

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΑΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

υπό

**ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΚΕΛΕΠΟΥΡΗ**

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού Α.Π.Θ., 1996

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2006



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 3363/1  
Ημερ. Εισ.: 21-11-2006  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ  
658.500 151 18  
ΚΕΛ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΑΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

υπό

**ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΚΕΛΕΠΟΥΡΗ**

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού Α.Π.Θ., 1996

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2006

© 2006 Δημήτριος Κελεπούρης

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Πενταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Γεώργιος Λυμπερόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Αθανάσιος Ζηλιασκόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Σπυρίδων Καραμάνος Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών
Τέταρτος Εξεταστής	Δρ. Γεώργιος Κοζανίδης Διδάσκων Π.Δ. 407/80, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών
Πέμπτος Εξεταστής	Δρ. Παντελής Δημήτριος Διδάσκων Π.Δ. 407/80, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή Δρ. Γεώργιο Λυμπερόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου καθώς και την οικογένειά μου για την ηθική υποστήριξή της και την κατανόησή της σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης του μεταπτυχιακού.

Δημήτρης Κελεπούρι

# ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΙΑΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΕΛΕΠΟΥΡΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2003

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γεώργιος Λυμπερόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Διοίκησης  
Παραγωγής

## Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μοντελοποιήθηκε και αναλύθηκε μια γραμμή παραγωγής μεταλλικών κατασκευών με την χρήση του λογισμικού MPX. Το MPX χρησιμοποιεί την Τεχνολογία Γρήγορης Μοντελοποίησης (Rapid Modeling Technology ή RMT) για να υπολογίζει γρήγορα, βάσει προσεγγιστικών αναλυτικών μαθηματικών τύπων, σημαντικά μέτρα απόδοσης ενός συστήματος παραγωγής, όπως είναι ο μέσος χρόνος παραγωγής προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των αναμονών (lead time), ο μέσος αριθμός εργασιών σε εξέλιξη (work-in-process ή WIP), και η παραγωγική δυναμικότητα (capacity) του συστήματος.

Αρχικά γίνεται μια περιγραφή της υφιστάμενης γραμμής παραγωγής, και συγκεκριμένα του εξοπλισμού, του εργατικού δυναμικού και των προϊόντων που παράγονται. Επίσης γίνεται αναφορά στην δρομολόγηση των προϊόντων (routing) μέσω του διαγράμματος ροής της παραγωγής (production flow diagram) της γραμμής παραγωγής. Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά τα βασικότερα χαρακτηριστικά του λογισμικού MPX, και ακολουθεί η περιγραφή της μοντελοποίησης και του τρόπου εισαγωγής των δεδομένων της υφιστάμενης γραμμής παραγωγής στο MPX. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της υφιστάμενης γραμμής παραγωγής και γίνεται μια προσπάθεια βελτιστοποίησης της απόδοσης της γραμμής εφαρμόζοντας διάφορα πιθανά σενάρια αλλαγών (what if) στις παραμέτρους της υφιστάμενης γραμμής.

## Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο .....	1
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	4
1.3 Οργάνωση Μεταπτυχιακής Εργασίας .....	5
Κεφάλαιο 2 Περιγραφή της Γραμμής Παραγωγής.....	7
2.1 Εξοπλισμός.....	7
2.2 Εργατικό Δυναμικό .....	10
2.3 Προϊόντα .....	12
Κεφάλαιο 3 Συνοπτική Περιγραφή του Λογισμικού MPX.....	16
3.1 Στατικά και Δυναμικά Μοντέλα.....	16
3.2 First Come First Served.....	17
3.3 Προσωρινή Αποθήκευση και Μπλοκάρισμα.....	17
3.4 Ακρίβεια και Ανάλυση Ευαισθησίας.....	18
3.5 Περιπτώσεις όπου δεν Ενδείκνυται το MPX.....	18
3.6 Συμπεράσματα .....	19
Κεφάλαιο 4 Μοντελοποίηση της Γραμμής Παραγωγής με το MPX.....	20
4.1 Μοντελοποίηση της Μεταβλητότητας.....	21
4.1.1 Μεταβλητότητα στους Χρόνους Επεξεργασίας.....	21
4.1.2 Μεταβλητότητα στους Χρόνους Έκλυσης των Παραγγελιών των Προϊόντων.....	22
4.1.3 Μεταβλητότητα στη Δρομολόγηση των Προϊόντων.....	22
4.2 Καθορισμός της Παρτίδας και της Ομάδας Μεταφοράς .....	22
4.3 Μοντελοποίηση της Λειτουργίας του Εξοπλισμού .....	24
4.4 Βλάβες του Εξοπλισμού .....	25
4.5 Υπερωρίες στον Εξοπλισμό.....	26
4.6 Μοντελοποίηση του Εργατικού Δυναμικού.....	27
4.7 Υπερωρίες στο Προσωπικό.....	29
4.8 Επίδραση των Συντελεστών για τους Χρόνους Επεξεργασίας και Setup.....	29
4.9 Μοντελοποίηση του Flow Time των Προϊόντων .....	30



4.10	Διαχείριση των Ελαττωματικών Προϊόντων (Scrap).....	3
4.11	Συμπεράσματα .....	3
<b>Κεφάλαιο 5 Αριθμητικά Αποτελέσματα.....</b>		<b>3</b>
5.1	Υφιστάμενο Σύστημα.....	3
5.2	1 <sup>ο</sup> Σενάριο: Αγορά Νέας Ρομποτικής Στράντζας.....	3
5.3	2 <sup>ο</sup> Σενάριο: Εγκατάσταση Νέας Μονάδας Φωσφάτωσης – Βαφείου .....	4
5.4	3 <sup>ο</sup> Σενάριο: Ελάττωση των Παρτίδων στα Προϊόντα.....	4
5.5	Συμπεράσματα .....	4
<b>Κεφάλαιο 6 Σύνοψη Μεταπτυχιακής Εργασίας .....</b>		<b>5</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>		<b>5</b>

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Εξοπλισμός της γραμμής παραγωγής.....	8
Πίνακας 2.2: Εργατικό δυναμικό της γραμμής παραγωγής.....	11
Πίνακας 2.3.1: IBOM Μεταλλικής Βιβλιοθήκης.....	13
Πίνακας 2.3.2: IBOM Μεταλλικής Αρχαιοθήκης.....	13
Πίνακας 5.1.1: Μέσο flow time των προϊόντων και WIP του συστήματος για το αριθμητικό παράδειγμα 1 (basecase).....	35
Πίνακας 5.2.1: Διαφοροποίηση των δεδομένων του 1ου σεναρίου σε σχέση με το basecase.....	38
Πίνακας 5.2.2: Μέσο flow time των προϊόντων και WIP του συστήματος για το 1ο σενάριο – αγορά νέας ρομποτικής στράντζας.....	39
Πίνακας 5.3.1 Διαφοροποίηση των δεδομένων του 2ου σεναρίου σε σχέση με το 1ο σενάριο (basecase).....	42
Πίνακας 5.3.2: Μέσο flow time των προϊόντων και WIP του συστήματος για το 2ο σενάριο – εγκατάσταση νέας μονάδας φωσφάτωσης - βαφείου.....	44
Πίνακας 5.4.1: Μέσο flow time των προϊόντων και WIP του συστήματος για το 3ο σενάριο – ελάττωση των παρτίδων.....	46

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής της γραμμής παραγωγής .....	14
Σχήμα 5.1.1: Χρησιμοποίηση του εξοπλισμού στο basecase.....	35
Σχήμα 5.1.2: Χρησιμοποίηση του προσωπικού στο basecase.....	36
Σχήμα 5.2.1: Συγκριτική χρησιμοποίηση του εξοπλισμού στο basecase και στο 1ο σενάριο (αγορά νέας ρομποτικής στράντζας).....	40
Σχήμα 5.2.2: Συγκριτική χρησιμοποίηση του προσωπικού στο basecase και στο 1 <sup>ο</sup> σενάριο	41
Σχήμα 5.3.1: Συγκριτική χρησιμοποίηση του εξοπλισμού στο basecase και στο 2ο σενάριο (εγκατάσταση νέας μονάδας φωσφάτωσης - βαφείου) .....	44
Σχήμα 5.3.2: Συγκριτική χρησιμοποίηση του προσωπικού στο basecase και στο 2 <sup>ο</sup> σενάριο	45
Σχήμα 5.4.1: Συγκριτική χρησιμοποίηση του εξοπλισμού στο basecase και στο 3ο σενάριο (μείωση των παρτίδων στο μισό και στο ένα τέταρτο) .....	47
Σχήμα 5.4.2: Συγκριτική χρησιμοποίηση του προσωπικού στο basecase και στο 3 <sup>ο</sup> σενάριο	48

# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζουμε πληροφορίες εισαγωγικού χαρακτήρα που δίνουν το κίνητρο και το υπόβαθρο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, παραθέτουμε μια πολύ σύντομη ανασκόπηση της σχετικής με την εργασία βιβλιογραφίας, και περιγράφουμε συνοπτικά τις βασικές ενότητες της μεταπτυχιακής εργασίας.

## 1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Σε μία κατασκευαστική βιομηχανία είναι πολύ σημαντικό οι προϊστάμενοι του Τμήματος Παραγωγής να έχουν στην διάθεσή τους ένα εργαλείο που να τους επιτρέπει να μοντελοποιούν και να αναλύουν τα συστήματα παραγωγής που καλούνται να σχεδιάσουν και να λειτουργήσουν. Τα πιο συνηθισμένα εργαλεία μοντελοποίησης και ανάλυσης συστημάτων παραγωγής που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία είναι τα υπολογιστικά φύλλα (π.χ. Excel) και τα συστήματα Προγραμματισμού Απαιτούμενων Υλικών (Material Requirement Planning ή MRP).

Τα υπολογιστικά φύλλα (π.χ. Excel) είναι απλά και εύκολα στη χρήση αλλά οι υπολογισμοί τους στηρίζονται σε στατικά μοντέλα και δεν λαμβάνουν υπόψη του δυναμικούς παράγοντες ενός συστήματος παραγωγής, όπως είναι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των προϊόντων, οι αλλαγές προετοιμασίας εξοπλισμού (setup changes), οι αστοχίες και επισκευές των μηχανημάτων.

Τα συστήματα MRP μπορούν, ξεκινώντας από τις ημερομηνίες παράδοσης και πηγαίνοντας αντίστροφα στον χρόνο, να προσδιορίσουν τις ημερομηνίες έναρξης των διαφόρων εργασιών σε ένα σύστημα παραγωγής. Όμως τα συστήματα MRP είναι συνήθως μεγάλα και δύσχρηστα, απαιτούν αξιόλογους υπολογιστικούς χρόνους και δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε υποθετικές γραμμές παραγωγής για τις οποίες δεν υπάρχουν δεδομένα στη βάση τους. Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματά τους είναι ότι ο συνολικός χρόνος παραγωγής ενός προϊόντος μαζί με τις αναμονές (lead time) θεωρείται μια σταθερά εισόδου και όχι μια υπολογιζόμενη μεταβλητή εξόδου που ποικίλει ανάλογα με το φόρτο εργασιών και άλλες αλληλεπιδράσεις.

Ένα εργαλείο μοντελοποίησης και ανάλυσης ενός συστήματος παραγωγής με δυνατότητα πολύ μεγάλης ακρίβειας στην απεικόνιση της πραγματικότητας είναι η προσομοίωση δυναμικών συστημάτων με διακριτά συμβάντα (discrete event dynamic system simulation). Με την προσομοίωση παράγεται ένα εικονικό δείγμα τυχαίων και μη «συμβάντων» σε ένα σύστημα παραγωγής, όπως αφίξεις προϊόντων, περατώσεις επεξεργασίας προϊόντων και αλλαγής προετοιμασίας εξοπλισμού παραγωγής (setup change), αναπάντεχες βλάβες σταθμών παραγωγής, κτλ., βάσει του οποίου μπορούν να εκτιμηθούν σημαντικά μέτρα απόδοσης του συστήματος. Το βασικό μειονέκτημα της προσομοίωσης είναι ότι για να προκύψει μια ακριβής – με στενό διάστημα εμπιστοσύνης – εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος, απαιτείται πολύ μεγάλο δείγμα τυχαίων συμβάντων, πράγμα που συνεπάγεται μεγάλο υπολογιστικό κόστος και χρόνος.

Εναλλακτικά με την προσομοίωση, ένα σύστημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα δίκτυο ουρών αναμονής (queuing network) και να χρησιμοποιηθούν υπάρχοντα ακριβή ή προσεγγιστικά αναλυτικά αποτελέσματα για την πολύ γρήγορη ανάλυσή του. Το λογισμικό MPX, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, είναι ένα εργαλείο που εφαρμόζει την Τεχνολογία Γρήγορης Μοντελοποίησης (Rapid Modeling Technology ή RMT) για να υπολογίζει γρήγορα, βάσει αναλυτικών μαθηματικών αποτελεσμάτων της θεωρίας δικτύων ουρών αναμονής, σημαντικά μέτρα απόδοσης ενός συστήματος παραγωγής, όπως είναι ο μέσος χρόνος παραγωγής προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των αναμονών (lead time), ο μέσος αριθμός εργασιών σε εξέλιξη (work-in-process ή WIP), και η παραγωγική δυναμικότητα (capacity) του συστήματος. Είναι γεγονός ότι τα τρία παραπάνω μέτρα απόδοσης, δηλαδή το lead time, το WIP, και το capacity είναι αποτέλεσμα δυναμικών αλληλεπιδράσεων σε μια γραμμή παραγωγής. Για παράδειγμα το lead time εξαρτάται από τον χρόνο επεξεργασίας (processing time) και από τον χρόνο αναμονής στην ουρά (queue time), δηλαδή από τον χρόνο που ένα κομμάτι περιμένει στην σειρά για να εξυπηρετηθεί στα μηχανήματα, όταν αυτά δουλεύουν. Ενώ ο χρόνος επεξεργασίας μπορεί να προσδιοριστεί από τις παραμέτρους των μηχανημάτων, το queue time εξαρτάται από πολλούς δυναμικούς παράγοντες όπως το γεγονός να περιμένουν στην ουρά και άλλα κομμάτια, να υποστεί βλάβη το μηχάνημα, να μην είναι διαθέσιμο ανθρώπινο δυναμικό, κ.α. Η τεχνική RMT μέσω του λογισμικού MPX μοντελοποιεί αυτούς τους δυναμικούς παράγοντες με ένα σύστημα εξισώσεων και μπορεί να δώσει σε πολύ μικρό υπολογιστικό χρόνο μια πολύ καλή εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος. Το MPX παρέχει σχετικά εύκολα και γρήγορα, στοιχεία για την εκτίμηση της απόδοσης ενός συστήματος παραγωγής, χωρίς την λεπτομερή απεικόνιση που είναι δυνατή με την προσομοίωση, αλλά με την προσέγγιση: πρώτα το δάσος και μετά τα δέντρα.

Η συνεισφορά αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας είναι ότι εφαρμόζοντας ένα λογισμικό (το MPX) ως εργαλείο μοντελοποίησης και ανάλυσης μια γραμμής παραγωγής στις πραγματικές συνθήκες μιας βιομηχανίας καθίσταται σαφές ότι η απόδοση της γραμμής μπορεί να εκτιμηθεί με σχετική ακρίβεια, να διερευνηθεί τυχόν βελτίωσή της και να παρθούν άμεσα αποφάσεις για την επίτευξη των αντικειμενικών στόχων της διοίκησης.

## 1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Υπάρχουν αρκετές μελέτες που πραγματεύονται την πρακτικότητα, την ευκολία και την ακρίβεια της τεχνικής RMT. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ως βασικό εργαλείο ανάπτυξης και μοντελοποίησης το Εγχειρίδιο Χρήσης (User Manual) του λογισμικού MPX της εταιρείας Network Dynamics [1].

Ο Suri [2] στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο του βιβλίου του *Quick Response Manufacturing* κάνει μια εισαγωγή στις μεθόδους που χρησιμοποιεί το MPX χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη γνώση της θεωρίας ουρών.

Το MPX βασίζεται στη θεωρία ενός ανοιχτού δικτύου με πολλαπλά επίπεδα πελατών και λύνεται χρησιμοποιώντας την αποσύνθεση των κόμβων του. Δεν απαιτείται ακριβής γνώση ή υπόθεση των κατανομών πιθανότητας για τους χρόνους εξυπηρέτησης και τους ενδιάμεσους χρόνους άφιξης. Αντίθετα, κάθε κόμβος αναλύεται σαν μια ουρά GI/G/m, με μια εκτίμηση για το μέσο χρόνο αναμονής που βασίζεται στις πρώτες δύο ροπές (moments) των κατανομών των χρόνων άφιξης και εξυπηρέτησης. Στη συνέχεια, λαμβάνεται υπόψη η αλληλοσύνδεση των κόμβων (οι διεργασίες αναχώρησης συνδέονται με τις διεργασίες άφιξης) καθώς και η επίδραση των αποτυχιών του εξοπλισμού στους χρόνους εξυπηρέτησης και στις κατανομές αναχώρησης. Η αλληλεπίδραση του ανθρωπίνου δυναμικού

μοντελοποιείται σε ένα δεύτερο επίπεδο μέσα από ένα πολυσύνθετο κλειστό δίκτυο ουρών. Η ανάπτυξη και η εφαρμογή των δικτύων ουρών στην παραγωγή αναλύεται στην αναφορά [3].

### 1.3 Οργάνωση Μεταπτυχιακής Εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας χωρίζεται σε τέσσερις ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2 - 5, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφουμε αναλυτικά την υφιστάμενη γραμμή παραγωγής. Δίνονται στοιχεία που αφορούν 1) στον εξοπλισμό, όπως είναι ο αριθμός μηχανημάτων ανά ομάδα (group), οι βάρδιες που χρησιμοποιούνται, οι μέσοι χρόνοι μεταξύ βλαβών (mean time to failure ή MTTF) και οι μέσοι χρόνοι επιδιόρθωσης (mean time to repair ή MTTR) και το υπεύθυνο προσωπικό για τη λειτουργία αυτών των μηχανημάτων, 2) στο εργατικό δυναμικό, όπως είναι ο αριθμός εργατών ανά ομάδα (group), οι βάρδιες που χρησιμοποιούνται, ο χρόνος διαλείμματος, και 3) στα προϊόντα προς κατασκευή (IBOM και δρομολόγηση).

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται συνοπτικά τα βασικότερα χαρακτηριστικά του λογισμικού MPX όπως είναι η πειθαρχία εξυπηρέτησης που ακολουθείται, η αντιμετώπιση της προσωρινής αποθήκευσης και του μπλοκαρίσματος των προϊόντων, η ακρίβεια και η ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού, καθώς και οι περιπτώσεις όπου δεν ενδείκνυται η χρήση του MPX.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται η μοντελοποίηση και ο τρόπος εισαγωγής των δεδομένων της γραμμής παραγωγής στο MPX. Συγκεκριμένα αναπτύσσεται η μοντελοποίηση της μεταβλητότητας, της παρτίδας και της ομάδας μεταφοράς, του εξοπλισμού, του εργατικού δυναμικού, των συντελεστών για τους χρόνους επεξεργασίας και setup, του χρόνου ροής (flow time) των προϊόντων και του ποσοστού απόρριψης (scrap) ελαττωματικών προϊόντων.



Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το “τρέξιμο” του λογισμικού με τα δεδομένα της υφιστάμενης κατάστασης και γίνεται μια προσπάθεια βελτιστοποίησης της απόδοσης της γραμμής παραγωγής εφαρμόζοντας τρία πιθανά σενάρια (what if): τη αγορά μιας καινούριας ρομποτικής στράντζας, την εγκατάσταση νέας μονάδας φωσφάτωσ – βαφής και την ελάττωση της ποσότητας των παρτίδων στα προϊόντα.

Τα τελικά συμπεράσματα της μεταπτυχιακής εργασίας και κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

## Κεφάλαιο 2 Περιγραφή της Γραμμής Παραγωγής

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφουμε την γραμμή παραγωγής στην οποία εφαρμόζουμε το λογισμικό MPX.

Στο Υποκεφάλαιο 2.1, γίνεται αναφορά για τον εξοπλισμό της γραμμής, στο Υποκεφάλαιο 2.2 για το προσωπικό και στο Υποκεφάλαιο 2.3 γίνεται λόγος για τα δέντρα (IBOM) και τη δρομολόγηση των προϊόντων, αναλύοντας το διάγραμμα ροής της παραγωγής (production flow diagram) της γραμμής παραγωγής.

### 2.1 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός της γραμμής παραγωγής της συγκεκριμένης βιομηχανίας μεταλλικών κατασκευών, καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά του, φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

Αναλυτικά έχουμε την περιγραφή του εξοπλισμού, το σύνολο των μηχανημάτων ή κέντρων εργασίας ανά group, τον χρόνο υπερωρίας (%) για κάθε group μηχανών και το απαραίτητο προσωπικό για τη λειτουργία του. Επίσης δίνονται στοιχεία που αφορούν στην αξιοπιστία του εξοπλισμού, όπως είναι ο μέσος χρόνος μεταξύ των βλαβών (Mean Time To Failure ή MTTF) και ο μέσος χρόνος επισκευής (Mean Time To Repair ή MTTR). Οι χρόνοι αυτοί προέκυψαν από τα αρχεία του Τμήματος Συντήρησης του εργοστασίου και από τα αρχεία και τις εκτιμήσεις των εργοδηγών των διαφόρων τμημάτων.

A/A	Περιγραφή εξοπλισμού	Αριθμός στο group	Υπερωρία (%)	Mean Time To Failure (min)	Mean Time To Repair (min)	Υπεύθυνο προσωπικό
1	Κοπτικά (Punching)	2	50	21.600	480	Χειριστές Κοπτικών
2	Απογρεζωτές (Deburing)	2	0	63.360	120	Χειριστές Κοπτικών
3	Στράντζες (Bending)	3	100	31.680	180	Χειριστές Στράντζων
4	Πρέσα ενθέτων (Riveting)	1	0	158.400	60	Μηχανοτεχνίτης
5	Ηλεκτροπόντα (Spot Welding)	3	0	21.120	30	Συγκολλητές
6	Μηχανή συγκόλλησης (Fusion Welding)	1	0	480	5	Συγκολλητές
7	Φωσφάτωση (Zn-Phosphate)	1	0	10.560	180	Βαφείς
8	Βαφείο ηλεκτροστατικής βαφής πούδρας (Powder coating)	1	0	2.400	80	Βαφείς
9	Επισκευή Βαφής (Rework of Painting)	1	0	1	0	Βαφείς
10	Ποιοτικός Έλεγχος (Inspect)	1	0	1	0	Ελεγκτές Π.Ε.
11	Συναρμολόγηση (Assembling)	1	0	1	0	Συναρμολογητές
12	Συσκευασία (Packing)	2	0	1	0	Συναρμολογητές

Πίνακας 2.1: Εξοπλισμός της γραμμής παραγωγής

Στον παραπάνω Πίνακα 2.1, οι μηδενικές τιμές στη στήλη της υπερωρίας υποδηλώνουν ότι δεν υπάρχουν επιπλέον διαθέσιμες ώρες στον αντίστοιχο εξοπλισμό. Η ύπαρξη απογευματινής βάρδιας σε ένα κοπτικό μηχάνημα και τρεις στράντζες, μοντελοποιείται με υπερωρία 50% στα κοπτικά μηχανήματα και 100% στις στράντζες.

Οι χρόνοι MTTF και MTTR για τα διάφορα μηχανήματα προκύπτουν ως εξής:

Στα κοπτικά λόγω παλαιότητας και καταπόνησης αναφέρονται βλάβες μετά από λειτουργία 6 εβδομάδων περίπου, η επισκευή των οποίων είναι επίπονη (αλλαγή σπασμένων ζουμπάδων, διόρθωση φαινομένου ψαλιδισμού) και διαρκεί περίπου 8 ώρες κατά μέσο όρο. Θεωρώντας ότι στην απογευματινή βάρδια δουλεύουν τα κοπτικά εναλλάξ, το κάθε κοπτικό δουλεύει  $(480*5)+(480*5)/2=3.600\text{min /week}$ . Άρα  $MTTF= 3.600*6=21.600\text{min}$  και  $MTTR= 60*8=480\text{min}$ .

Στα δύο μηχανήματα της απογρέζωσης αναφέρεται βλάβη μετά από 6 μήνες λειτουργίας, η οποία επισκευάζεται σε 2 ώρες περίπου. Αν υποθέσουμε ότι ο κάθε μήνας έχει 22 εργάσιμες ημέρες κατά μέσο όρο, έχουμε:  $MTTF= 60*8*22*6=63.360\text{min}$  και  $MTTR= 60*2=120\text{min}$ .

Στις στράντζες αναφέρεται βλάβη μετά από 3 μήνες λειτουργίας, η οποία επισκευάζεται σε 3 ώρες περίπου. Άρα  $MTTF= 60*8*22*3=31.680\text{min}$  και  $MTTR= 60*3=180\text{min}$ .

Η πρέσα των ενθέτων παθαίνει πολύ σπάνια βλάβη, περίπου μια φορά ανά 15 μήνες, η επισκευή της οποίας διαρκεί μια ώρα. Άρα  $MTTF= 60*8*22*15=158.400\text{min}$  και  $MTTR= 60*1=60\text{min}$ .

Στις ηλεκτροπρόνες αναφέρεται βλάβη μια φορά ανά δύο μήνες περίπου, η οποία επισκευάζεται σε 30min περίπου. Άρα  $MTTF= 60*8*22*2=21.120\text{min}$  και  $MTTR= 30\text{min}$ .

Στις μηχανές συγκόλλησης παρατηρούνται συχνές αλλά γρήγορα επισκευάσιμες βλάβες, οπότε  $MTTF= 480\text{min}$  και  $MTTR= 5\text{min}$ .

Η φωσφάτωση αποτελεί μια εγκατάσταση διαδοχικών δεξαμενών και χρησιμοποιείται για να προετοιμάσει χημικά την επιφάνεια των εξαρτημάτων που πρόκειται να βαφούν, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη πρόσφυση βαφής. Τα εξαρτήματα αναρτώνται σε κρεμάστρες και

εμβαπτίζονται διαδοχικά στις δεξαμενές, που είναι γεμάτες με διάφορα υγρά συγκεκριμένης χημικής σύστασης και περιεκτικότητας, ώστε να γίνει καθαρισμός (αποξείδωση και απολίπανση) και επικάλυψη των επιφανειών τους με διάφορα χημικά συστατικά.

Οι βλάβες της εγκατάστασης της φωσφάτωσης αφορούν στην μεταβολή της χημικής σύστασης των δεξαμενών, γεγονός που συμβαίνει μια φορά το μήνα περίπου, η αποκατάσταση της οποίας διαρκεί περίπου 3 ώρες. Άρα  $MTTF = 60 \cdot 8 \cdot 22 = 10.560 \text{ min}$  και  $MTTR = 60 \cdot 3 = 180 \text{ min}$ .

Το βαφείο ηλεκτροστατικής βαφής περιλαμβάνει ένα φούρνο στεγνώματος των εξαρτημάτων (μετά από τις διαδοχικές εμβαπτίσεις στη διαδικασία της φωσφάτωσης), μια καμπίνα ηλεκτροστατικής βαφής και ένα φούρνο πολυμερισμού της πούδρας. Βλάβες παρατηρούνται κυρίως στην καμπίνα ηλεκτροστατικής βαφής ανά μία εβδομάδα περίπου, η επισκευή των οποίων διαρκεί 80min. Άρα  $MTTF = 60 \cdot 8 \cdot 5 = 2.400 \text{ min}$  και  $MTTR = 80 \text{ min}$ .

Τέλος στα κέντρα εργασίας της επισκευής της βαφής όπου γίνεται touch up των αστοχιών της βαφής με πινέλο, spray ή αερογράφο, του ποιοτικού ελέγχου, της συναρμολόγησης και της συσκευασίας δεν παρατηρούνται βλάβες που να έχουν άμεση επίδραση στην εξέλιξη της επεξεργασίας, γι' αυτό και έχουμε  $MTTR = 0$  και  $MTTF =$  οποιοσδήποτε θετικός αριθμός.

## 2.2 Εργατικό Δυναμικό

Το εργατικό δυναμικό της γραμμής παραγωγής καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά του, φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

Αναλυτικά έχουμε την περιγραφή του εργατικού δυναμικού, το σύνολο των εργατών ανά group, τον χρόνο υπερωρίας (%) για κάθε group εργατών και τον χρόνο μη

διαθεσιμότητας των εργατών ως ποσοστό του κανονικού χρόνου εργασίας. Τα 15min του διαλείμματος μοντελοποιούνται ως χρόνος μη διαθεσιμότητας 3% ( $15\text{min}=3\% \times 480\text{min}$  περίπου)

A/A	Περιγραφή του εργατικού δυναμικού	Αριθμός στο group	Υπερωρία (%)	(%) Χρόνος μη διαθεσιμότητας
1	Χειριστές Κοπτικών	4	25	3
2	Χειριστές Στραντζών	4	100	3
3	Μηχανοτεχνίτης	1	0	3
4	Συγκολλητές	3	0	3
5	Βαφείς	3	0	3
6	Ελεγκτές Π.Ε.	1	0	3
7	Συναρμολογητές	3	0	3

Πίνακας 2.2: Εργατικό δυναμικό της γραμμής παραγωγής

Στον παραπάνω Πίνακα 2.2, οι μηδενικές τιμές στη στήλη της υπερωρίας υποδηλώνουν ότι δεν υπάρχουν επιπλέον διαθέσιμες ώρες στο αντίστοιχο εργατικό δυναμικό. Η ύπαρξη απογευματινής βάρδιας ενός χειριστή κοπτικού μηχανήματος και τεσσάρων χειριστών στις στράντζες μοντελοποιείται με υπερωρία 25% στους χειριστές κοπτικών και 100% στους χειριστές στραντζών. Οι χειριστές της απογευματινής βάρδιας απαιτούνται για τη λειτουργία του αντίστοιχου εξοπλισμού (ένα κοπτικό και τρεις στράντζες).

## 2.3 Προϊόντα

Εξετάστηκαν δύο προϊόντα, της ίδιας κατασκευαστικής φιλοσοφίας: μία μεταλλική βιβλιοθήκη και μία μεταλλική αρχειοθήκη. Τα δύο αυτά προϊόντα αναφέρονται στον ίδιο πελάτη και προορίζονται για την κάλυψη αναγκών σε σχολικά κτίρια. Η συνολική ζήτηση στη διάρκεια ενός χρόνου είναι 7.500 αρχειοθήκες και 2.500 βιβλιοθήκες. Λόγω της παρόμοιας βιομηχανοποίησης των προϊόντων, τα εξαρτήματα (items) αλλά και τα υποσυγκροτήματά τους (assemblies) περνάνε από τα ίδια group μηχανημάτων και εργατών στην γραμμή παραγωγής, μέχρι την ολοκλήρωση και την αποστολή τους.

Κατά τη διάρκεια μοντελοποίησης των προϊόντων στην διαθέσιμη έκδοση του MPX (academic version 3.3), διαπιστώθηκαν προβλήματα που αφορούσαν στον αριθμό των δεδομένων. Επειδή ο μέγιστος αριθμός εξαρτημάτων, υποσυγκροτημάτων και προϊόντων δεν μπορούσε να ξεπεράσει τα 25, αναγκαστήκαμε να ομαδοποιήσουμε μερικά από τα εξαρτήματα των προϊόντων. Τα τεχνητά (dummy) εξαρτήματα που προέκυψαν από την ομαδοποίηση διαθέτουν όλα τα χαρακτηριστικά της δρομολόγησης (routing) των επιμέρους εξαρτημάτων αντιμετωπίζοντας αθροιστικά τους χρόνους setup και επεξεργασίας.

Τα δέντρα ή IBOM (Indented Bill Of Materials) των δύο προϊόντων παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν. Το πρόθεμα ZK- , YK- και IK- στον κωδικό υποδηλώνει αντίστοιχα προϊόν, υποσυγκρότημα και εξάρτημα του προϊόντος. Οι β' ύλες και το συνδετικό υλικό (π.χ. σύρμα συγκόλλησης, πούδρα ηλεκτροστατικής βαφής, πόμολα, κοχλίες, ροδέλες) δεν λαμβάνονται υπόψη στο IBOM . Το γεγονός αυτό δεν έχει επίδραση στην εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος, αν θεωρήσουμε ότι είναι διαθέσιμα από τους αντίστοιχους υποκατασκευαστές ή προμηθευτές τη στιγμή που απαιτούνται.

ΕΠΙΠΕΔΟ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΜΟΝΑΔΙΑΙΑ ΠΟΣΟΤΗΤΑ
0	ZK-OSK-B1	Μεταλλική Βιβλιοθήκη	1
1	ΥΚ-OSK-B1	Κυρίως σώμα Βιβλιοθήκης	1
2	ΙΚ-OSK-B4_5_11_13	Βάση Βιβλιοθήκης	1
2	ΙΚ-OSK-B1_2	Πλάτη Βιβλιοθήκης	1
2	ΙΚ-OSK-B12_14_17_18_19	Ενισχύσεις Βιβλιοθήκης	1
2	ΙΚ-OSK-B7_8_15_16	Οδηγοί τζαμιών-πορτών	1
2	ΙΚ-OSK-B20	Οροφή Βιβλιοθήκης	1
2	ΙΚ-OSK-B23_24	Πλαϊνά Βιβλιοθήκης	2
1	ΥΚ-OSK-B2	Ράφια Βιβλιοθήκης	3
1	ΥΚ-OSK-B3	Αριστερή πόρτα Βιβλιοθήκης	1
1	ΥΚ-OSK-B4	Δεξιά πόρτα Βιβλιοθήκης	1

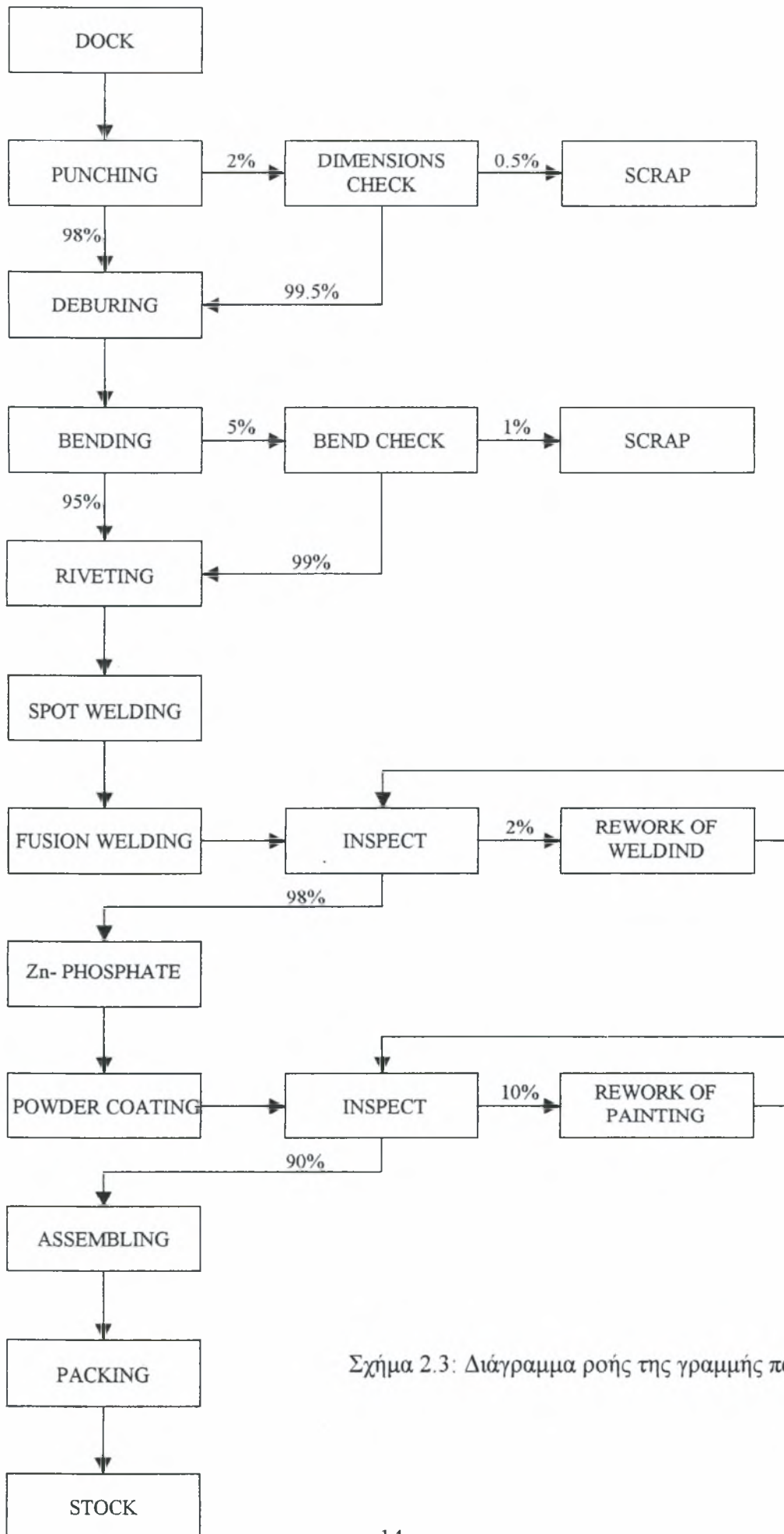
Πίνακας 2.3.1: IBOM Μεταλλικής Βιβλιοθήκης

ΕΠΙΠΕΔΟ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΜΟΝΑΔΙΑΙΑ ΠΟΣΟΤΗΤΑ
0	ZK-OSK-A1	Μεταλλική Αρχαιοθήκη	1
1	ΥΚ-OSK-A1	Κυρίως σώμα Αρχαιοθήκης	1
2	ΙΚ-OSK-A3_4_13_14	Βάση Αρχαιοθήκης	1
2	ΙΚ-OSK-A1_2	Πλάτη Αρχαιοθήκης	2
2	ΙΚ-OSK-A5_15_17_18_26	Ενισχύσεις Αρχαιοθήκης	1
2	ΙΚ-OSK-A7_8	Οδηγοί πορτών	1
2	ΙΚ-OSK-A19	Οροφή Αρχαιοθήκης	1
2	ΙΚ-OSK-B22_23	Πλαϊνά Αρχαιοθήκης	2
1	ΥΚ-OSK-A2	Ράφια Αρχαιοθήκης	8
1	ΥΚ-OSK-A3	Αριστερή πόρτα Αρχαιοθήκης	1
1	ΥΚ-OSK-A4	Δεξιά πόρτα Αρχαιοθήκης	1

Πίνακας 2.3.2: IBOM Μεταλλικής Αρχαιοθήκης

Το διάγραμμα ροής της γραμμής παραγωγής φαίνεται στο Σχήμα 2.3.





Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής της γραμμής παραγωγής

Στο MPX το routing ενός προϊόντος ξεκινά πάντα από μια τεχνητή (dummy) λειτουργία που καλείται DOCK και υποδηλώνει την είσοδο του στη γραμμή παραγωγής και τελειώνει με την τεχνητή (dummy) λειτουργία STOCK που υποδηλώνει την έξοδό του από τη γραμμή. Ανάλογα με τη δρομολόγησή του, το κάθε εξάρτημα, υποσυγκρότημα ή προϊόν μπορεί να περάσει από όλα ή μέρος των μηχανημάτων της γραμμής παραγωγής που περιγράφονται στο διάγραμμα ροής, ξεκινώντας πάντα από το DOCK και τελειώνοντας στο STOCK.

## Κεφάλαιο 3 Συνοπτική Περιγραφή του Λογισμικού MPX

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρουμε τα βασικά χαρακτηριστικά και τις υποθέσεις της τεχνικής RMT που χρησιμοποιεί το λογισμικό MPX.

Στο Υποκεφάλαιο 3.1, γίνεται μια αναφορά στα στατικά και τα δυναμικά μοντέλα. Οι έξοδοι του MPX αποτελούν μέσες τιμές της σταθερής μακροπρόθεσμα (steady state) κατάστασης των δυναμικών μοντέλων. Στο Υποκεφάλαιο 3.2, αναφέρεται η πειθαρχία first come first served (FCFS), ενώ στο Υποκεφάλαιο 3.3 γίνεται λόγος για την αντιμετώπιση από το MPX των χώρων προσωρινής αποθήκευσης (buffers) και του μπλοκαρίσματος που προκαλούν αυτοί σε ένα σύστημα. Στο Υποκεφάλαιο 3.4 εξετάζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του MPX συγκριτικά με τα πιο λεπτομερή μοντέλα προσομοίωσης και τέλος στο Υποκεφάλαιο 3.5 αναφέρονται μερικές περιπτώσεις όπου δεν ενδείκνυται η χρήση του MPX. Ολοκληρώνουμε με τα συμπεράσματα του κεφαλαίου στο Υποκεφάλαιο 3.6.

### 3.1 Στατικά και Δυναμικά Μοντέλα

Τα στατικά μοντέλα απλώς συγκρίνουν το σύνολο του χρόνου εργασίας που αθροίζεται σε ένα πόρο (εργατικό δυναμικό ή μηχανήμα) με τον διαθέσιμο χρόνο του πόρου αυτού. Τα μοντέλα αυτά αν και επισημαίνουν τα βασικά μπουτλιαρίσματα (bottleneck) του συστήματος, αγνοούν τις δυναμικές αλληλεπιδράσεις και αβεβαιότητες στις οποίες στηρίζονται οι χρόνοι αναμονής για πόρους, οπότε δε μπορούν να εκτιμήσουν σωστά το χρόνο ροής (flow time) των προϊόντων.

Τα δυναμικά μοντέλα βασισμένα στη θεωρία των δικτύων ουρών μοντελοποιούν όλες αυτές τις αλληλεπιδράσεις με έναν συγκεντρωτικό τρόπο. Οι χρόνοι άφιξης των εργασιών στα κέντρα εργασίας δεν είναι πλήρως γνωστοί και οι χρόνοι επεξεργασίας μπορεί να ποικίλουν από εργασία σε εργασία και μερικές φορές από κομμάτι σε κομμάτι μέσα στην ίδια παρτίδα. Τα διάφορα προϊόντα συναγωνίζονται για την εύρεση πόρων (εξοπλισμού και ανθρωπίνου δυναμικού). Όλα τα παραπάνω έχουν σημαντική επίδραση στην απόδοση του συστήματος. Τα δυναμικά μοντέλα εκτιμούν την συγκεντρωτική “steady state” απόδοση του συστήματος, προβλέπουν δηλαδή τη συμπεριφορά του μακροπρόθεσμα. Τυπικά μεγέθη μέτρησης της απόδοσης του συστήματος είναι η χρησιμοποίηση του εξοπλισμού και του εργατικού δυναμικού (equipment and labor utilization), ο μέσος αριθμός εργασιών σε εξέλιξη (work-in-process ή WIP) σε σχέση με το προϊόν και με το κέντρο εργασίας και ο χρόνος παραμονής του προϊόντος στο σύστημα (product flow time).

Οι έξοδοι του MPX, όπως είναι το WIP και το flow time, με τις οποίες εκτιμάται η απόδοση του συστήματος, είναι οι μέσες τιμές της steady state κατάστασης.

### **3.2 First Come First Served**

Το MPX χρησιμοποιεί την πειθαρχία first come first served (FCFS) σε όλα τα group του εξοπλισμού. Αυτό σημαίνει ότι οι παρτίδες εξυπηρετούνται με τη σειρά άφιξής τους στα μηχανήματα. Επίσης δεν μοντελοποιείται κάποια άλλη μέθοδος προτεραιοτήτων όσον αφορά στα προϊόντα.

### **3.3 Προσωρινή Αποθήκευση και Μπλοκάρισμα**

Το MPX δεν λαμβάνει υπόψη τις συνέπειες περιορισμένων χώρων αποθήκευσης (buffers) στο σύστημα. Όταν ολοκληρώνεται η επεξεργασία ενός κομματιού σε ένα μηχάνημα,

θεωρείται ότι υπάρχει χώρος για την έξοδο του κομματιού ώστε να μην έχουμε μπλοκάρισμα. Η υπόθεση αυτή δεν έχει σημαντική επίδραση σε μια πραγματική μη αυτοματοποιημένη γραμμή παραγωγής. Εντούτοις το MPX μοντελοποιεί το χρόνο αναμονής των προϊόντων πριν (ή μετά) το χρόνο επεξεργασίας σε ένα μηχάνημα.

### **3.4 Ακρίβεια και Ανάλυση Ευαισθησίας**

Έχει αναφερθεί ότι οι εκτιμήσεις του MPX για τη χρησιμοποίηση του εξοπλισμού και του εργατικού δυναμικού αποκλίνουν μόλις 5% από αυτές που προέρχονται από τα λεπτομερή μοντέλα προσομοίωσης και αντίστοιχα οι εκτιμήσεις για το WIP και το flow time αποκλίνουν το πολύ 15%. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η ακρίβεια των δεδομένων σε μια βιομηχανία δεν είναι τόσο σημαντική, η εφαρμογή του MPX ως εργαλείο στρατηγικής και λήψης αποφάσεων είναι εξίσου αξιόλογη με την εφαρμογή κάποιου πιο λεπτομερούς μοντέλου σε αυτά τα δεδομένα. Μπορούμε επίσης κάνοντας ανάλυση ευαισθησίας (αλλάζοντας δηλαδή κάποιες παραμέτρους και παρακολουθώντας την επίδρασή τους στην απόδοση του συστήματος) να επικεντρώσουμε την προσοχή μας στα σημεία που απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια.

### **3.5 Περιπτώσεις όπου δεν Ενδείκνυται το MPX**

Στη συνέχεια παρουσιάζονται περιπτώσεις όπου δεν ενδείκνυται η χρήση του MPX ως εργαλείο ανάλυσης:

- Η μελέτη βραχυπρόθεσμων επιδράσεων που επιφέρει μια αλλαγή στο σύστημα, όπως είναι το ξεκίνημα ή το σταμάτημα του συστήματος, ή η απάντηση στο ερώτημα “ποιο προϊόν ακολουθεί”.

- Η μελέτη σε πραγματικό χρόνο στρατηγικών ελέγχου, όπως είναι ο προγραμματισμός εργασιών και οι αποφάσεις διαδοχής, οι ρυθμίσεις προτεραιοτήτων και η στρατηγική προγραμματισμού επισκευών.
- Όταν υπάρχει μεγάλο μπλοκάρισμα σε μια συζευγμένη γραμμή μεταφοράς.
- Η μελέτη ενός λεπτομερούς διαχειριστικού συστήματος προϊόντων, όπου το μέγεθος των ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων και ο προγραμματισμός των εργασιών είναι κρίσιμα στην απόδοση του συστήματος.
- Η μοντελοποίηση μιας γραμμής παραγωγής που βιομηχανοποιεί μη διακριτά κομμάτια και τα προϊόντα της μετρούνται ως ποσότητες μάζας ή όγκου, όπως είναι μια βιομηχανία χρωμάτων ή χημικών.

### 3.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήσαμε τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνικής RMT και κατ' επέκταση του λογισμικού MPX και διαπιστώσαμε ότι αν και υφίστανται περιπτώσεις δύσκολης ή ανέφικτης εφαρμογής του, το παραπάνω λογισμικό αποτελεί ένα αξιόλογο, σχετικά ακριβές και γρήγορο εργαλείο προσομοίωσης και εκτίμησης της απόδοσης των δυναμικών αλληλεπιδράσεων μιας γραμμής παραγωγής.

## Κεφάλαιο 4 Μοντελοποίηση της Γραμμής Παραγωγής με το MPX

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσουμε τους τρόπους μοντελοποίησης των κυριότερων στοιχείων μιας παραγωγικής διαδικασίας και κατ' επέκταση της εν λόγω γραμμής παραγωγής στο MPX.

Στο Υποκεφάλαιο 4.1, αναλύεται η μεταβλητότητα των δεδομένων εισόδου του συστήματος και ειδικότερα η μεταβλητότητα στους χρόνους επεξεργασίας (παράγραφος 4.1.1), η μεταβλητότητα στη ζήτηση των προϊόντων (παράγραφος 4.1.2) και τέλος η μεταβλητότητα στη δρομολόγηση (routing) των προϊόντων (παράγραφος 4.1.3). Στο Υποκεφάλαιο 4.2, καθορίζεται και διαχωρίζεται η έννοια της παρτίδας από την έννοια της ομάδας μεταφοράς. Τα επόμενα τρία Υποκεφάλαια αναφέρονται στον εξοπλισμό. Το Υποκεφάλαιο 4.3 στη λειτουργία, το Υποκεφάλαιο 4.4 στις βλάβες αναλύοντας τους χρόνους MTTF και MTTR και το Υποκεφάλαιο 4.5 στις υπερωρίες του εξοπλισμού. Στη συνέχεια έχουμε το Υποκεφάλαιο 4.6 που αναφέρεται στο εργατικό δυναμικό και το 4.7 που αναφέρεται στις υπερωρίες του. Στο Υποκεφάλαιο 4.8 εξετάζεται η επίδραση των συντελεστών στους χρόνους επεξεργασίας και setup. Στο Υποκεφάλαιο 4.9 αναλύεται η δρομολόγηση (routing) ενός προϊόντος στη γραμμή παραγωγής και ο τρόπος υπολογισμού του χρόνου ροής (flow time). Ακολουθεί το Υποκεφάλαιο 4.10 που αναφέρεται στη διαχείριση του scrap και ολοκληρώνουμε με τα συμπεράσματα του κεφαλαίου στο Υποκεφάλαιο 4.11.

## 4.1 Μοντελοποίηση της Μεταβλητότητας

Το MPX αν και δίνει στις εξόδους του μέσες τιμές, μοντελοποιεί την στατιστική μεταβλητότητα του συστήματος μέσα από τα δεδομένα εισόδου με τους παρακάτω τρόπους:

### 4.1.1 Μεταβλητότητα στους Χρόνους Επεξεργασίας

Οι χρόνοι επεξεργασίας για το ίδιο κομμάτι ποικίλουν τόσο για τους εργάτες (εξαιτίας παραγόντων όπως η δυσκολία συναρμολόγησης, η κούραση, έλλειψη συνδετικού υλικού κ.α.), όσο και για τα μηχανήματα (διαφορά τεχνικής από εργάτη σε εργάτη κ.α.). Αν σχεδιάζαμε ένα ιστόγραμμα όλων των δυνατών χρόνων για μια συγκεκριμένη εργασία, θα μπορούσαμε να εκτιμήσουμε τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση αυτών των χρόνων. Ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς το μέσο ονομάζεται συντελεστής μεταβλητότητας CV (Coefficient of Variation)

Τα δεδομένα εισόδου στο MPX είναι οι μέσοι χρόνοι για κάθε εργασία. Εντούτοις μπορούμε να προσδιορίσουμε και το συντελεστή μεταβλητότητας CV για μια ομάδα μηχανημάτων ή εργατών. Αρχικά το MPX θεωρεί  $CV=0,3$  (τιμή που αλλάζει κατά το δοκούν) για όλους τους χρόνους επεξεργασίας- μηχανημάτων και εργατών (αυτό σημαίνει ότι η τυπική απόκλιση είναι το 30% του μέσου, γεγονός που ισχύει ως επί το πλείστον στις εργασίες βιομηχανοποίησης). Επιπρόσθετα μπορούμε να μεταβάλουμε το CV για μία ομάδα μηχανών ή εργατών πολλαπλασιάζοντας την αρχική τιμή (π.χ. 0,3) με έναν άλλο συντελεστή, έχοντας όμως πάντα το ίδιο CV για όλες τις εργασίες της ίδιας ομάδας μηχανών ή εργατών.

Στη συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής θεωρήσαμε  $CV_{\text{Equipment}}=0,3$ .



#### 4.1.2 Μεταβλητότητα στους Χρόνους Έκλυσης των Παραγγελιών των Προϊόντων

Η μεταβλητότητα στους χρόνους έκλυσης (release) των παραγγελιών εξαρτάται κυρίως από δύο λόγους: Τη μεταβλητότητα στην τελική ζήτηση (παραγγελίες πελάτη) και την αναξιόπιστη άφιξη των υλικών από τους προμηθευτές.

Αρχικά το MPX θεωρεί  $CV=0,3$  (τιμή που αλλάζει κατά το δοκούν) για όλους τους ενδιάμεσους χρόνους έκλυσης όλων των προϊόντων. Επιπρόσθετα μπορούμε να μεταβάλουμε το CV για ένα προϊόν πολλαπλασιάζοντας την αρχική τιμή (π.χ. 0,3) με έναν άλλο συντελεστή.

Μια σημαντική μεταβολή στη μέση ζήτηση κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης περιόδου είναι καλύτερα να μη μοντελοποιηθεί με αλλαγή του CV αλλά μεταβάλλοντας την τιμή της ζήτησης σε ένα what if σενάριο.

Στη συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής θεωρήσαμε  $CV_{Products}=0,3$ .

#### 4.1.3 Μεταβλητότητα στη Δρομολόγηση των Προϊόντων

Η μεταβλητότητα αυτή μπορεί να είναι το αποτέλεσμα διαφορετικής δρομολόγησης (π.χ. μετά την κοπή το 98% ενός προϊόντος στέλνεται για απογρέζωση και το υπόλοιπο 2% για διαστασιολογικό έλεγχο), πιθανών επισκευών, ή καταστροφής των προϊόντων.

### 4.2 Καθορισμός της Παρτίδας και της Ομάδας Μεταφοράς

Η παρτίδα (lot) στο MPX είναι η ποσότητα ενός προϊόντος που παράγεται σε ένα setup ενός μηχανήματος. Αν μία ποσότητα κομματιών μπορεί να μετακινηθεί από το ένα μηχάνημα στο επόμενο πριν ολοκληρωθεί η παρτίδα, η ποσότητα αυτή αποτελεί την ομάδα μεταφοράς (transfer batch). Η μετακίνηση της ομάδας μεταφοράς απαιτεί κάποιο χρόνο από τους πόρους

του συστήματος, οπότε όσο μικρότερη είναι η ομάδα μεταφοράς τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για τη μετακίνησή της. Στο τέλος της δρομολόγησης και πριν την αποστολή του προϊόντος μπορούμε, είτε να συλλέξουμε τις ομάδες μεταφοράς ώστε να σχηματιστεί ξανά η ποσότητα της παρτίδας, είτε να τις αποστείλουμε ως έχουν στον πελάτη.

Στο MPX η παρτίδα ακολουθεί τους εξής κανόνες:

- Όταν μια παρτίδα φτάνει σε μια ομάδα μηχανημάτων μόνο ένα μηχάνημα της ομάδας χρησιμοποιείται να εξυπηρετήσει ολόκληρη την παρτίδα.
- Ο χρόνος setup ενός μηχανήματος ή ενός εργάτη πάντα λαμβάνεται υπόψη σε μια παρτίδα όταν ξεκινά η επεξεργασία της. Αυτό σημαίνει ότι το MPX δεν μπορεί να γνωρίζει αν το ίδιο προϊόν πέρασε από το κέντρο εργασίας προηγουμένως για να μην υπολογίσει ξανά τον χρόνο setup.
- Τα κομμάτια της παρτίδας παραμένουν αναπόσπαστα εκτός αν έχουν οριστεί ομάδες μεταφοράς. Για παράδειγμα θεωρούμε ότι το μέγεθος της παρτίδας είναι 100 κομμάτια τα οποία διακινούνται στη γραμμή παραγωγής σε παλέτες των 20 κομματιών. Αυτό σημαίνει ότι το MPX διατηρεί το setup σε κάθε μηχάνημα μέχρι να ολοκληρωθούν τα 100 κομμάτια της ίδιας παρτίδας προϊόντος, χωρίς να μπορεί κάποιο άλλο προϊόν να μεσολαβήσει μεταξύ δύο ομάδων μεταφοράς του ίδιου προϊόντος.

Στη συγκεκριμένη γραμμή μεταφοράς έχει οριστεί μέγεθος παρτίδων 40 κομμάτια και δεν έχουν ληφθεί υπόψη ομάδες μεταφοράς.

### 4.3 Μοντελοποίηση της Λειτουργίας του Εξοπλισμού

Τα προϊόντα μετακινούνται στη γραμμή παραγωγής σε παρτίδες (ή ομάδες μεταφοράς). Οι παρτίδες εξυπηρετούνται στα μηχανήματα με την πειθαρχία first come first served. Όταν μια παρτίδα φτάσει σε ένα μηχάνημα, όλα τα κομμάτια της πρέπει να επεξεργαστούν πριν το μηχάνημα αρχίσει την επεξεργασία της επόμενης παρτίδας.

Όταν ένα μηχάνημα αρχίσει την επεξεργασία μιας καινούριας παρτίδας απαιτείται κάποιος χρόνος setup για το μηχάνημα  $\{Equip. Setup Time [Lot]\}$ . Ο χρόνος αυτός προσμετράται μία φορά ανά παρτίδα. Όταν ολοκληρωθεί το setup, ξεκινά η επεξεργασία του προϊόντος. Μερικές φορές (π.χ. στην ύπαρξη ενός φούρνου) μπορεί να χρειαστεί να προσδιοριστεί ο χρόνος επεξεργασίας για όλη την παρτίδα  $\{Equip. Run Time [Lot]\}$ . Ο χρόνος αυτός προσμετράται επίσης μία φορά ανά παρτίδα. Έπειτα στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ομάδες μεταφοράς, για κάθε μία από αυτές το μηχάνημα αφιερώνει τον χρόνο  $\{Equip. Setup Time [Tbatch]\}$  για το setup, συν τον χρόνο  $\{Equip. Run Time [Tbatch]\}$  για την επεξεργασία. Στο τέλος υπάρχει και ο χρόνος setup  $\{Equip. Setup Time [Piece]\}$  καθώς και ο χρόνος επεξεργασίας για κάθε κομμάτι  $\{Equip. Run Time [Piece]\}$  μέχρι να ολοκληρωθεί η παρτίδα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως και στη συγκεκριμένη γραμμή μεταφοράς, πολλές από τις παραπάνω τιμές είναι μηδενικές και μόνο οι χρόνοι  $\{Equip. Setup Time [Lot]\}$  και  $\{Equip. Run Time [Piece]\}$  είναι μη μηδενικοί.

Κατά τη διάρκεια μιας προετοιμασίας (setup) ή κάποιας επεξεργασίας ένα μηχάνημα μπορεί να πάθει βλάβη και να χρειαστεί επισκευή. Επίσης για τη διενέργεια ενός setup ή μιας επεξεργασίας το μηχάνημα μπορεί να χρειάζεται την παρουσία κάποιου εργάτη. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κάποιος εργάτης διαθέσιμος θα υπάρξει καθυστέρηση οφειλόμενη σε αναμονή προσωπικού  $[Wait for Labor]$ .

Συνοψίζοντας ένα μηχάνημα μπορεί να βρεθεί σε μία από τις εξής καταστάσεις: προετοιμασία (setup), επεξεργασία (run), επισκευή (repair) και αναμονή προσωπικού (wait for labor), οι οποίες και απεικονίζονται στο γράφημα χρησιμοποίησης του μηχανήματος.

#### 4.4 Βλάβες του Εξοπλισμού

Οι βλάβες στον εξοπλισμό οδηγούν σε αύξηση της μεταβλητότητας των αφίξεων, της εξυπηρέτησης και των αναχωρήσεων των προϊόντων. Υπάρχουν δύο μεγέθη που χαρακτηρίζουν την αξιοπιστία ενός μηχανήματος. Ο μέσος χρόνος μεταξύ των βλαβών (Mean Time To Failure) και ο μέσος χρόνος επισκευής (Mean Time To Repair).

Ο χρόνος μεταξύ βλαβών είναι ο χρόνος από την ολοκλήρωση της τελευταίας επισκευής μέχρι την ύπαρξη της νέας βλάβης, εκτός από τον τυχόν ενδιάμεσο χρόνο αδράνειας. Η μέση τιμή του παραπάνω χρόνου είναι το MTTF. Το MPX θεωρεί ότι ένα μηχάνημα μπορεί να πάθει βλάβη μόνο όταν είναι απασχολημένο, δηλαδή στο setup ή στο χρόνο επεξεργασίας της παρτίδας. Κάθε μηχάνημα μπορεί να πάθει βλάβη ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα στο ίδιο group. Η τιμή MTTF αφορά ένα μηχάνημα του ίδιου group. Το αντίστοιχο ισχύει για το MTTR, που είναι ο μέσος χρόνος επισκευής για ένα μηχάνημα. Το MTTF είναι θετικός αριθμός διαφορετικός από το 0, ενώ το MTTR μπορεί να είναι και 0 (στην περίπτωση ενός μηχανήματος χωρίς βλάβη). Το MPX θεωρεί ότι οι χρόνοι μεταξύ των βλαβών και των επισκευών ακολουθούν εκθετική κατανομή.

Οι χρόνοι MTTF και MTTR του εξοπλισμού της συγκεκριμένης γραμμής παραγωγής δίνονται στον Πίνακα 2.1.

## 4.5 Υπερωρίες στον Εξοπλισμό

Επειδή το MPX μοντελοποιεί την συνολική δυναμικότητα της γραμμής, διαχειρίζεται τις τυχόν υπερωρίες ως συνολικές επιπλέον διαθέσιμες ώρες εργασίας. Έτσι η ύπαρξη υπερωριών σε ένα μηχάνημα σημαίνει ότι αυξάνονται οι διαθέσιμες ώρες του μηχανήματος για να ολοκληρώσει την εργασία του. Αν για παράδειγμα θεωρήσουμε 25% υπερωρία σε ένα μηχάνημα που εργάζεται 8 ώρες την ημέρα, τότε έχουμε επιπρόσθετα άλλες 2 εργάσιμες ώρες ( $8h \times 25\% = 2h$ ) για το μηχάνημα. Αν σε ένα εργοστάσιο εργάζεται κανονικά μία βάρδια τη μέρα κάθε εβδομάδα και επιθυμούμε να μοντελοποιήσουμε την ύπαρξη μιας επιπλέον βάρδιας το Σάββατο για ένα group μηχανημάτων, προσθέτουμε 20% υπερωρία σε αυτό το group. Η υπερωρία μπορεί να είναι και αρνητική για να προσδιορίσουμε τη μείωση των διαθέσιμων εργατωρών.

Στη συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής η ύπαρξη απογευματινής βάρδιας σε ένα κοπτικό μηχάνημα (2 κοπτικά στο group) μοντελοποιείται με 50% υπερωρία σε αυτό το group.

Οι υπερωρίες στον εξοπλισμό έχουν άμεση επίδραση στο χρόνο ροής (flow time) των προϊόντων που επεξεργάζονται στα αντίστοιχα μηχανήματα. Οι επιπλέον ώρες προσθέτουν δυναμικότητα και μειώνουν το χρόνο αναμονής. Η αναφορά εξόδου του MPX για το χρόνο ροής (flow time) εκφράζεται σε μονάδες κανονικού χρόνου εργασίας, οπότε κάθε θετική υπερωρία θα μείωνε τις ώρες κανονικής λειτουργίας και κατά συνέπεια το χρόνο ροής (flow time) των προϊόντων που περνάνε από αυτόν τον εξοπλισμό. Έτσι απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην ανάλυση των αποτελεσμάτων του χρόνου ροής (flow time), γιατί στον εξοπλισμό με υπερωρίες η κανονική ώρα λειτουργίας είναι προσαυξημένη με το ποσοστό των υπερωριών.

## 4.6 Μοντελοποίηση του Εργατικού Δυναμικού

Το MPX θεωρεί τον εξοπλισμό ως τον πρωτεύοντα πόρο σε μια παραγωγική διαδικασία. Αυτό σημαίνει ότι στη δρομολόγηση (routing) ενός προϊόντος, πρώτα εξασφαλίζεται η ύπαρξη του απαιτούμενου μηχανήματος και μετά αναζητείται το κατάλληλο προσωπικό.

Το προσωπικό χρειάζεται σε τρεις περιπτώσεις: την προετοιμασία (setup), την επεξεργασία και την μετακίνηση πιθανών ομάδων μεταφοράς. Σε κάθε group εξοπλισμού που απαιτεί προσωπικό, ορίζεται ένα group εργατών που είναι υπεύθυνο για τα setup και την διαδικασία της επεξεργασίας σ' αυτό το group μηχανών (Πίνακας 2.1). Σε κάθε group προσωπικού ορίζεται ένας ή περισσότεροι εργάτες που είναι υπεύθυνοι για τη λειτουργία ενός ή περισσοτέρων group μηχανών (Πίνακας 2.2). Επίσης είναι δυνατό σε μια αυτοματοποιημένη γραμμή παραγωγής να μην απαιτείται εργατικό δυναμικό για τη λειτουργία κάποιων group μηχανών. Στις περιπτώσεις όπου έχουμε περισσότερες μηχανές από χειριστές θα προκληθούν καθυστερήσεις λόγω έλλειψης προσωπικού.

Το MPX ενδιαφέρεται για το συνολικό χρόνο απαίτησης εργατών σε κάποιο group μηχανών απλοποιώντας την προσομοίωση παροδικής ή εναλλασσόμενης απασχόλησής τους σε αυτές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διαδικασίες αλληλεπίδρασης προσωπικού και μηχανών:

- **Setup:** Το MPX επιτρέπει τον ορισμό διαφορετικού χρόνου setup στους εργάτες από τον αντίστοιχο χρόνο setup του εξοπλισμού. Αυτό δικαιολογείται αν αναλογιστούμε ότι υπάρχουν μηχανήματα στα οποία απαιτείται ζέσταμα χωρίς την παρουσία εργατών ή ότι υπάρχουν μηχανές που χρειάζονται δύο ή περισσότερους εργάτες για το setup τους. Σε γράφημα εξόδου η χρησιμοποίηση του προσωπικού στα setup [*Labor utilization in Setup*]

απεικονίζει το συνολικό ποσοστό του χρόνου (%) που απαιτείται από το συγκεκριμένο group προσωπικού να πραγματοποιήσει τα setup σε όλες τις μηχανές της αρμοδιότητάς του.

- **Επεξεργασία:** Ο χρόνος επεξεργασίας των εργατών μπορεί επίσης να είναι μικρότερος, ίσος ή μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο του εξοπλισμού. Σε γράφημα εξόδου η χρησιμοποίηση του προσωπικού στην επεξεργασία [*Labor utilization in Run*] απεικονίζει το συνολικό ποσοστό του χρόνου (%) που απαιτείται από το συγκεκριμένο group προσωπικού να πραγματοποιήσει την επεξεργασία των προϊόντων σε όλες τις μηχανές της αρμοδιότητάς του.
- **Βλάβες εξοπλισμού:** Το προσωπικό στο μοντέλο του MPX δεν είναι υπεύθυνο για τις επισκευές των μηχανημάτων, οι οποίες θεωρείται ότι γίνονται από εξωτερικούς πόρους. Έτσι αν κάποιο μηχάνημα πάθει βλάβη και επισκευάζεται, το προσωπικό μπορεί να εργάζεται στις υπόλοιπες μηχανές αρμοδιότητάς του ή να παραμένει αδρανές.
- **Προτεραιότητες:** Όταν ένας εργάτης είναι υπεύθυνος για πολλές μηχανές το MPX εφαρμόζει την πολιτική “attention sharing” ή αλλιώς, ο εργάτης αυτός πρέπει να μοιράσει το χρόνο του μεταξύ των μηχανών της άμεσης αρμοδιότητάς του. Έτσι στην περίπτωση που ο εργάτης αυτός πραγματοποιεί ένα χρονοβόρο setup σε μια μηχανή και προκύψει αναμονή προσωπικού σε μια άλλη μηχανή για μια εργασία που απαιτεί μικρό χρόνο, θα περιμένει μέχρι να βρεθεί η κατάλληλη ευκαιρία να αφήσει την πρώτη μηχανή και να ολοκληρώσει την μικρή εργασία στη δεύτερη μηχανή. Στο μεσοδιάστημα η πρώτη μηχανή θα βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής προσωπικού μέχρι ο εργάτης να επιστρέψει από τη δεύτερη μηχανή. Γι αυτό το λόγο όταν ο χρόνος

ενός εργάτη μοιράζεται σε πολλές μηχανές, όλοι οι χρόνοι (setup και επεξεργασίας) αυξάνονται λίγο αναλογικά.

- **Μη διαθεσιμότητα προσωπικού:** Αυτό συμβαίνει όταν το προσωπικό βρίσκεται σε διάλειμμα. Σ' αυτή την περίπτωση οι μηχανές είτε βρίσκονται σε αναμονή προσωπικού είτε παραμένουν αδρανείς.

#### 4.7 Υπερωρίες στο Προσωπικό

Από το γράφημα εξόδου της χρησιμοποίησης εξοπλισμού και τη στήλη “αναμονή για προσωπικό” [Wait for labor] μπορούμε να παρατηρήσουμε αν το προσωπικό αποτελεί σημαντικό μπουτιλιάρισμα και να αυξήσουμε τις συνολικές του διαθέσιμες ώρες προσθέτοντας υπερωρίες.

#### 4.8 Επίδραση των Συντελεστών για τους Χρόνους Επεξεργασίας και Setup

Το MPX θεωρεί ότι κάθε βελτίωση στο χρόνο επεξεργασίας ή προετοιμασίας (setup) ενός group εξοπλισμού που επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο συντελεστή [Equip. Run/Setup Time Factor], επιδρά αναλογικά και στον αντίστοιχο χρόνο του προσωπικού γι' αυτό το group του εξοπλισμού. Οι χρόνοι του προσωπικού στα υπόλοιπα group του εξοπλισμού δεν επηρεάζονται από αυτή την αλλαγή.

Οποιαδήποτε αλλαγή στους συντελεστές των χρόνων επεξεργασίας ή setup ενός group προσωπικού [Labor. Run/Setup Time Factor] επιδρά αναλογικά μόνο στους χρόνους του προσωπικού σε όλες τις μηχανές που έχει οριστεί. Έτσι για παράδειγμα ένας setup συντελεστής 0,3 σε ένα group εξοπλισμού και ένας setup συντελεστής 0,5 για το αντίστοιχο group προσωπικού, ισοδυναμεί με ένα setup συντελεστή 0,15 ( $0,3 \times 0,5$ ) για το συγκεκριμένο group προσωπικού στον παραπάνω εξοπλισμό.



Η αλλαγή στους συντελεστές των χρόνων επεξεργασίας ή προετοιμασίας (setup) είναι πολύ χρήσιμη στα what if σενάρια.

#### 4.9 Μοντελοποίηση του Flow Time των Προϊόντων

Το MPX θεωρεί ότι η ροή ενός προϊόντος σε μια γραμμή παραγωγής ακολουθεί την κάτωθι ακολουθία:

- i. Το προϊόν ψάχνει το επόμενο group εξοπλισμού στη δρομολόγησή του και μετακινείται στην ουρά αναμονής του.
- ii. Περιμένει στην ουρά για το πρώτο διαθέσιμο μηχάνημα αυτού του group.
- iii. Όταν ένα μηχάνημα είναι διαθέσιμο (δεν έχει πάθει βλάβη ή δεν εξυπηρετεί άλλο προϊόν), ξεκινά το setup του μηχανήματος γι' αυτό το προϊόν.
- iv. Αν είναι απαραίτητο και προσωπικό για το setup, περιμένει (αν χρειάζεται) για προσωπικό.
- v. Κάνει χρήση του προσωπικού μέχρι να ολοκληρωθεί το setup.
- vi. Ξεκινά η επεξεργασία για κάθε κομμάτι της παρτίδας του προϊόντος.
- vii. Αν είναι απαραίτητο και προσωπικό για την επεξεργασία, περιμένει (αν χρειάζεται) για προσωπικό.
- viii. Κάνει χρήση του προσωπικού μέχρι να ολοκληρωθεί η επεξεργασία όλων των κομματιών στην παρτίδα.
- ix. Αν η επόμενη λειτουργία είναι "stock" πήγαινε στο επόμενο βήμα, αλλιώς πήγαινε στο βήμα i.

χ. Υπολογίζεται το συνολικό χρόνο ροής (flow time) γι' αυτό το προϊόν

Το MPX μας δίνει το συνολικό χρόνο παραμονής ενός προϊόντος στο σύστημα (flow time), καθώς και τις κάτωθι πέντε συνιστώσες του:

- Η αναμονή για εξοπλισμό [Wait for Equipment] μας δίνει το σύνολο του χρόνου που περιμένει μια παρτίδα ώστε να είναι διαθέσιμος ο εξοπλισμός (βήμα ii). Στο χρόνο αυτό προστίθεται και ο χρόνος βλάβης ενός μηχανήματος κατά τη διάρκεια των βημάτων iii και viii.
- Η αναμονή για προσωπικό [Wait for Labor] μας δίνει το σύνολο του χρόνου που περιμένει μια παρτίδα ώστε να είναι διαθέσιμο το προσωπικό (βήματα iv και vii)
- Το setup μας δίνει το σύνολο του χρόνου που περιμένει μια παρτίδα ώστε να πραγματοποιηθεί το setup στον εξοπλισμό (βήματα iii και v).
- Το [Run Time] μας δίνει το σύνολο του χρόνου επεξεργασίας ενός κομματιού σε όλες τις μηχανές της δρομολόγησής του.
- Η αναμονή για την παρτίδα [Wait for Lot] μας δίνει το σύνολο του χρόνου που περιμένει ένα κομμάτι μέχρι να επεξεργαστούν τα υπόλοιπα κομμάτια της παρτίδας.

Η χρήση μεγάλων παρτίδων στο σύστημα μπορεί να ανιχνευτεί από το μέγεθος [Wait for Lot]. Επίσης αν το μέγεθος [Wait for Equipment] είναι μεγάλο σε ένα μηχάνημα με μικρή χρησιμοποίηση τότε είτε έχουμε πολλές βλάβες στο μηχάνημα, είτε χρησιμοποιούμε μεγάλες παρτίδες, είτε συμβαίνουν και τα δύο.

#### 4.10 Διαχείριση των Ελαττωματικών Προϊόντων (Scrap)

Ένα προϊόν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ακατάλληλο (scrap) σε κάθε στάδιο της παραγωγικής του διαδικασίας είτε ως απλό εξάρτημα, είτε ως υποσυγκρότημα αποτελούμενο από διάφορα εξαρτήματα. Σε κάθε περίπτωση, η ύπαρξη ελαττωματικών προϊόντων (scrap) οδηγεί στην παραγωγή περισσότερων προϊόντων ώστε να καλυφθεί η ζήτηση, οπότε έχουμε άμεση επίδραση στην δυναμικότητα της γραμμής και στο χρόνο ροής (flow time).

Η ύπαρξη ελαττωματικών προϊόντων (scrap) μπορεί να μοντελοποιηθεί εύκολα με το MPX σε κάθε σημείο της γραμμής παραγωγής. Στα σημεία αυτά παρατηρείται αύξηση της χρησιμοποίησης των πόρων επειδή πρέπει να παραχθούν επιπλέον κομμάτια για να καλυφθεί η ζήτηση της περιόδου. Επίσης στα σημεία της δρομολόγησης (routing) όπου έχουμε scrap, το MPX μειώνει την ποσότητα της παρτίδας σε ποσοστό αντίστοιχο των ακατάλληλων κομματιών. Η μείωση της παρτίδας οδηγεί σε αύξηση των setup των πόρων του συστήματος.

Στο MPX συναντάμε τις κάτωθι περιπτώσεις υπολογισμού της ζήτησης και αντίστοιχα των ελαττωματικών (scrap) προϊόντων:

- Κατάλληλα εξαρτήματα που αποστέλλονται
- Κατάλληλα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται σε κατάλληλα υποσυγκροτήματα τα οποία και αποστέλλονται
- Κατάλληλα εξαρτήματα που ολοκληρώνουν την παραγωγική τους διαδικασία αλλά χάνονται λόγω μη καταλληλότητας του υποσυγκροτήματος στο οποίο χρησιμοποιούνται [Scraped In Assembly].
- Εξαρτήματα που απορρίπτονται κατά την παραγωγή τους [Scraped In Production].

Μετά από τη δημιουργία του δέντρου του προϊόντος (Indented Bill Of Materials-IBOM), το MPX υπολογίζει τον αριθμό των εξαρτημάτων που είναι απαραίτητα για το σχηματισμό των υποσυγκροτημάτων. Αν στη δρομολόγηση (routing) κάποιου υποσυγκροτήματος υπάρχουν ελαττωματικά (scrap), το MPX θεωρεί ως ακατάλληλα (scrap) και όλα τα εξαρτήματα που συνιστούν αυτό το υποσυγκρότημα. Από το ποσοστό των ακατάλληλων εξαρτημάτων υπολογίζεται το σύνολο που πρέπει να παραχθεί, ώστε να καλυφθεί η ζήτηση των υποσυγκροτημάτων.

#### **4.11 Συμπεράσματα**

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήσαμε τα σημαντικότερα στοιχεία μιας παραγωγικής διαδικασίας όπως είναι η μεταβλητότητα των δεδομένων, οι πόροι του συστήματος, η δρομολόγηση και ο χρόνος παραμονής των προϊόντων στο σύστημα και αναφέραμε τους τρόπους υλοποίησης του αντίστοιχου μοντέλου στο MPX. Αυτό συντελεί στην κατανόηση των υπολογισμών των μεγεθών, της παρουσίασης των αποτελεσμάτων και των γραφημάτων και γενικότερα της λογικής με την οποία αντιλαμβάνεται το MPX μια γραμμή παραγωγής.

## Κεφάλαιο 5 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε αριθμητικά αποτελέσματα από την εφαρμογή του λογισμικού στο υφιστάμενο σύστημα και σε τρία σενάρια (what if) βελτιστοποίησης της απόδοσης της γραμμής παραγωγής: την αγορά μιας καινούριας ρομποτικής στράντζας, την εγκατάσταση νέας μονάδας φωσφάτωσης – βαφής και την ελάττωση της ποσότητας των παρτίδων στα προϊόντα.

### 5.1 Υφιστάμενο Σύστημα

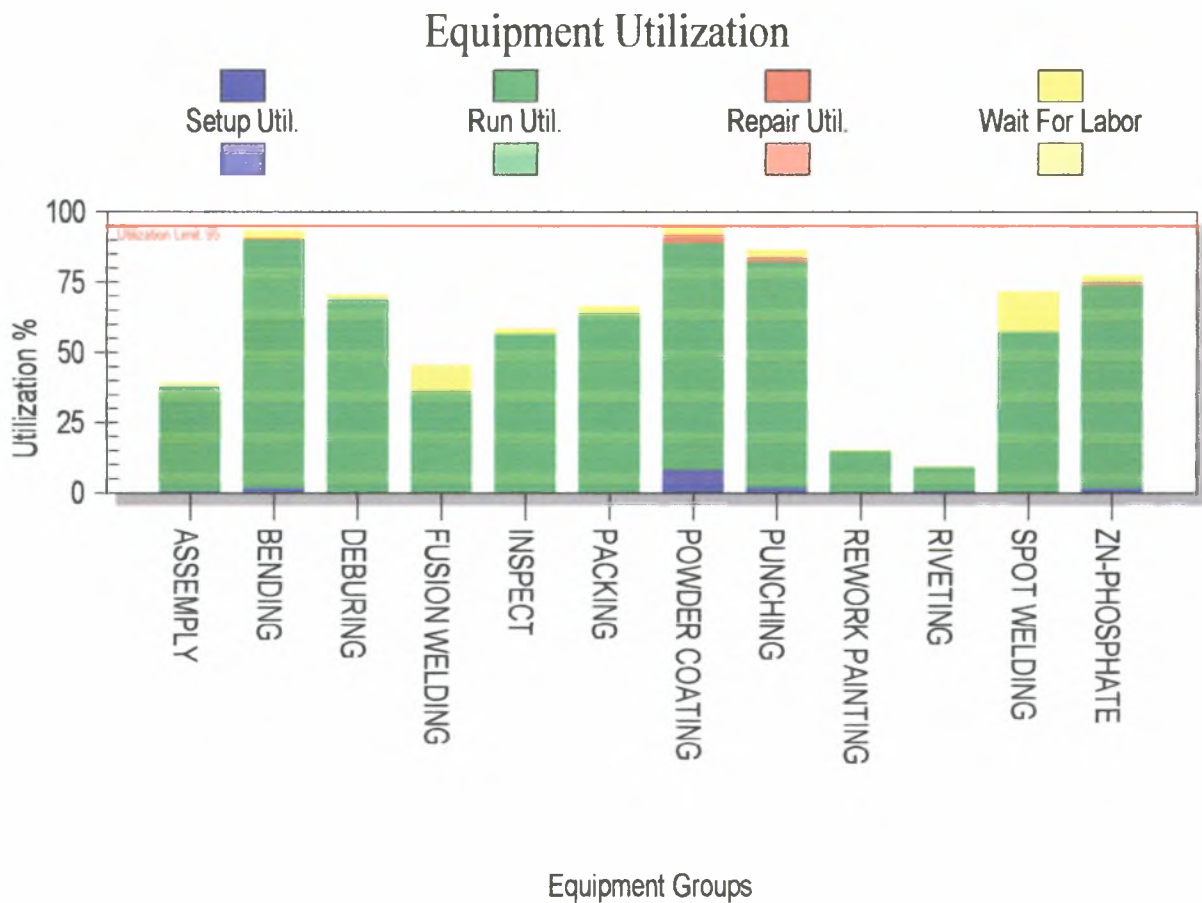
Το πρώτο αριθμητικό παράδειγμα αφορά στη μοντελοποίηση του υφιστάμενου συστήματος (basecase), η παραμετροποίηση του οποίου περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.

“Τρέχοντας” τα δεδομένα, παρατηρούμε αρχικά ότι το MPX μας προειδοποιεί σε ορισμένα προϊόντα ότι οι χρόνοι επεξεργασίας των στραντζών είναι μικρότεροι από τους αντίστοιχους χρόνους επεξεργασίας των χειριστών. Το γεγονός αυτό είναι φυσιολογικό αν αναλογιστούμε ότι ορισμένα κομμάτια λόγω του μεγέθους και του βάρους τους απαιτούν δύο άτομα για να τοποθετηθούν και να επεξεργαστούν στις στράντζες.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του MPX στο αριθμητικό παράδειγμα 1 φαίνονται όσον αφορά το συνολικό αριθμό εργασιών σε εξέλιξη (WIP) του συστήματος και το μέσο χρόνο ροής (flow time) των προϊόντων στον Πίνακα 5.1.1, τη χρησιμοποίηση του εξοπλισμού στο Σχήμα 5.1.1 και τη χρησιμοποίηση του εργατικού δυναμικού στο Σχήμα 5.1.2 που ακολουθούν.

Απόδοση συστήματος	Ποσότητα	Μ/Μ
WIP συστήματος	3.329	pieces
Μέσο flow time προϊόντων	3,6	days

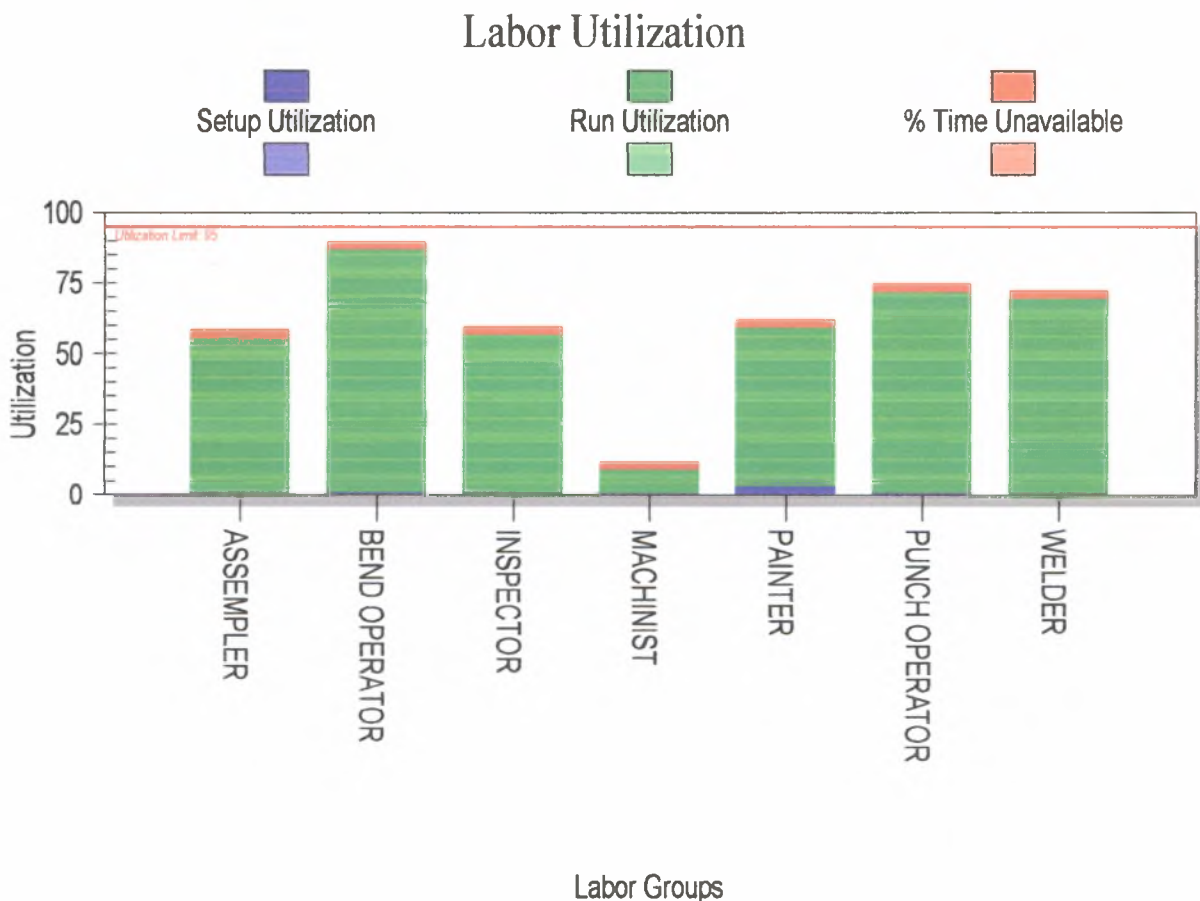
Πίνακας 5.2.1: Μέσο flow time των προϊόντων και WIP του συστήματος για το αριθμητικό παράδειγμα 1 (basecase).



Σχήμα 5.1.1: Χρησιμοποίηση του εξοπλισμού στο basecase.

Στο παραπάνω Σχήμα 5.1.1 παρατηρούμε τα εξής:

- Η χρησιμοποίηση του βαφείου, των στραντζών και των κοπτικών είναι πολύ μεγάλη, αγγίζει σχεδόν την τιμή 95% που θέσαμε ως άνω όριο προειδοποίησης για την υπέρβαση της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος.
- Στη φωσφάτωση αλλά κυρίως στο βαφείο έχουμε μεγάλο χρόνο προετοιμασίας (setup). Αυτό οφείλεται στο υφιστάμενο σύστημα διακίνησης και επεξεργασίας σ' αυτές τις εγκαταστάσεις, όπου για να βαφούν τα προϊόντα πρέπει πρώτα να τοποθετηθούν σε κρεμάστρες, οι οποίες μεταφέρονται χειροκίνητα και αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της φωσφάτωσης και της βαφής να ξεκρεμαστούν.
- Ο χρόνος επισκευής στη φωσφάτωση και στο βαφείο είναι αξιοσημείωτος.
- Στις στράντζες όπως και στα κοπτικά είναι εμφανής ο χρόνος προετοιμασίας (setup).



Σχήμα 5.1.2: Χρησιμοποίηση του προσωπικού στο basecase.

Στο παραπάνω Σχήμα 5.1.2 παρατηρούμε τα εξής:

- Η χρησιμοποίηση των χειριστών στις στράντζες είναι υψηλή
- Είναι εμφανής ο χρόνος προετοιμασίας (setup) για τους βαφείς

Αναλύοντας τις παρατηρήσεις των Σχημάτων 5.1.1 και 5.1.2 θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ότι παρά το γεγονός ότι υπάρχουν δύο βάρδιες στις στράντζες και τους αντίστοιχους χειριστές, η χρησιμοποίησή τους παραμένει υψηλή. Στο δεύτερο αριθμητικό παράδειγμα θα διερευνήσουμε το (what if) σενάριο αγοράς μιας νέας ρομποτικής στράντζας, στην οποία ο χρόνος επεξεργασίας θα είναι 50% μικρότερος και ο χρόνος προετοιμασίας (setup) θα είναι ίσος με το 30% του αντίστοιχου χρόνου στις υπάρχουσες συμβατικές στράντζες.

Στο τρίτο αριθμητικό παράδειγμα θα διερευνήσουμε το (what if) σενάριο εγκατάστασης νέων μονάδων φωσφάτωσης – βαφείου, οι οποίες θα είναι πιο αξιόπιστες, πιο γρήγορες στην επεξεργασία και θα έχουν μικρότερους χρόνους προετοιμασίας (setup) από τις αντίστοιχες υφιστάμενες μονάδες.

## **5.2 1<sup>ο</sup> Σενάριο: Αγορά Νέας Ρομποτικής Στράντζας**

Η διαφοροποίηση των δεδομένων εισόδου σε σχέση με το αρχικό (basecase) σύστημα περιγράφεται στον Πίνακα 5.2.1 που ακολουθεί:



A/A	Κατηγορία	Περιγραφή	Πεδίο	basecase	1ο σενάριο-αγορά νέας ρομποτικής στράντζας
1	Εξοπλισμός	Στράντζες (Bending)	Συντελεστής χρόνου επεξεργασίας (Run factor)	1	0,5
2			Συντελεστής χρόνου setup (Setup factor)	1	0,3
3			Mean Time To Failure (MTTF)	31.680	63.360
4			Mean Time To Repair (MTTR)	180	240
5			Αριθμός στο group (group size)	3	2
6	Εργατικό δυναμικό	Χειριστές Στραντζών	Συντελεστής χρόνου setup (Setup factor)	1	0,5
7			Αριθμός στο group (group size)	4	2
8	Προϊόν	IK-OSK-A1_2	Χρόνος επεξεργασίας χειριστών στις στράντζες ανά κομμάτι (Labor Run time per piece)	$r_1$	$r_1/2$
9		IK-OSK-A19		$r_2$	$r_2/2$
10		IK-OSK-A22_23		$r_3$	$r_3/2$
11		IK-OSK-B1_2		$r_4$	$r_4/2$
12		IK-OSK-B23_24		$r_5$	$r_5/2$
13		ΥΚ-OSK-A3		$r_6$	$r_6/2$
14		ΥΚ-OSK-A4		$r_7$	$r_7/2$

Πίνακας 5.2.1: Διαφοροποίηση των δεδομένων του 1<sup>ου</sup> σεναρίου σε σχέση με το basecase

Η αγορά μιας νέας ρομποτικής στράντζας επιδρά αρχικά στο μέσο χρόνο μεταξύ βλαβών (MTTF) ο οποίος διπλασιάζεται και στο μέσο χρόνο επισκευής (MTTR) των στραντζών ο οποίος αυξάνεται από τρεις ώρες σε τέσσερις λόγω της πολυπλοκότητας της νέας αυτοματοποιημένης στράντζας.

Ο χρόνος προετοιμασίας (setup) των στραντζών μικραίνει (είναι περίπου το 30% του χρόνου προετοιμασίας στο basecase) και ο χρόνος προετοιμασίας (setup) των χειριστών ελαχιστοποιείται (είναι περίπου το 15% (=0,3x0,5) του χρόνου προετοιμασίας των χειριστών στο basecase).

Επίσης ο χρόνος επεξεργασίας τόσο των στραντζών όσο και των χειριστών μειώνεται κατά 50%. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να αποδεσμεύσουμε μία στράντζα και δύο χειριστές από τη γραμμή παραγωγής των βιβλιοθηκών – αρχειοθηκών.

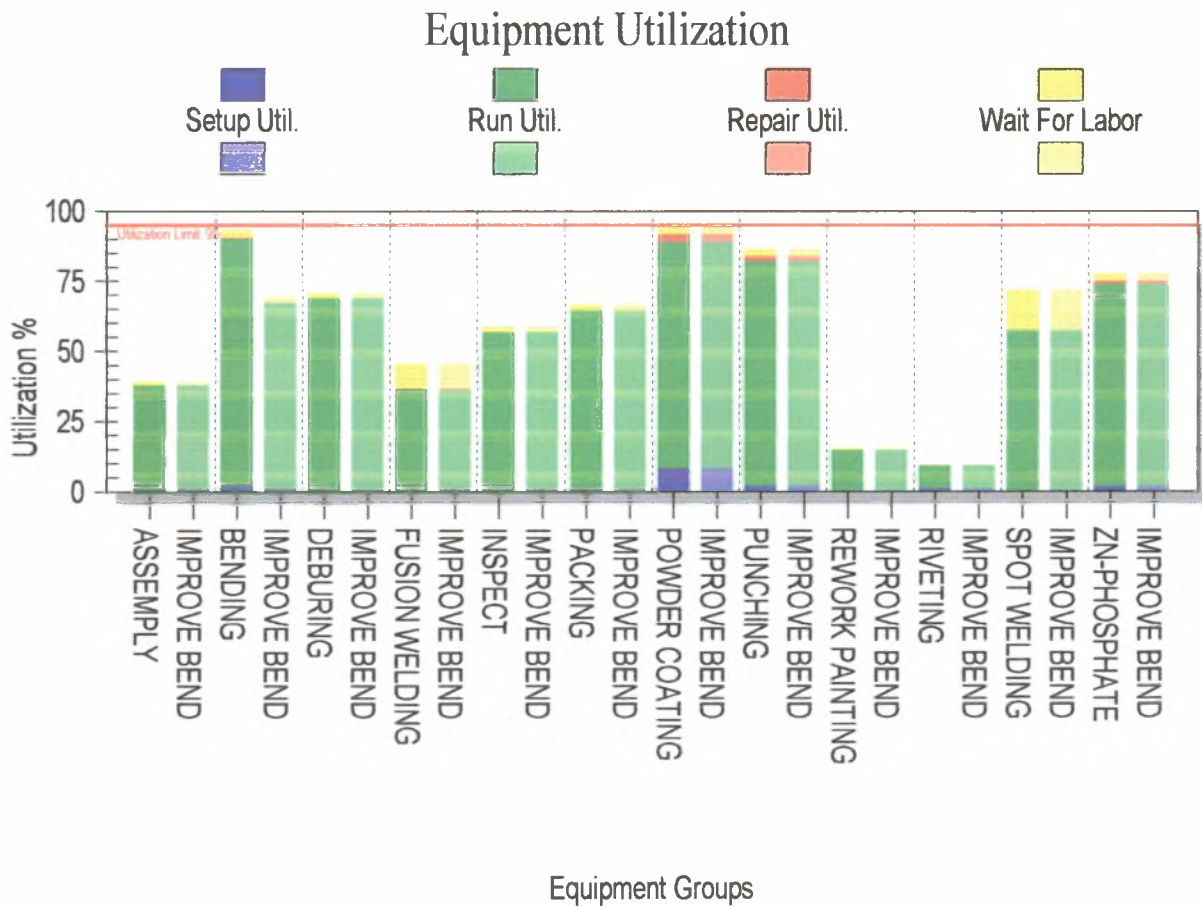
Η τροφοδοσία της νέας στράντζας γίνεται με ρομποτικό βραχίονα, έτσι ο χρόνος επεξεργασίας των χειριστών για τα μεγάλα σε μέγεθος κομμάτια μειώνεται κατά το ήμισυ.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του MPX στο 1<sup>ο</sup> σενάριο φαίνονται όσον αφορά το συνολικό αριθμό εργασιών σε εξέλιξη (WIP) του συστήματος και το μέσο χρόνο ροής (flow time) των προϊόντων στον Πίνακα 5.2.2, τη χρησιμοποίηση του εξοπλισμού στο Σχήμα 5.2.1 και τη χρησιμοποίηση του εργατικού δυναμικού στο Σχήμα 5.2.2 που ακολουθούν.

<i>Απόδοση συστήματος</i>	<i>Ποσότητα</i>	<i>M/M</i>
WIP συστήματος	2.624	pieces
Μέσο flow time προϊόντων	2,8	days

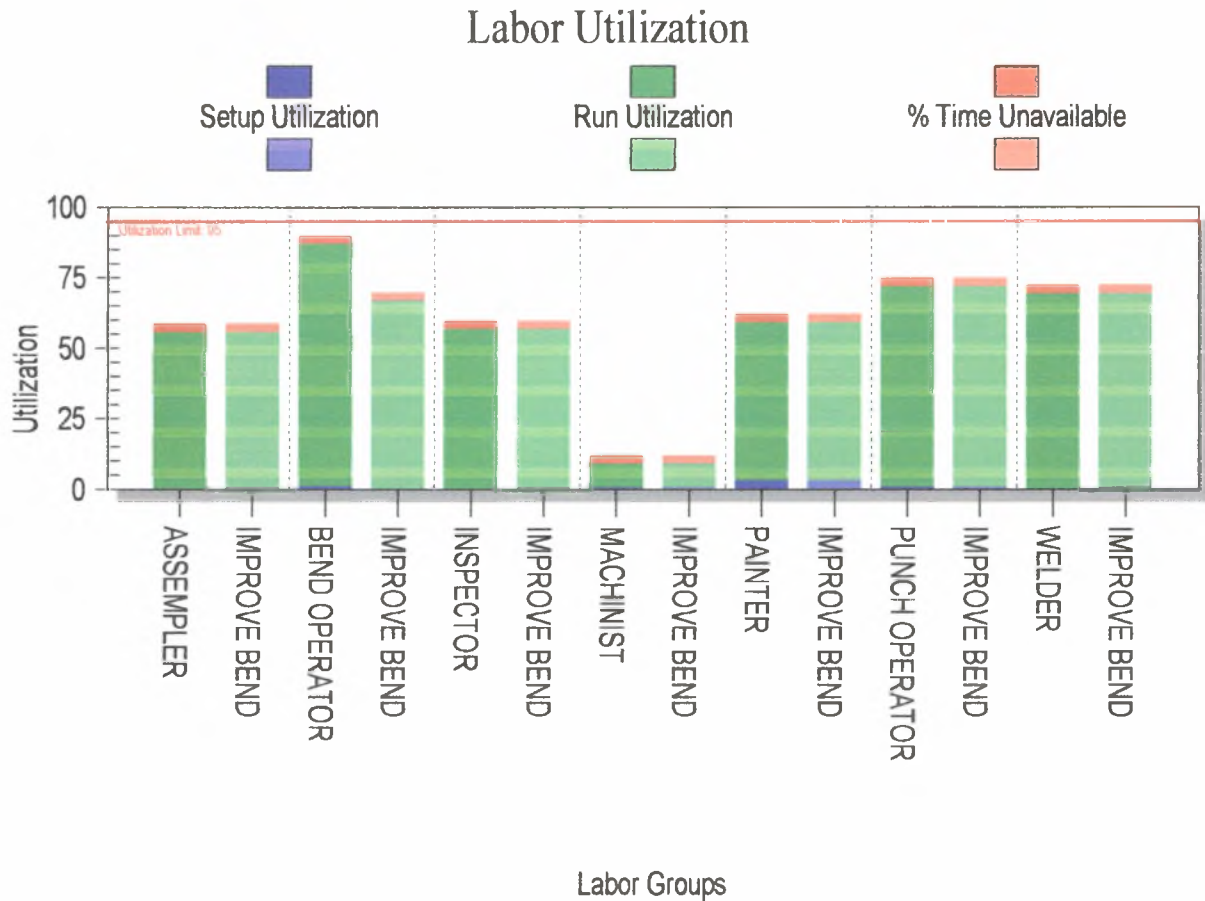
Πίνακας 5.2.2: Μέσο flow time των προϊόντων και WIP του συστήματος για το 1<sup>ο</sup> σενάριο – αγορά νέας ρομποτικής στράντζας.

Παρατηρούμε ότι ο συνολικός αριθμός εργασιών σε εξέλιξη (WIP) του συστήματος και ο μέσος χρόνος ροής (flow time) των προϊόντων μειώθηκαν σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στο basecase εξαιτίας της μείωσης του χρόνου επεξεργασίας των κομματιών στις στράντζες.



Σχήμα 5.2.1: Συγκριτική χρησιμοποίηση του εξοπλισμού στο basecase και στο 1<sup>ο</sup> σενάριο (αγορά νέας ρομποτικής στράντζας).

Παρατηρούμε ότι παρά το γεγονός ότι έχουμε μια στράντζα λιγότερο, η χρησιμοποίηση και ο χρόνος προετοιμασίας (setup) των στραντζών ελαττώθηκε αισθητά.



Σχήμα 5.2.2: Συγκριτική χρησιμοποίηση του προσωπικού στο basecase και στο 1<sup>ο</sup> σενάριο.

Παρατηρούμε ότι παρά το γεγονός ότι έχουμε δύο χειριστές στραντζών λιγότερους, η χρησιμοποίηση και ο χρόνος προετοιμασίας (setup) των χειριστών στραντζών ελαττώθηκε αισθητά.

### 5.3 2<sup>ο</sup> Σενάριο: Εγκατάσταση Νέας Μονάδας Φωσφάτωσης – Βαφείου

Θεωρώντας τώρα ως basecase τη γραμμή παραγωγής που περιγράφεται στο 1<sup>ο</sup> σενάριο (υιοθετώντας δηλαδή την αγορά μιας νέας ρομποτικής στράντζας), θα διερευνήσουμε περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης της γραμμής με την εγκατάσταση μιας νέας μονάδας φωσφάτωσης – βαφείου ηλεκτροστατικής βαφής. Η διαφοροποίηση των δεδομένων εισόδου σε σχέση με το basecase σύστημα περιγράφεται στον Πίνακα 5.3.1 που ακολουθεί:

A/A	Κατηγορία	Περιγραφή	Πεδίο	basecase	2ο σενάριο-εγκατάσταση νέας μονάδας φωσφάτωσης - βαφείου
1	Εξοπλισμός	Φωσφάτωση (Zn- phosphate)	Συντελεστής χρόνου επεξεργασίας (Run factor)	1	0,6
2			Συντελεστής χρόνου setup (Setup factor)	1	0,2
3			Mean Time To Failure (MTTF)	10.560	63.360
4			Mean Time To Repair (MTTR)	180	90
5		Βαφείο ηλεκτροστατικής βαφής πούδρας (Powder coating)	Συντελεστής χρόνου επεξεργασίας (Run factor)	1	0,6
6			Συντελεστής χρόνου setup (Setup factor)	1	0,2
7			Mean Time To Failure (MTTF)	2.400	10.560
8			Mean Time To Repair (MTTR)	80	30
9	Εργατικό δυναμικό	Βαφείς	Αριθμός στο group (group size)	3	2

Πίνακας 5.3.1 Διαφοροποίηση των δεδομένων του 2<sup>ου</sup> σεναρίου σε σχέση με το 1<sup>ο</sup> σενάριο (basecase)

Στην παλιά μονάδα φωσφάτωσης – βαφείου τα προϊόντα αναρτώνται σε κρεμάστρες οι οποίες διακινούνται χειροκίνητα. Στη νέα μονάδα φωσφάτωσης – βαφείου υπάρχει μια ταινία μεταφοράς (conveyor) σε μορφή βρόχου, η οποία βρίσκεται σε ορισμένο ύψος και η κίνηση της γίνεται αυτόματα ρυθμίζοντας την ταχύτητα μεταφοράς. Σε κάποιο σημείο του conveyor αναρτώνται τα προϊόντα που απαιτούν βαφή και στο ίδιο σημείο γίνεται το ξεκρέμασμα των έτοιμων βαμμένων προϊόντων.

Μετά το κρέμασμά τους τα προϊόντα εισχωρούν σε μια καμπίνα όπου γίνεται η φάση της φωσφάτωσης με διαδοχικούς ψεκασμούς διαλυμάτων.

Στη συνέχεια τα προϊόντα εισέρχονται διαδοχικά σε ένα φούρνο στεγνώματος, στην καμπίνα ηλεκτροστατικής βαφής όπου ψεκάζεται αυτόματα η πούδρα και στο φούρνο πολυμερισμού της πούδρας. Μετά την έξοδό τους από τον φούρνο πολυμερισμού τα προϊόντα είναι έτοιμα για να ξεκρεμαστούν.

Ο χρόνος επεξεργασίας της φωσφάτωσης, του βαφείου αλλά και των χειριστών εξαρτάται από την ταχύτητα μεταφοράς του conveyor και στην προκειμένη περίπτωση μειώνεται κατά 40%. Αντίστοιχα ο χρόνος προετοιμασίας (setup) της φωσφάτωσης, του βαφείου αλλά και των χειριστών μειώνεται κατά 80% λόγω αλλαγής του συστήματος μεταφοράς από χειροκίνητο σε αυτόματο. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να αποδεσμεύσουμε ένα χειριστή (βαφέα) από τη διαδικασία φωσφάτωσης - βαφής.

Στη νέα μονάδα της φωσφάτωσης τα διάφορα συστατικά των διαλυμάτων βρίσκονται σε διαφορετικές δεξαμενές και η ανάμειξή τους γίνεται αυτόματα πριν από τον ψεκάσμό τους. Ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών (MTTF) εξαπλασιάζεται και ο μέσος χρόνος επισκευής (MTTR) μειώνεται από τρεις ώρες σε μιάμιση.

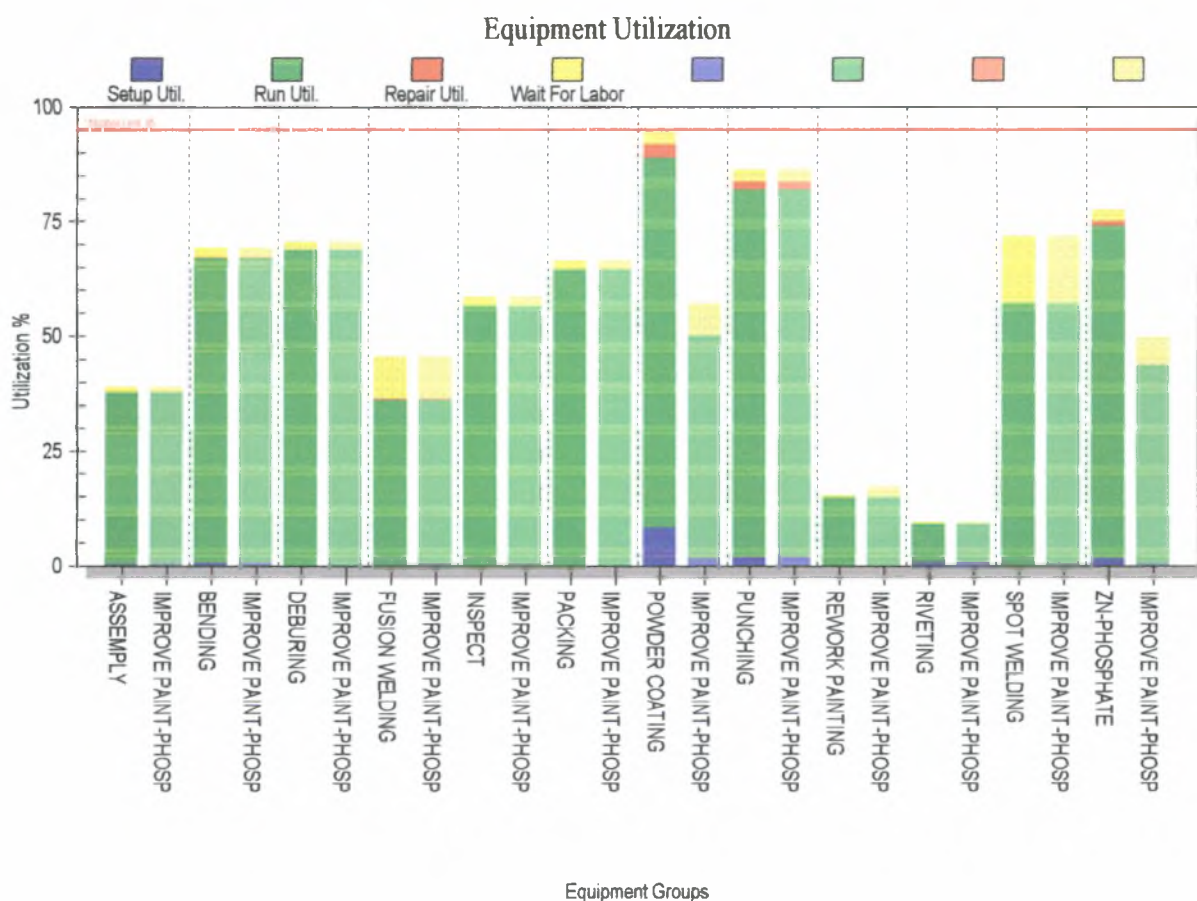
Στη νέα μονάδα του βαφείου λόγω του ότι η καμπίνα βαφής είναι πιο σύγχρονη, ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών (MTTF) αυξάνεται από μια φορά τη βδομάδα σε μια φορά το μήνα περίπου και ο μέσος χρόνος επισκευής (MTTR) μειώνεται από 80min σε 30min περίπου.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του MPX στο 2<sup>ο</sup> σενάριο φαίνονται όσον αφορά το συνολικό αριθμό εργασιών σε εξέλιξη (WIP) του συστήματος και το μέσο χρόνο ροής (flow time) των προϊόντων στον Πίνακα 5.3.2, τη χρησιμοποίηση του εξοπλισμού στο Σχήμα 5.3.1 και τη χρησιμοποίηση του εργατικού δυναμικού στο Σχήμα 5.3.2 που ακολουθούν.

Απόδοση συστήματος	Ποσότητα	M/M
WIP συστήματος	1.633	pieces
Μέσο flow time προϊόντων	1,86	days

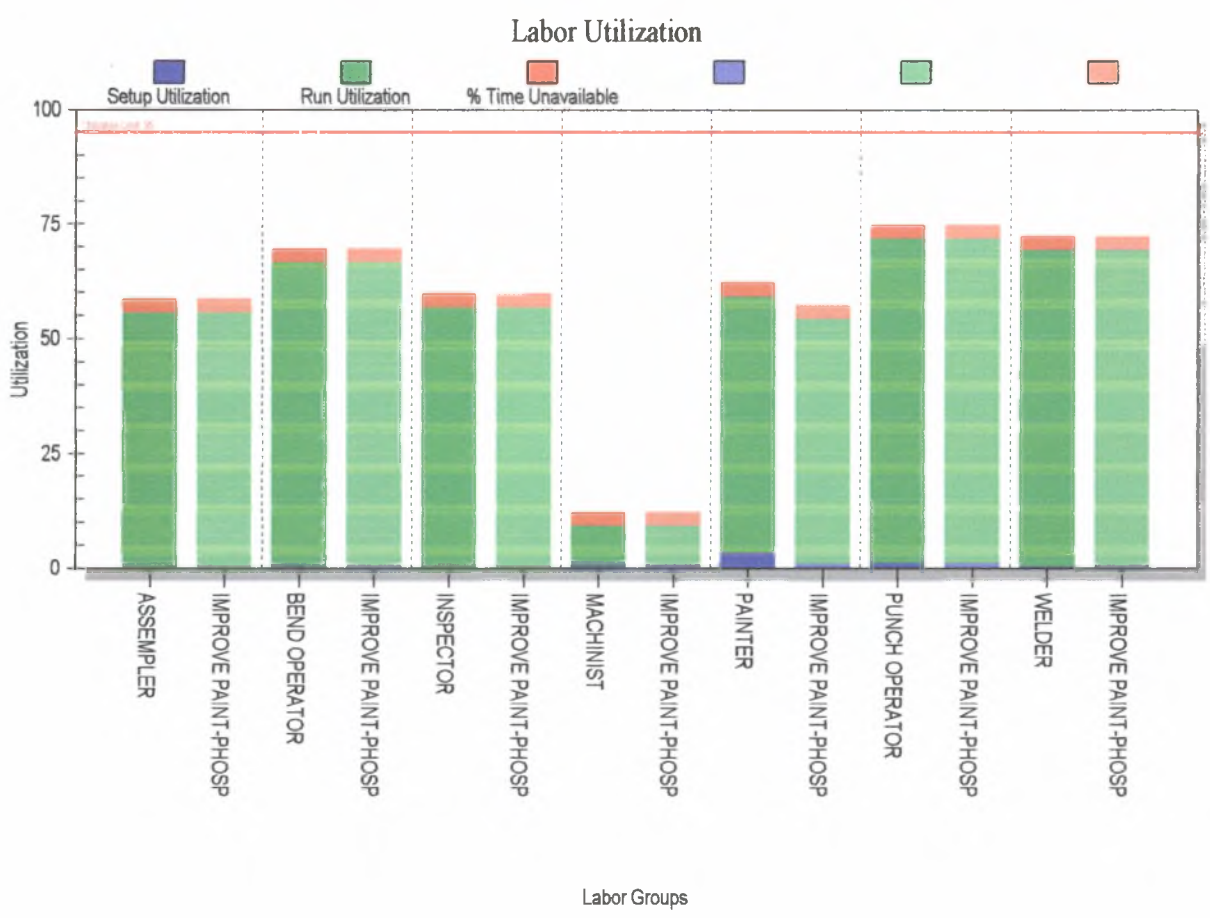
Πίνακας 5.3.2: Μέσο flow time των προϊόντων και WIP του συστήματος για το 2<sup>ο</sup> σενάριο – εγκατάσταση νέας μονάδας φωσφάτωσης - βαφείου.

Παρατηρούμε ότι ο συνολικός αριθμός εργασιών σε εξέλιξη (WIP) του συστήματος και ο μέσος χρόνος ροής (flow time) των προϊόντων μειώθηκαν σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στο basecase εξαιτίας της μείωσης του χρόνου επεξεργασίας και προετοιμασίας (setup) των κομματιών στη φωσφάτωση και τη βαφή.



Σχήμα 5.3.1: Συγκριτική χρησιμοποίηση του εξοπλισμού στο basecase και στο 2<sup>ο</sup> σενάριο (εγκατάσταση νέας μονάδας φωσφάτωσης - βαφείου).

Παρατηρούμε ότι η χρησιμοποίηση, ο χρόνος προετοιμασίας (setup) και ο χρόνος επισκευών της φωσφάτωσης και του βαφείου μειώθηκαν αρκετά.



Σχήμα 5.3.2: Συγκριτική χρησιμοποίηση του προσωπικού στο basecase και στο 2<sup>ο</sup> σενάριο.

Παρατηρούμε ότι η χρησιμοποίηση και ο χρόνος προετοιμασίας (setup) των βαφείων ελαττώθηκε, παρά το γεγονός ότι έχουμε ένα βαφέα λιγότερο.

### 5.4 3<sup>ο</sup> Σενάριο: Ελάττωση των Παρτίδων στα Προϊόντα

Θεωρώντας τώρα ως basecase τη γραμμή παραγωγής που περιγράφεται στο 2<sup>ο</sup> σενάριο (υιοθετώντας δηλαδή την αγορά μιας νέας ρομποτικής στράντζας και την εγκατάσταση νέας



μονάδας φωσφάτωσης - βαφείου), θα διερευνήσουμε περαιτέρω βελτίωση του χρόνου ροής (flow time) των προϊόντων με την ελάττωση των παρτίδων (lots). Εξετάζουμε δύο περιπτώσεις: α) μείωση των παρτίδων των προϊόντων στο μισό και β) μείωση των παρτίδων των προϊόντων στο ένα τέταρτο σε σχέση με το basecase.

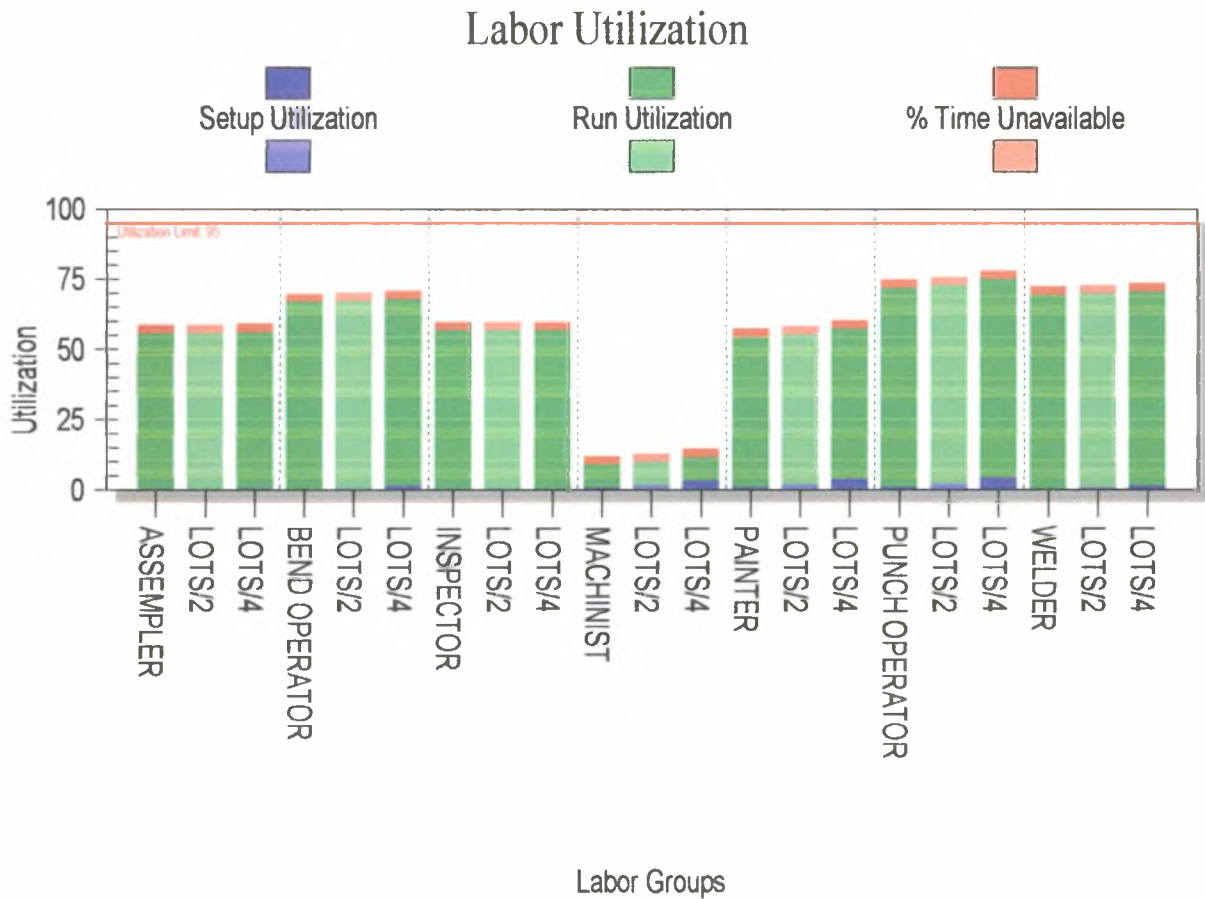
Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του MPX στο 3<sup>ο</sup> σενάριο φαίνονται όσον αφορά το συνολικό αριθμό εργασιών σε εξέλιξη (WIP) του συστήματος και το μέσο χρόνο ροής (flow time) των προϊόντων στον Πίνακα 5.4.1, τη χρησιμοποίηση του εξοπλισμού στο Σχήμα 5.4.1 και τη χρησιμοποίηση του εργατικού δυναμικού στο Σχήμα 5.4.2 που ακολουθούν.

<i>Απόδοση συστήματος</i>	<i>Ποσότητα basecase</i>	<i>Ποσότητα lots/2</i>	<i>Ποσότητα lots/4</i>	<i>M/M</i>
WIP συστήματος	1.633	876	534	pieces
Μέσο flow time προϊόντων	1,86	1,00	0,62	days

Πίνακας 5.4.1: Μέσο flow time των προϊόντων και WIP του συστήματος για το 3<sup>ο</sup> σενάριο – ελάττωση των παρτίδων.

Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται η ποσότητα των παρτίδων τόσο μειώνεται ο συνολικός αριθμός εργασιών σε εξέλιξη (WIP) του συστήματος και ο μέσος χρόνος ροής (flow time) των προϊόντων. Βέβαια όσο μικρότερες είναι οι παρτίδες τόσο αυξάνεται ο χρόνος προετοιμασίας (setup) του εξοπλισμού και των χειριστών όπως φαίνεται στα Σχήματα που ακολουθούν.





Σχήμα 5.4.2: Συγκριτική χρησιμοποίηση του προσωπικού στο basecase και στο 3<sup>ο</sup> σενάριο.

## 5.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύσαμε τα αριθμητικά αποτελέσματα από την εφαρμογή του λογισμικού MPX στο υφιστάμενο σύστημα και διερευνήσαμε πιθανούς τρόπους βελτιστοποίησης της απόδοσης της γραμμής παραγωγής.

Τα δύο πρώτα σενάρια αφορούσαν στην αλλαγή του υπάρχοντος εξοπλισμού με την αγορά μιας νέας ρομποτικής στράντζας και στην εγκατάσταση μιας νέας μονάδας φωσφάτωσης – βαφής. Στην πραγματικότητα, η διοίκηση της βιομηχανίας μεταλλικών κατασκευών πραγματοποίησε τα δύο αυτά σενάρια και τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τις

εκτιμήσεις του MPX σχετικά με τη μείωση του χρόνου ροής (flow time) των προϊόντων περίπου κατά το ήμισυ (από τέσσερις ημέρες σε δύο).

Περαιτέρω μείωση του χρόνου ροής (flow time) επιτυγχάνεται όπως φαίνεται και στο τρίτο σενάριο με την μείωση της ποσότητας των παρτίδων των προϊόντων.

## Κεφάλαιο 6 Σύνοψη Μεταπτυχιακής Εργασίας

Σε αυτήν την μεταπτυχιακή εργασία μελετήσαμε την εφαρμογή του λογισμικού MPX για την μοντελοποίηση και την εκτίμηση της απόδοσης μιας πραγματικής γραμμής παραγωγής σε μια βιομηχανία μεταλλικών κατασκευών.

Αρχικά έγινε μια περιγραφή της γραμμής παραγωγής και του λογισμικού, στη συνέχεια αναλύθηκε η μοντελοποίηση της γραμμής και τέλος με την παράθεση γραφημάτων παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, εκτιμήθηκε η απόδοση της γραμμής παραγωγής και διερευνήθηκαν πιθανά σενάρια περαιτέρω βελτίωσης της απόδοσης.

Διαπιστώθηκε ότι το MPX μοντελοποιώντας σχετικά εύκολα τους δυναμικούς παράγοντες ενός πραγματικού συστήματος, μπορεί να δώσει σε πολύ μικρό υπολογιστικό χρόνο και με σχετική ακρίβεια μια πολύ καλή εκτίμηση για το μέσο χρόνο παραγωγής προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των αναμονών (lead time), το μέσο αριθμό εργασιών σε εξέλιξη (work-in-process ή WIP), και την παραγωγική δυναμικότητα (capacity) του συστήματος. Επίσης εφαρμόζοντας διάφορα πιθανά σενάρια (what if), μπορεί να διερευνηθεί η βελτιστοποίηση της απόδοσης της γραμμής παραγωγής.

Μερικά από τα ερωτήματα που μέινανε αναπάντητα και θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω εργασίας είναι η μοντελοποίηση των υποκατασκευαστών, του συστήματος διακίνησης, της αλλαγής του μεγέθους της παρτίδας ενός προϊόντος (consolidation or unlotting) κατά τη δρομολόγησή του και η λεπτομερής

μοντελοποίηση του conveyor της νέας μονάδος φωσφάτωσης- βαφής. Όλα τα παραπάνω προσομοιώνονται ως “καθυστέρηση” (delay station) στη γραμμή παραγωγής.

## Βιβλιογραφία

- [1] Network Dynamics (1999) User Manual Software Version 3.3 “MPX The quick Response Manufacturing System,” *First edition*.
- [2] Suri, R. (1998) “Quick Response Manufacturing : A Company wide approach to reducing Lead Times,” *Productivity Press (Portland, OR), Chapter 7*.
- [3] Suri, R., G.W.W. Diehl, de Treville, S. and Tomsicek, M. (1995) “From CAN-Q to MPX: Evolution of Queuing Software for Manufacturing,” *Interfaces*, Vol.25, No.5, 128-150.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000089115