.
- [18] Wikipedia, «Pneumatic gripper,» 11 December 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatic_gripper.
- [19] PFA Incorporated, «What is a Gripper?,» 29 March 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pfa-inc.com/what-is-an-electric-gripper/>.
- [20] MOBILE HYDRAULIC TIPS, «Hydraulic Grippers,» 24 September 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mobilehydraulictips.com/hydraulic-grippers/>.
- [21] Wikipedia, "Fourth Industrial Revolution," 19 March 2025. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Fourth_Industrial_Revolution.
- [22] D. Palka and J. Ciukaj, "Prospects for development movement in the industry concept 4.0," *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 1 September 2019.
- [23] A. K. Sharma, R. Bhandari, C. Pinca-Bretotan, C. Sharma, S. K. Dhakad και Α. Mathur, «A study of trends and industrial prospects of Industry 4.0,» *Materials Today: Proceedings*, τόμ. 47, αρ. 12, pp. 2364-2369, 2021.
- [24] E. Gizem, How to Define Industry 4.0: The Main Pillars Of Industry 4.0, 1 November 2017.
- [25] R. Goyat και M. Singh, «Fundamental pillars for industry 4.0 development: implementation framework and challenges in manufacturing environment,» *The TQM Journal*, τόμ. 36, 5 April 2023.
- [26] Wikipedia, «Artificial intelligence,» 2 April 6 May 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_intelligence.
- [27] Wikipedia, «Artificial intelligence in industry,» 2 May 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_intelligence_in_industry.
- [28] F. N. Alezini, S. Abbasi, A. H. Mohammed και Α. M. Rahmani, «The artificial intelligence technologies in Industry 4.0: A taxonomy, approaches, and future directions , *Computers & Industrial Engineering*,» τόμ. 185, 2023.
- [29] M. Sharabov και G. Tsochev, «The Use of Artificial Intelligence in Industry 4.0,» *Problems of Engineering Cybernetics and Robotics*, τόμ. 73, 2 November 2020.

- [30] Y. Lu, "Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 6, pp. 1-10, 2017.
- [31] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh και R. Suman, «Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation,» *Cognitive Robotics*, τόμ. 1, pp. 58-75, 2021.
- [32] GT-Engineering, "Selection of protective measures," 26 June 2023. [Online]. Available: <https://www.gt-engineering.it/en/technical-standards/en-iec-standards/en-62046-protective-equipment/4-selection-of-protective-measures/>.
- [33] GT-Engineering, "Type A, B and C Standards," 10 August 2023. [Online]. Available: <https://www.gt-engineering.it/en/insights/machinery-safety/le-norme-armonizzate-di-tipo-a-b-c-1-2-3/>.
- [34] GT-Engineering, "Machinery Directive: the Harmonised Standards," 1 August 2023. [Online]. Available: <https://www.gt-engineering.it/en/insights/machinery-directive/machinery-directive-the-harmonised-standards1191476462/>.
- [35] iTeh Standards, "ISO 13855," 1 May 2010. [Online]. Available: <https://cdn.standards.itih.ai/samples/42845/3cc3132928a94eae8a58c105f033ce2c/ISO-13855-2010.pdf>.
- [36] iTeh Standards, "ISO 13857," October 2019. [Online]. Available: <https://cdn.standards.itih.ai/samples/69569/0fd47bda23e343d18e259e1cc9670730/ISO-13857-2019.pdf>.
- [37] GT-Engineering, «4.2 Safety distances to prevent access by upper limbs,» 31 January 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.gt-engineering.it/en/technical-standards/en-iso-standards/en-iso-13857-safety-distances/safety-distances-upper-limbs/>.
- [38] iTeh Standards, "ISO 14120," 1 November 2015. [Online]. Available: <https://cdn.standards.itih.ai/samples/59545/c1c055c111084169a27aa22bf360583c/ISO-14120-2015.pdf>.
- [39] GT-Engineering, "6 - Selection of types of guards," 26 July 2023. [Online]. Available: <https://www.gt-engineering.it/en/technical-standards/en-iso-standards/en-iso-14120/6-selection-of-types-of-guards/>.
- [40] iTeh Standards, "ISO 10128-1," 1 July 2011. [Online]. Available: <https://cdn.standards.itih.ai/samples/51330/c008a0a974584a5098400991b63eaae9/ISO-10128-1-2011.pdf>.
- [41] iTeh Standards, "ISO 10218-2," 1 July 2011. [Online]. Available: <https://cdn.standards.itih.ai/samples/41571/ce1c2cc423f542038fd5b525ef592318/ISO-10218-2-2011.pdf>.

- [42] B. Vaisi, «A review of optimization models and applications in robotic manufacturing systems: Industry 4.0 and beyond,» *Decision Analytics Journal*, τόμ. 2, pp. 1-18, 2022.
- [43] M. Gadaleta, G. Berselli, M. Pellicciari και F. Grassia, «Extensive experimental investigation for the optimization of the energy consumption of a high payload industrial robot with open research dataset,» *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, τόμ. 68, 2021.
- [44] M. Soori, B. Arezoo και R. Dastres, «Optimization of energy consumption in industrial robots, a review,» *Cognitive Robotics*, τόμ. 3, pp. 142-157, 2023.
- [45] A. Liu, H. Liu, B. Yao, W. Xu και M. Yang, «Energy consumption modeling of industrial robot based on simulated power data and parameter identification,» *Advances in Mechanical Engineering*, τόμ. 10, 4 May 2018.
- [46] R. Ruzarovsky, T. Horak και R. Bocak, «Evaluating Energy Efficiency and Optimal Positioning of Industrial Robots in Sustainable Manufacturing,» *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, τόμ. 8, 2024.
- [47] A. Mohammeda, B. Schmidt, L. Wang και L. Gao, «Minimizing Energy Consumption for Robot Arm Movement,» *Procedia CIRP*, τόμ. 25, pp. 400-405, 2014.
- [48] Paryanto, M. Brossog, M. Bornschlegl και J. Franke, «Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, τόμ. 78, pp. 1315-1328, 2015.
- [49] D. Karastoyanov και S. Karastanev, «Reuse of Industrial Robots,» *IFAC-PapersOnLine*, τόμ. 51, αρ. 30, pp. 44-47, 2018.
- [50] J. Fadhil, A. Faeq Hussein, A. Lateef, Q. Lateef και S. Ahmad, «WIRELESS MONITORING OF POWER CONSUMPTION FOR INDUSTRIAL ROBOT DURING A PICK AND PLACE TASK FOR PREDICTIVE MAINTENANCE,» *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, τόμ. 99, 1 June 2021.
- [51] P. Nunes, J. Santos και E. Rocha, «Challenges in predictive maintenance – A review,» *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, τόμ. 40, pp. 53-67, 2023.
- [52] F. Stuhlenmiller, S. Weyand, J. Jungblut, L. Schebek, D. Clever και S. Rinderknecht, «Impact of Cycle Time and Payload of an Industrial Robot on Resource Efficiency,» *Robotics*, τόμ. 10, 2021.
- [53] Wikipedia, «ABB,» 27 April 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/ABB>.
- [54] A. N. Cozmin CRISTOIU, «VALIDATION OF FORWARD GEOMETRIC MODELS FOR ABB ROBOTS USING VIRTUAL MODELS AND THE SOFTWARE APPLICATIONS CATIA AND ABB ROBOT STUDIO,» *Proceedings in Manufacturing Systems*, τόμ. 12, αρ. 4, pp. 145-153, 2017.

- [55] Δ. Παναγιώτης, Ανάλυση του Ενεργειακού Αποτυπώματος στον κύκλο ζωής ενός τυπικού Βιομηχανικού Ρομπότ, Αθήνα, Διπλωματική εργασία: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Σχολή Μηχανικών Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2024.
- [56] «10 ways that ABB's RobotStudio® software can help you optimize your robot's performance,» ABB, 11 October 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://new.abb.com/news/detail/96221/10-ways-that-abbs-robotstudior-software-can-help-you-optimize-your-robots-performance>.
- [57] S. Dietrich, «control.com,» 22 February 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://control.com/technical-articles/introduction-to-abb-robot-programming-language/>.
- [58] R. ABB, «Product specification - RobotStudio,» 5 February 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.uzivatelskadokumentace.cz/Software%20Products/Design,%20Programming%20&%20Configuration%20Software/en/3HAC026932-001.pdf>.
- [59] ABB, «IRB 460 data sheet,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://library.e.abb.com/public/5a76f0c259924058898c50a1050e26c6/IRB%20460%20datasheet_20231206.pdf?x-sign=Nu/PmDLRS3G6++3R9IgCJ0s8emCfIT1czVFFAy0eq7xRcL68p39I1fvmh2Js4BJn.
- [60] ABB, «IRB 660 data sheet,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107046A8172&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [61] ABB, «IRB 760 data sheet,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB02007EN_A&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch.
- [62] ABB, «FlexGripper Vacuum Data sheet,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A8890&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [63] Wikipedia, «Joule,» 1 June 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Joule>.

