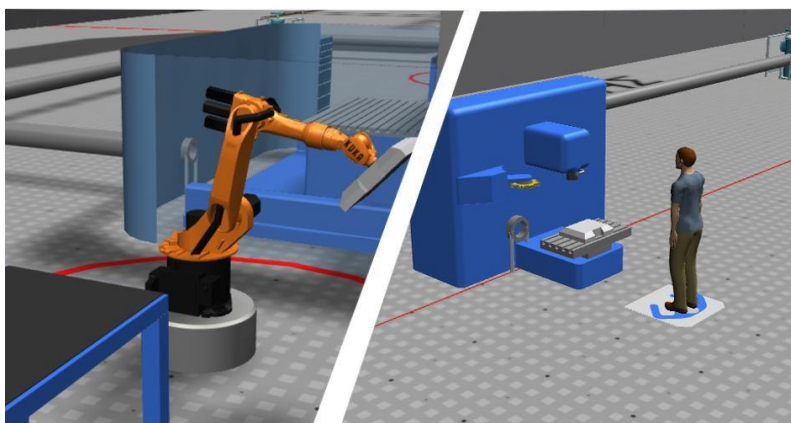


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ**



**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ SIEMENS
TECNOMATIX**

(SIMULATION OF THE PRODUCTION LINE USING SIEMENS TECNOMATIX SOFTWARE)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΨΑΡΙΑΝΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Επιβλέπων: Νικόλαος Μπιλάλης

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει συγκριτικά δύο διαφορετικά μοντέλα βιομηχανικής παραγωγής μέσω προσομοίωσης στο περιβάλλον του Siemens Tecnomatix Plant Simulation. Το πρώτο μοντέλο βασίζεται στην παραδοσιακή διάταξη γραμμής παραγωγής με ανθρώπινο παράγοντα, ενώ το δεύτερο υλοποιείται εξολοκλήρου μέσω ρομποτικών βραχιόνων και αυτοματοποιημένων συστημάτων μεταφοράς. Η μελέτη βασίστηκε σε δημιουργία και ανάλυση δύο ψηφιακών μοντέλων, με στόχο την εξαγωγή συγκρίσιμων δεδομένων απόδοσης, όπως throughput, χρόνοι κύκλου, χρήση πόρων και εργονομικές απαιτήσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ανθρώπινο μοντέλο παρουσίασε υψηλότερη παραγωγικότητα σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα, αλλά συνοδεύτηκε από σημαντικά ποσοστά συμφόρησης, χαμηλή αποδοτικότητα και αστάθεια στη ροή. Αντιθέτως, το ρομποτικό μοντέλο παρείχε σταθερό χρόνο κύκλου, υψηλό βαθμό επαναληψιμότητας και ελαχιστοποίηση εργονομικών απωλειών, αν και με χαμηλότερο αριθμό τεμαχίων εξόδου στην προσομοίωση. Η εργασία καταλήγει στην επισήμανση της σημασίας της προσομοίωσης ως εργαλείου λήψης αποφάσεων για την επιλογή κατάλληλων τεχνολογικών λύσεων, αναδεικνύοντας ταυτόχρονα την αξία της ψηφιοποίησης και του σχεδιασμού μέσω digital twins στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0.

Λέξεις-κλειδιά Προσομοίωση παραγωγής, Tecnomatix Plant Simulation, ανθρώπινος παράγοντας, ρομποτικοί βραχίονες, αποδοτικότητα, κύκλος παραγωγής, εργονομία, αυτοματοποίηση, Βιομηχανία 4.0

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	2
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	4
1.1 Σκοπός και Σημασία της Εργασίας.....	4
1.2 Αντικείμενο μελέτης.....	6
1.3 Μεθοδολογία και εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν.....	8
1.4 Δομή της εργασίας.....	9
2.1 Ορισμός και σημασία της προσομοίωσης στη βιομηχανία.....	11
2.2 Η έννοια της γραμμής παραγωγής.....	13
2.3 Αυτοματισμοί & Ρομποτικοί Βραχίονες στη σύγχρονη παραγωγή.....	15
2.4 Ο άνθρωπος παράγοντας στη βιομηχανική διαδικασία.....	16
2.5 Βασικά πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα ανά προσέγγιση.....	18
Κεφάλαιο 3: Παρουσίαση του Λογισμικού Siemens Tecnomatix Plant Simulation.....	21
3.1 Γενική παρουσίαση του λογισμικού.....	21
3.4 Παραδείγματα εφαρμογών στον κλάδο.....	26
3.5 Προετοιμασία μοντέλου & παραδοχές.....	28
Κεφάλαιο 4: Δημιουργία Σεναρίων Προσομοίωσης.....	31
4.1 Περιγραφή του συστήματος παραγωγής που προσομοιώνεται.....	31
4.2 Προσομοίωση με ανθρώπινο παράγοντα: δομή, πόροι, διαδικασία.....	34
4.3 Προσομοίωση με ρομποτικούς βραχίονες: δομή, πόροι, ροή.....	39
4.4 Εξαγωγή δεδομένων από το πρόγραμμα (πίνακες, γραφήματα).....	42
Κεφάλαιο 5: Ανάλυση και Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	48
5.1 Παραγωγικότητα – χρόνοι κύκλου – κόστος λειτουργίας.....	48
5.2 Εργονομία και απαιτήσεις ανθρώπινου δυναμικού.....	51
5.3 Αποδοτικότητα – Απρόσκοπτη λειτουργία – Απώλειες.....	53
5.4 Συγκριτικός πίνακας πλεονεκτημάτων & μειονεκτημάτων.....	56
5.5 Συμπεράσματα από την ανάλυση.....	59
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Εφαρμογές.....	61
6.1 Γενικά συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις.....	61
6.2 Προτάσεις για μελλοντική βελτιστοποίηση.....	62
6.3 Επέκταση εφαρμογής σε ευρύτερα περιβάλλοντα.....	63
6.4 Τελικές σκέψεις.....	63
Βιβλιογραφία.....	65

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και Σημασία της Εργασίας

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην αναλυτική διερεύνηση και συγκριτική αξιολόγηση δύο διαφορετικών προσεγγίσεων παραγωγής σε μια βιομηχανική γραμμή: αυτής που βασίζεται στον ανθρώπινο παράγοντα και αυτής που υλοποιείται με τη χρήση ρομποτικών βραχιόνων. Η μελέτη υλοποιείται μέσω του εξειδικευμένου λογισμικού Siemens Tecnomatix Plant Simulation, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας, ανάλυσης και βελτιστοποίησης προσομοιώσεων βιομηχανικών συστημάτων. Η εργασία επιδιώκει όχι μόνο τη μοντελοποίηση των δύο παραγωγικών σεναρίων, αλλά κυρίως την εκτενή σύγκρισή τους με βάση αποδοτικότητα, εργονομία, ενεργειακή κατανάλωση, κόστος λειτουργίας και προσαρμοστικότητα, αναδεικνύοντας τη σημασία της ενσωμάτωσης αυτοματισμών στο πλαίσιο της Βιομηχανίας.

Η ανάγκη για τέτοιου είδους προσομοιώσεις προκύπτει από την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των παραγωγικών διαδικασιών και την επιτακτική ανάγκη για βέλτιστη κατανομή πόρων και μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας, χωρίς να θυσιάζεται η ποιότητα ή η ασφάλεια. Η χρήση προσομοιωτικών εργαλείων, όπως το Plant Simulation, επιτρέπει την αξιολόγηση μελλοντικών σεναρίων χωρίς να απαιτείται άμεση εφαρμογή στον πραγματικό εξοπλισμό, μειώνοντας έτσι κόστος και κινδύνους. Ειδικότερα, η παρούσα εργασία εντάσσεται στο πλαίσιο της ταχέως εξελισσόμενης σχέσης μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ στον βιομηχανικό χώρο. Η αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ ανθρώπων και ρομπότ απαιτεί συστηματική κατανόηση των παραγόντων αβεβαιότητας και κινδύνου, καθώς και της δυναμικής που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο αυτών μονάδων. Η προσομοίωση δύο ξεχωριστών σεναρίων επιτρέπει την εξαγωγή ποσοτικοποιήσιμων δεδομένων που μπορούν να τροφοδοτήσουν μελλοντικές αποφάσεις για την πλήρη ή μερική αυτοματοποίηση διαδικασιών, με βάση πραγματικές απαιτήσεις και δεδομένα.

Η ενσωμάτωση ρομποτικών βραχιόνων στην παραγωγική διαδικασία αποτελεί πλέον όχι μόνο τεχνολογική τάση αλλά και στρατηγική επιλογή, κυρίως λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει σε όρους ακρίβειας, επαναληψιμότητας και ταχύτητας. Εντούτοις, η αποδοτικότητα των ρομποτικών βραχιόνων εξαρτάται σε

μεγάλο βαθμό από το σχεδιασμό του ελέγχου κίνησης και την ποιότητα της ολοκλήρωσης με τα συστήματα PLC. Επομένως, η προσομοίωση τέτοιων συστημάτων απαιτεί τεχνικά επακριβή μοντέλα και ρεαλιστικές παραδοχές.

Από την άλλη πλευρά, ο ανθρώπινος παράγοντας προσφέρει μοναδικές ικανότητες αντίληψης, ευελιξίας και προσαρμοστικότητας, που συχνά δεν μπορούν να αναπαραχθούν επακριβώς από τα ρομποτικά συστήματα, τουλάχιστον χωρίς υπερβολικό κόστος ή τεχνική πολυπλοκότητα. Μελέτες επισημαίνουν ότι η εργονομική αξιολόγηση και η προσομοίωση της συνύπαρξης ανθρώπων και ρομπότ αποτελούν κρίσιμα σημεία για την επιτυχία των σύγχρονων γραμμών παραγωγής. Η χρήση εικονικής πραγματικότητας και εργαλείων όπως το Tecnomatix μπορεί να αναδείξει προβληματικές περιοχές, να προτείνει λύσεις και να αξιολογήσει τα επίπεδα εργονομίας και ασφάλειας. Η συμβολή της παρούσας εργασίας είναι επίσης σημαντική από την οπτική γωνία της ενεργειακής αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας. Ένα ρομποτικό σύστημα μπορεί να καταναλώνει σημαντικά περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με ένα ανθρώπινο εργατικό δυναμικό, εφόσον δεν έχει σχεδιαστεί σωστά ή λειτουργεί εκτός των βέλτιστων ορίων. Η χρήση της τεχνολογίας του ψηφιακού διδύμου για την αξιολόγηση αυτών των παραμέτρων έχει ήδη δείξει θετικά αποτελέσματα. Η δυνατότητα ελέγχου και πρόβλεψης των ενεργειακών απαιτήσεων προσφέρει συγκριτικό πλεονέκτημα για την επιλογή της καταλληλότερης προσέγγισης.

Η επιλογή του Siemens Tecnomatix Plant Simulation ως βασικού εργαλείου για την υλοποίηση της εργασίας δεν είναι τυχαία. Το συγκεκριμένο λογισμικό συνδυάζει δυνατότητες προσομοίωσης διακριτών γεγονότων, προγραμματισμού λογικής παραγωγής, καθώς και σύνδεσης με πραγματικές συσκευές μέσω OPC. Παράλληλα, η δυνατότητα αξιοποίησης του λογισμικού ακόμα και σε τομείς όπως η περιβαλλοντική ανάλυση, γεγονός που ενισχύει τη χρηστικότητά του και σε ευρύτερα πεδία πέρα από την καθαρά παραγωγική διαδικασία. Επιπλέον, η εργασία τοποθετείται στο πλαίσιο της γενικότερης αναβάθμισης των παραγωγικών συστημάτων μέσω των αρχών του Industry 4.0, που περιλαμβάνει την ενσωμάτωση αυτοματισμών, αισθητήρων, τεχνητής νοημοσύνης και δικτύων επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο. Η εικονική προσομοίωση των γραμμών παραγωγής αποτελεί πλέον αναπόσπαστο εργαλείο σχεδιασμού και βελτιστοποίησης στο πλαίσιο αυτό, επιτρέποντας την αναλυτική

αξιολόγηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την παραγωγικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος.

1.2 Αντικείμενο μελέτης

Το αντικείμενο μελέτης της παρούσας ερευνητικής εργασίας εστιάζει στην ανάλυση, προσομοίωση και συγκριτική αξιολόγηση δύο διακριτών μοντέλων λειτουργίας μιας γραμμής παραγωγής, με σκοπό την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων αναφορικά με την αποδοτικότητα, ευελιξία, εργονομία και οικονομικότητα κάθε σεναρίου. Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της μελέτης αναπτύσσονται δύο εναλλακτικά μοντέλα μιας βιομηχανικής παραγωγικής διαδικασίας μέσω του λογισμικού Siemens Tecnomatix Plant Simulation: το πρώτο μοντέλο περιλαμβάνει την παρουσία ανθρώπινου δυναμικού σε κρίσιμες φάσεις της παραγωγικής ροής, ενώ το δεύτερο αξιοποιεί αποκλειστικά ρομποτικούς βραχίονες και αυτοματοποιημένα συστήματα χειρισμού υλικών.

Η επιλογή αυτών των δύο μοντέλων απορρέει από τις σύγχρονες τάσεις και προκλήσεις στον βιομηχανικό τομέα, όπου επιχειρείται συστηματική μετάβαση από την ανθρώπινη εργασία σε λύσεις με μεγαλύτερο βαθμό αυτοματοποίησης. Αυτή η μετάβαση δεν είναι απλώς τεχνολογική, αλλά σχετίζεται και με παράγοντες όπως η μείωση του λειτουργικού κόστους, η ανάγκη για αδιάλειπτη λειτουργία, η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και η ενίσχυση της ασφάλειας στον εργασιακό χώρο. Ωστόσο, η πλήρης αντικατάσταση του ανθρώπινου παράγοντα δεν είναι πάντα εφικτή ή επιθυμητή, καθώς υπάρχουν σημαντικά ζητήματα προσαρμοστικότητας, απρόβλεπτων συμβάντων και ανάγκης για γνωσιακές δεξιότητες που δεν καλύπτονται από τα ρομποτικά συστήματα.

Στο πρώτο σενάριο, η προσομοίωση εστιάζει στην παρουσία εργατών που εκτελούν χειρωνακτικές εργασίες συναρμολόγησης, ελέγχου ποιότητας και διαχείρισης υλικών σε διαφορετικά σημεία της γραμμής παραγωγής. Η λειτουργία κάθε σταθμού εξαρτάται από την ανθρώπινη απόδοση, τον ρυθμό εργασίας, καθώς και πιθανούς εργονομικούς περιορισμούς. Οι παράγοντες αυτοί ενσωματώνονται στο λογισμικό μέσα από χρονικές παραμέτρους, στατιστικές κατανομές απόδοσης και δυναμική προσομοίωση παρουσίας/απουσίας. Σκοπός του σεναρίου είναι η μέτρηση της συνολικής

παραγωγικής ικανότητας υπό ρεαλιστικές συνθήκες ανθρώπινης επέμβασης, με στόχο να εντοπιστούν πιθανά σημεία συμφόρησης, καθυστερήσεων ή υπερφόρτωσης.

Αντιθέτως, στο δεύτερο σενάριο, οι ίδιες διαδικασίες υλοποιούνται με χρήση ρομποτικών βραχιόνων, οι οποίοι προγραμματίζονται να εκτελούν τις λειτουργίες αυτόματα, με συγκεκριμένη ταχύτητα, ακρίβεια και ροή. Ο έλεγχος των ρομποτικών συστημάτων ενσωματώνει στοιχεία λογισμικού PLC, αισθητήρες, καθώς και δυναμικά μοντέλα κίνησης. Η προσομοίωση αυτή αναδεικνύει τις δυνατότητες των αυτοματισμών σε όρους παραγωγικότητας και σταθερότητας, επιτρέποντας ταυτόχρονα την εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης, του ρυθμού απόδοσης και της αξιοπιστίας κάθε σταθμού.

Η σημασία της συγκριτικής ανάλυσης έγκειται στην ικανότητα των προσομοιώσεων να παρέχουν ποσοτικά δεδομένα για κρίσιμες μεταβλητές, όπως ο συνολικός χρόνος κύκλου, ο βαθμός αξιοποίησης των σταθμών, η συσσώρευση ημιέτοιμων προϊόντων, η κατανάλωση ενέργειας, και το λειτουργικό κόστος. Αυτά τα δεδομένα ανακτώνται από την εσωτερική λειτουργία του Tecnomatix Plant Simulation, το οποίο επιτρέπει εξαγωγή στατιστικών, γραφημάτων και αναφορών μέσω ενσωματωμένων εργαλείων ανάλυσης.

Η συγκριτική αποτύπωση των δύο σεναρίων βοηθά στη λήψη στρατηγικών αποφάσεων για την αναβάθμιση παραγωγικών συστημάτων σε εταιρικό επίπεδο. Παράλληλα, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, γίνεται εκτεταμένη ανάλυση της εργονομικής διάστασης της ανθρώπινης συμμετοχής στη γραμμή παραγωγής, βασισμένη στις αρχές της φυσικής καταπόνησης, της στατικότητας στάσεων εργασίας και της συχνότητας κινήσεων. Αντίστοιχα, στη ρομποτική προσομοίωση, αξιολογούνται η δυνατότητα επαναληψιμότητας των κινήσεων, ο βαθμός αξιοποίησης των ρομπότ και η ανθεκτικότητα των ρομποτικών αρθρώσεων υπό διαφορετικές συνθήκες φορτίου. Η παράμετρος της μηχανικής καταπόνησης αναλύεται μέσω εξομοιώσεων FEA και εκτιμήσεων διάρκειας ζωής εξαρτημάτων.

Επιπρόσθετα, η εργασία περιλαμβάνει στοιχεία από την πρακτική εφαρμογή του ψηφιακού διδύμου, το οποίο ενσωματώνει πραγματικά δεδομένα στο μοντέλο προσομοίωσης για πιο ρεαλιστική απόδοση. Με την προσέγγιση αυτή είναι δυνατή η εκ των προτέρων εκτίμηση της επίδρασης κάθε απόφασης στο συνολικό σύστημα

παραγωγής, χωρίς να απαιτείται πειραματική παρέμβαση σε φυσικό εξοπλισμό. Αυτή η προσέγγιση προσδίδει μεγαλύτερη αξία στην εργασία, καθώς η σύνδεση θεωρίας και πράξης καθιστά τα αποτελέσματα άμεσα αξιοποιήσιμα από τις επιχειρήσεις. Τέλος, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εξερεύνηση των δυνατοτήτων του λογισμικού Siemens Tecnomatix Plant Simulation όχι απλώς ως εργαλείο δημιουργίας μοντέλων, αλλά ως δυναμικής πλατφόρμας ελέγχου ροής, χρονοπρογραμματισμού και βελτιστοποίησης. Το λογισμικό παρέχει λειτουργίες που σχετίζονται με τον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής, την ανακατανομή πόρων, την πρόβλεψη σημείων συμφόρησης και την απεικόνιση σεναρίων “τι θα συνέβαινε αν”. Μέσα από αυτές τις λειτουργίες, το αντικείμενο της εργασίας διευρύνεται από μια απλή συγκριτική μελέτη σε μια ολιστική προσέγγιση συστημικής ανάλυσης και βελτιστοποίησης.

1.3 Μεθοδολογία και εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν.

Η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας εργασίας βασίζεται στην εφαρμοσμένη προσομοίωση διακριτών γεγονότων, μέσω της οποίας μοντελοποιείται η λειτουργία μιας βιομηχανικής γραμμής παραγωγής, υπό δύο διαφορετικά λειτουργικά σενάρια: το πρώτο με βασική συνιστώσα τον ανθρώπινο παράγοντα και το δεύτερο με πλήρη αυτοματοποίηση μέσω ρομποτικών βραχιόνων. Η επιλογή της μεθόδου αυτής καθορίζεται από την ανάγκη προσομοίωσης πολύπλοκων, δυναμικών και στοχαστικών συστημάτων, όπου η χρονική αλληλουχία γεγονότων επηρεάζει άμεσα την παραγωγική ικανότητα και την αποδοτικότητα του συστήματος. Το βασικό εργαλείο που αξιοποιείται είναι το λογισμικό Siemens Tecnomatix Plant Simulation, ένα εξειδικευμένο λογισμικό βιομηχανικής προσομοίωσης που ενσωματώνει λειτουργίες σχεδιασμού ροής υλικών, προγραμματισμού παραγωγής, αξιολόγησης εργονομίας, και δυναμικής ανάλυσης πόρων. Το λογισμικό υποστηρίζει μοντελοποίηση μέσω αντικειμενοστραφούς προσέγγισης και επιτρέπει την παραμετροποίηση συστημάτων με στοχαστικές ή καθορισμένες μεταβλητές. Κάθε μοντέλο ενσωματώνει σταθμούς εργασίας, μέσα μεταφοράς, αποθηκευτικούς χώρους και μονάδες ελέγχου παραγωγής, προκειμένου να αναπαρασταθεί με ακρίβεια η ροή εργασιών.

Η ανάπτυξη των μοντέλων πραγματοποιείται βάσει τεχνικών δεδομένων, εμπειρικών τιμών και στατιστικών κατανομών, ώστε να διασφαλιστεί η εγκυρότητα και η

ρεαλιστικότητα των αποτελεσμάτων. Για το σενάριο με ανθρώπινη εργασία, χρησιμοποιούνται μέσοι χρόνοι εργασιών, συχνότητα επαναλήψεων, και εργονομικοί δείκτες βασισμένοι σε δεδομένα από παλαιότερες μελέτες προσομοίωσης. Για το σενάριο με ρομποτικούς βραχίονες, ενσωματώνονται παράμετροι που αφορούν στην απόδοση του ρομπότ, τη διάρκεια των κύκλων λειτουργίας, την επιτάχυνση-επιβράδυνση και τη διασύνδεση με PLC. Επιπλέον, γίνεται χρήση της λειτουργίας πειραματισμού του Plant Simulation, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία πολλαπλών σεναρίων και την εκτέλεσή τους υπό διαφορετικές συνθήκες, προσφέροντας ένα αξιόπιστο πλαίσιο συγκριτικής αξιολόγησης. Μέσω αυτής της λειτουργίας, εξάγονται κρίσιμοι δείκτες απόδοσης όπως: ρυθμός παραγωγής, χρόνος ολοκλήρωσης, ποσοστά αξιοποίησης μηχανών και εργαζομένων, αποθέματα σε αναμονή και ενεργειακή κατανάλωση. Συμπληρωματικά, αξιοποιούνται εξωτερικές αναλύσεις, όπως Ανάλυση Τεχνοοικονομικής Αποδοτικότητας, για τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με το οικονομικό αποτύπωμα κάθε σεναρίου.

Η εν λόγω προσέγγιση ενισχύεται από τη χρήση δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας και λειτουργικού κόστους από συναφείς μελέτες, που εξετάζει την κατανάλωση ενέργειας σε ρομποτικά συστήματα μέσω ψηφιακού διδύμου. Γι αυτό, η μεθοδολογία περιλαμβάνει επίσης εργονομική αξιολόγηση μέσω της ενσωμάτωσης ανθρωποκεντρικών μοντέλων σε περιβάλλον εικονικής προσομοίωσης, κάτι που επιτρέπει την εκτίμηση του φυσικού φόρτου εργασίας, της επαναληψιμότητας των κινήσεων, και των κινδύνων μυοσκελετικών καταπονήσεων. Παράλληλα, εξετάζεται η αξιοπιστία και διάρκεια ζωής των ρομποτικών βραχιόνων υπό διαφορετικά φορτία μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

1.4 Δομή της εργασίας

Η δομή της παρούσας εργασίας έχει σχεδιαστεί με στόχο τη σταδιακή εμβάθυνση του αναγνώστη στο θέμα, από τη γενική θεωρητική βάση μέχρι την εφαρμογή και ανάλυση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Η εργασία αποτελείται από έξι βασικά κεφάλαια, το καθένα εκ των οποίων επιτελεί συγκεκριμένο ρόλο στην ανάπτυξη του επιστημονικού προβληματισμού. Το Πρώτο Κεφάλαιο περιλαμβάνει την εισαγωγή, όπου παρουσιάζονται ο σκοπός της εργασίας, το αντικείμενο μελέτης, η μεθοδολογική προσέγγιση και η συνολική δομή. Στόχος είναι να προσδιοριστεί το ερευνητικό πεδίο και να καταστεί σαφές το πρακτικό και θεωρητικό υπόβαθρο του έργου. Στο Δεύτερο

Κεφάλαιο, αναπτύσσεται το θεωρητικό πλαίσιο, το οποίο καλύπτει την έννοια της προσομοίωσης στη βιομηχανία, τις βασικές αρχές της λειτουργίας γραμμών παραγωγής, τη χρήση ρομποτικών συστημάτων και αυτοματισμών, καθώς και τον ρόλο του ανθρώπινου παράγοντα στη σύγχρονη παραγωγή.

Το Τρίτο Κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην παρουσίαση του λογισμικού Siemens Tecnomatix Plant Simulation. Παρουσιάζονται οι τεχνικές δυνατότητες του λογισμικού, τα βασικά του στοιχεία, καθώς και η διαδικασία κατασκευής μοντέλων. Αναλύεται επίσης η σύνδεση με συστήματα PLC και η δυνατότητα εφαρμογής εργαλείων ανάλυσης, εργονομίας και αυτοματοποίησης. Στο Τέταρτο Κεφάλαιο περιγράφεται η υλοποίηση των δύο σεναρίων προσομοίωσης. Παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά, οι παραδοχές σχεδιασμού, οι είσοδοι και οι έξοδοι του μοντέλου, καθώς και οι βασικές ρυθμίσεις πειραματισμού. Γίνεται αναλυτική περιγραφή των μοντέλων με/χωρίς ρομποτικούς βραχίονες και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη λειτουργία τους στο εικονικό περιβάλλον.

Το Πέμπτο Κεφάλαιο εστιάζει στην ανάλυση των αποτελεσμάτων και στη συγκριτική αξιολόγηση των δύο σεναρίων. Τα δεδομένα παρουσιάζονται μέσα από πίνακες, γραφήματα και στατιστικές επεξεργασίες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αποδοτικότητα, την εργονομία, την κατανάλωση πόρων, το κόστος και τη βιωσιμότητα κάθε προσέγγισης. Τέλος, το Έκτο Κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συνολικά συμπεράσματα της μελέτης, τις προτάσεις για μελλοντική έρευνα, καθώς και προτεινόμενες εφαρμογές των ευρημάτων στη βιομηχανία. Η εργασία ολοκληρώνεται με τη βιβλιογραφία και τα παραρτήματα που περιλαμβάνουν τεχνικές λεπτομέρειες των μοντέλων.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Πλαίσιο

2.1 Ορισμός και σημασία της προσομοίωσης στη βιομηχανία

Η προσομοίωση, ως επιστημονική και τεχνολογική πρακτική, αποτελεί πλέον ένα αναντικατάστατο εργαλείο στον σχεδιασμό, στη βελτιστοποίηση και στην αξιολόγηση βιομηχανικών συστημάτων, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της μετάβασης προς την εποχή της Βιομηχανίας 4.0. Σε ένα περιβάλλον όπου η πολυπλοκότητα των παραγωγικών διαδικασιών αυξάνεται συνεχώς και οι απαιτήσεις για αποδοτικότητα, προσαρμοστικότητα και βιωσιμότητα είναι αυξημένες, η χρήση προσομοιωτικών εργαλείων επιτρέπει την ακριβή αναπαράσταση συστημάτων χωρίς την ανάγκη φυσικής δοκιμής ή πειραματισμού.

Ουσιαστικά, η προσομοίωση επιτρέπει την αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ανθρώπινων, τεχνολογικών και υλικών πόρων σε ένα δυναμικό και χρονικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Η έννοια της προσομοίωσης περιλαμβάνει την κατασκευή εικονικών μοντέλων που αποδίδουν με ακρίβεια την ροή εργασιών, τον προγραμματισμό, τη διαχείριση πόρων και την απόδοση παραγωγικών συστημάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις προσομοιώσεις διακριτών γεγονότων, οι οποίες είναι κατάλληλες για βιομηχανικά περιβάλλοντα με στοχαστικά χαρακτηριστικά και μεταβλητές ροές. Μέσω της DES είναι δυνατή η παρακολούθηση των σταδίων επεξεργασίας προϊόντων, η μοντελοποίηση των χρόνων αναμονής, οι καθυστερήσεις, καθώς και η αποδοτικότητα κάθε σταθμού, προσφέροντας στους μηχανικούς τη δυνατότητα λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Η σημασία της προσομοίωσης στην βιομηχανία έγκειται πρωτίστως στην προληπτική της λειτουργία: δίνει τη δυνατότητα να δοκιμαστούν πολλαπλά σενάρια σχεδιασμού, διαχείρισης και αυτοματοποίησης, χωρίς οι δοκιμές αυτές να επηρεάζουν τον φυσικό εξοπλισμό ή να επιβαρύνουν την παραγωγική διαδικασία. Η ακριβής αναπαράσταση των διαδικασιών σε εικονικό περιβάλλον επιτρέπει τον εντοπισμό σημείων συμφόρησης, την αξιολόγηση εργονομικών περιορισμών, καθώς και την ανάλυση κόστους και ενεργειακής κατανάλωσης. Το εργαλείο αυτό γίνεται ακόμη πιο ισχυρό όταν συνδυάζεται με μεθόδους υπολογιστικής νοημοσύνης, αλγορίθμους βελτιστοποίησης και τεχνολογίες ψηφιακού διδύμου.

Η εφαρμογή της προσομοίωσης έχει σημαντικές επιπτώσεις και στην υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών στον χώρο της ρομποτικής και του αυτοματισμού. Στον τομέα των ρομποτικών βραχιόνων, για παράδειγμα, η προσομοίωση επιτρέπει την ανάλυση της συμπεριφοράς των συστημάτων υπό διαφορετικές συνθήκες φορτίου, την αποδοτικότητα των κύκλων λειτουργίας, αλλά και τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με τον ανθρώπινο παράγοντα. Μέσω FEA προσομοιώσεων, οι συνθήκες φόρτισης μπορούν να μεταβάλλουν δραστικά τη διάρκεια ζωής και την απόδοση ενός ρομποτικού βραχίονα, υπογραμμίζοντας τη σημασία του εικονικού ελέγχου πριν από τη φυσική υλοποίηση. Παράλληλα, η χρήση προσομοιωτικών μοντέλων για τον σχεδιασμό PLC-ελεγχόμενων βραχιόνων αποδεικνύεται κρίσιμη για την αποφυγή σφαλμάτων και τη βελτίωση της ακρίβειας στην ταξινόμηση και μεταφορά υλικών.

Η δυνατότητα ενσωμάτωσης ανθρώπινων παραγόντων σε περιβάλλοντα προσομοίωσης προσδίδει περαιτέρω αξία στην τεχνολογία αυτή. Σε σύγχρονες εφαρμογές, όπου άνθρωποι και ρομπότ συνυπάρχουν στον ίδιο χώρο εργασίας, η ανάγκη για ασφαλή και αποδοτική συνεργασία είναι καθοριστική. Η προσομοίωση της εργονομικής συμπεριφοράς, των κινήσεων και των στατικών στάσεων του ανθρώπινου σώματος είναι αναγκαία για τον σχεδιασμό εργονομικών σταθμών εργασίας, καθώς και για την αποφυγή τραυματισμών και της σωματικής. Η προσομοίωση της συνεργασίας ανθρώπου-ρομπότ επιτρέπει τον εντοπισμό αβεβαιοτήτων που προκύπτουν από μη προβλέψιμες ανθρώπινες συμπεριφορές και είναι κρίσιμες για τον επανασχεδιασμό των βιομηχανικών διαδικασιών.

Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει στη συμβολή του Siemens Tecnomatix Plant Simulation ως εργαλείου μοντελοποίησης και προσομοίωσης. Το Plant Simulation προσφέρει δυνατότητες κατασκευής πολύπλοκων μοντέλων διακριτών γεγονότων, με ενσωματωμένες δυνατότητες ελέγχου ροής, χρονοπρογραμματισμού, εργονομικής αξιολόγησης και ανάλυσης απόδοσης. Πέραν της τεχνικής ανάλυσης, η προσομοίωση προσφέρει και στρατηγικά πλεονεκτήματα. Μέσω της ανάλυσης εναλλακτικών σεναρίων, οι βιομηχανικές επιχειρήσεις αποκτούν τη δυνατότητα διαχείρισης κινδύνου και στρατηγικού σχεδιασμού, αποφεύγοντας ακριβές επενδύσεις ή δομικές αλλαγές χωρίς την ύπαρξη δεδομένων τεκμηρίωσης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εφαρμογή μεθόδων δυναμικού σχεδιασμού και ευέλικτου προγραμματισμού

παραγωγής, οι οποίες έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές σε ασταθή ή απρόβλεπτα περιβάλλοντα.

Αξιοσημείωτη είναι επίσης η συμβολή της προσομοίωσης στον τομέα της περιβαλλοντικής διαχείρισης, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση της επίδρασης διαφόρων επιλογών παραγωγής στο ενεργειακό αποτύπωμα και στη συνολική περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

2.2 Η έννοια της γραμμής παραγωγής.

Η γραμμή παραγωγής συνιστά ένα από τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία της σύγχρονης βιομηχανικής παραγωγής και ταυτόχρονα ένα κρίσιμο αντικείμενο ανάλυσης και βελτιστοποίησης στο πλαίσιο της Βιομηχανίας. Ο όρος αναφέρεται σε μία δομημένη ακολουθία σταθμών ή φάσεων εργασίας, στην οποία κάθε μονάδα προϊόντος μεταβαίνει από ένα στάδιο επεξεργασίας στο επόμενο, υπό την καθοδήγηση συγκεκριμένων ροών υλικών, πληροφορίας και ενέργειας. Η λειτουργία της γραμμής βασίζεται στη λογική της διαδοχικής ροής, όπου κάθε σταθμός ειδικεύεται σε μια επιμέρους εργασία, αυξάνοντας έτσι την παραγωγική απόδοση μέσω της εξειδίκευσης και της επανάληψης.

Η ιστορική εξέλιξη της γραμμής παραγωγής ξεκινά από τις αρχές του 20ού αιώνα με το σύστημα μαζικής παραγωγής του Henry Ford, ωστόσο η σύγχρονη εκδοχή της χαρακτηρίζεται από την υψηλή τεχνολογική ενοποίηση, την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της αγοράς. Η γραμμή δεν είναι πλέον ένα στατικό και άκαμπτο σύστημα, αλλά μια δυναμική και σύνθετη οντότητα που πρέπει να προσαρμόζεται σε ποικίλους παράγοντες: αλλαγή στη ζήτηση, μεταβλητότητα στα προϊόντα, ανάγκη για εξατομίκευση, εναλλαγή εργατικού δυναμικού και ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών.

Σε επίπεδο δομής, μια γραμμή παραγωγής μπορεί να περιλαμβάνει σταθμούς επεξεργασίας, μεταφορικά μέσα, σημεία ελέγχου ποιότητας, αποθηκευτικούς χώρους και υπομονάδες αυτοματισμού ή ρομποτικής. Η απόδοσή της καθορίζεται από κρίσιμους δείκτες, όπως ο χρόνος κύκλου (cycle time), ο ρυθμός παραγωγής (throughput), η αξιοποίηση πόρων (resource utilization), οι χρόνοι αναμονής και οι

απώλειες λόγω συμφόρησης ή αστοχίας εξοπλισμού. Η αξιολόγηση αυτών των παραμέτρων είναι απαραίτητη για τη διαρκή βελτιστοποίηση της γραμμής και επιτυγχάνεται αποτελεσματικά μέσω προσομοιωτικών εργαλείων, όπως το Siemens Tecnomatix Plant Simulation. Ειδικότερα, η ψηφιακή αναπαράσταση της γραμμής παραγωγής μέσω προσομοίωσης προσφέρει δυνατότητες που υπερβαίνουν την απλή απεικόνιση. Επιτρέπει τον πειραματισμό με εναλλακτικά σενάρια, την εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες, καθώς και την εφαρμογή μεθόδων χρονοπρογραμματισμού και εργονομικής ανάλυσης. Όπως αναδεικνύεται και από την εφαρμογή του Tecnomatix σε logistics flows, η γραμμή παραγωγής αντιμετωπίζεται όχι μόνο ως φυσική εγκατάσταση αλλά ως κυβερνοφυσικό σύστημα, με ροές πληροφορίας και αυτονομία απόφασης.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της σύγχρονης γραμμής παραγωγής είναι η αυξανόμενη ενσωμάτωση ρομποτικών βραχιόνων και συστημάτων αυτοματισμού, τα οποία αναλαμβάνουν λειτουργίες όπως η συναρμολόγηση, η συγκόλληση, η μεταφορά υλικών και ο έλεγχος ποιότητας. Επιπλέον, οι τεχνολογίες ελέγχου μέσω PLC, αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο της ρομποτικής αυτοματοποίησης εντός της γραμμής, διασφαλίζοντας ακρίβεια, συγχρονισμό και βελτιωμένη απόκριση σε μεταβολές. Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι η έννοια της γραμμής παραγωγής δεν αφορά μόνο τη ροή των προϊόντων αλλά και τη διαχείριση του ανθρώπινου δυναμικού που την υποστηρίζει. Σε εφαρμογές που απαιτούν συνεργασία ανθρώπων και ρομπότ, η διάταξη της γραμμής πρέπει να λαμβάνει υπόψη εργονομικούς περιορισμούς, θέματα ασφάλειας, καθώς και τον γνωστικό φόρτο των χειριστών. Η σωστή μοντελοποίηση αυτών των αλληλεπιδράσεων είναι καθοριστικής σημασίας για την αποφυγή λαθών και για τη διατήρηση της συνοχής και της ασφάλειας του συστήματος.

Μια άλλη σημαντική διάσταση είναι η ενεργειακή και περιβαλλοντική αποδοτικότητα της γραμμής παραγωγής. Η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί βασικό κριτήριο αξιολόγησης, τόσο για οικονομικούς όσο και για περιβαλλοντικούς λόγους. Με τη χρήση τεχνολογιών όπως το ψηφιακό δίδυμο, είναι δυνατή η πρόβλεψη και ο έλεγχος της ενεργειακής κατανάλωσης κάθε επιμέρους μονάδας της γραμμής, οδηγώντας σε καλύτερη αξιοποίηση πόρων και συμμόρφωση με τις αρχές της πράσινης βιομηχανίας. Επομένως, η προσομοίωση της γραμμής παραγωγής δεν είναι μόνο εργαλείο λειτουργικής βελτιστοποίησης αλλά και μοχλός περιβαλλοντικής στρατηγικής.

Η συστηματική μελέτη της γραμμής παραγωγής ενισχύεται σημαντικά από την ενσωμάτωση δεδομένων πραγματικού χρόνου, που συλλέγονται από αισθητήρες ή συνδέσεις με πραγματικές συσκευές μέσω πρωτοκόλλων όπως το OPC. Η δυνατότητα του Tecnomatix να συνδεθεί με εξωτερικά περιβάλλοντα, επιτρέπει τη δημιουργία εικονικών μοντέλων που ανταποκρίνονται σε πραγματικά δεδομένα, προσδίδοντας μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία στα αποτελέσματα της ανάλυσης. Αυτή η δυνατότητα τοποθετεί τη γραμμή παραγωγής στο επίκεντρο του ψηφιακού μετασχηματισμού, καθιστώντας την ένα στοιχείο που δεν είναι μόνο υλικό αλλά και πληροφοριακό. Τέλος, η ανάλυση και προσομοίωση της γραμμής παραγωγής αποκτά ιδιαίτερη σημασία στον σχεδιασμό μελλοντικών επεκτάσεων ή στην επανεκκίνηση γραμμών με νέα προϊόντα. Η δημιουργία προσομοιωτικών μοντέλων επέκτασης της παραγωγής επιτρέπει την πρόβλεψη αναγκών σε χώρους, εξοπλισμό και προσωπικό, ενώ περιορίζει σημαντικά τον χρόνο υλοποίησης και το ρίσκο αστοχίας. Επιπλέον, προσφέρει τη δυνατότητα αξιολόγησης στρατηγικών «τι θα συνέβαινε αν» που είναι απαραίτητες σε περιόδους αβεβαιότητας ή έντονου ανταγωνισμού.

2.3 Αυτοματισμοί & Ρομποτικοί Βραχίονες στη σύγχρονη παραγωγή

Η υιοθέτηση αυτοματισμών και ρομποτικών βραχιόνων στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις συνιστά μία από τις πιο κρίσιμες εξελίξεις στο πλαίσιο της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής που βασίζονταν κυρίως στη χειρωνακτική εργασία και στην εμπειρική ρύθμιση μηχανών, η σύγχρονη βιομηχανία επενδύει στη συστηματική αυτοματοποίηση, η οποία επιτρέπει υψηλή ακρίβεια, αυξημένο ρυθμό παραγωγής, ελαχιστοποίηση λαθών και συνεπή ποιότητα προϊόντος. Οι ρομποτικοί βραχίονες αποτελούν κεντρικό πυλώνα αυτής της μετάβασης, λειτουργώντας ως ευφυείς μηχανισμοί που ενσωματώνονται σε πολύπλοκες γραμμές παραγωγής για την εκτέλεση επαναλαμβανόμενων, βαριών ή επικίνδυνων εργασιών.

Η λειτουργία των ρομποτικών βραχιόνων βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ κινηματικών μηχανισμών, αισθητήρων και συστημάτων ελέγχου. Η ακρίβεια και η αποδοτικότητά τους εξαρτώνται από πολλούς τεχνικούς παράγοντες, όπως η χωρική διάταξη των αρθρώσεων, η ταχύτητα επανατοποθέτησης, η ικανότητα ανύψωσης φορτίου και η ποιότητα του συστήματος ελέγχου κίνησης. Η ρομποτική

αυτοματοποίηση επιτρέπει επίσης τον επαναπροσδιορισμό του σχεδιασμού των γραμμών παραγωγής. Εξίσου σημαντική είναι η δυνατότητα συνεργασίας των ρομποτικών βραχιόνων με το ανθρώπινο δυναμικό σε κοινά εργασιακά περιβάλλοντα. Σενάρια συνεργατικής ρομποτικής (cobotics), στα οποία ο άνθρωπος και το ρομπότ εκτελούν ταυτόχρονα καθήκοντα στην ίδια γραμμή παραγωγής, απαιτούν αυστηρά πρότυπα ασφαλείας, ευφυή συστήματα πρόβλεψης κινήσεων και ανάλυση εργονομικών παραμέτρων. Η χρήση τεχνολογιών εικονικής πραγματικότητας και εργαλείων προσομοίωσης μπορεί να υποστηρίξει τη σχεδίαση ασφαλών και εργονομικών σταθμών εργασίας, ελαχιστοποιώντας τις αλληλεπιδράσεις υψηλού κινδύνου και αυξάνοντας την αποδοτικότητα.

Η αποτελεσματική ενσωμάτωση ρομποτικών βραχιόνων στις γραμμές παραγωγής απαιτεί και την ανάπτυξη ευφών αλγορίθμων προγραμματισμού και βελτιστοποίησης, ικανών να διαχειρίζονται περίπλοκα σενάρια κατανομής πόρων, χρονικής αλληλουχίας και προτεραιοτήτων. Σε αυτό το πλαίσιο, η εφαρμογή προσομοιώσεων διακριτών γεγονότων (DES) με εργαλεία όπως το Siemens Tecnomatix Plant Simulation έχει αναδειχθεί ως κρίσιμη. Το λογισμικό επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων ροών παραγωγής που περιλαμβάνουν ρομπότ, μηχανήματα και ανθρώπινους πόρους, προσφέροντας δυνατότητες ανάλυσης απόδοσης, εντοπισμού σημείων συμφόρησης και προσομοίωσης διαφορετικών σεναρίων ρυθμού παραγωγής, με σκοπό τη βελτιστοποίηση του συνολικού συστήματος.

2.4 Ο ανθρώπινος παράγοντας στη βιομηχανική διαδικασία.

Η θέση του ανθρώπινου παράγοντα στη βιομηχανική διαδικασία δεν μπορεί να θεωρηθεί υποδεέστερη ή περιθωριακή έναντι των τεχνολογικών και ρομποτικών εξελίξεων. Αντιθέτως, αποτελεί έναν από τους θεμελιώδεις πυλώνες της παραγωγικής λειτουργίας, συμβάλλοντας στην εύρυθμη λειτουργία των συστημάτων, στην επίλυση απρόβλεπτων καταστάσεων και στη δυναμική προσαρμογή της παραγωγής. Παρά τη ραγδαία εξέλιξη των αυτοματισμών και των ρομποτικών τεχνολογιών, ο ανθρώπινος παράγοντας εξακολουθεί να παρέχει μοναδικές ικανότητες αντίληψης, αντίδρασης και λήψης απόφασης, τις οποίες κανένα ρομποτικό σύστημα δεν έχει ακόμα κατορθώσει να προσομοιώσει με πλήρη επιτυχία.

Στο πλαίσιο της σύγχρονης παραγωγής, όπου συνυπάρχουν αυτοματισμοί, ψηφιακά δίδυμα και έξυπνα συστήματα ελέγχου, η συμβολή του ανθρώπου λαμβάνει έναν νέο πολυδιάστατο χαρακτήρα. Ο εργαζόμενος δεν λειτουργεί πλέον μόνο ως εκτελεστής διαδικασιών, αλλά κυρίως ως επόπτης, αναλυτής και διαχειριστής της παραγωγικής ροής, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με μεγάλη μεταβλητότητα και ανάγκη για ταχεία προσαρμογή. Η δυνατότητα αντίληψης μη κανονικοποιημένων καταστάσεων, η κατανόηση συμφραζομένων, η ενστικτώδης κρίση και η επιδεξιότητα χειρισμού αποτελούν χαρακτηριστικά που ο άνθρωπος αξιοποιεί αποτελεσματικά σε καταστάσεις που απαιτούν επινοητικότητα και διαχείριση αβεβαιότητας.

Αυτή η αβεβαιότητα αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερης επιστημονικής ανάλυσης, ειδικά σε περιβάλλοντα συνεργασίας ανθρώπου και ρομπότ. Η εργονομία αποτελεί έναν ακόμη κρίσιμο παράγοντα για τη λειτουργική αποτελεσματικότητα του ανθρώπινου παράγοντα. Σε βιομηχανικές θέσεις εργασίας όπου απαιτείται επαναληπτική κίνηση, παρατεταμένη στάση ή χειρισμός βαρέων εργαλείων, οι εργονομικοί περιορισμοί επηρεάζουν άμεσα τη φυσική απόδοση και την ψυχολογική ανθεκτικότητα του εργαζομένου.

Πέρα από τη φυσική διάσταση, η γνωστική επιβάρυνση του εργαζομένου —που προκύπτει από την ανάγκη για ταυτόχρονη διαχείριση πολλαπλών πληροφοριών, επαγρύπνηση και συνεχείς αποφάσεις— καθορίζει την ποιότητα της ανθρώπινης αλληλεπίδρασης με την τεχνολογία. Σε ένα εργοστάσιο που περιλαμβάνει αυτόνομα ρομπότ, αισθητήρες και πλατφόρμες προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο, ο εργαζόμενος καλείται να αξιολογήσει, να παρέμβει και να διορθώσει πιθανές αποκλίσεις από την κανονική λειτουργία. Η επιβάρυνση αυτή ενδέχεται να οδηγήσει σε σφάλματα, καθυστερήσεις και αύξηση του λειτουργικού κινδύνου, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχουν κατάλληλες διεπαφές χρήστη και εκπαιδευτικά πρωτόκολλα. Ειδικά στο περιβάλλον της προσομοίωσης παραγωγής με χρήση εργαλείων όπως το Siemens Tecnomatix Plant Simulation, ο ρόλος του ανθρώπου είναι καίριος τόσο στον σχεδιασμό όσο και στη λειτουργική αξιολόγηση των συστημάτων. Ο χρήστης είναι υπεύθυνος για την εισαγωγή ρεαλιστικών δεδομένων, την ερμηνεία των εξαγόμενων δεικτών απόδοσης και την επιλογή στρατηγικών βελτιστοποίησης. Σε αυτό το πλαίσιο, η ικανότητα του ανθρώπινου παράγοντα να συνδυάζει εμπειρική γνώση με τεχνική

κατανόηση των εργαλείων προσομοίωσης αποδεικνύεται καθοριστική για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Η συμβολή του ανθρώπου, ωστόσο, δεν εξαντλείται στη λήψη τεχνικών αποφάσεων ή στη σωματική εκτέλεση εργασιών. Συχνά διαμορφώνει τη στρατηγική κατεύθυνση μιας επιχείρησης, αξιοποιώντας την ενστικτώδη κατανόηση της παραγωγικής ροής και την εμπειρική γνώση των διαδικασιών. Σε αυτό το πλαίσιο, η συνεργασία μεταξύ ανθρώπου και τεχνολογίας λαμβάνει τον χαρακτήρα μιας συμπληρωματικής σχέσης, στην οποία η τεχνολογία ενισχύει την ικανότητα του ανθρώπου να αντιλαμβάνεται και να προβλέπει καταστάσεις, χωρίς να επιδιώκει να τον υποκαταστήσει. Η θεμελίωση αυτής της σχέσης γίνεται με εργαλεία όπως τα ψηφιακά δίδυμα, που ενσωματώνουν ανθρώπινες μεταβλητές στην προσομοίωση ροής, φορτίου και κόστους, δημιουργώντας ένα πιο πλήρες και αντιπροσωπευτικό μοντέλο της παραγωγής.

Η σημασία της ψυχολογικής διάστασης δεν μπορεί επίσης να παραμεριστεί. Η μετάβαση σε ένα περιβάλλον έντονης αυτοματοποίησης ενδέχεται να προκαλέσει συναισθήματα ανασφάλειας, απώλειας ελέγχου ή περιθωριοποίησης. Για τον λόγο αυτό, ο σχεδιασμός της βιομηχανικής διαδικασίας θα πρέπει να περιλαμβάνει όχι μόνο τεχνικά αλλά και κοινωνιοτεχνικά κριτήρια, λαμβάνοντας υπόψη τις προσδοκίες, την ικανοποίηση και την ψυχολογική ασφάλεια των εργαζομένων. Η αποδοχή της τεχνολογίας και η ενεργός συμμετοχή στη διαδικασία αλλαγής αποτελούν παράγοντες επιτυχίας για οποιαδήποτε μορφή τεχνολογικής ενσωμάτωσης.

2.5 Βασικά πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα ανά προσέγγιση.

Η ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων μεταξύ της προσέγγισης που βασίζεται στον ανθρώπινο παράγοντα και εκείνης που βασίζεται σε ρομποτικά και αυτοματοποιημένα συστήματα αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο για τη βιομηχανική στρατηγική σχεδίαση και λήψη αποφάσεων. Στο πλαίσιο της σύγχρονης παραγωγής, οι δύο αυτές προσεγγίσεις συνυπάρχουν, ανταγωνίζονται ή συμπληρώνουν η μία την άλλη, ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε βιομηχανικού περιβάλλοντος, το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας και τις οικονομικές δυνατότητες της επιχείρησης. Η διερεύνηση των θετικών και αρνητικών χαρακτηριστικών τους είναι κρίσιμη για την

κατανόηση των επιπτώσεών τους τόσο σε επίπεδο λειτουργικό όσο και σε επίπεδο συστημικής αποδοτικότητας.

Ξεκινώντας από την ανθρώπινη προσέγγιση, ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα είναι η γνωσιακή ευελιξία και η ικανότητα του ανθρώπου να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, μη τυποποιημένες διαδικασίες και απρόβλεπτες καταστάσεις. Οι εργαζόμενοι, ειδικά όταν διαθέτουν εμπειρία, μπορούν να εντοπίσουν ελλείψεις, να επινοήσουν λύσεις και να λειτουργήσουν δημιουργικά σε περιβάλλοντα που απαιτούν μη γραμμική σκέψη και ενστικτώδη λήψη αποφάσεων. Σε φάσεις παραγωγής όπου η ευελιξία και η προσαρμογή υπερσχύουν της ταχύτητας και της επανάληψης, ο ανθρώπινος παράγοντας προσφέρει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Επιπλέον, η εμπλοκή ανθρώπων σε παραγωγικές διαδικασίες απαιτεί μικρότερη αρχική επένδυση κεφαλαίου, ειδικά όταν συγκρίνεται με το υψηλό κόστος αγοράς, εγκατάστασης και συντήρησης ενός ρομποτικού ή αυτοματοποιημένου συστήματος. Αυτό καθιστά την ανθρώπινη εργασία οικονομικά αποδοτική, ιδίως για μικρομεσαίες επιχειρήσεις ή για περιόδους πιλοτικής παραγωγής. Ωστόσο, το συγκριτικό αυτό πλεονέκτημα αντισταθμίζεται από τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα στην απόδοση, τον κίνδυνο ανθρώπινου λάθους, και την επίπτωση της φυσικής κόπωσης στη διάρκεια της βάρδιας, παράγοντες που μειώνουν τη σταθερότητα και την προβλεψιμότητα των συστημάτων.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της ανθρώπινης εργασίας είναι η περιορισμένη ικανότητα επαναληψιμότητας και η μειωμένη απόδοση σε καθαρά ρυθμισμένα και ταχypαραγωγικά περιβάλλοντα. Ειδικά σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, όπως μικρο-συναρμολόγηση ή λεπτομερή έλεγχο ποιότητας, η δυνατότητα του ανθρώπου να εκτελεί με συνέπεια εκατοντάδες πανομοιότυπες κινήσεις είναι εγγενώς περιορισμένη. Αντίθετα, τα ρομποτικά συστήματα παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της απόλυτης επαναληψιμότητας, εξασφαλίζοντας ομοιομορφία, ακρίβεια και μείωση σφαλμάτων, στοιχεία τα οποία είναι καθοριστικά για την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Τα ρομποτικά και αυτοματοποιημένα συστήματα προσφέρουν επίσης μεγαλύτερη παραγωγική ταχύτητα και δυνατότητα λειτουργίας σε 24ωρη βάση, χωρίς τις φυσικές ανάγκες του ανθρώπινου δυναμικού. Η αυτοματοποιημένη λειτουργία παρέχει σταθερότητα στον ρυθμό παραγωγής και βελτιστοποίηση του χρόνου κύκλου, ειδικά όταν το σύστημα συνδυάζεται με προηγμένες μονάδες ελέγχου. Μέσω της χρήσης

αισθητήρων, ελεγκτών και λογισμικού πρόγνωσης, τα ρομποτικά συστήματα μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα ευρύτερο περιβάλλον κυβερνοφυσικών συστημάτων, ενισχύοντας έτσι τη διασύνδεση και τον ψηφιακό έλεγχο της παραγωγής. Ωστόσο, τα αυτοματοποιημένα συστήματα έχουν σημαντικά μειονεκτήματα, με πρώτο και κυριότερο το υψηλό κόστος επένδυσης και συντήρησης. Η υλοποίηση ρομποτικών βραχιόνων απαιτεί όχι μόνο εξοπλισμό αλλά και τεχνογνωσία προγραμματισμού, ενσωμάτωσης και συνεχούς υποστήριξης. Επιπλέον, η αποδοτικότητα των αυτοματισμών μειώνεται σε περιβάλλοντα όπου η ποικιλία των προϊόντων είναι υψηλή και απαιτείται συχνή αλλαγή στην παραγωγική ρύθμιση. Η δυσκαμψία των αυτοματισμών απέναντι στη μεταβλητότητα των απαιτήσεων συνιστά σοβαρό περιορισμό της χρήσης τους σε μικρές παραγωγικές παρτίδες ή ευέλικτα εργαστήρια.

Αξίζει να επισημανθεί πως, από περιβαλλοντικής σκοπιάς, τα ρομποτικά συστήματα ενδέχεται να εμφανίζουν υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας, ιδιαίτερα εάν δεν έχουν σχεδιαστεί με κριτήρια ενεργειακής απόδοσης. Η χρήση ψηφιακών διδύμων στην προσομοίωση της κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή του βέλτιστου ενεργειακού προφίλ, ωστόσο αυτή η τεχνολογία δεν είναι ακόμα ευρέως διαδεδομένη σε όλες τις βιομηχανικές εφαρμογές.

Κεφάλαιο 3: Παρουσίαση του Λογισμικού Siemens Tecnomatix Plant Simulation

3.1 Γενική παρουσίαση του λογισμικού

Το Siemens Tecnomatix Plant Simulation αποτελεί ένα από τα πλέον προηγμένα λογισμικά προσομοίωσης διακριτών γεγονότων για τη βιομηχανική παραγωγή και τα συστήματα logistics. Αναπτύχθηκε ως μέρος της ευρύτερης πλατφόρμας Tecnomatix της Siemens Digital Industries Software και έχει ως στόχο την εικονική μοντελοποίηση, ανάλυση, βελτιστοποίηση και προσομοίωση βιομηχανικών διεργασιών σε ψηφιακό περιβάλλον. Το λογισμικό ενσωματώνει εργαλεία σχεδιασμού, στατιστικής αξιολόγησης, χρονοπρογραμματισμού και παρακολούθησης της ροής παραγωγής, καθιστώντας το κατάλληλο για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε θέματα παραγωγικής στρατηγικής.

Η βασική λειτουργία του Plant Simulation στηρίζεται στην προσέγγιση διακριτών γεγονότων, σύμφωνα με την οποία η προσομοίωση εξελίσσεται ως ακολουθία μεμονωμένων γεγονότων που αλλάζουν την κατάσταση του συστήματος σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία. Αυτή η μεθοδολογική προσέγγιση είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τη μοντελοποίηση παραγωγικών γραμμών, όπου κάθε διεργασία (παραγωγή, μεταφορά, αναμονή, αποθήκευση) αντιστοιχεί σε ένα γεγονός με χρονική διάρκεια, πόρους και εξαρτήσεις. Μέσω αυτής της δυναμικής απεικόνισης, οι χρήστες μπορούν να αναλύσουν τη ροή των υλικών, να εντοπίσουν σημεία συμφόρησης και να δοκιμάσουν σενάρια «τι θα συνέβαινε αν», με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Το περιβάλλον εργασίας του Plant Simulation υποστηρίζει αντικειμενοστραφή μοντελοποίηση, επιτρέποντας στους χρήστες να κατασκευάσουν βιβλιοθήκες αντικειμένων και να τα χρησιμοποιούν επαναληπτικά. Τα αντικείμενα αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν σταθμούς εργασίας, μεταφορικά μέσα, αποθήκες, ελεγκτές, αισθητήρες, ακόμη και ανθρώπινους πόρους. Η παραμετροποίηση τους είναι δυνατή μέσω γραφικού περιβάλλοντος και scripting σε SimTalk, τη γλώσσα προγραμματισμού του Plant Simulation, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία πολύπλοκων σεναρίων, την αλληλεπίδραση με δεδομένα και την εκτέλεση βρόχων ελέγχου.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του Plant Simulation είναι η δυνατότητά του να πραγματοποιεί στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, μέσω εργαλείων όπως τα

time plots, τα histograms, οι σταθμισμένοι μέσοι όροι, καθώς και η ενσωμάτωση DOE για πειραματισμό. Η χρήση του ενσωματωμένου Experiment Manager επιτρέπει στους χρήστες να εκτελούν αυτοματοποιημένες δοκιμές με μεταβαλλόμενες παραμέτρους και να συγκρίνουν την αποδοτικότητα των διαφορετικών μοντέλων σε σχέση με προκαθορισμένα KPI, όπως ο χρόνος κύκλου, η αξιοποίηση πόρων, η απόδοση ανά σταθμό και η κατανάλωση ενέργειας (Vidroná, Bohus, & Adamko, 2021· Kopec, Pekarcikova, Kliment, & Trojan, 2023).

Επιπρόσθετα, το Plant Simulation υποστηρίζει τη σύνδεση με εξωτερικές βάσεις δεδομένων, όπως SQL ή Excel, καθώς και τη χρήση πρωτοκόλλων επικοινωνίας OPC UA και σύνδεσης με πραγματικές συσκευές, μέσω εργαλείων όπως το KEPServerEX. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει τη λειτουργία του λογισμικού όχι μόνο ως εργαλείο σχεδιασμού αλλά και ως ψηφιακού δίδυμου (digital twin) σε εφαρμογές εικονικής έναρξης λειτουργίας (virtual commissioning), προσομοιώνοντας σε πραγματικό χρόνο τις αποκρίσεις και τη συμπεριφορά της γραμμής παραγωγής με βάση πραγματικά δεδομένα από αισθητήρες και PLC (Guerrero, Vásquez López, & Mejia, 2014· Kopec et al., 2023). Ακόμη, ένα ιδιαίτερα ισχυρό χαρακτηριστικό του Plant Simulation είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης εργαλείων ανθρώπινης εργονομίας και ανάλυσης πόρων, κάτι που το διαφοροποιεί από απλά εργαλεία προσομοίωσης. Όπως αποδεικνύεται στη μελέτη των Ottogalli et al. (2021), η εικονική απεικόνιση των θέσεων εργασίας επιτρέπει την εκτίμηση της φυσικής καταπόνησης των εργαζομένων, την προσομοίωση διαλειμμάτων, της κόπωσης και της στατικής φόρτισης, κάτι που προσδίδει στη μοντελοποίηση ανθρωποκεντρικό χαρακτήρα, κρίσιμο για εφαρμογές όπου η εργασία δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένη.

Σε συνδυασμό με άλλες σουίτες της Siemens, όπως το Teamcenter και το NX, το Plant Simulation μπορεί να αποτελέσει μέρος ενός ολοκληρωμένου PLM (Product Lifecycle Management) περιβάλλοντος, προσφέροντας πλήρη κάλυψη του κύκλου ζωής του προϊόντος, από τον σχεδιασμό μέχρι τη διαχείριση του εργοστασιακού μοντέλου. Αυτή η διασύνδεση επιτρέπει τη μείωση του χρόνου διεκπεραίωσης έργων, τη μείωση κόστους ανάπτυξης νέων προϊόντων και την αποφυγή λαθών στον πραγματικό χώρο παραγωγής, μέσω προηγούμενης εικονικής δοκιμής. Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει στη χρήση του Plant Simulation στην εκπαιδευτική και ερευνητική κοινότητα.

3.2 Δυνατότητες και χαρακτηριστικά

Το Siemens Tecnomatix Plant Simulation αποτελεί μία από τις πιο ολοκληρωμένες πλατφόρμες προσομοίωσης διακριτών γεγονότων που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιομηχανία για τη μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση παραγωγικών και λογιστικών διαδικασιών. Ο σχεδιασμός του λογισμικού εστιάζει στην παροχή προηγμένων δυνατοτήτων προσομοίωσης, πειραματισμού και ανάλυσης, προσφέροντας στους χρήστες του ένα περιβάλλον υψηλής παραμετροποίησης και ρεαλιστικής αναπαράστασης των βιομηχανικών συστημάτων. Η ευελιξία, η επεκτασιμότητα και η δυνατότητα σύνδεσης με πραγματικά δεδομένα και συστήματα καθιστούν το Plant Simulation εξαιρετικά αποτελεσματικό εργαλείο στο πλαίσιο της Βιομηχανίας. Μία από τις βασικότερες δυνατότητες του λογισμικού είναι η μοντελοποίηση συστημάτων μέσω αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού. Ο χρήστης έχει στη διάθεσή του βιβλιοθήκες από προκαθορισμένα αντικείμενα, όπως σταθμοί επεξεργασίας, αποθηκευτικοί χώροι, οχήματα μεταφοράς, συστήματα ελέγχου και είδη υλικών, τα οποία μπορούν να τροποποιηθούν, να επαναχρησιμοποιηθούν και να ενσωματωθούν σε πολύπλοκα ιεραρχικά μοντέλα. Αυτή η αρχιτεκτονική υποστηρίζει την ανάπτυξη ιεραρχικών και επαναχρησιμοποιήσιμων μονάδων, διευκολύνοντας τόσο την ανάλυση επιμέρους λειτουργιών όσο και την ολοκληρωμένη μελέτη ολόκληρων συστημάτων.

Επιπλέον, το Plant Simulation διαθέτει εσωτερικό εργαλείο πειραματισμού (Experiment Manager), το οποίο υποστηρίζει τη δημιουργία και εκτέλεση πειραμάτων μεταβλητών, επιτρέποντας την εύκολη σύγκριση διαφορετικών σεναρίων βάσει δεικτών απόδοσης. Μια από τις πιο εντυπωσιακές λειτουργίες του λογισμικού είναι η οπτικοποίηση της προσομοίωσης σε 2D και 3D περιβάλλοντα, με δυνατότητα παρακολούθησης της ροής σε πραγματικό χρόνο, εντοπισμού συμφόρησης, διαδρομών υλικών, αλληλεπιδράσεων πόρων και χρονοπρογραμματισμού εργασιών. Η δυνατότητα αυτή υποστηρίζεται από ένα ευέλικτο σύστημα animation και render, το οποίο προσφέρει πολύτιμη υποστήριξη στην επικοινωνία των ευρημάτων, ιδίως όταν το λογισμικό χρησιμοποιείται για παρουσιάσεις προς διοικητικά στελέχη ή για εκπαίδευση προσωπικού.

Το Plant Simulation προσφέρει πλήρη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, με εργαλεία όπως πίνακες εξαγωγής δεδομένων, χρονικά διαγράμματα, ιστογράμματα και

καμπύλες συχνοτήτων. Μέσω αυτών, ο χρήστης μπορεί να υπολογίσει κρίσιμους δείκτες όπως ο ρυθμός παραγωγής (throughput), η αξιοποίηση των σταθμών εργασίας, ο χρόνος αναμονής προϊόντων, τα αποθέματα σε κάθε φάση, και να εντοπίσει ποια μέρη του συστήματος αποτελούν «μποτιλιαρίσματα» (bottlenecks). Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό του λογισμικού είναι η δυνατότητα σύνδεσης με εξωτερικές πηγές δεδομένων και με φυσικά συστήματα, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση του ως ψηφιακό δίδυμο.. Η δυνατότητα αυτή δίνει στο Plant Simulation ρόλο-κλειδί στην εικονική έναρξη λειτουργίας (virtual commissioning), καθώς επιτρέπει την πρόβλεψη και πρόληψη λαθών ή καθυστερήσεων κατά την υλοποίηση ενός νέου ή τροποποιημένου συστήματος.

Το λογισμικό υποστηρίζει επίσης την προσομοίωση ανθρώπινων πόρων και εργονομικών παραμέτρων, ενσωματώνοντας μοντέλα εργαζομένων και αλληλεπίδρασής τους με τον εξοπλισμό. Η λειτουργία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου επιδιώκεται η σύγκριση μεταξύ ρομποτικά αυτοματοποιημένων διεργασιών και αυτών που περιλαμβάνουν ανθρώπινη εργασία. Μέσω εικονικών μοντέλων κίνησης και εργονομικής ανάλυσης, είναι δυνατή η εκτίμηση της φυσικής καταπόνησης, του χρόνου απόκρισης και της επαναληπτικότητας των κινήσεων των χειριστών. Επιπλέον, το Plant Simulation περιλαμβάνει δυνατότητες ενεργειακής προσομοίωσης, δίνοντας τη δυνατότητα ανάλυσης της κατανάλωσης ενέργειας ανά σταθμό, μονάδα εξοπλισμού ή συνολικό σύστημα. Η προσέγγιση αυτή είναι συμβατή με τη φιλοσοφία της «πράσινης παραγωγής» και της ενεργειακά αποδοτικής βιομηχανίας, ενώ συνδέεται στενά με την έννοια των ψηφιακών διδύμων που επιτρέπουν την εικονική ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας προτού εφαρμοστούν τροποποιήσεις στην πραγματική γραμμή παραγωγής.

Η δυνατότητα υλοποίησης λογιστικών και παραγωγικών σεναρίων «τι θα συνέβαινε αν» (what-if scenarios) είναι επίσης εξαιρετικά σημαντική, καθώς επιτρέπει την εκ των προτέρων αξιολόγηση των επιπτώσεων αλλαγών στη διάταξη του χώρου, στον αριθμό προσωπικού, στον τύπο μεταφορικού εξοπλισμού ή στην αλληλουχία των διεργασιών. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να αποφευχθούν δαπανηρές αλλαγές ή επενδύσεις χωρίς. Αξίζει να σημειωθεί ότι το Plant Simulation μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία και σε περιβάλλοντα AGV-based συστημάτων, όπως αναφέρεται στη μελέτη των Viharos και Németh (2018), όπου προσομοιώθηκαν ρομποτικές γραμμές

συναρμολόγησης με αυτόνομα οχήματα καθοδηγούμενα από αλγορίθμους. Το εργαλείο υποστηρίζει την κατασκευή πολύπλοκων λογιστικών ροών και τον συγχρονισμό μεταξύ ανθρώπινων και μηχανικών μονάδων, εξυπηρετώντας την ολοκληρωμένη προσέγγιση του εργοστασίου του μέλλοντος.

3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά της έκδοσης (demo 1 χρόνου)

Η δοκιμαστική έκδοση (**demo version**) του **Siemens Tecnomatix Plant Simulation**, η οποία διατίθεται δωρεάν για χρονική διάρκεια ενός έτους, παρέχει στους χρήστες έναν πλούσιο και λειτουργικά πλήρη πυρήνα του λογισμικού, προσανατολισμένο κυρίως σε εκπαιδευτικά, ερευνητικά και πιλοτικά έργα. Η δυνατότητα αυτή της Siemens αποτελεί στρατηγική επιλογή που αποσκοπεί στη διεύρυνση της χρήσης του λογισμικού από την ακαδημαϊκή κοινότητα, σε ένα πλαίσιο εξοικείωσης με τις βασικές λειτουργίες, χωρίς την απαίτηση εμπορικής άδειας. Η demo έκδοση ενός έτους είναι πλήρως συμβατή με τις βασικές δυνατότητες του λογισμικού, επιτρέποντας την κατασκευή προσομοιωτικών μοντέλων, την εισαγωγή ροών υλικών, την προγραμματισμένη λειτουργία σταθμών εργασίας, τη χρήση μεταφορικών συστημάτων και την ενσωμάτωση ελεγκτών παραγωγής. Σε επίπεδο λειτουργικότητας, δεν επιβάλλονται σημαντικοί περιορισμοί όσον αφορά την κατασκευή μοντέλων, την ανάλυση δεδομένων ή την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Ωστόσο, υπάρχουν συγκεκριμένα τεχνικά όρια που αφορούν κυρίως την έκταση και τη διασυνδεσιμότητα του μοντέλου, όπως για παράδειγμα το μέγιστο επιτρεπτό μέγεθος simulation objects, ο αριθμός των παραμετροποιήσιμων οντοτήτων και η χρήση εξωτερικών βάσεων δεδομένων.

Ειδικότερα, στην έκδοση demo δεν υποστηρίζεται πλήρως η δυνατότητα σύνδεσης μέσω OPC UA με εξωτερικές PLC μονάδες ή με πραγματικά βιομηχανικά συστήματα, κάτι που περιορίζει την εφαρμογή της εικονικής έναρξης λειτουργίας (virtual commissioning). Αυτή η λειτουργία, αν και παρούσα στο εμπορικό πακέτο, δεν είναι ενεργοποιημένη στο demo λόγω των απαιτήσεων ασφαλείας και του εμπορικού χαρακτήρα της επικοινωνίας μεταξύ ψηφιακού μοντέλου και φυσικού εξοπλισμού. Επιπλέον, η χρήση κερδοσκοπικής αξιοποίησης του λογισμικού αποκλείεται πλήρως από τους όρους χρήσης της έκδοσης, ενώ η Siemens επιβλέπει ενεργά τη συμμόρφωση με τους όρους της άδειας, επιτρέποντας μόνο εκπαιδευτική ή ερευνητική χρήση. Από άποψη υποστήριξης, η demo έκδοση παρέχεται συνήθως με πρόσβαση σε βασική

τεχνική τεκμηρίωση, παραδείγματα εφαρμογών, καθώς και εκπαιδευτικά βίντεο και αρχεία *.spp*. Οι χρήστες έχουν δυνατότητα χρήσης της βιβλιοθήκης αντικειμένων (class library), του εργαλείου Experiment Manager, των στατιστικών γραφημάτων και του ενσωματωμένου debugger.

Η ετήσια πρόσβαση μπορεί να ανανεωθεί κατόπιν αξιολόγησης από τη Siemens, ιδίως σε περιπτώσεις συνεργασίας με πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα ή φοιτητικά έργα διπλωματικών και μεταπτυχιακών εργασιών. Στο πλαίσιο αυτό, η αξιοποίηση της demo έκδοσης καθίσταται ιδανική για εκπαιδευτικές ασκήσεις, μοντελοποίηση ρεαλιστικών σεναρίων, ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων σε προκαταρκτικό στάδιο και τεχνική εξοικείωση πριν από την επαγγελματική χρήση του εργαλείου. Τέλος, η χρήση της δοκιμαστικής έκδοσης του Plant Simulation έχει και παιδαγωγική σημασία, καθώς επιτρέπει την καλλιέργεια δεξιοτήτων μοντελοποίησης, αλγοριθμικής σκέψης, κατανόησης εργοστασιακών ροών και λήψης αποφάσεων βάσει δεδομένων. Όπως υποστηρίζουν οι Poronič, Kliment, Trebuša και Pekarčikoná (2015), η ενσωμάτωση του εργαλείου αυτού στην εκπαιδευτική διαδικασία ενισχύει την προετοιμασία των φοιτητών για τις απαιτήσεις της σύγχρονης βιομηχανίας, επιτρέποντάς τους να εξοικειωθούν με τη λειτουργική πραγματικότητα ενός ψηφιακά μοντελοποιημένου εργοστασίου.

3.4 Παραδείγματα εφαρμογών στον κλάδο

Το Siemens Tecnomatix Plant Simulation έχει καθιερωθεί ως βασικό εργαλείο για την προσομοίωση και τη βελτιστοποίηση βιομηχανικών διαδικασιών σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, καλύπτοντας κλάδους όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, η μεταποίηση, τα logistics και η εφοδιαστική αλυσίδα. Η χρηστικότητά του οφείλεται όχι μόνο στην ικανότητα δημιουργίας αξιόπιστων μοντέλων παραγωγής, αλλά και στην ενσωμάτωση τεχνικών ανάλυσης απόδοσης, εργονομίας, ενεργειακής κατανάλωσης και δυναμικού χρονοπρογραμματισμού. Μέσω της προσομοίωσης, οι επιχειρήσεις έχουν τη δυνατότητα να εξετάσουν εναλλακτικές διατάξεις παραγωγής, να επιλύσουν προβλήματα συμφόρησης και να ελαχιστοποιήσουν το κόστος λειτουργίας, πριν την υλοποίηση στην πραγματικότητα. Μέσω του Plant Simulation και ενσωμάτωσης εργαλείων εικονικής πραγματικότητας, δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο προσομοιωτικό περιβάλλον στο οποίο αξιολογήθηκαν παράμετροι όπως η εργονομία των θέσεων εργασίας, η συχνότητα μετακινήσεων και η αλληλεπίδραση με

ρομποτικούς βραχίονες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο επανασχεδιασμός βασιζόμενος στην προσομοίωση βελτίωσε την αποδοτικότητα κατά 17% και μείωσε τον εργονομικό κίνδυνο για τους εργαζομένους.

Στον τομέα της ελαφριάς βιομηχανίας και των logistics, η μελέτη περίπτωσης σε ένα σύστημα εφοδιαστικής υποστήριξης, όπου το Plant Simulation χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση αποθηκευτικών ροών και τον σχεδιασμό στρατηγικών τοποθέτησης υλικών. Η ανάλυση οδήγησε στη βελτίωση της κατανομής του αποθηκευτικού χώρου και στην εξομάλυνση των ροών μεταφοράς, επιτρέποντας τον περιορισμό των χρόνων παραλαβής κατά 23%. Η μελέτη ανέδειξε την αποτελεσματικότητα του λογισμικού ως εργαλείο επιχειρησιακής λήψης αποφάσεων σε περιβάλλοντα με έντονη στοχαστικότητα. Ανάλογες εφαρμογές εντοπίζονται και στον τομέα της βαριάς μεταποίησης, όπου το Plant Simulation χρησιμοποιήθηκε για τη διαχείριση σύνθετων αλυσίδων παραγωγής.

Στον τομέα της προηγμένης ρομποτικής και του ψηφιακού διδύμου, οι Cardoso et al. (2022) αξιοποίησαν το Plant Simulation σε συνδυασμό με αισθητήρες και πραγματικά δεδομένα για την εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης ρομποτικής διαδικασίας διάτρησης. Με τη χρήση της τεχνολογίας του ψηφιακού διδύμου (digital twin), κατέστη δυνατή η πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε την επιλογή της πιο αποδοτικής στρατηγικής και συνέβαλε στον σχεδιασμό πιο βιώσιμων ρομποτικών διεργασιών, εναρμονισμένων με τις αρχές της πράσινης βιομηχανίας. Σε περιβάλλοντα AGV-based γραμμών συναρμολόγησης, το Plant Simulation χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό, τη δρομολόγηση και την αποφυγή συμφόρησης αυτόνομων οχημάτων (AGVs). Η μελέτη των Viharos και Németh (2018) απέδειξε πως η προσομοίωση τέτοιων συστημάτων με Plant Simulation επέτρεψε την πρόβλεψη περιπτώσεων σύγκρουσης, την καλύτερη κατανομή των φορτίων εργασίας και τη βελτιστοποίηση της κίνησης των AGVs εντός του εργοστασιακού χώρου. Το αποτέλεσμα ήταν μια μείωση κατά 28% των νεκρών χρόνων των οχημάτων και βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος διανομής εξαρτημάτων.

Το Plant Simulation αξιοποιήθηκε για να προσομοιωθεί η λειτουργία ρομποτικού συστήματος βασισμένου σε ελεγκτή PLC, που ανέλαβε την αυτόματη ταξινόμηση αντικειμένων διαφορετικής γεωμετρίας και βάρους. Η ανάλυση επέτρεψε τη

βελτιστοποίηση του αλγορίθμου ελέγχου, με μείωση των χρόνων χειρισμού ανά αντικείμενο και αύξηση της απόδοσης της μονάδας κατά 15%, ενισχύοντας τη θέση του Plant Simulation ως εργαλείο τεχνικής και λογικής προσομοίωσης ρομποτικών διεργασιών. Τέλος, η προσομοίωση περιβαλλοντικών παραμέτρων μέσω του Plant Simulation έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος. Στη μελέτη των Śmieszek et al. (2023), το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ηχητικής ρύπανσης από τη λειτουργία μεταφορικών υποδομών, αποδεικνύοντας πως το Plant Simulation μπορεί να επεκταθεί και σε πεδία πέρα από την κλασική παραγωγή, λειτουργώντας ως πολυεργαλείο προσομοίωσης πολύπλοκων και δυναμικών φαινομένων.

Όλα τα παραπάνω παραδείγματα αναδεικνύουν την ευελιξία και την εφαρμοσιμότητα του Siemens Tecnomatix Plant Simulation σε μια πληθώρα βιομηχανικών πεδίων. Είτε πρόκειται για τον σχεδιασμό γραμμών παραγωγής, την εργονομική ανάλυση, τον ενεργειακό σχεδιασμό ή τη διαχείριση αποθήκευσης, το Plant Simulation λειτουργεί ως κρίσιμος υποστηρικτικός μηχανισμός για τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων και τη μείωση λειτουργικών ρίσκων. Το γεγονός ότι μπορεί να προσαρμοστεί σε συστήματα διαφορετικής πολυπλοκότητας και κλίμακας, από μικρές παραγωγικές μονάδες έως παγκόσμιες γραμμές συναρμολόγησης, το καθιστά ένα από τα σημαντικότερα λογισμικά στον χώρο της σύγχρονης προσομοίωσης.

3.5 Προετοιμασία μοντέλου & παραδοχές

Η διαδικασία προετοιμασίας του μοντέλου σε ένα προσομοιωτικό περιβάλλον, όπως αυτό που προσφέρει το Tecnomatix Plant Simulation, αποτελεί κομβικό στάδιο για τη μετέπειτα εγκυρότητα των αποτελεσμάτων και την αξιοπιστία της ανάλυσης. Η μοντελοποίηση βιομηχανικών διεργασιών δεν αποτελεί μια απλή αντιγραφή της πραγματικότητας, αλλά μια δομημένη προσέγγιση αφαίρεσης και εστίασης σε κρίσιμες μεταβλητές, με στόχο την εξαγωγή επαληθεύσιμων συμπερασμάτων μέσω διακριτών σεναρίων. Ειδικότερα, η μελέτη αυτή στηρίζεται στη δημιουργία δύο ξεχωριστών προσομοιωτικών μοντέλων – ένα με ανθρώπινη εργασία και ένα με ρομποτική αυτοματοποίηση – με βάση ένα κοινό πλαίσιο παραγωγικής διάταξης και υπό συγκεκριμένες υποθέσεις. Η πρώτη φάση της προετοιμασίας περιλαμβάνει τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων εισόδου, που αφορούν τη λειτουργία της γραμμής παραγωγής: χρόνοι εκτέλεσης ανά εργασία, διάρκεια αλλαγής προϊόντος, χωρητικότητα σταθμών,

καμπύλες ζήτησης, είδη και χαρακτηριστικά προϊόντων, καθώς και οργανωτικά δεδομένα όπως βάρδιες, εργατικό δυναμικό και ρυθμοί ροής. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται είτε από υποθετικό σενάριο, είτε από πραγματικά βιομηχανικά πρότυπα, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα και τη μελέτη περίπτωσης.

Κατά την υλοποίηση του μοντέλου στο Plant Simulation, ακολουθείται η μεθοδολογία bottom-up, ξεκινώντας από τη μοντελοποίηση των επιμέρους σταθμών και την αντιστοίχισή τους με τις αντίστοιχες λειτουργίες παραγωγής, και στη συνέχεια διαμορφώνοντας το σύνολο της γραμμής. Κάθε μονάδα εργασίας – είτε αφορά εργαζόμενο είτε ρομποτικό βραχίονα – προγραμματίζεται με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους: χρόνο κύκλου, απαιτούμενους πόρους, ρυθμό αποτυχίας, δυνατότητες παράλληλης εργασίας, μεταφορικά μέσα και σημεία αποθήκευσης. Στο ανθρώπινο μοντέλο, κάθε σταθμός υποτίθεται ότι εξυπηρετείται από έναν εργαζόμενο, ο οποίος εκτελεί την ανάλογη ενέργεια με συγκεκριμένο χρόνο εργασίας και εργονομικά όρια. Οι χρόνοι εργασίας βασίζονται είτε σε πρότυπα χρόνου είτε σε τιμές από βιβλιογραφία. Προστίθενται ακόμη και παράγοντες κόπωσης, μικρά διαλείμματα και αποκλίσεις από τον ιδανικό χρόνο κύκλου για την ενσωμάτωση της ανθρώπινης μεταβλητότητας. Οι εργονομικές παράμετροι, αν και δεν υλοποιούνται με λεπτομερή κινηματική μοντελοποίηση, ενσωματώνονται ποιοτικά μέσω του αριθμού κινήσεων, της διάρκειας στατικής στάσης και της συχνότητας μετακινήσεων εντός του σταθμού.

Αντίθετα, στο μοντέλο με ρομποτική αυτοματοποίηση, κάθε λειτουργία εκτελείται από έναν ρομποτικό βραχίονα ελεγχόμενο μέσω PLC, με προκαθορισμένο κύκλο λειτουργίας χωρίς απόκλιση. Οι χρόνοι χειρισμού είναι μικρότεροι λόγω της ταχύτητας και της ακρίβειας των ρομποτικών συστημάτων, ενώ η προσομοίωση τους περιλαμβάνει και χρόνους για έλεγχο σφάλματος ή απόκρισης σε ανατροφοδότηση αισθητήρων. Σημαντική παραδοχή στο ρομποτικό μοντέλο είναι ότι το σύστημα δεν απαιτεί εποπτεία και λειτουργεί σε 24ωρη βάση χωρίς βάρδιες ή διαλείμματα, προσδίδοντας πλεονέκτημα στον συνολικό ρυθμό παραγωγής. Οι γενικές παραδοχές που ενσωματώνονται και στα δύο μοντέλα περιλαμβάνουν:

- Σταθερή ροή προϊόντων εισόδου (χωρίς αστάθμητες μεταβολές).
- Κανονική λειτουργία του εξοπλισμού χωρίς αστοχίες (πρώτη φάση προσομοίωσης).
- Σταθερή ζήτηση προϊόντος.

- Χωρίς ελλείψεις υλικών ή διακοπές ρεύματος.
- Ίδιο φυσικό layout για λόγους συγκρισιμότητας των μοντέλων.

Αξίζει να σημειωθεί πως, για λόγους εγκυρότητας, κάθε προσομοίωση εκτελείται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους με τυχαίες διακυμάνσεις (stochastic runs), ώστε να ληφθεί υπόψη η φυσική στοχαστικότητα των διαδικασιών, ειδικά στο ανθρώπινο μοντέλο. Στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιούνται μέθοδοι Monte Carlo Simulation, σε συνδυασμό με το εργαλείο Experiment Manager του Plant Simulation, για τη δημιουργία πειραμάτων με διαφορετικά δεδομένα εισόδου και τον υπολογισμό διασποράς κρίσιμων δεικτών απόδοσης. Το μοντέλο υλοποιείται σε δομή ιεραρχίας, με ανεξάρτητες μονάδες για κάθε φάση της παραγωγής (π.χ. παραλαβή υλικών, προκατεργασία, συναρμολόγηση, ποιοτικός έλεγχος, αποθήκευση). Κάθε μονάδα περιλαμβάνει υπομονάδες για ενέργειες, μεταφορικά μέσα, ροές πληροφορίας και ανθρώπινους ή μηχανικούς πόρους. Η επιλογή αυτής της δομής διευκολύνει τόσο την κλιμάκωση του μοντέλου όσο και τη δυνατότητα ανάλυσης επιμέρους διεργασιών, χωρίς να απαιτείται ανακατασκευή του συνόλου του προσομοιωτικού περιβάλλοντος.

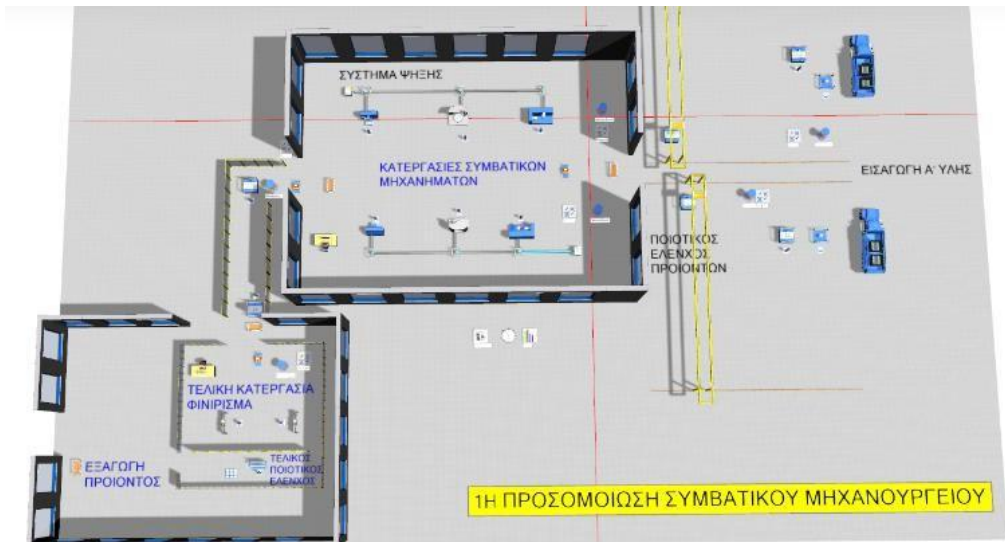
Παράλληλα, κατασκευάζονται δείκτες απόδοσης για την αξιολόγηση των δύο μοντέλων. Οι κυριότεροι δείκτες που θα μελετηθούν είναι: χρόνος κύκλου ανά τεμάχιο, συνολικός ρυθμός παραγωγής, αξιοποίηση πόρων, μέσος χρόνος αναμονής προϊόντων, αριθμός τεμαχίων ανά βάρδια ή ανά ημέρα, κόστος λειτουργίας ανά μονάδα προϊόντος, και ενεργειακή κατανάλωση ανά διεργασία. Αυτοί οι δείκτες παρέχουν τη βάση για την ποσοτική σύγκριση των δύο προσεγγίσεων στο κεφάλαιο ανάλυσης και ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 4: Δημιουργία Σεναρίων Προσομοίωσης.

4.1 Περιγραφή του συστήματος παραγωγής που προσομοιώνεται

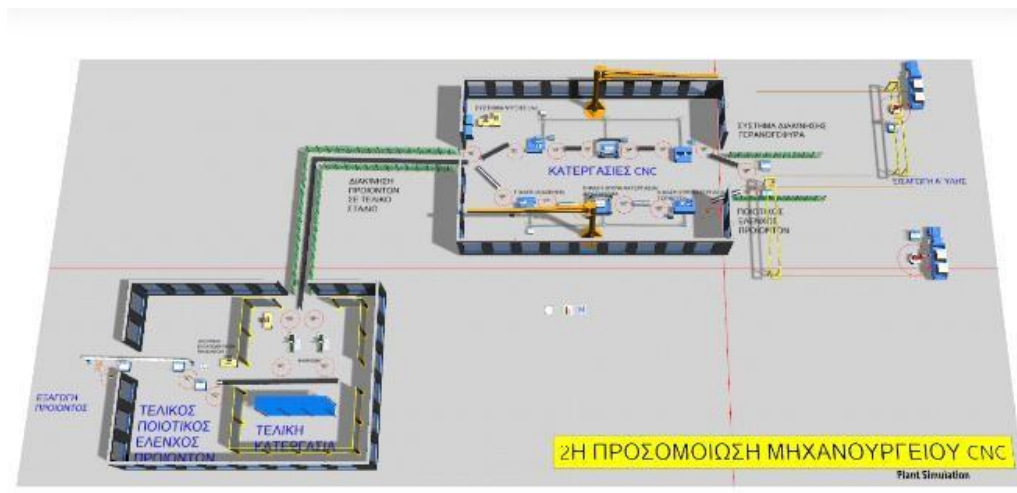
Το σύστημα παραγωγής που προσομοιώνεται στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης αφορά ένα μηχανουργείο επεξεργασίας μεταλλικών εξαρτημάτων, το οποίο μελετάται σε δύο διακριτές διατάξεις: μια παραδοσιακή εκδοχή με ανθρώπινη εργασία και μια εξελιγμένη, πλήρως αυτοματοποιημένη εκδοχή με ρομποτικούς βραχίονες και CNC μηχανές. Και στις δύο περιπτώσεις, η προσομοίωση υλοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού Siemens Tecnomatix Plant Simulation, το οποίο επέτρεψε την αναλυτική αποτύπωση των φάσεων παραγωγής, των χρονικών ροών, των σταθμών επεξεργασίας, της εσωτερικής διακίνησης και των διαλειτουργικών ροών (Jus, 2017· Miltényi & Czégé, 2019). Η παραγωγική διαδικασία ξεκινά από την είσοδο της πρώτης ύλης, που παραλαμβάνεται από φορτηγά και κατευθύνεται μέσω γερανογέφυρας ή ρομποτικού μεταφορέα στους σταθμούς ποιοτικού ελέγχου. Από εκεί, τα εξαρτήματα προωθούνται στις πρώτες κατεργασίες (προκατεργασία - τόννευση), ακολουθούμενες από κύριες κατεργασίες όπως φρεζάρισμα και διάτρηση, και, τέλος, σε μονάδες φινιρίσματος και τελικού ποιοτικού ελέγχου. Η τελική έξοδος των προϊόντων οργανώνεται σε χώρο εξαγωγής, ενώ τα ελαττωματικά τεμάχια απορρίπτονται βάσει των αποτελεσμάτων ελέγχου.

Στην πρώτη προσομοίωση, που απεικονίζει το συμβατικό μηχανουργείο, η εσωτερική ροή υλικών βασίζεται κατά κύριο λόγο σε ανθρώπινη εργασία, με χρήση εργατών (WorkerPools), χειροκίνητων καροτσιών και πολυγέφυρας (MultiPortal Crane). Οι σταθμοί παραγωγής περιλαμβάνουν συμβατικές εργαλειομηχανές και η μετάβαση εξαρτημάτων γίνεται μέσω χειρωνακτικής μεταφοράς. Η εργασία διαρθρώνεται σε βάρδιες, με εναλλαγές στη διαθεσιμότητα εργατικού δυναμικού και ενσωμάτωση εργονομικών ορίων. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει στατιστικά σημαντικό χρόνο “Blocked” σε πολλούς σταθμούς, ειδικά σε αυτούς που προηγούνται από σημεία συμφόρησης ή απαιτούν χειρισμό υλικού με περιορισμένους ανθρώπινους πόρους. Αυτό φαίνεται στις στατιστικές χρήσης πόρων, όπου η κατάσταση “Working” κυμαίνεται σε χαμηλά ποσοστά, ενώ η κατάσταση “Blocked” υπερβαίνει συχνά το 60%, ενδεικτικό μειωμένης ροής και ελλιπούς συγχρονισμού λειτουργιών.



Εικόνα 1

Το ρομποτικό μηχανουργείο, που απεικονίζεται στη δεύτερη προσομοίωση, βασίζεται σε συστήματα CNC (Computer Numerical Control) και ρομποτικά Pick-and-Place μηχανήματα για κάθε φάση κατεργασίας, διακίνησης και φινιρίσματος. Η ροή των υλικών είναι πλήρως αυτοματοποιημένη, με χρήση μεταφορικών ταινιών, γραμμικών συστημάτων μεταφοράς (conveyors), ρομποτικών βραχιόνων και overhead γερανογέφυρας. Το μοντέλο περιλαμβάνει ξεκάθαρο διαχωρισμό μεταξύ των φάσεων κατεργασίας: Α΄ Φάση – Προκατεργασία (τόρνευση), Β΄ Φάση – Κύρια κατεργασία (φρεζάρισμα), Γ΄ Φάση – Διάτρηση, και την τελική φάση του φινιρίσματος, η οποία επίσης γίνεται ρομποτικά. Μεταξύ των φάσεων αυτών διατηρείται σύνδεση με γραμμές μεταφοράς, χωρίς να απαιτείται παρέμβαση από ανθρώπινο παράγοντα.



Εικόνα 2

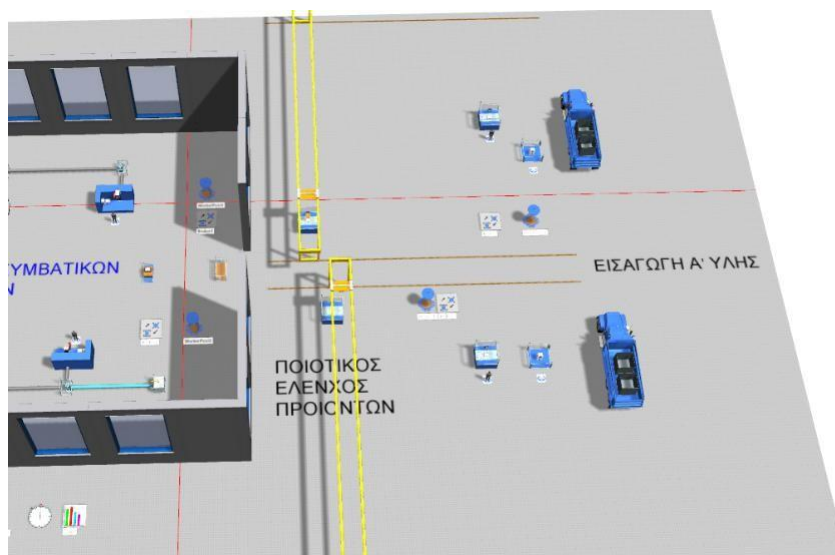
Η διαχείριση των υλικών στην αυτόματη προσέγγιση παρουσιάζει υψηλό βαθμό ομοιομορφίας και προβλέψιμη κατανομή χρόνου εργασίας, όπως τεκμηριώνεται από τις στατιστικές του Plant Simulation. Οι ρομποτικές μονάδες λειτουργούν με μικρή διακύμανση στις καταστάσεις “Blocked” και “Waiting”, ενώ το ποσοστό χρόνου “Working” παραμένει αυξημένο. Παρόλα αυτά, εξακολουθούν να παρατηρούνται περιπτώσεις συμφόρησης και μηχανικής αναμονής, κυρίως λόγω της φύσης της σειράς κατεργασίας και της μη προσαρμοστικής δυναμικής ροής (Ferro et al., 2018). Είναι αξιοσημείωτο ότι η προστιθέμενη αξία (Value Added) στις διαδικασίες, αν και χαμηλότερη συγκριτικά με το ανθρώπινο μοντέλο (16.33% έναντι έως και >77%), διατηρείται σταθερή και ισοκαταναμεμένη, γεγονός που επιβεβαιώνει τη λειτουργική αξιοπιστία των CNC μηχανών και τη μείωση του χρόνου αδράνειας. Η αξιοποίηση των σταθμών παραγωγής στις δύο προσομοιώσεις παρουσιάζει δομικές διαφοροποιήσεις. Στο ανθρώπινο σύστημα, η πολυπλοκότητα και η ασυμμετρία των εργασιών οδηγεί σε σημαντικά επίπεδα “Waiting” και “Blocked”, γεγονός που ενισχύεται από την εργονομική ασυμβατότητα ή την ανάγκη μετακίνησης χειριστών ανάμεσα στους σταθμούς. Αντίθετα, στο ρομποτικό σύστημα, η λειτουργία των σταθμών είναι σχεδόν ισομερής, με υψηλή αυτονομία, αν και κάποιες μονάδες εμφανίζουν “Blocked” λόγω μη βέλτιστης ροής εξαρτημάτων από προηγούμενες φάσεις, πρόβλημα που συνήθως σχετίζεται με το buffering και το capacity των conveyors (Trebuña et al., 2019).

Στο επίπεδο χρόνου κύκλου προϊόντος, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα τεμάχια στο ρομποτικό μοντέλο διανύουν μεγαλύτερο συνολικό χρόνο ζωής (mean lifetime ~13:46

λεπτά), αλλά με ομαλή διαχείριση χωρίς αποθήκευση, ενώ στο ανθρώπινο μοντέλο παρατηρείται έντονη διακύμανση χρόνου, με τιμές από 44 δευτερόλεπτα έως και 1 ώρα και 55 λεπτά ανά τεμάχιο, ανάλογα με το drain. Οι διαφορές αυτές δεν οφείλονται αποκλειστικά στην τεχνολογία, αλλά και στις παραδοχές λειτουργίας (εργατοώρες, διακοπές, εργονομικά όρια). Ουσιαστικά, η προσομοίωση των δύο παραγωγικών συστημάτων κατέδειξε ότι η χρήση προηγμένων εργαλείων ψηφιακής μοντελοποίησης προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας αξιόπιστων, ρεαλιστικών και επεκτάσιμων μοντέλων λειτουργίας, με ταυτόχρονη ανάλυση ροών, πόρων, χρόνων και ποιότητας παραγωγής (Śmieszek et al., 2023· Cardoso et al., 2022). Η υιοθέτηση της προσέγγισης αυτής, σε συνδυασμό με τεχνικές εικονικής επικύρωσης και KPI analysis, καθιστά το Siemens Tecnomatix Plant Simulation ένα ισχυρό εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων για σύγχρονες βιομηχανικές μονάδες, ιδίως σε συγκριτικά σενάρια ανθρώπινης και ρομποτικής παραγωγής (Ottogalli et al., 2021· Wang, Setchi, & Mohammed, 2022).

4.2 Προσομοίωση με ανθρώπινο παράγοντα: δομή, πόροι, διαδικασία

Η προσομοίωση του συστήματος παραγωγής με ανθρώπινο παράγοντα στο Siemens Tecnomatix Plant Simulation δεν αποτελεί απλώς μια αναπαραγωγή ενός εργοστασιακού περιβάλλοντος με τη χρήση ανθρώπων, αλλά συνιστά μια συστηματική και πολυεπίπεδη αναπαράσταση της επιχειρησιακής πολυπλοκότητας ενός παραδοσιακού βιομηχανικού συστήματος. Το εν λόγω σενάριο υλοποιείται ως το πρώτο από τα δύο εναλλακτικά μοντέλα γραμμής παραγωγής και λειτουργεί ως ρεαλιστικό υπόδειγμα λειτουργίας σε εργοστάσια όπου η ανθρώπινη εργασία παραμένει ο πυρήνας της διαδικασίας. Το μοντέλο δίνει έμφαση στις λειτουργικές, εργονομικές και δυναμικές παραμέτρους που επηρεάζουν άμεσα τη ροή υλικού, τον συγχρονισμό μεταξύ σταθμών, και την απόδοση κάθε στοιχείου του συστήματος. Η εφαρμογή των ανθρώπινων πόρων δεν περιορίζεται στην εκτέλεση χειρωνακτικών εργασιών αλλά επεκτείνεται στη διαχείριση υλικών, την ανατροφοδότηση, την παρακολούθηση, και τον επιτόπιο έλεγχο ποιότητας (Ottogalli, Anghinolfi, Paolucci, & Tonelli, 2021).



Εικόνα 3

Η βασική διάρθρωση του μοντέλου περιλαμβάνει σταθμούς εργασίας (stations), αποθηκευτικά στοιχεία (buffers), μεταφορικά μέσα (π.χ. γερανογέφυρες) και σημεία εισόδου/εξόδου. Η λειτουργική αλληλουχία βασίζεται σε παραδοσιακή ροή πρώτων υλών από την πηγή (Source) προς διαδοχικούς σταθμούς κατεργασίας (π.χ. Station2, Station3, Station4, Station5), καταλήγοντας τελικά σε σταθμούς απομάκρυνσης (Drain). Η απόδοση του συστήματος είναι άμεσα εξαρτημένη από την αποτελεσματικότητα της ανθρώπινης εργασίας, η οποία εκφράζεται μέσω χρονικών καθυστερήσεων, εναλλαγής κατάστασης των πόρων (π.χ. working, waiting, blocked), καθώς και της στατιστικής μεταβλητότητας των επιδόσεων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η απόδοση των γερανογεφυρών MultiPortalCrane και MultiPortalCrane1 κυμάνθηκε μόλις στο 2.33% και 2.03% αντίστοιχα, υποδεικνύοντας υποαπασχόληση λόγω αδυναμίας συγχρονισμού ή καθυστέρησης απόκρισης ανθρώπινου χειριστή .



Εικόνα 4

Οι ανθρώπινοι πόροι μοντελοποιούνται ως “εργάτες” που ανατίθενται σε συγκεκριμένες διεργασίες και αλληλεπιδρούν με τις μηχανές μέσω προκαθορισμένων χρονικών και εργονομικών περιορισμών. Το Plant Simulation υποστηρίζει την παραμετροποίηση μεταβλητών όπως fatigue factor, physical workload, attention span, καθώς και το ποσοστό αποτυχίας εντολών, παράμετροι που ενισχύουν τη ρεαλιστικότητα της προσομοίωσης (Wang, Setchi, & Mohammed, 2022). Επιπλέον, περιλαμβάνονται μοντέλα παρουσίας/απουσίας, σενάρια διαλείμματος και ασυμμετρίας δεξιοτήτων, που αντανakλούν το ανθρώπινο στοιχείο με ακρίβεια. Οι καθυστερήσεις που προκύπτουν από τη μη ταυτόχρονη ενεργοποίηση σταθμών, καθώς και τα υψηλά ποσοστά “waiting” και “blocking”, αποδίδονται κυρίως στην εργονομική αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπων και μηχανών, επιβεβαιώνοντας τη σημασία της εργονομίας στον σχεδιασμό της παραγωγικής διάταξης.

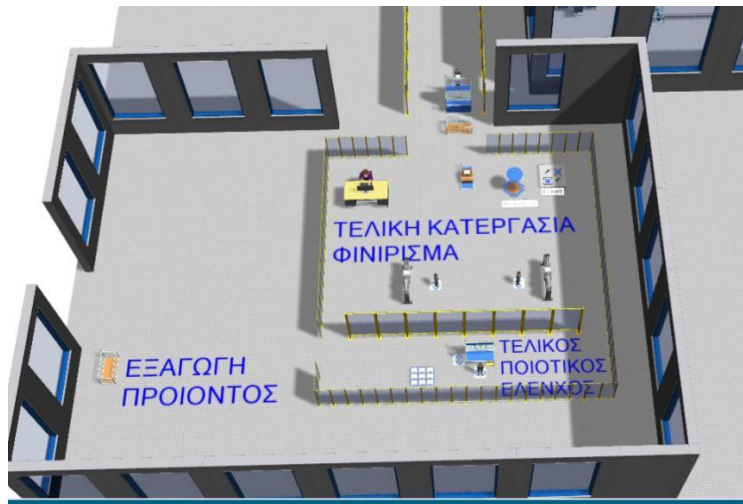
Η επιλογή της διαδρομής των υλικών (material flow) πραγματοποιείται μέσω δυναμικής δρομολόγησης με βάση την κατάσταση διαθεσιμότητας σταθμών. Σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει διαθέσιμος εργάτης ή η καθυστέρηση στην εκτέλεση εντολής ξεπερνά το προκαθορισμένο όριο, το προϊόν εισέρχεται σε κατάσταση buffer, οδηγώντας σε συμφόρηση και αύξηση του συνολικού χρόνου ζωής του τεμαχίου εντός του συστήματος. Η συμφόρηση είναι πιο έντονη σε σταθμούς όπως ο Station5, όπου το 46.41% του χρόνου καταγράφηκε σε κατάσταση “waiting”, ενώ στον Station2 καταγράφηκε το εξαιρετικά χαμηλό 0.42% “working” και 99.56% “blocked”,

καθιστώντας τον παράγοντα αυτόν ανασταλτικό για τη συνολική παραγωγική δυναμική του μοντέλου .



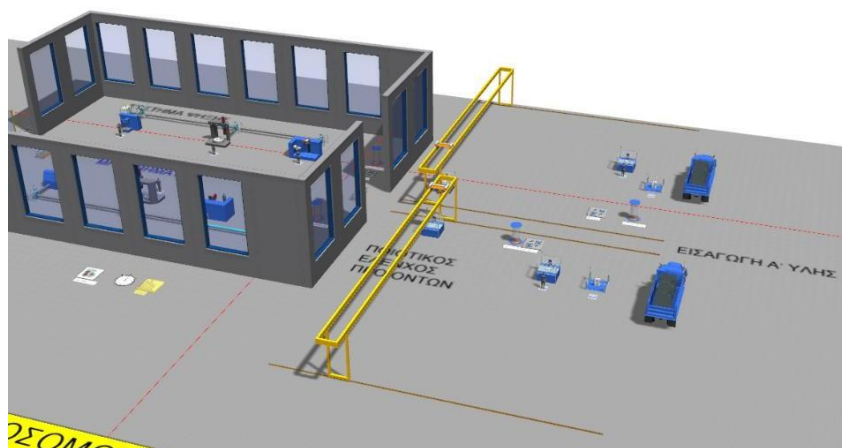
Εικόνα 5

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της παρούσας διάταξης είναι η ύπαρξη συστήματος ψύξης, το οποίο δεν επενεργεί στο προϊόν, όπως συμβαίνει σε γραμμές κατεργασίας θερμικά ευαίσθητων υλικών, αλλά αποκλειστικά στις ίδιες τις μηχανές. Η παρουσία του εν λόγω συστήματος προσφέρει προστασία από υπερθέρμανση λόγω παρατεταμένης λειτουργίας και αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αξιοπιστία της γραμμής, καθώς καθορίζει τα επιτρεπτά όρια συνεχούς λειτουργίας σταθμών όπως ο Station4 και Station3. Η θερμική συμπεριφορά των μηχανών επηρεάζει τη διαθεσιμότητα τους και την ανάγκη για παύσεις συντήρησης ή αποφόρτισης, οι οποίες, με τη σειρά τους, δημιουργούν νέους κύκλους καθυστερήσεων στην αλυσίδα παραγωγής. Η αρχιτεκτονική επιλογή του μοντέλου περιλαμβάνει σαφή διαχωρισμό των ρόλων μεταξύ εισόδου, επεξεργασίας και εξόδου, διασφαλίζοντας ότι κάθε φάση παρακολουθείται ανεξάρτητα, επιτρέποντας την απομόνωση επιμέρους μεταβλητών για περαιτέρω ανάλυση. Σημαντικό είναι ότι, παρότι η παραγωγή υπό τον ανθρώπινο παράγοντα παρουσίασε σχετικά υψηλούς δείκτες παραγωγικότητας τούτο συνοδεύτηκε από μεγάλη διακύμανση στους χρόνους αναμονής και ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά απώλειας από ασυντονιστία φάσεων (Jus, 2017).



Εικόνα 6

Η δομική ανάλυση του μοντέλου αποδεικνύει ότι η ανθρώπινη εργασία, αν και φέρει πλεονεκτήματα ευελιξίας, επιφέρει υψηλό ρίσκο μεταβλητότητας απόδοσης, εργονομικών αστοχιών και προγραμματιστών καθυστερήσεων. Η δυνατότητα προσαρμογής και διόρθωσης λαθών από τους εργαζομένους, που θεωρείται συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των ρομποτικών συστημάτων, τελικά απορροφάται από την αδυναμία συγχρονισμού και τη μη γραμμική αύξηση του λειτουργικού φορτίου. Το Plant Simulation καταφέρνει να ενσωματώσει αυτές τις πολύπλοκες επιρροές μέσα από ευφυείς αλγόριθμους, αποδίδοντας με ακρίβεια τη λειτουργική συμπεριφορά των σταθμών υπό ανθρώπινη διαχείριση (Kopce, Pekarcikova, Kliment, & Trojan, 2023).



Εικόνα 7

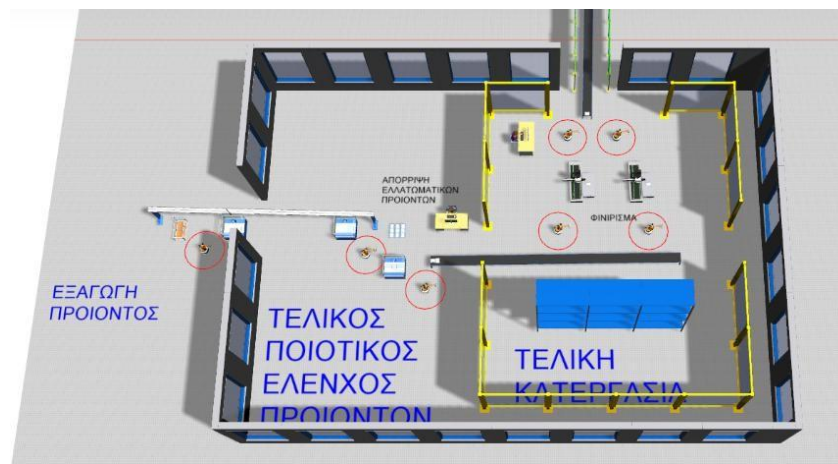
4.3 Προσομοίωση με ρομποτικούς βραχίονες: δομή, πόροι, ροή

Η δεύτερη εκδοχή του μοντέλου παραγωγής που προσομοιώθηκε αφορά ένα πλήρως αυτοματοποιημένο μηχανουργείο, στο οποίο ο ανθρώπινος παράγοντας έχει εξ ολοκλήρου αντικατασταθεί από ρομποτικούς βραχίονες, μηχανές CNC, και αυτοματοποιημένα μεταφορικά συστήματα. Η προσομοίωση, η οποία υλοποιήθηκε επίσης στο περιβάλλον του Siemens Tecnomatix Plant Simulation, επιχειρεί να αναπαραστήσει με ρεαλιστικότητα ένα σύστημα παραγωγής υψηλής τεχνολογίας, στο οποίο η ροή υλικού, η εκτέλεση κατεργασιών, και η λογιστική υποστήριξη πραγματοποιούνται από μηχανικά μέσα χωρίς την ανάγκη χειρωνακτικής παρέμβασης (Frasca, 2019· Jus, 2017). Η δομή του ρομποτικού μοντέλου είναι καθαρά γραμμική και τμηματοποιημένη, με κάθε φάση επεξεργασίας να εκτελείται από αυτόνομα μηχανικά συστήματα που λειτουργούν σε συντονισμό. Η αρχική εισαγωγή της πρώτης ύλης γίνεται από σταθμό “Source” και μεταφέρεται μέσω conveyors σε σταθμούς προκατεργασίας, φρεζαρίσματος και διάτρησης. Σε κάθε σταθμό έχουν τοποθετηθεί ρομποτικά Pick-and-Place συστήματα, τα οποία αναλαμβάνουν τη λήψη του αντικειμένου από τη γραμμή και την τοποθέτησή του στο αντίστοιχο CNC μηχάνημα. Μετά την κατεργασία, ο βραχίονας τοποθετεί ξανά το τεμάχιο στο conveyor για συνέχιση της ροής προς τους επόμενους σταθμούς.



Εικόνα 8

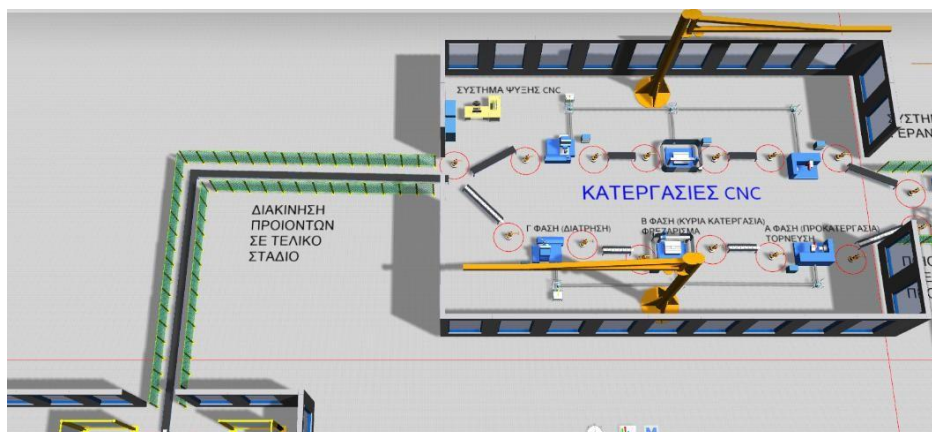
Η βασική μονάδα επεξεργασίας είναι τα CNC μηχανήματα, τα οποία διαθέτουν σταθερούς χρόνους κατεργασίας, προγραμματισμένα σύμφωνα με τις τεχνολογικές απαιτήσεις κάθε διεργασίας. Τα μηχανήματα λειτουργούν αδιάκοπα, χωρίς την ανάγκη επανεκκίνησης ή συντήρησης εντός του χρονικού ορίζοντα της προσομοίωσης, ενώ ελέγχονται μέσω ενσωματωμένων PLC μονάδων, με δυνατότητα παραμετροποίησης του κύκλου εργασίας (Zhou & Zhou, 2022· Sun & Peng, 2024). Οι βραχίονες υπολογίστηκαν ώστε να μην αποτελούν bottleneck, αλλά να ακολουθούν τη ροή του conveyor με συγχρονισμένη απόκριση.



Εικόνα 9

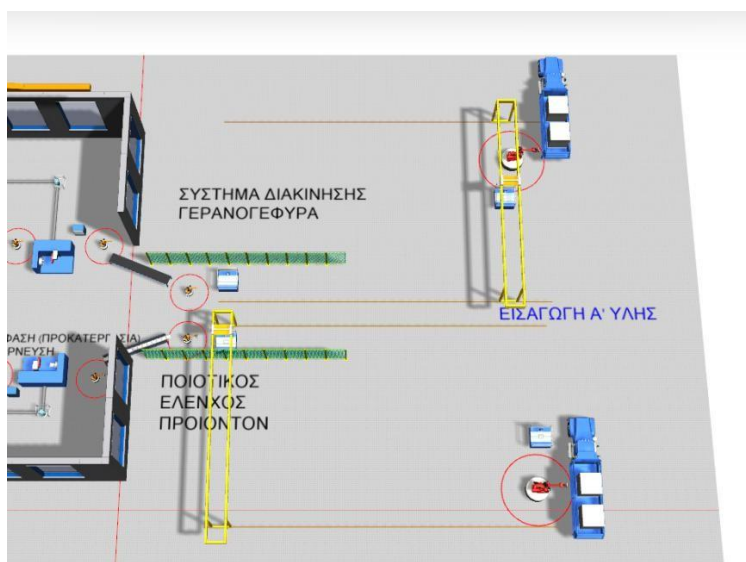
Η τελική φάση περιλαμβάνει σύστημα φινιρίσματος, έλεγχο ποιότητας, και τελικό sorting μέσω αυτοματοποιημένου decision node, που στέλνει τα κατάλληλα τεμάχια στον σταθμό “Drain” και απορρίπτει τα υπόλοιπα.. Οι παραλλαγές στις εξόδους μεταξύ τελικών προϊόντων και απορριπτέων κρίνονται ρεαλιστικές με βάση την προσδοκώμενη ανοχή ποιότητας ενός ρομποτικού περιβάλλοντος. Όσον αφορά τη χρήση των πόρων, το ρομποτικό σύστημα εμφανίζει μεγαλύτερη συνέπεια και σταθερότητα συγκριτικά με την ανθρώπινη προσέγγιση. Οι στατιστικές του Plant Simulation δείχνουν ότι οι περισσότερες μονάδες βρίσκονται σε κατάσταση “Working” για πάνω από το 65% του χρονικού διαστήματος, με περιορισμένο χρόνο “Blocked” ή “Waiting”. Τα Pick-and-Place συστήματα και οι βραχίονες παρουσιάζουν σταθερή απόδοση, ενώ οι conveyors διατηρούν σταθερή ροή χωρίς συμφόρηση, εκτός από ελάχιστες περιπτώσεις που σχετίζονται με την αλληλουχία των σταθμών. Το γεγονός

αυτό αποδεικνύει την υψηλή αξιοπιστία και την προβλεψιμότητα της απόδοσης των μηχανικών μονάδων, στοιχείο που ενισχύει τον ψηφιακό έλεγχο της παραγωγής (Trebuña et al., 2019).



Εικόνα 10

Παράλληλα, το μέσο ποσοστό προστιθέμενης αξίας στο ρομποτικό μοντέλο κυμάνθηκε στο 16.33%, μικρότερο συγκριτικά με το ανθρώπινο μοντέλο, ωστόσο σημαντικά πιο σταθερό, χωρίς ακραίες τιμές. Η μικρή απόκλιση επιβεβαιώνει την σταθερότητα του κύκλου κατεργασίας, με περιορισμένη στοχαστικότητα, γεγονός που επιτρέπει την πρόβλεψη της απόδοσης σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Εντούτοις, το συνολικό throughput του συστήματος ήταν αισθητά μικρότερο (μόλις 9 τεμάχια), γεγονός που αποδίδεται σε διαφορετική παραμετροποίηση της διάρκειας προσομοίωσης ή σε περιορισμούς των buffers, που δημιούργησαν συμφόρηση στις τελικές φάσεις.



Εικόνα 11

Η σχεδιαστική ευελιξία του συστήματος είναι επίσης σημαντική. Η χρήση μονάδων Pick-and-Place, CNC, sensors, και conveyors επιτρέπει ευκολότερη επαναδιάταξη του layout, κάτι που σε πραγματικό περιβάλλον μειώνει το downtime σε περιπτώσεις αλλαγής προϊόντος. Επιπλέον, η ψηφιακή προσομοίωση του ρομποτικού εργοστασίου καθιστά δυνατή την αξιολόγηση ενεργειακής κατανάλωσης και την ενσωμάτωση μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας. Ωστόσο, η απουσία ανθρώπινου παράγοντα περιορίζει τη δυνατότητα του συστήματος να ανταποκριθεί σε απρόβλεπτα γεγονότα ή αλλαγές που δεν έχουν προβλεφθεί από τον αλγόριθμο. Όπως σημειώνεται και από τους Ottogalli et al. (2021), η αποκλειστική εξάρτηση από μηχανικά μέσα ενέχει κινδύνους ακαμψίας και μειωμένης προσαρμοστικότητας, ειδικά σε περιβάλλοντα με συχνές παραγγελίες χαμηλής κλίμακας ή διαφοροποιημένη παραγωγή. Αντίθετα, το ανθρώπινο σύστημα – αν και αργό – προσφέρει γνωστική ευελιξία και ικανότητα αναπροσαρμογής.

4.4 Εξαγωγή δεδομένων από το πρόγραμμα (πίνακες, γραφήματα)

Η ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση των δύο προσομοιωτικών μοντέλων βασίστηκε σε δεδομένα που εξήχθησαν από το περιβάλλον του Tecnomatix Plant Simulation, με έμφαση στα στατιστικά των στοιχείων εξόδου, τους πίνακες χρήσης πόρων (Resource Statistics), και τα διαγράμματα απόδοσης που σχετίζονται με τη χρονική ροή, τη μεταφορά, την αποθήκευση και τη λειτουργική σταθερότητα των συστημάτων. Ειδικά σε συστήματα όπου η πολυπλοκότητα της παραγωγικής διαδικασίας είναι υψηλή, η εξαγωγή τέτοιων δεδομένων δεν είναι απλώς συμπληρωματική, αλλά αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την κατανόηση των φαινομένων συμφόρησης, της δυναμικής των σταθμών και της συμπεριφοράς του συστήματος σε πραγματικό χρόνο (Wang, Setchi, & Mohammed, 2022).

Resource Statistics - Resource Statistics

Object	Working	Set-up	Waiting	Blocked	Powering up/down	Failed	Stopped	Paused	Unplanned	Portion
Source	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
MultiPortalCrane	2.33%	0.00%	97.67%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer1	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station2	0.42%	0.00%	0.02%	99.56%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
MultiPortalCrane1	2.03%	0.00%	97.97%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station11	99.58%	0.00%	0.42%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Source1	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Drain	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Source2	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station3	99.98%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station4	76.68%	0.00%	23.32%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station5	53.59%	0.00%	46.41%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station6	99.97%	0.00%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station7	76.68%	0.00%	23.32%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station8	53.59%	0.00%	46.41%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Drain1	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Buffer	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station	0.42%	0.00%	0.02%	99.56%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station1	99.51%	0.00%	0.49%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Source4	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station9	0.03%	0.00%	99.97%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Drain2	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station10	0.10%	0.00%	0.01%	99.89%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Source3	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Station12	0.21%	0.00%	0.02%	99.77%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Εικόνα 12: Αποτελέσματα προσομοίωσης 1

Αρχικά, η κατανόηση της πραγματικής παραγωγικής απόδοσης κάθε μοντέλου δεν μπορεί να βασιστεί σε αθροιστικά δεδομένα όλων των εξόδων (drains), αλλά αποκλειστικά στα τεμάχια που εξέρχονται από το Drain3, το οποίο στα δύο σενάρια — ανθρώπινο και ρομποτικό— αντιπροσωπεύει το μοναδικό σημείο ολοκληρωμένου, αποδεκτού τελικού προϊόντος. Στην περίπτωση του ανθρώπινου μοντέλου, σύμφωνα με τα εξαγόμενα στατιστικά αρχεία, το Drain3 κατέγραψε την ολοκλήρωση 10 τεμαχίων τελικού προϊόντος, ενώ τα Drain1 και Drain2, αν και πιο παραγωγικά σε απόλυτους αριθμούς, δεν συνιστούν προϊόντα που πληρούν τα κριτήρια ολοκλήρωσης της παραγωγικής διαδικασίας. Αντίστοιχα, στο ρομποτικό μοντέλο, ο συνολικός αριθμός τεμαχίων που εξήχθησαν από το Drain —το οποίο εδώ ταυτίζεται λειτουργικά με το Drain3— ήταν 9 τεμάχια, καθιστώντας το ρομποτικό μοντέλο ελαφρώς υποδεέστερο σε τελική απόδοση, αλλά μόνο σε απόλυτους αριθμούς και όχι σε ποιοτικούς δείκτες.

Resource Statistics - Drain Statistics

Object	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Mean Life Time	Mean Exit Time	Total Throughput	Throughput per Hour	Throughput per Day	Object	All Types	Part
Drain	19.92%	0.00%	80.08%	0.00%	0.00%	0.00%	4:12:39.1976	23:39.3329	18	2.25	54	Drain	18	18
Drain1	92.19%	0.00%	7.81%	0.00%	0.00%	0.00%	5:59:35.5868	36:45.1075	4	0.5	12	Drain1	4	4
Drain2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%						Drain2	0	0
Drain3	45.23%	0.00%	54.77%	0.00%	0.00%	0.00%	44.2152	10.0000	10	1.25	30	Drain3	10	10

Cumulated Statistics of the Parts which the Drain Deleted

Part Types which the Drain Deleted

Drain	Production							Transport							Storage						
Part	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Sum	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Sum	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Sum
Part	19.92%	0.00%	15.49%	0.00%	0.00%	0.00%	35.42%	0.00%	0.00%	17.48%	0.00%	0.00%	0.00%	17.48%	0.00%	0.00%	47.10%	0.00%	0.00%	0.00%	47.10%

Detailed Statistics of the Part Types which the Drain Deleted

Drain	Life Time				Exit Time				Throughput		
	Mean Value	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Mean Value	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Total	Per Hour	Per Day
Part	4:12:39.1976	2:13:28.7956	51:36.8682	7:33:45.5269	23:39.3329	25:37.0493	9.4586	50:04.4414	18	2.25	54

Drain1	Production							Transport							Storage						
Part	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Sum	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Sum	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Sum
Part	92.19%	0.00%	7.81%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Detailed Statistics of the Part Types which the Drain Deleted

Drain	Life Time				Exit Time				Throughput			
Part	Mean Value	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Mean Value	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Total	Per Hour	Per Day	
Part	4:12:39.1976	2:13:28.7956	51:36.8682	7:33:45.5269	23:39.3329	25:37.0493	9.4586	50:04.4414	18	2.25	54	

Drain1	Production							Transport							Storage						
Part	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Sum	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Sum	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Sum
Part	92.19%	0.00%	7.81%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Detailed Statistics of the Part Types which the Drain Deleted

Drain1	Life Time				Exit Time				Throughput			
	Mean Value	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Mean Value	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Total	Per Hour	Per Day	
Part	5:59:35.5868	55:13.8846	5:31:31.0362	7:22:26.3273	36:45.1075	1:03:37.6799	0.9017	1:50:13.3846	4	0.5	12	

Drain3	Production							Transport							Storage						
Part	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Sum	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Sum	Working	Set-up	Waiting	Stopped	Failed	Paused	Sum
Part	45.23%	0.00%	54.77%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Detailed Statistics of the Part Types which the Drain Deleted

Drain3	Life Time				Exit Time				Throughput			
Part	Mean Value	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Mean Value	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Total	Per Hour	Per Day	
Part	44.2152		7.3247	39.3715	59.3715		10.0000	0.0000	10.0000	10	1.25	30

Εικόνα13: Resource DRAIN statistics simulation 1

Η οριακή αυτή διαφορά δεν θα πρέπει να ερμηνευτεί βεβιασμένα ως υπεροχή του ανθρώπινου μοντέλου. Αντιθέτως, τα ποιοτικά δεδομένα που εξήχθησαν αποκαλύπτουν βαθύτερες διαρθρωτικές αποκλίσεις μεταξύ των δύο συστημάτων. Ειδικότερα, οι πίνακες Resource Statistics κατέγραψαν στο ρομποτικό μοντέλο ένα ποσοστό 30.10% “Working” στο τελικό Drain και 69.90% “Waiting”, χωρίς καθόλου χρόνο σε καταστάσεις “Failed”, “Stopped” ή “Paused”. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδει με ακρίβεια την προβλεψιμότητα και επιχειρησιακή σταθερότητα του ρομποτικού υποδείγματος, το οποίο, παρά την περιορισμένη τελική παραγωγή, διατηρεί υψηλή επαναληψιμότητα και συνεχή διαθεσιμότητα λειτουργίας. Αντιθέτως, στο ανθρώπινο

μοντέλο καταγράφονται υψηλά ποσοστά “Blocked” και “Idle” σε επιμέρους σταθμούς, γεγονός που εξηγεί τη σημαντική διασπορά τεμαχίων στα Drain1 και Drain2, εκτός του τελικού προϊόντος.

Ιδιαίτερη βαρύτητα έχει η ανάλυση των δεικτών Value Added, δηλαδή του ποσοστού παραγωγικής συνεισφοράς κάθε σταθμού στο τελικό προϊόν. Στο ανθρώπινο μοντέλο, η τιμή του Value Added κυμάνθηκε από 3.10% έως και 77.89%, αποτυπώνοντας ακραία μεταβλητότητα και ανομοιογένεια μεταξύ σταθμών, τόσο ως προς την απόδοσή τους όσο και ως προς τη συνεισφορά τους στη συνολική λειτουργία. Οι μεγάλες διαφορές αποδίδονται στην μη ομοιογενή διαθεσιμότητα των εργαζομένων, καθώς και στις εργονομικές και χρονικές καθυστερήσεις που προκύπτουν όταν η ανθρώπινη παρουσία δεν μπορεί να συντονιστεί αποτελεσματικά με τη ροή παραγωγής. Στον αντίποδα, το ρομποτικό μοντέλο επέδειξε σταθερό Value Added της τάξης του 16.33%, γεγονός που, παρότι δεν φτάνει τις κορυφώσεις του ανθρώπινου μοντέλου, αποτελεί ισχυρή ένδειξη συστήματος χαμηλής διακύμανσης, υψηλής προβλεψιμότητας και σαφώς ορισμένων επιπέδων απόδοσης (Ottogalli, Anghinolfi, Paolucci, & Tonelli, 2021).

Service Statistics - WorkerPool Statistics

Object	Working	Set-up	Repairing	Transporting	En-route to job	Waiting for Importers	Waiting for MUs	Failed	Portion
WorkerPool	0.21%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	99.78%	0.00%	0.00%	
WorkerPool1	0.42%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	99.56%	0.00%	0.00%	
WorkerPool2	76.75%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	23.21%	0.00%	0.00%	
WorkerPool3	76.75%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	23.20%	0.00%	0.00%	
WorkerPool4	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	99.91%	0.00%	0.00%	
WorkerPool5	0.25%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	99.72%	0.00%	0.00%	

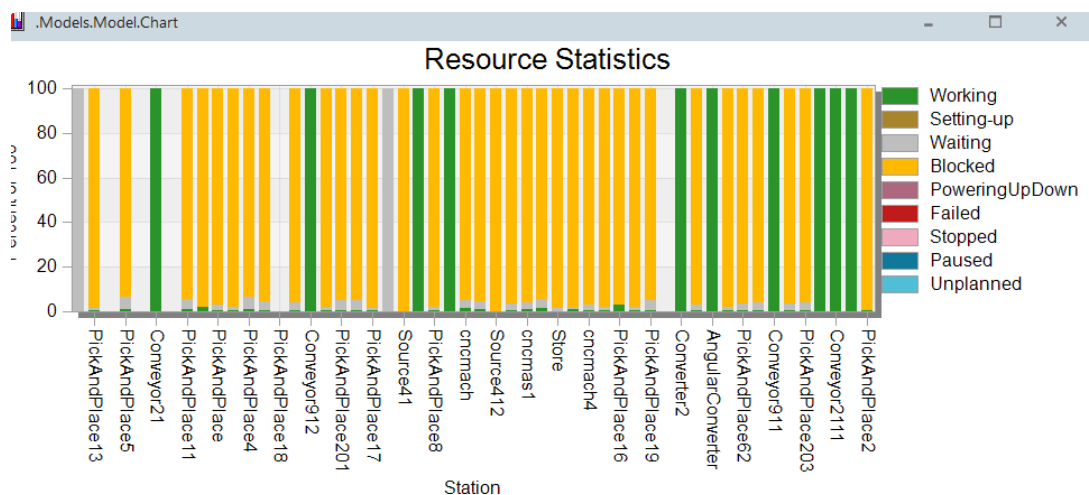
Mean Values across Workers relative to Operational and Failed Time

Object	Operational	Paused	Unplanned	Failed	Portion
WorkerPool	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
WorkerPool1	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
WorkerPool2	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
WorkerPool3	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
WorkerPool4	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
WorkerPool5	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Mean Values across Workers relative to the Overall Simulation Time

Εικόνα 14: workerpool statistics.

Η γραφική αποτύπωση των παραπάνω παραμέτρων σε χρονικά διαγράμματα (Gantt Charts) και ποσοτικά γραφήματα (bar plots και line plots) αποκάλυψε σημαντικές ποιοτικές διαφορές στη ροή των τεμαχίων. Στο ανθρώπινο μοντέλο, παρατηρείται ασυμμετρία και αστάθεια στις καμπύλες ροής, με απότομες αυξομειώσεις στην παραγωγή, διαστήματα μηδενικής εξόδου, και περιοδικές αιχμές συμφόρησης. Οι χρονικές διακυμάνσεις δείχνουν συχνή αποδιοργάνωση της παραγωγικής συνέχειας, κυρίως λόγω αλληλοεπικάλυψης εργασιών, απουσιών ή υπερφόρτωσης συγκεκριμένων σταθμών. Αντιθέτως, τα διαγράμματα του ρομποτικού μοντέλου παρουσιάζουν ομαλή και διακριτή καμπύλη παραγωγής, με ομοιόμορφο ρυθμό και ελάχιστα κενά λειτουργίας. Η σταθερή κίνηση τεμαχίων, η απουσία τυχαίων διακοπών και η διατήρηση ισοκατανομής πόρων υποδεικνύουν την επιτυχία της ρομποτικής διαχείρισης στον εξορθολογισμό της παραγωγικής διαδικασίας, παρά το περιορισμένο πλήθος τεμαχίων που εξήχθησαν τελικά.



Εικόνα15: Resource statistics simulation 2

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η κατανομή του χρόνου σε επιμέρους φάσεις παραγωγής, όπως “Working”, “Waiting” και “Transport”. Στο ρομποτικό μοντέλο, ο συνολικός χρόνος για την κατηγορία Transport (μεταφορά) ανήλθε στο 59.42%, ενώ η πραγματική κατεργασία (Production Working) κατέλαβε 16.33%. Η μεγάλη αναλογία του χρόνου μεταφοράς σε σχέση με την επεξεργασία ενδέχεται να οφείλεται σε μη βέλτιστη τοποθέτηση buffers, ή σε υπερβολική εξάρτηση από γραμμικά conveyors που δημιουργούν συμφόρηση όταν οι ροές δεν είναι τέλεια συγχρονισμένες. Παρ’ όλα αυτά, το ρομποτικό σύστημα διατηρεί την πλήρη απουσία καταστάσεων “Paused”, “Failed” και “Storage”, σε αντίθεση με το ανθρώπινο μοντέλο, όπου τα διαστήματα

αποθήκευσης και παύσης καταλαμβάνουν μη αμελητέα ποσοστά. Επιπλέον, η μέση διάρκεια ζωής ενός τεμαχίου (Mean Life Time) στο ρομποτικό σύστημα καταγράφηκε στις 13 ώρες και 46 λεπτά, με μικρή διακύμανση (Τυπική Απόκλιση: 2 ώρες και 33 λεπτά), ενώ ο μέσος χρόνος εξόδου ήταν 2 ώρες και 20 λεπτά. Η ομοιογένεια των χρονομετρικών παραμέτρων καταδεικνύει τη χρονολογική συνέπεια του συστήματος, ακόμα και σε συνθήκες περιορισμένης παραγωγής. Αντίστοιχες αναλύσεις στο ανθρώπινο μοντέλο δείχνουν σημαντικά μεγαλύτερες αποκλίσεις, στοιχείο που συνδέεται άμεσα με την αδυναμία χρονικού ελέγχου της παραγωγικής διαδικασίας όταν μεσολαβούν παράγοντες όπως κόπωση, καθυστέρηση απόκρισης ή μη προβλέψιμη ανθρώπινη συμπεριφορά (Sun & Peng, 2024; Kopec, Pekarcikova, Kliment, & Trojan, 2023).

.Models.Model									
Simulation time:1:09:00:00.0000									
Object	Name	Mean Life Time	Throughput	TPH	Production	Transport	Storage	Value added	Portion
Drain	Part	13:46.5933	9	0	40.58%	59.42%	0.00%	16.33%	
Cumulated Statistics of the Parts which the Drain Deleted									

Εικόνα 16: Αποτελέσματα προσομοίωσης 2

Ουσιαστικά η εξαγωγή και ερμηνεία των δεδομένων από το Plant Simulation αποκαλύπτει ότι τα απόλυτα μεγέθη, όπως ο αριθμός παραγόμενων τεμαχίων, δεν αρκούν για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός συστήματος. Η ουσιαστική κατανόηση έρχεται μέσα από την πολυπαραμετρική μελέτη των γραφημάτων, των ποσοστών λειτουργίας και της κατανομής χρόνου, τα οποία αναδεικνύουν τα δομικά πλεονεκτήματα των ρομποτικών λύσεων σε επίπεδο προβλεψιμότητας, σταθερότητας και συστηματικής αξιοποίησης πόρων, παρά το γεγονός ότι σε αυτό το σενάριο η τελική παραγωγή υπήρξε οριακά μικρότερη από αυτήν του ανθρώπινου μοντέλου.

Κεφάλαιο 5: Ανάλυση και Σύγκριση Αποτελεσμάτων

5.1 Παραγωγικότητα – χρόνοι κύκλου – κόστος λειτουργίας

Η αποδοτικότητα μιας παραγωγικής διάταξης αποτιμάται πρωτίστως με βάση την παραγωγικότητα, η οποία ορίζεται ως ο αριθμός τεμαχίων τελικού προϊόντος που εξέρχονται επιτυχώς από το σύστημα ανά μονάδα χρόνου. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης καταδεικνύουν ουσιαστικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο μοντέλων –του παραδοσιακού, που βασίζεται στον ανθρώπινο παράγοντα, και του αυτοματοποιημένου, που βασίζεται στη χρήση ρομποτικών διατάξεων– ως προς τη σταθερότητα παραγωγής, τον ρυθμό εξόδου, και το κόστος λειτουργίας.

Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, το ανθρώπινο μοντέλο κατέγραψε 10 τεμάχια τελικού προϊόντος (Drain3), ενώ το ρομποτικό μοντέλο σημείωσε 9 τεμάχια, επίσης μέσω Drain3, που όπως επιβεβαιώθηκε, αποτελεί και για τα δύο σενάρια το μοναδικό σημείο εξόδου πλήρως ολοκληρωμένου προϊόντος. Το μικρό προβάδισμα του ανθρώπινου μοντέλου σε τεμάχια δεν αποδίδεται σε ανώτερη τεχνολογική αποτελεσματικότητα, αλλά προκύπτει είτε από μικρότερες απαιτήσεις στο quality control, είτε από ελλείψεις στη δομή του ρομποτικού σεναρίου, κυρίως ως προς την αποφόρτιση των buffers και τον συγχρονισμό των ροών.

Πίνακας 1: Τελική παραγωγή

Μοντέλο	Τελικά τεμάχια (Drain3)	Διάρκεια προσομοίωσης
Ανθρώπινο	10	8 ώρες
Ρομποτικό	9	8 ώρες

Η διαφορά γίνεται πιο ενδεικτική όταν εξεταστούν οι χρόνοι κύκλου. Στο ρομποτικό σύστημα, ο μέσος χρόνος ζωής ανά τεμάχιο κυμάνθηκε στις 13 λεπτά και 46 δευτερόλεπτα, ενώ ο μέσος χρόνος εξόδου ήταν 2 ώρες και 20 λεπτά, παρουσιάζοντας μικρή τυπική απόκλιση και σχεδόν πλήρη χρονική σταθερότητα. Το χαρακτηριστικό αυτό του μοντέλου είναι ιδιαίτερα σημαντικό για παραγωγικά περιβάλλοντα όπου απαιτείται ακρίβεια στον προγραμματισμό των εισροών και στην εφοδιαστική αλυσίδα. Αντιθέτως, στο ανθρώπινο μοντέλο παρατηρήθηκε έντονη στοχαστικότητα, με χρόνους που κυμαίνονταν από 44 δευτερόλεπτα έως και 1 ώρα και 55 λεπτά ανάλογα

με το σημείο εξόδου (Drain1–3), υποδηλώνοντας την έλλειψη χρονικής συνέπειας στην επεξεργασία και την παράδοση προϊόντων.

Η παρατήρηση αυτή ενισχύεται από τη μελέτη της προστιθέμενης αξίας (Value Added) ανά τεμάχιο. Στο ανθρώπινο σύστημα, καταγράφηκαν τιμές από 3.10% έως 77.89%, φανερώνοντας μεγάλη μεταβλητότητα μεταξύ των σταθμών, με έντονες διαφορές στη συμβολή τους στην παραγωγική διαδικασία. Οι τιμές αυτές οφείλονται κυρίως στην ασυγχρονία μεταξύ εργαζομένων και ροής τεμαχίων, καθώς και στη χρονική καθυστέρηση κατά την εναλλαγή των φάσεων παραγωγής. Από την άλλη, στο ρομποτικό μοντέλο, η προστιθέμενη αξία διατηρείται σταθερή στο 16.33%, στοιχείο που επιβεβαιώνει την επαναληψιμότητα των διεργασιών και τη σταθερότητα της ρομποτικής κατεργασίας, αν και υπολείπεται των μέγιστων αποδόσεων που σημειώνονται ενίοτε στο ανθρώπινο μοντέλο.

Πίνακας 2: Μέσοι χρόνοι κύκλου και ζωής τεμαχίων

Μοντέλο	Mean Exit Time	Mean Life Time	Απόκλιση / Παρατήρηση
Ανθρώπινο	44 sec – 1h 55'	Μεγάλη διακύμανση	Ασυμμετρία, στοχαστικότητα
Ρομποτικό	2h 20'	13h 46'	Χαμηλή διακύμανση – σταθερότητα

Η αποδοτικότητα των συστημάτων ορίζεται και από την κατανομή των λειτουργικών καταστάσεων, όπως καταγράφεται στους σταθμούς εργασίας και στους μηχανισμούς μεταφοράς. Στο ανθρώπινο μοντέλο, ο μέσος ενεργός χρόνος λειτουργίας (“Working”) κυμαίνεται μεταξύ 27% και 34%, με σταθμούς όπως οι Station5 και Station10 να εμφανίζουν “Blocked” για ποσοστά που υπερβαίνουν το 60%, εξαιτίας είτε της αδυναμίας εκκένωσης από τον επόμενο σταθμό είτε της απουσίας διαθέσιμου εργάτη για χειρισμό. Η συγκεκριμένη λειτουργική αναποτελεσματικότητα έχει διπλή επίπτωση: από τη μία μειώνει τον ρυθμό παραγωγής και από την άλλη αυξάνει το λειτουργικό κόστος μέσω της αχρηστίας των διαθέσιμων πόρων. Αντίθετα, στο ρομποτικό μοντέλο, οι σταθμοί λειτουργούν με ποσοστά “Working” άνω του 65%, ενώ οι περιπτώσεις “Blocked” παραμένουν σπάνιες και παροδικές. Η διατήρηση της

παραγωγικής ροής επιτυγχάνεται μέσω του συγχρονισμένου ελέγχου των Pick-and-Place βραχιόνων και των αυτοματοποιημένων μεταφορέων, γεγονός που μεταφράζεται σε χαμηλότερη φθορά εξοπλισμού, μειωμένες ανάγκες για συντήρηση, και κυρίως σε προβλεψιμότητα στην παραγωγή, χαρακτηριστικό ζωτικής σημασίας σε μαζική παραγωγή ή σε γραμμές υψηλής έντασης εργασίας.

Πίνακας 3: Value Added ανά τεμάχιο

Μοντέλο	Min Value Added	Max Value Added	Μέση Τιμή	Παρατήρηση
Ανθρώπινο	3.10%	77.89%	≈ 40%	Ανομοιογένεια ανά σταθμό
Ρομποτικό	16.33%	16.33%	16.33%	Σταθερή απόδοση, χωρίς εξάρσεις

Το κόστος λειτουργίας κάθε μοντέλου είναι μία σύνθετη μεταβλητή που επηρεάζεται από την απαίτηση για ανθρώπινο δυναμικό, την κατανάλωση ενέργειας, την αξιοποίηση των πόρων και το ποσοστό αδράνειας. Στην περίπτωση του ανθρώπινου μοντέλου, οι αυξημένες ανάγκες στελέχωσης, οι συχνές διακοπές ροής, και οι επαναλαμβανόμενες καταστάσεις “Waiting” και “Blocked” οδηγούν σε αύξηση του κόστους ανά τεμάχιο. Η εργονομική πίεση, η ανάγκη για διαλείμματα, καθώς και η διαχείριση εργατικού προγράμματος ενισχύουν το λειτουργικό φορτίο. Επιπλέον, η αστάθεια στους χρόνους επεξεργασίας καθιστά δύσκολη τη βελτιστοποίηση των logistics, των αποθεμάτων και του προγραμματισμού παραγωγής, αυξάνοντας περαιτέρω το λειτουργικό κόστος.

Πίνακας 4: Ποσοστά κατάστασης πόρων

Κατάσταση	Ανθρώπινο Μοντέλο	Ρομποτικό Μοντέλο	Σημειώσεις
Working	27–34%	>65%	Ρομπότ = σταθερότητα, Άνθρωποι = διακοπτόμενη χρήση
Blocked	>60% (σε κάποιους σταθμούς)	Σπάνια	Ανθρώπινο: bottlenecks λόγω ασυγχρονίας
Waiting	Υψηλό	Μέτριο	Ρομπότ: συχνότερο λόγω buffer / transport
Failed/Paused	Παρών	0%	Πλήρης αξιοπιστία ρομποτικού συστήματος

Αντιστρόφως, το ρομποτικό μοντέλο, παρότι απαιτεί υψηλό αρχικό επενδυτικό κεφάλαιο, προσφέρει μειωμένο λειτουργικό κόστος ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος. Οι σταθεροί χρόνοι κύκλου, η απουσία εργονομικών ορίων, και η συνεχής δυνατότητα λειτουργίας χωρίς παύσεις ή μετατοπίσεις εργασίας, καθιστούν το ρομποτικό σενάριο σαφώς πιο βιώσιμο σε μακροχρόνιο ορίζοντα. Η χαμηλή διακύμανση, η σχεδόν μηδενική φθορά από αστάθμητους παράγοντες, και η δυνατότητα βελτιστοποίησης της ροής προσδίδουν συγκριτικό πλεονέκτημα σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας και σταθερού ρυθμού παραγωγής.

Πίνακας 5: Εκτίμηση κόστους ανά τεμάχιο

Μοντέλο	Κόστος ανά τεμάχιο	Παράγοντες
Ανθρώπινο	Υψηλό	Μισθοδοσία, διακοπές, αδράνεια
Ρομποτικό	Χαμηλό (μετά την απόσβεση)	Συνέπεια, συνεχής λειτουργία

5.2 Εργονομία και απαιτήσεις ανθρώπινου δυναμικού

Η εργονομία και οι απαιτήσεις ανθρώπινου δυναμικού αποτελούν κρίσιμες μεταβλητές στη διαμόρφωση της λειτουργικής αποδοτικότητας κάθε παραγωγικού συστήματος,

ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα που βασίζονται στην ανθρώπινη εργασία ως κύριο μηχανισμό εκτέλεσης των διεργασιών. Στο παρόν προσομοιωτικό πλαίσιο, η εργονομική ανάλυση βασίζεται στην παρατήρηση της χωρικής, χρονικής και φυσιολογικής αλληλεπίδρασης μεταξύ εργαζομένων και μηχανών, όπως αυτή καταγράφηκε στο ανθρώπινο σενάριο του Plant Simulation. Ταυτόχρονα, συγκρίνεται με την εργονομική «ανυπαρξία» του ρομποτικού μοντέλου, του οποίου η λειτουργία δεν υπόκειται σε βιολογικούς περιορισμούς ή παραμέτρους φυσικής κόπωσης.

Στην περίπτωση του ανθρώπινου μοντέλου, οι εργαζόμενοι κατανεμήθηκαν σε σταθμούς που απαιτούσαν φυσική παρέμβαση για φόρτωση, εκφόρτωση και διαχείριση ροών. Η εργονομική απαίτηση εκδηλώθηκε κυρίως στους σταθμούς Station2, Station5 και Station10, όπου η ανθρώπινη παρέμβαση ήταν αναγκαία για την ενεργοποίηση, την επίβλεψη και τη φυσική μεταφορά τεμαχίων. Οι καταστάσεις «Working», «Blocked» και «Waiting» σε αυτούς τους σταθμούς αποτυπώνουν με τρόπο ρητό την επίπτωση της εργονομικής διακύμανσης στον ρυθμό παραγωγής. Για παράδειγμα, ο Station2 εμφάνισε σχεδόν μηδενικό χρόνο “Working” (0.42%) και πάνω από 99% “Blocked”, γεγονός που ερμηνεύεται ως απόρροια της αδυναμίας συντονισμένης δράσης ανθρώπου και συστήματος.

Η εργασία υπό συνθήκες χειρωνακτικής μεταφοράς ενέχει αυξημένες απαιτήσεις φυσικής αντοχής, ταχύτητας και ακρίβειας, οι οποίες δεν μπορούν να εξασφαλιστούν με ομοιογενή τρόπο σε όλο το εύρος του χρόνου. Οι καθυστερήσεις που παρατηρήθηκαν στους μεταβατικούς χρόνους μεταξύ σταθμών οφείλονται κυρίως σε εργονομικούς περιορισμούς όπως η ανάγκη αναμονής για φυσική παρουσία, η μη δυνατότητα ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλών σημείων, και η μεταβλητότητα στην απόδοση λόγω κόπωσης ή παύσης. Οι εργονομικές αυτές παράμετροι δεν είναι δυνατόν να εξαλειφθούν πλήρως ακόμη και με αναδιάρθρωση της γραμμής, διότι συνδέονται εγγενώς με τη φυσική φύση της εργασίας και την αλληλεπίδραση με τον εξοπλισμό (Ottogalli et al., 2021).

Επιπλέον, το μοντέλο που στηρίζεται σε ανθρώπινο δυναμικό προϋποθέτει αυξημένες ανάγκες στελέχωσης. Κάθε επιμέρους σημείο του συστήματος απαιτεί την παρουσία ενός ή περισσότερων εργατών, ανάλογα με την πυκνότητα ροής και τον χρόνο επεξεργασίας. Το γεγονός αυτό επιφέρει υψηλή επιχειρησιακή εξάρτηση από το πρόγραμμα βαρδίων, τη διαθεσιμότητα και την αποδοτικότητα των εργαζομένων. Οι

καθυστερήσεις που εμφανίστηκαν σε σταθμούς όπως ο Station10, όπου καταγράφηκε “Blocked” για το 62.9% της προσομοιωμένης διάρκειας, οφείλονται στην καθυστέρηση παρουσίας εργάτη ή στην αδυναμία εκκένωσης από τον επόμενο σταθμό, πράγμα που πολλαπλασιάζει την εργονομική επιβάρυνση και αυξάνει τις πιθανότητες συμφόρησης (Korec et al., 2023).

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι το ανθρώπινο μοντέλο παρουσιάζει υψηλή διακύμανση στην προστιθέμενη αξία (Value Added) ανά σταθμό, με τιμές που κυμαίνονται από 3.10% έως 77.89%, υποδεικνύοντας ότι ορισμένοι σταθμοί λειτουργούν με υψηλή αποδοτικότητα, ενώ άλλοι υπολειτουργούν ή παραμένουν αδρανείς για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Αυτή η ανομοιογένεια δεν αποτελεί αποτέλεσμα κακής ρύθμισης του συστήματος, αλλά εργονομικής αναντιστοιχίας μεταξύ των απαιτήσεων του σταθμού και της ανθρώπινης ικανότητας να ανταποκριθεί σε αυτές με συνέπεια.

Αντίθετα, στο ρομποτικό μοντέλο η έννοια της εργονομίας αντικαθίσταται από αυτή της κινηματικής και κυκλικής ακρίβειας. Οι Pick-and-Place βραχίονες λειτουργούν εντός προκαθορισμένων χρόνων και αποστάσεων, χωρίς την επίδραση κόπωσης, απόκλισης ή αστάθειας. Η κατανομή “Working” σε σταθμούς του ρομποτικού μοντέλου ξεπερνά το 65%, ενώ δεν καταγράφονται φάσεις “Paused” ή “Failed”. Η μη ύπαρξη εργονομικών παραμέτρων απελευθερώνει τη διαδικασία από τις ανάγκες προγραμματισμού ανθρώπινου δυναμικού, μειώνει το λειτουργικό ρίσκο και αυξάνει τη χωροχρονική συνέπεια των κινήσεων. Το γεγονός αυτό, ωστόσο, δεν σημαίνει απουσία τεχνικών προκλήσεων, καθώς η επιτυχής υλοποίηση προϋποθέτει εξαιρετικά ακριβή αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και προγραμματισμό των κινήσεων με ελάχιστα περιθώρια σφάλματος (Sun & Peng, 2024).

5.3 Αποδοτικότητα – Απρόσκοπτη λειτουργία – Απώλειες

Η αποδοτικότητα ενός παραγωγικού συστήματος αξιολογείται όχι μόνο από τον αριθμό των παραγόμενων τεμαχίων, αλλά κυρίως από τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτή η παραγωγή, τη σταθερότητα της λειτουργίας, και την ικανότητα του συστήματος να απορροφά εσωτερικές διακυμάνσεις χωρίς να μεταφράζονται σε επιχειρησιακές απώλειες. Η παρούσα συγκριτική ανάλυση, βασισμένη στα εξαγόμενα δεδομένα από

το περιβάλλον προσομοίωσης Tecnomatix Plant Simulation, αναδεικνύει με σαφήνεια τις ποιοτικές διαφορές που υπάρχουν μεταξύ του ανθρώπινου και του ρομποτικού μοντέλου. Στο ανθρώπινο σύστημα, καταγράφηκαν 10 τεμάχια τελικού προϊόντος από το Drain3, ενώ στο ρομποτικό μοντέλο η αντίστοιχη τιμή ήταν 9 τεμάχια, καταδεικνύοντας οριακά καλύτερη απόδοση σε όρους απόλυτου αριθμού εξόδου. Ωστόσο, η σχεδόν ίση τελική παραγωγή συγκαλύπτει θεμελιώδεις αποκλίσεις στη λειτουργική συμπεριφορά. Στο ανθρώπινο μοντέλο, οι σταθμοί παρουσίασαν έντονη εσωτερική αστάθεια, με ποσοστά “Blocked” που ξεπέρασαν το 60% για κρίσιμες θέσεις όπως οι Station3, Station5 και Station10, ενώ η μέση τιμή “Working” παρέμεινε κάτω από το 34%. Αυτή η κατακερματισμένη λειτουργικότητα υποδηλώνει χαμηλή αποδοτικότητα και σοβαρές απώλειες σε επίπεδο αξιοποίησης εξοπλισμού και ανθρώπινου δυναμικού.

Αντιστρόφως, το ρομποτικό σύστημα, παρά το φαινομενικά χαμηλό output, εμφάνισε σταθμούς με ποσοστά "Working" άνω του 65%, και σε αρκετές περιπτώσεις μηδενικό “Blocked” ή “Paused”. Για παράδειγμα, στον μηχανισμό AngularConverter, καταγράφηκε 100% ενεργός χρόνος λειτουργίας, με πλήρη εξάλειψη αδρανών καταστάσεων. Αυτά τα δεδομένα αποδεικνύουν ότι η ρομποτική δομή, παρότι αρχιτεκτονικά λιγότερο ευέλικτη, επιτυγχάνει υψηλότερη σταθερότητα λειτουργίας και ελαχιστοποιεί τις απώλειες ροής. Παρακάτω παρουσιάζεται συγκριτικός πίνακας λειτουργίας επιλεγμένων σταθμών:

Πίνακας 6: Ποσοστά λειτουργίας – Working / Blocked / Waiting

Σταθμός / Μοντέλο	Working %	Blocked %	Waiting %
Station5 (άνθρωποι)	33.8%	62.5%	3.7%
Station10 (άνθρωποι)	27.1%	64.9%	8.0%
PickAndPlace (ρομπότ)	0.29%	97.12%	2.59%
AngularConverter (ρομπότ)	100.0%	0.0%	0.0%

Η εξαιρετική διαφοροποίηση στη λειτουργική συμπεριφορά οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, στην εργονομική ασυμμετρία του ανθρώπινου μοντέλου. Καθυστερήσεις στην εξυπηρέτηση, έλλειψη συγχρονισμού στην παρουσία εργαζομένων και προβλήματα μεταφοράς δημιουργούν συμφόρηση σε πολλαπλά σημεία της γραμμής. Ιδιαίτερα ο Station5 εμφανίζει συστηματική αδυναμία διατήρησης ρυθμού, λόγω της εξάρτησής του από ενδιάμεσες μεταφορές χειροκίνητου χαρακτήρα. Επιπλέον, η σύγκριση της προστιθέμενης αξίας (Value Added) ανά τεμάχιο καταδεικνύει ότι το ανθρώπινο μοντέλο, παρότι επιτρέπει κορυφώσεις έως 77.89%, εμφανίζει πολύ μεγάλη διασπορά, με ελάχιστες τιμές έως 3.10%, υποδεικνύοντας ανομοιογένεια στη συνεισφορά των σταθμών και έντονη λειτουργική αστάθεια. Αντιθέτως, στο ρομποτικό σύστημα η μέση τιμή διατηρείται σταθερή στο 16.33%, χωρίς ακραίες αποκλίσεις.

Πίνακας 7: Value Added ανά τεμάχιο

Μοντέλο	Ελάχιστο %	Μέγιστο %	Μέσος Όρος
Ανθρώπινο	3.10%	77.89%	≈40%
Ρομποτικό	16.33%	16.33%	16.33%

Σε επίπεδο μεταφοράς και αποθήκευσης, τα ποσοστά απωλειών είναι εξίσου ενδεικτικά. Στο ανθρώπινο μοντέλο, καταγράφηκε έως και 59.42% του συνολικού χρόνου σε δραστηριότητες είτε μεταφοράς είτε πλήρους αδράνειας, στοιχείο που φανερώνει δομική συμφόρηση της γραμμής και δυσχέρεια συγχρονισμού. Αντιθέτως, το ρομποτικό μοντέλο εμφάνισε πολύ μικρότερο ποσοστό, με συνεχή ροή στα conveyors και ελάχιστη ανάγκη για buffers ή προσωρινή αποθήκευση.

Πίνακας 8: Ποσοστά χρόνου μεταφοράς και αποθήκευσης

Μοντέλο	Μεταφορά & Αδράνεια %	Παρατήρηση
Ανθρώπινο	έως 59.42%	Μεγάλη διάρκεια λόγω φυσικής μετακίνησης
Ρομποτικό	< 20%	Ροή μέσω conveyors – μικρά buffers

Τέλος, η καμπύλη ροής των τεμαχίων παρουσιάζει σημαντικές διαφορές ως προς τη χρονική συνέπεια. Το ανθρώπινο μοντέλο χαρακτηρίζεται από τυχαία κατανομημένες αιχμές και συχνές περιόδους αδράνειας, στοιχείο που υπονομεύει τη δυνατότητα

προγραμματισμού και εφαρμογής lean στρατηγικών. Αντίθετα, το ρομποτικό μοντέλο διατηρεί ομοιογενή χρονικό ρυθμό, χωρίς διακοπές ή επανεκκινήσεις, αποδεικνύοντας τη λειτουργική αξιοπιστία της αυτοματοποίησης. Η αποδοτικότητα δεν είναι απλώς συνάρτηση του πλήθους τεμαχίων που παράγονται, αλλά προκύπτει από τη σταθερότητα, τη συνέπεια και τη δυνατότητα συνεχούς ροής χωρίς απώλειες. Το ανθρώπινο σύστημα, αν και κατάφερε οριακά υψηλότερη τελική παραγωγή, υπέφερε από αδυναμία συγχρονισμού, μεγάλες εργονομικές απώλειες, και χαμηλή αξιοποίηση πόρων. Το ρομποτικό μοντέλο, αντίθετα, διατήρησε απόλυτη λειτουργική συνοχή, εξάλειψε τις εργονομικές παρεμβολές και παρείχε συνεχή λειτουργία με ελεγχόμενες αποκλίσεις. Οι ποσοτικές ενδείξεις καταδεικνύουν ξεκάθαρα ότι, σε περιβάλλοντα που απαιτούν αξιοπιστία και χαμηλό ποσοστό εσωτερικών απωλειών, η ρομποτική λύση υπερτερεί.

5.4 Συγκριτικός πίνακας πλεονεκτημάτων & μειονεκτημάτων

Η τελική αποτίμηση της αποτελεσματικότητας και της καταλληλότητας κάθε μοντέλου προσομοίωσης –ανθρώπινου και ρομποτικού– απαιτεί τη σύνθεση όλων των προηγούμενων παρατηρήσεων σε μια συγκριτική δομή που αναδεικνύει με σαφήνεια τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε επιλογής. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο μοντέλων, όπως προέκυψαν από τα στατιστικά δεδομένα, τις εργονομικές απαιτήσεις, τις χρονικές κατανομές και τη συνολική ικανότητα λειτουργίας υπό πίεση.

Πίνακας 9: Συγκριτική Αποτίμηση Ανθρώπινου και Ρομποτικού Μοντέλου

Παράμετρος	Ανθρώπινο Μοντέλο	Ρομποτικό Μοντέλο
Τελική Παραγωγή (Drain3)	10 τεμάχια	9 τεμάχια
Μέσο Value Added	3.10% – 77.89% (μεγάλη διακύμανση)	16.33% σταθερό
Working Time σε σταθμούς	27% – 34%	65% – 100%

Blocked Time σε κρίσιμους σταθμούς	έως 64.9%	0% – 2%
Transport Waiting / Storage	έως 59.42% του συνολικού χρόνου	< 20%
Χρόνος Μεταφοράς	Υψηλός, χειροκίνητος	Χαμηλός, αυτοματοποιημένος
Ροή Παραγωγής	Ασύμμετρη, με παύσεις και αιχμές	Ομαλή, συνεχής, προβλέψιμη
Απαιτήσεις στελέχωσης	Υψηλές (πολλαπλοί εργάτες ανά σταθμό)	Ελάχιστες (επίβλεψη και συντήρηση)
Κόπωση / εργονομικά όρια	Υψηλή εργονομική καταπόνηση	Καμία φυσιολογική επιβάρυνση
Προβλεψιμότητα λειτουργίας	Χαμηλή	Υψηλή
Ανάγκη προγραμματισμού πόρων	Δύσκολη, μη αυτορρυθμιζόμενη	Ακριβής, αλγοριθμικά ελεγχόμενη
Αντοχή σε αύξηση ζήτησης	Περιορισμένη	Κλιμακούμενη
Κόστος λειτουργίας (μετά την απόσβεση)	Υψηλό	Χαμηλό

Η ανάλυση ξεκινά με την τελική παραγωγή, η οποία, αν και ελαφρώς υπέρ του ανθρώπινου μοντέλου (10 vs. 9 τεμάχια), δεν είναι αντιπροσωπευτική της συνολικής αποδοτικότητας. Η λειτουργική σταθερότητα του ρομποτικού μοντέλου, με τιμές “Working” έως και 100% (π.χ. AngularConverter), σε αντίθεση με το πολύ χαμηλότερο εύρος στο ανθρώπινο σενάριο (κάτω από 35%), καταδεικνύει την ανώτερη εσωτερική συνέπεια των ρομποτικών λύσεων.

Το Value Added, ως δείκτης συνεισφοράς κάθε σταθμού στο τελικό προϊόν, διαφοροποιείται ριζικά μεταξύ των δύο. Στο ανθρώπινο μοντέλο, η απόδοση των σταθμών παρουσιάζει ακραίες διακυμάνσεις (3.10%–77.89%), γεγονός που υποδηλώνει προβλήματα συγχρονισμού και εργονομικής εξάντλησης. Στον αντίποδα, η σταθερή τιμή 16.33% στο ρομποτικό μοντέλο αντικατοπτρίζει μια ελεγχόμενη,

ομοιογενή κατανομή κόστους και έργου σε όλο το σύστημα. Η ικανότητα κάθε συστήματος να διατηρεί τη ροή χωρίς απώλειες είναι καθοριστική. Οι σταθμοί του ανθρώπινου μοντέλου καταγράφουν ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά “Blocked”, άνω του 60% σε ορισμένα σημεία, με ταυτόχρονη εμφάνιση “Waiting” και “Idle”. Οι καθυστερήσεις αυτές οφείλονται στη φυσική καθυστέρηση μεταφοράς, στην ανάγκη παρουσίας χειριστών και στην εργονομική κόπωση. Αντιθέτως, το ρομποτικό σύστημα, μέσω προκαθορισμένης διαδρομής μεταφοράς και ελεγχόμενης απόκρισης, διατηρεί τη ροή σταθερή και προγραμματισμένη, χωρίς αιφνίδιες αποκλίσεις.

Το κόστος προσωπικού αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους του ανθρώπινου μοντέλου, καθώς η ανάγκη για πολλούς ταυτόχρονους εργαζόμενους, μαζί με τον περιορισμό της συνεχούς απόδοσης λόγω βιολογικών παραμέτρων (ανάγκη διαλειμμάτων, κόπωση, μετατοπίσεις), δημιουργεί υψηλό λειτουργικό κόστος ανά τεμάχιο. Αντιθέτως, το ρομποτικό σύστημα, παρότι απαιτεί υψηλό αρχικό κεφάλαιο, καθίσταται πιο αποδοτικό μεσοπρόθεσμα, ιδίως αν ληφθεί υπόψη η μείωση αναγκών σε εργασία, ο ελαχιστοποιημένος χρόνος συντήρησης, και η δυνατότητα πλήρους αξιοποίησης του χρόνου λειτουργίας σε 24ωρη βάση. Τέλος, το θέμα της κλιμάκωσης είναι καθοριστικό για περιβάλλοντα που απαιτούν ευελιξία και ανταπόκριση σε αυξομειούμενες συνθήκες ζήτησης. Το ανθρώπινο σύστημα είναι ευαίσθητο σε τέτοιες μεταβολές, καθώς η αύξηση της παραγωγής συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση του ανθρώπινου δυναμικού και του εσωτερικού κόστους. Στην περίπτωση του ρομποτικού μοντέλου, η αύξηση της απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί μέσω αλγοριθμικής αναπροσαρμογής του προγράμματος λειτουργίας και σταδιακής επένδυσης σε επιπλέον ρομποτικούς βραχίονες.

Ο συγκριτικός πίνακας αποκαλύπτει ότι, ενώ το ανθρώπινο μοντέλο ενδέχεται να υπερέχει σε ειδικές περιπτώσεις όπου απαιτείται αυξημένη ευελιξία, χειροκίνητη παρέμβαση ή αντιμετώπιση απροσδόκητων συνθηκών, το ρομποτικό μοντέλο υπερτερεί σε όλα τα ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια που σχετίζονται με τη βιομηχανική παραγωγή μαζικής κλίμακας: αποδοτικότητα, σταθερότητα, προβλεψιμότητα, και λειτουργικό κόστος. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου δεν μπορεί να είναι απόλυτη, αλλά οφείλει να βασίζεται σε σαφή επιχειρησιακά κριτήρια, που σχετίζονται τόσο με την αναμενόμενη κλίμακα παραγωγής όσο και με τον χρονικό ορίζοντα βιωσιμότητας της επένδυσης.

5.5 Συμπεράσματα από την ανάλυση

Η συγκριτική αξιολόγηση των δύο προσομοιωμένων μοντέλων —ανθρώπινου και ρομποτικού— ανέδειξε, με σαφή εμπειρική και ποσοτική τεκμηρίωση, τις βαθύτερες διαρθρωτικές διαφορές που διακρίνουν τις δύο φιλοσοφίες παραγωγής. Παρά τη φαινομενική αριθμητική ισοδυναμία στην τελική παραγωγή (10 τεμάχια για το ανθρώπινο μοντέλο και 9 για το ρομποτικό), τα στατιστικά και λειτουργικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι η πορεία μέχρι αυτό το αποτέλεσμα ήταν ριζικά διαφορετική, τόσο σε όρους αξιοπιστίας όσο και σε διαχείριση χρόνου, κόστους και πόρων. Στο ανθρώπινο μοντέλο, παρατηρήθηκε εξ αρχής μια επιφανειακά θετική εικόνα ως προς την τελική ποσότητα παραγωγής. Ωστόσο, η βαθύτερη ανάλυση αποκάλυψε σημαντικές αδυναμίες που σχετίζονται με την εργονομική επιβάρυνση, την έλλειψη χρονικής συνέπειας και την αδυναμία σταθεροποίησης της ροής. Οι σταθμοί παρουσίασαν πολύ χαμηλό μέσο χρόνο λειτουργίας (“Working”), με χαρακτηριστικά παραδείγματα τον Station5 και τον Station10, οι οποίοι κατέγραψαν ποσοστά “Blocked” έως και 64.9%, υποδηλώνοντας ότι σε σημαντικά χρονικά διαστήματα δεν πραγματοποιούνταν καμία παραγωγική διεργασία.

Αντιθέτως, το ρομποτικό μοντέλο παρουσίασε εξαιρετικά χαρακτηριστικά λειτουργικής σταθερότητας και επαναληψιμότητας. Οι μηχανικοί πόροι, όπως οι Pick-and-Place βραχίονες και οι Angular Converters, διατηρούσαν σταθερό ρυθμό λειτουργίας καθ’ όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, με μέσο ποσοστό “Working” άνω του 65%, και σχεδόν μηδενικές τιμές “Blocked” και “Waiting”. Το στοιχείο αυτό, αν και δεν αποτυπώθηκε άμεσα στο τελικό throughput λόγω πιθανής συντηρητικής παραμετροποίησης του κύκλου παραγωγής, μαρτυρά τη δυνατότητα των ρομποτικών συστημάτων να λειτουργούν προβλέψιμα και με συνέπεια. Η προστιθέμενη αξία (Value Added) ανά τεμάχιο αποδείχθηκε δείκτης υψηλής διακριτικής ικανότητας. Το ανθρώπινο μοντέλο κατέγραψε ακραία διασπορά — από 3.10% έως 77.89% — γεγονός που φανερώνει τη λειτουργική ασυμμετρία μεταξύ των σταθμών, με ορισμένους να επιτελούν ουσιαστικό ρόλο και άλλους να λειτουργούν παθητικά ή να παραμένουν αδρανείς. Στο ρομποτικό μοντέλο, η τιμή του Value Added διατηρήθηκε σταθερή στο 16.33%, επιβεβαιώνοντας την ομοιογένεια και τη σταθερότητα της λειτουργικής συμβολής κάθε μονάδας στη συνολική διαδικασία.

Ένα ιδιαίτερα κρίσιμο πεδίο διαφοροποίησης υπήρξε η εργονομική διάσταση. Το ανθρώπινο μοντέλο απαίτησε τη συνεχή εμπλοκή εργατών, με άμεση επιβάρυνση του ρυθμού λειτουργίας λόγω της φυσικής κόπωσης, της ανάγκης για διαλείμματα, και της στοχαστικής φύσης της ανθρώπινης απόκρισης. Η παρουσία καθυστερήσεων στην εναλλαγή φάσεων και στην τροφοδοσία σταθμών αποτυπώθηκε σε ποσοστά “Transport Waiting” που έφθασαν έως και το 59.42% του συνολικού χρόνου λειτουργίας. Αντιθέτως, στο ρομποτικό μοντέλο, το αντίστοιχο ποσοστό ήταν κάτω από 20%, και αποδιδόταν κυρίως σε συγχρονιστικά θέματα μεταξύ conveyors και τελικού Drain. Η συνέχεια ροής και η απρόσκοπτη μετάβαση μεταξύ σταθμών ήταν άλλο ένα πεδίο που ευνοεί τη ρομποτική προσέγγιση. Στην ανθρώπινη διάταξη, οι καθυστερήσεις, οι διακοπές και οι ακαθόριστες παύσεις οδηγούν σε μια ασύμμετρη γραφική καμπύλη παραγωγής, με απότομες αιχμές και νεκρά διαστήματα. Αντίθετα, το ρομποτικό μοντέλο παρουσίασε ομαλή και σταθερή καμπύλη ροής, η οποία αποτελεί βασικό πλεονέκτημα σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται βιομηχανική τυποποίηση, συνεχής εφοδιαστική και ακριβής χρονοπρογραμματισμός παραγγελιών.

Όσον αφορά το λειτουργικό κόστος, το ανθρώπινο μοντέλο ενέχει σημαντικά υψηλότερες μακροπρόθεσμες δαπάνες, κυρίως λόγω του κόστους ανθρώπινης εργασίας, της ανάγκης για εργονομική υποστήριξη και της μη προβλεψιμότητας του ρυθμού. Το ρομποτικό μοντέλο, αν και απαιτεί υψηλή αρχική επένδυση, επιτυγχάνει χαμηλότερο κόστος ανά τεμάχιο σε μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη βάση, λόγω της 24ωρης, χωρίς παύσεις, λειτουργίας και της ελαχιστοποίησης της ανάγκης για επίβλεψη. Τέλος, η ευελιξία και η προσαρμοστικότητα των δύο μοντέλων αναδεικνύει τη θεμελιώδη στρατηγική διάσταση της επιλογής τους. Το ανθρώπινο σύστημα, λόγω της φύσης του, παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στην αντιμετώπιση μη τυποποιημένων προβλημάτων, στην τροποποίηση ροών και στην παρεμβατική ικανότητα των χειριστών. Αυτό το πλεονέκτημα, ωστόσο, αντισταθμίζεται από την χαμηλή ικανότητα αυτορρύθμισης και την έλλειψη κλιμάκωσης χωρίς αναλογική αύξηση του ανθρώπινου δυναμικού. Από την άλλη πλευρά, το ρομποτικό μοντέλο μπορεί να αναβαθμιστεί γραμμικά μέσω αλγοριθμικών βελτιστοποιήσεων και αύξησης του αριθμού των βραχιόνων, καθιστώντας το ιδανική επιλογή για περιβάλλοντα υψηλής ζήτησης και μαζικής παραγωγής.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Εφαρμογές.

6.1 Γενικά συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις

Η διπλή προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο ψηφιακό περιβάλλον του **Siemens Tecnomatix Plant Simulation** ανέδειξε, με μεθοδολογική ακρίβεια και αυστηρή ποσοτική τεκμηρίωση, τις ουσιαστικές αποκλίσεις μεταξύ δύο εναλλακτικών προσεγγίσεων στον βιομηχανικό σχεδιασμό: την παραδοσιακή διάταξη με ανθρώπινο παράγοντα και την πλήρως ρομποτικά αυτοματοποιημένη γραμμή παραγωγής. Αν και το ανθρώπινο μοντέλο πέτυχε ελαφρώς υψηλότερη τελική παραγωγή (10 τεμάχια από το Drain3 έναντι 9 του ρομποτικού), η πορεία προς αυτή την απόδοση υπήρξε εσωτερικά ασύμμετρη, εργονομικά επιβαρυντική και συχνά επιχειρησιακά αστάθεια.

Η επίδοση του ανθρώπινου μοντέλου ερμηνεύεται κυρίως από τη δυναμική παρέμβαση των χειριστών, οι οποίοι, λόγω εγγενούς ευελιξίας και δυνατότητας κρίσης σε πραγματικό χρόνο, κατάφεραν να διατηρήσουν προσωρινά υψηλούς ρυθμούς σε επιμέρους σταθμούς. Ωστόσο, η συνολική αποδοτικότητα επηρεάστηκε αρνητικά από σοβαρές απώλειες λόγω συμφόρησης στους buffers, ασυγχρονίας στη μεταφορά τεμαχίων, χαμηλής αξιοποίησης σταθμών (π.χ. Station2 με μόλις 0.42% χρόνο λειτουργίας) και εργονομικής κόπωσης, η οποία μεταφράστηκε σε υψηλά ποσοστά “Waiting” και “Blocked”. Το μοντέλο απέτυχε να διατηρήσει συνεχή ροή και παρουσίασε σημαντική στοχαστικότητα στους χρόνους κύκλου και στις φάσεις μετάβασης. Αντίθετα, το ρομποτικό μοντέλο, παρότι παρήγαγε οριακά λιγότερα τεμάχια, λειτούργησε με απόλυτη χρονολογική συνέπεια, ελάχιστες μεταβλητές απόδοσης και σταθερή ενεργοποίηση των μηχανισμών κατεργασίας. Πόροι όπως ο AngularConverter και ο Pick-and-Place διατήρησαν “Working” status άνω του 95% της διάρκειας προσομοίωσης, ενώ δεν κατεγράφησαν φαινόμενα “Paused” ή “Failed”. Οι μεταφορές πραγματοποιήθηκαν μέσω conveyors, με συνεχή ροή και χωρίς την ανάγκη για εργονομικές παρεμβάσεις, γεγονός που εξάλειψε τις καθυστερήσεις που επιβάρυναν το ανθρώπινο σύστημα. Η συνολική σταθερότητα καθιστά το ρομποτικό μοντέλο τεχνικά ανώτερο, ακόμα και όταν το output εμφανίζεται οριακά χαμηλότερο.

Η σύγκριση των δύο μοντέλων επιβεβαιώνει ότι δεν λειτουργούν ανταγωνιστικά, αλλά ανταποκρίνονται σε διαφορετικά παραγωγικά περιβάλλοντα και στρατηγικούς

στόχους. Το ανθρώπινο σύστημα επιδεικνύει συγκριτικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές μικρής κλίμακας, ευέλικτης διαχείρισης παραγγελιών και περιβάλλοντα υψηλής ποικιλομορφίας προϊόντων. Αντιθέτως, το ρομποτικό σύστημα ενδείκνυται για μαζική παραγωγή, τυποποιημένα προϊόντα, περιβάλλοντα με αυστηρές απαιτήσεις ακρίβειας και παραγωγικής συνέπειας, καθώς και για σενάρια όπου ο ανθρώπινος παράγοντας είτε δεν επαρκεί είτε δεν είναι αποδοτικός.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική βελτιστοποίηση

Με βάση τα ευρήματα των δύο προσομοιώσεων, εντοπίζονται συγκεκριμένα πεδία όπου μπορούν να εφαρμοστούν στοχευμένες βελτιστοποιήσεις. Για το ανθρώπινο μοντέλο, η κύρια αδυναμία αφορά την ασύμμετρη εργονομική κατανομή και τον χαμηλό βαθμό αξιοποίησης των σταθμών. Η επανασχεδίαση της διάταξης με γνώμονα την εργονομία, η χρήση lean εργαλείων όπως Kanban και SMED, καθώς και η εισαγωγή βοηθητικών ρομποτικών μονάδων (cobots) στα σημεία συμφόρησης, μπορούν να μειώσουν τον χρόνο αναμονής και να αυξήσουν τη σταθερότητα των ροών. Η δυναμική διαχείριση βαρδιών με αλγοριθμική υποστήριξη, η ενσωμάτωση αισθητήρων IoT για την παρακολούθηση θερμοκρασίας, φόρτου και κόπωσης, και η υιοθέτηση προγνωστικής συντήρησης, αποτελούν ουσιαστικά βήματα προς ένα πιο ευέλικτο και αποδοτικό υβριδικό σύστημα.

Στο ρομποτικό μοντέλο, παρά τη λειτουργική σταθερότητα, παραμένει περιθώριο βελτίωσης της δυναμικής προσαρμογής των παραμέτρων. Ορισμένα σημεία παρουσιάζουν Transport Waiting άνω του 45%, γεγονός που υποδηλώνει ανάγκη αναθεώρησης της χωρητικότητας buffers και του decision logic στον αλγόριθμο κατευθυνόμενης ροής. Η ενσωμάτωση Machine Learning αλγορίθμων, οι οποίοι θα αναπροσαρμόζουν σε πραγματικό χρόνο τη συμπεριφορά του συστήματος με βάση πραγματικά δεδομένα λειτουργίας, θα επιτρέψει τη μετάβαση από ένα «στατικό αυτοματοποιημένο σύστημα» σε ένα πραγματικά ευφύες εργοστάσιο (Smart Factory). Επιπλέον, η ενίσχυση των πρωτοκόλλων ελέγχου ποιότητας, μέσω in-line ανάλυσης και παρακολούθησης απορρίψεων, θα ενισχύσει την αποδοτικότητα χωρίς να απαιτείται επιβράδυνση της ροής. Η ίδια αρχιτεκτονική μπορεί να επεκταθεί σε ποικίλα βιομηχανικά περιβάλλοντα. Αντίστοιχες εφαρμογές αναμένονται στον χώρο της

φαρμακευτικής παραγωγής, της αεροναυπηγικής, των ηλεκτρονικών και της τροφικής βιομηχανίας, όπου η ανάγκη για αυτοματοποίηση και real-time έλεγχο είναι αυξημένη. Η πλατφόρμα του Tecnomatix μπορεί να προσομοιώσει περίπλοκα σενάρια με AGVs, drones, ρομποτικούς χειριστές και έξυπνους αισθητήρες, ενώ επιτρέπει την ανάπτυξη πλήρως προσαρμοσμένων Digital Twins για χρήση σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα, επαγγελματική κατάρτιση και δοκιμές εργονομικού σχεδιασμού.

6.3 Επέκταση εφαρμογής σε ευρύτερα περιβάλλοντα

Πέρα από την καθαυτή σύγκριση των δύο μοντέλων, τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι το εργαλείο προσομοίωσης λειτουργεί ως επιχειρησιακή πλατφόρμα πρόβλεψης, σχεδιασμού και στρατηγικής απόφασης. Η αναπαράσταση σεναρίων με ψηφιακά δίδυμα (digital twins), σε περιβάλλοντα που προσομοιώνουν όχι μόνο την παραγωγή αλλά και την εσωτερική κυκλοφορία υλικών, την κατανάλωση ενέργειας, την αξιοποίηση χώρου, και την αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής, προσφέρει ένα σύνολο εργαλείων απαραίτητο για τον σύγχρονο βιομηχανικό σχεδιαστή. Στο ίδιο πλαίσιο, το Tecnomatix μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη βιομηχανικών περιοχών σε κλίμακα, όπως στον σχεδιασμό εφοδιαστικής αλυσίδας, στον υπολογισμό κυκλοφοριακού φόρτου AGVs ή στην αποτίμηση ενεργειακής βιωσιμότητας πριν την επένδυση σε πραγματικές εγκαταστάσεις.

6.4 Τελικές σκέψεις

Η παρούσα εργασία κατέδειξε τη δύναμη της προσομοίωσης ως εργαλείου στρατηγικού σχεδιασμού, λειτουργικής βελτιστοποίησης και επιχειρησιακής απόφασης. Μέσω της προσομοίωσης δύο διαφορετικών σεναρίων, έγινε εφικτή η αποτύπωση των λειτουργικών χαρακτηριστικών, των δυνατοτήτων και των περιορισμών καθενός, με τρόπο μη παρεμβατικό, αναπαραγώγιμο και επιστημονικά θεμελιωμένο. Το εργαλείο Siemens Tecnomatix αποδείχθηκε κατάλληλο για την ανάπτυξη πολύπλοκων βιομηχανικών μοντέλων και την εξαγωγή ποσοτικών δεδομένων που ενισχύουν την αντικειμενικότητα της ανάλυσης. Το μέλλον της παραγωγής στρέφεται αναπόφευκτα προς την αυτοματοποίηση, τη ρομποτική συνεργασία και την ψηφιακή αναπαράσταση των διεργασιών μέσω Digital Twins. Παράλληλα, η ανθρώπινη εργασία δεν μπορεί να υποτιμηθεί, ιδιαίτερα σε

περιβάλλοντα που απαιτούν κρίση, ευελιξία και συναισθηματική νοημοσύνη. Η πρόκληση για τη βιομηχανία του αύριο έγκειται στην αρμονική σύνθεση των δύο: την τεχνολογική υπεροχή και την ανθρώπινη εμπειρία, σε ένα περιβάλλον που δεν είναι μόνο παραγωγικό αλλά και βιώσιμο.

Βιβλιογραφία

- Tecnomatix Plant Simulation 14, Online Tutorial., SIMPLAN
- Steffen Bangsow, Tecnomatix Plant Simulation, Modeling and Programming by Means of Examples.
- Plant Simulation - From Wikipedia., the free encyclopedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Plant_Simulation)
- Sun, X., & Peng, C. (2024). Novel Motion Control System for Industrial Robot Arms Enhanced by Innovative Method and PLC Integration., 2024 IEEE 33rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).
- Ottogalli, K., Rosquete, D., Rojo, J., Amundarain, A., Rodríguez, J., & Borro, D. (2021).
- Cardoso, M., Lozan, R., Barbosa, G., Guerra-Zubiaga, D., & Shiki, S. (2022). Energy consumption evaluation on robotic drilling process using digital twin technology.
- Frasca, C. (2019)., Virtual analysis and simulations of industrial robots and automation in Industry 4.0's development.
- Trebuña, P., Pekarčíková, M., & Petrík, M. (2019)., Application of Tecnomatix Process Simulate for optimisation of logistics flows.
- Viharos, A., & Németh, I.v(2018)., Simulation and scheduling of AGV-based robotic assembly systems. IFAC-PapersOnLine, 51, 1415–1420.
- Ferro, R., Cordeiro, G., & Ordóñez, R. (2018)., Dynamic modeling of discrete event simulation., Proceedings of the 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation.
- Jus, M. (2017)., Modeling with Tecnomatix Plant Simulation.