ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΜΙΑ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

υπό

Χαράλαμπου Ανδρέου

ΧΑΝΙΑ, 2008

© Copyright υπό Χαράλαμπου Ανδρέου

Έτος: 2008

Η διατριβή του Χαράλαμπου Ανδρέου, εγκρίνεται από τους Βασίλη Κουϊκόγλου (επιβλέπων), Ηλία Κοσματόπουλο και Ιωάννη Παπαμιχαήλ.

1) Βασίλης Κουϊκόγλου (επιβλέπων) _____

2) Ηλίας Κοσματόπουλος _____

3) Ιωάννης Παπαμιχαήλ _____

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ 7

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ 10

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 12

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Προγραμματισμός Συντήρησης 16

Εισαγωγή 16

1.1 Η λειτουργία της συντήρησης 17

1.2 Αντικειμενικός στόχος της συντήρησης 18

1.3 Αποφάσεις κατά τη συντήρηση 20

1.4 Τύποι συντήρησης 22

1.5 Εφαρμογή της συντήρησης 24

1.6 Μοντέλα προγραμματισμού συντήρησης 25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προγραμματισμός Παραγωγής 28

Εισαγωγή 28

2.1 Μοντέλα προγραμματισμού παραγωγής 30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μοντέλα προγραμματισμού παραγωγής και συντήρησης 33

Εισαγωγή 33

3.1 Μοντέλο βασισμένο σε συνθήκη 34

3.1.1 Παρουσίαση του μοντέλου 35

3.2 Μοντέλο για ένα σύστημα που υπόκειται σε τυχαίες βλάβες 41

3.2.1 Παρουσίαση του μαθηματικού μοντέλου 41

3.2.2 Αλγόριθμος για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου 44

3.3 Μοντέλο απόφασης Markov για ένα σύστημα παραγωγής πολλαπλών προϊόντων 46

3.3.1 Διατύπωση του μοντέλου 47

3.3.2 Μέθοδος επίλυσης 50

3.3.3 Εκπλήρωση των απαιτήσεων της παραγωγής 51

3.4 Μοντέλο δημιουργίας οικονομικών παρτίδων παραγωγής για μια αναξιόπιστη μηχανή υπό μια πολιτική συντήρησης που βασίζεται στη διάρκεια ζωής της μηχανής 53

3.4.1 Περιγραφή του μοντέλου 53

3.4.2 Διατύπωση του προβλήματος 54

3.4.3 Μαθηματικό μοντέλο 57

3.4.4 Επίλυση του μοντέλου 59

3.5 Μοντέλο για ένα κατασκευαστικό σύστημα το οποίο στηρίζεται στην διάρκεια ζωής του συστήματος 61

3.5.1 Περιγραφή του μοντέλου 62

3.5.2 Επίλυση του μοντέλου 64

3.5.3 Αλγόριθμος για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου 69

3.6 Μοντέλο δημιουργίας βέλτιστων μεγεθών παρτίδων παραγωγής με επιδείνωση της διαδικασίας και μηχανικές βλάβες, υπό ένα πρόγραμμα ελέγχων 71

3.6.1 Διατύπωση του προβλήματος 71

3.6.2 Περιγραφή του μοντέλου 72

3.6.3 Επίλυση των μοντέλων I και II 75

3.6.3.1 Μοντέλο I 75

3.6.3.2 Εκτεταμένο μοντέλο I 79

3.6.3.3 Μοντέλο II 79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Χρήση γενετικών αλγορίθμων στον προγραμματισμό παραγωγής και συντήρησης 83

4.1 Χρήση ευρετικού αλγορίθμου για την επίλυση ενός ενιαίου μοντέλου προγραμματισμού παραγωγής και συντήρησης για μια μηχανή 83

4.1.1 Περιγραφή του μοντέλου 83

4.1.2 Γενική περιγραφή των γενετικών αλγορίθμων 86

4.1.2.1 Γενετικοί αλγόριθμοι για το ενιαίο πρόβλημα προγραμματισμού 87

4.1.2.2 Χαρακτηριστικά γενετικών αλγορίθμων 87

4.2 Επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού κατασκευαστικών συστημάτων που υποβάλλονται σε συντήρηση 89

4.2.1 Περιγραφή του μοντέλου 90

4.2.2 Παρουσίαση του γενετικού αλγορίθμου 92

4.2.2.1 Απλός γενετικός αλγόριθμος 93

4.2.2.2 Προσθήκη κυρίαρχων γονιδίων στον απλό γενετικό αλγόριθμο 95

4.2.2.3 Προσθήκη διαδικασίας συντήρησης στο γενετικό αλγόριθμο με κυρίαρχα γονίδια 97

4.2.3 Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου για το πρόβλημα κατανομής προγράμματος παραγωγής 97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ερωτηματολόγιο 99

5.1 Ανάλυση του ερωτηματολογίου 99
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 103
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Απόδειξη θεωρήματος 106
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Ερωτηματολόγιο 107
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 111
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ 117
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ 117

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Η παρούσα ειδική επιστημονική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Ειδίκευσης στα Συστήματα Παραγωγής του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Βασίλη Κουϊκόγλου και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ηλία Κοσματόπουλο για την αμέριστη συμπαράστασή τους, την σωστή καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που μου παρείχαν σε όλο το διάστημα εκπόνησης της ειδικής επιστημονικής αυτής εργασίας.

Πολύτιμη ήταν η συμβολή των ατόμων που με βοήθησαν στη σύνταξη και συμπλήρωση του ερωτηματολογίου που χρησιμοποιήθηκε για σκοπούς της εργασίας, μέσα από το οποίο προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα, και οι οποίοι είναι: Δημήτρης Δρέσσιος, Ζωή Πρεβενίου, Χρίστος Ελισσαίου (Διευθυντής Συντήρησης σε εταιρία εμφιαλώσεως), Χριστάκης Γεωργίου (Τεχνικός Παραγωγής σε εταιρία εμφιαλώσεως), Στυλιανός Στυλιανού (Διευθυντής συντήρησης σε εταιρία λιανικού εμπορίου), Μάριος Σαρρής (Διευθυντής Ηλεκτρολογικού & Αυτοματισμών σε εταιρία εμφιαλώσεως), Γιάννος Χαρτούτσιας (Τεχνικός Διευθυντής σε εταιρία τροφίμων), Θεόδωρος Μιχαλόπουλος (Προϊστάμενος παραγωγής σε εταιρία εμφιαλώσεως), Γεώργιος Σταματίου (Προϊστάμενος συντήρησης σε εταιρία εμφιαλώσεως), Φώτης Φωτιάδη (Μηχανολόγος μηχανικός σε εταιρία εμφιαλώσεως), Χάρης Δεμερτζής (Μηχανικός Παραγωγής σε τσιμεντοβιομηχανία) και Γιώργος Μαρκόπουλος (Υπεύθυνος Παραγωγής Τμήματος Ηλεκτρικών Καμίνων σε εταιρία μεταλλουργίας).

Τέλος, οφείλω πολλά στην οικογένεια και τους φίλους μου για τη στήριξή και συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου, αλλά κυρίως στην καθημερινή μου ζωή.

Αφιερώνεται

στην

Άρτεμι

Ο Χαράλαμπος Ανδρέου γεννήθηκε στη Λευκωσία το 1980. Έχει πτυχίο Μηχανικού Παραγωγής & Διοίκησης και ολοκληρώνει το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών «Συστήματα Παραγωγής» του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο τομέας της έρευνάς του είναι ο ενιαίος προγραμματισμός παραγωγής και συντήρησης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η μεταπτυχιακή αυτή διατριβή επιτηδεύεται το θέμα του ενιαίου προγραμματισμού παραγωγής και συντήρησης. Ειδικότερα, παρουσιάζονται διάφορα μοντέλα που συναντάμε στη βιβλιογραφία και ασχολούνται με το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η χρήση τέτοιων μοντέλων από τις επιχειρήσεις είναι αναγκαία, καθώς για να επιβιώσει μια εταιρία στο υπάρχον ανταγωνιστικό περιβάλλον θα πρέπει να μπορεί να παράγει τις απαιτούμενες ποσότητες παραγγελιών, να τις παραδίδει έγκαιρα στους καταναλωτές ή μεταπωλητές και κυρίως να διατηρεί σε υψηλά επίπεδα την ποιότητα όλων των προϊόντων και των παραγωγικών διαδικασιών της. Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτούνται: ένας ακριβής προγραμματισμός της παραγωγής αλλά και ένας αποτελεσματικός προγραμματισμός της συντήρησης, για την διατήρηση των παραγωγικών διαδικασιών σε υψηλή λειτουργική κατάσταση και αποδοτικότητα.

Η παρούσα διατριβή χωρίζεται σε πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η έννοια της συντήρησης, πότε και από ποιους εφαρμόζεται, ποιοι τύποι συντήρησης υπάρχουν, πως επηρεάζει τη διαδικασία παραγωγής και γίνεται, επίσης, μια βιβλιογραφική αναφορά στα μοντέλα προγραμματισμού συντήρησης. Στο δεύτερο κεφάλαιο εξηγείται η έννοια της παραγωγής, παρουσιάζονται οι βασικές δραστηριότητες της "Αλυσίδας της αξίας" και γίνεται μια σύντομη επισκόπηση στα μοντέλα προγραμματισμού παραγωγής που συναντώνται στη βιβλιογραφία. Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί το βασικό μέρος της εργασίας, όπου μέσα από μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση παρουσιάζονται μοντέλα που αναφέρονται κυρίως στην ενσωμάτωση του προγραμματισμού παραγωγής και του προγράμματος συντήρησης για διάφορα συστήματα στην μεταποιητική βιομηχανία. Τα ποικίλα μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί για τις διάφορες περιπτώσεις, μας δίνουν μια συνολική, αλλά ξεκάθαρη εικόνα της σημαντικότητας για συνύπαρξη και συσχέτιση του προγραμματισμού παραγωγής και προγράμματος συντήρησης, και κατ'επέκταση της ποιότητας. Συγκεκριμένα, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μοντέλα των: Ashayeri, et al.(1995) το οποίο βασίζεται σε συνθήκη, Aghezzaf et al.(2007) το οποίο αναφέρεται σε ένα σύστημα μιας μηχανής που υπόκειται σε τυχαίες βλάβες, Sloan και Shanthikumar (2000) για ένα μοντέλο απόφασης Markov για ένα σύστημα παραγωγής πολλών προϊόντων, El-Ferik (2008) το οποίο αναφέρεται στη δημιουργία βέλτιστων παρτίδων παραγωγής για μια μηχανή υπό μια πολιτική συντήρησης που στηρίζεται στην διάρκεια ζωής του εξοπλισμού, Kenne et al.(2007) που επίσης στηρίζεται στην διάρκεια ζωής του συστήματος και Chakraborty et al.(2006) που παρουσιάζουν τη δημιουργία βέλτιστων μεγεθών παρτίδων για ένα σύστημα που υπόκειται μηχανικές βλάβες και ακολουθεί ένα πρόγραμμα ελέγχων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά σε ευρετικές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν γενετικούς αλγορίθμους για την εύρεση του βέλτιστου ενιαίου προγράμματος παραγωγής και συντήρησης. Περιγράφονται σε γενικές γραμμές τα χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων και παρουσιάζονται τα μοντέλα των Sortrakul et al.(2004) και Felix et al. (2006), τα οποία χρησιμοποιούν γενετικούς αλγορίθμους για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης προγραμματισμού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το ερωτηματολόγιο που συντάχτηκε για την συγκέντρωση στοιχείων και απόψεων που αφορούν τον προγραμματισμό της συντήρησης, με ότι αυτό προϋποθέτει, για διάφορους τύπους βιομηχανιών. Το ερωτηματολόγιο συντάχτηκε με την βοήθεια έμπειρων ατόμων στον τομέα της συντήρησης και στη συνέχεια στάλθηκε σε άτομα των οποίων η θέση εργασίας έχει άμεση σχέση με τον προγραμματισμό της συντήρησης και πιθανόν της παραγωγής. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την επεξεργασία των συμπληρωμένων ερωτηματολογίων.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο σημερινό γρήγορα μεταβαλλόμενο επιχειρησιακό περιβάλλον οι περισσότερες επιχειρήσεις και ειδικότερα αυτές που δραστηριοποιούνται στη μεταποιητική βιομηχανία βασίζονται στις νέες τεχνολογίες για να μπορέσουν να ανταπεξέλθουν στις αυξανόμενες προκλήσεις τις αγοράς. «Στη μεταποιητική βιομηχανία ανήκουν οι επιχειρήσεις οι οποίες προσθέτουν αξία στα υλικά (πρώτες ύλες) αναμειγνύοντας, διαχωρίζοντας, διαμορφώνοντας ή εφαρμόζοντας χημικές αντιδράσεις σε αυτά. Οι μεταποιήσεις μπορεί να είναι είτε συνεχείς είτε σε παρτίδες και συνήθως απαιτούν αυστηρό μεταποιητικό έλεγχο και υψηλές επενδύσεις σε κεφάλαιο»(Ashayeri et al. 1995, σελ.2). Παραδείγματα μεταποιητικών βιομηχανιών αποτελούν η βιομηχανία χημικών, η βιομηχανία πετρελαίου, η κατασκευή χαρτιού και ο κλάδος των ποτών (οινοπνευματούχων ή μη) και τροφίμων. Υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ της μεταποιητικής και της διακεκριμένης βιομηχανίας. Οι διαφορές αυτές συναντούνται στη σχέση των δυο με την αγορά, την παραγωγική διαδικασία, την ποιότητα των προϊόντων και διαδικασιών, καθώς και τις λειτουργίες προγραμματισμού και έλεγχου. «Επίσης, όσον αφορά τον αυτοματισμό, η μεταποιητική βιομηχανία αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από αυτοματοποιημένες διαδικασίες, ενώ στην διακεκριμένη βιομηχανία δίνεται περισσότερη έμφαση στην αυτοματοποίηση του συστήματος προγραμματισμού και ελέγχου» (Ashayeri et al. 1995, σελ.2). Οι κυριότερες διαφορές μεταξύ της μεταποιητικής και της διακεκριμένης βιομηχανίας δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Διαφορές μεταξύ μεταποιητικών και διακεκριμένων βιομηχανιών [Ashayeri et al. 1995, σελ.3]

	Μεταποιητική βιομηχανία	**Διακεκριμένη βιομηχανία**
Σχέση με την αγορά		
Τύπος προϊόντος	Εμπορεύσιμο	Σύνηθες
Ποικιλία προϊόντων	Περιορισμένη	Εκτεταμένη
Ζήτηση ανά προϊόν	Υψηλή	Χαμηλή
Κόστος ανά προϊόν	Χαμηλό	Υψηλό
Κατάκτηση παραγγελιών	Τιμή	Ταχύτητα παράδοσης
	Εγγύηση παράδοσης	Χαρακτηριστικά προϊόντος
Κόστος μεταφοράς	Υψηλό	Χαμηλό
Νέα προϊόντα	Λίγα	Πολλά
Η διαδικασία παραγωγής		
Δρομολόγηση	Αμετάβλητη	Ευμετάβλητη
Διάταξη	Κατά προϊόν	Κατά λειτουργία
Ευελιξία	Χαμηλή	Υψηλή
Εξοπλισμός παραγωγής	Εξειδικευμένος	Γενικός
Εργασιακή ένταση	Χαμηλή	Υψηλή
Κεφαλαιακή ένταση	Υψηλή	Χαμηλή
Χρόνοι αλλαγών	Υψηλοί	Χαμηλοί
Εργασία στην διαδικασία	Χαμηλή	Υψηλός
Όγκοι	Μεγάλοι	Μικροί
Ποιότητα		
Περιβαλλοντικές απαιτήσεις	Υψηλές	Χαμηλές
Κίνδυνος	Σε μερικές περιπτώσεις	Ελάχιστος
Μέτρηση ποιότητας	Μερικές φορές αρκετή	Μικρής διάρκειας
Προγραμματισμός & Έλεγχος		
Παραγωγή	Στο απόθεμα	Στην παραγγελία
Μακροπρόθεσμος προγραμματισμός	Χωρητικότητα	Σχεδιασμός προϊόντος
Βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός	Εκμετάλλευση χωρητικότητας	Εκμετάλλευση προσωπικού
Σημείο έναρξης προγραμματισμού	Διαθεσιμότητα χωρητικότητας	Διαθεσιμότητα υλικών
Ροή υλικών	Συγκλίνουσα + Αποκλίνουσα	Αποκλίνουσα
Μεταβλητότητα παραγωγής	Μερικές φορές υψηλή	Κατά το πλείστο χαμηλή
Δια μέσου 'Εκρηξης'	Συνταγές	Λίστα συστατικών (BOM)
By and Coproducts'	Μερικές φορές	Όχι
Ιχνηλασιμότητα προϊόντων	Κατά το πλείστο απαραίτητη	Συνήθως όχι απαραίτητη

Σύμφωνα με τους Rahim και Ben-Daya (2001, σελ.19) «Η μαζική παραγωγή ενός και μόνο προϊόντος έχει αντικατασταθεί από την τάση για ανάπτυξη πολλών προϊόντων, που είτε ανήκουν στην ίδια κατηγορία είτε διαφοροποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις των καταναλωτών. Οι ραγδαίες και συνεχείς αλλαγές στην αγορά, η αύξηση της ποικιλίας των

προϊόντων, αλλά κυρίως η επιθυμία για ποιοτικά προϊόντα, οδήγησαν στη χρήση σύγχρονων μέσων παραγωγής. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την απλοποίηση πολλών παραγωγικών διαδικασιών, την αυτοματοποίηση πολλών λειτουργιών και ελέγχων, αλλά ταυτόχρονα και στην αύξηση του κόστους των κατασκευαστικών διαδικασιών».

Για να μπορέσει μια επιχείρηση να επιβιώσει σε αυτό το έντονα ανταγωνιστικό περιβάλλον θα πρέπει να μπορεί να παράγει τις απαιτούμενες ποσότητες παραγγελιών, να τις παραδίδει έγκαιρα στους καταναλωτές και κυρίως να διατηρεί σε υψηλά επίπεδα την ποιότητα όλων των προϊόντων και διαδικασιών της. Για τα δυο πρώτα σημεία είναι αναγκαίος ένας σωστός και αποτελεσματικός προγραμματισμός της παραγωγής, ο οποίος μπορεί να γίνει με διάφορα λογισμικά προγράμματα. Το τρίτο σημείο, προϋποθέτει μια αύξηση των εξόδων συντήρησης και διατήρησης των παραγωγικών διαδικασιών σε υψηλή λειτουργική κατάσταση και αποδοτικότητα.

Οι τρεις διαστάσεις, παραγωγή, ποιότητα και συντήρηση είναι πολύ σημαντικές στις βιομηχανικές διαδικασίες και είναι άμεσα συνδεδεμένες και αλληλοεξαρτώμενες. Η παρουσίαση κάποιου προβλήματος ή καθυστέρησης στην διεκπεραίωση οποιαδήποτε από τις τρεις διαστάσεις έχει άμεσο αντίκτυπο και στις υπόλοιπες. Για την κατανόηση, επίλυση και κυρίως την πρόληψη αυτών των προβλημάτων απαιτείται η εύρεση και μοντελοποίηση των σημείων και διαδικασιών που είναι κοινές και αλληλοεξαρτώμενες.

Στο παρελθόν, η παραγωγή, η ποιότητα και η συντήρηση διαχειρίζονταν ως ανεξάρτητα προβλήματα και τα διάφορα μοντέλα που αναπτύχθηκαν από πολλούς ερευνητές αντιμετώπιζαν ξεχωριστά την κάθε διάσταση. Όσον αφορά την παραγωγή και διαχείριση των αποθεμάτων έχουν γίνει αρκετές μελέτες, κυρίως, για τη βέλτιστη οικονομική ποσότητα παραγωγής (EPQ-Economic Production Quantity) κάτω από διάφορες καταστάσεις. Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα βιβλίων και άρθρων που αναφέρονται στον προγραμματισμό παραγωγής, όπως για παράδειγμα οι Silver et al. (1998). Τα περισσότερα μοντέλα που έχουν σχέση με την εύρεση της οικονομικής ποσότητας παραγωγής (EPQ), θεωρούν ότι η παραγωγική διαδικασία είναι συνεχής, χωρίς καθυστερήσεις, και πως τα προϊόντα που παράγονται είναι όλα ποιοτικά. Στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει και μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση είναι αυτή στην οποία η ποιότητα των προϊόντων δεν είναι πάντα αποδεκτή, επειδή η κατάσταση της παραγωγικής διαδικασίας μπορεί να χειροτερεύει κατά την διάρκεια του χρόνου. Έχοντας υπόψη αυτό τον επιπλέον παράγοντα αναπτύχθηκαν μοντέλα που συμπεριλάμβαναν και την ποιότητα κατά τον προγραμματισμό της παραγωγής Rahim (1994) και Rahim et al.(1998).

Η συντήρηση ως ανεξάρτητο πρόβλημα έχει λάβει μεγάλη προσοχή από πολλούς ερευνητές εδώ και αρκετά χρόνια, ενώ στις μέρες μας αποτελεί ένα από τα βασικότερα θέματα προς μελέτη, έρευνα και βελτίωση. Οι Pierskalla και Voelker (1976) παρουσίασαν μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τα μοντέλα συντήρησης μέχρι το 1976. Με το ίδιο θέμα ασχολήθηκαν οι Sherif και Smith (1981), οι Valdez και Feldman (1989), οι Cho και Parlar (1991), ο Nakagawa (1980) και ο Jardine (1973). Περαιτέρω ανάλυση για την διαδικασία και τον προγραμματισμό της συντήρησης γίνεται στο Κεφάλαιο 1.

Με τις αλλαγές που έγιναν στην βιομηχανία, η συντήρηση δεν είναι πλέον ανεξάρτητη καθώς συνδέεται άμεσα και με την ποιότητα. Όπως αναφέρει ο Tagaras (1988, σελ.760), «τα δεδομένα που συλλέγονται κατά την διάρκεια της διαδικασίας στατιστικού ελέγχου μπορούν να καθορίσουν πιθανές δράσεις για αποκατάσταση βλαβών». Αυτό το γεγονός επηρεάζει άμεσα το πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης, καθώς θα πρέπει να γίνουν ενέργειες που δεν έχουν προγραμματιστεί, να βρεθεί το απαιτούμενο προσωπικό και πόροι. Παρομοίως, οι δραστηριότητες συντήρησης που πραγματοποιούνται στην παραγωγή επηρεάζουν αρνητικά τα δείγματα που λαμβάνονται κατά την παραγωγική διαδικασία και κατά συνέπεια οδηγούν στην αλλαγή των απαιτήσεων της διαδικασίας ελέγχου. Μοντέλα που αναφέρονται στη ταυτόχρονη εφαρμογή συντήρησης και της διαδικασίας στατιστικού ελέγχου παρουσιάστηκαν από τους Ben-Daya (1999), Ben-Daya και Makhdoom (1998), Ben-Daya και Rahim (2000).

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την δημιουργία μοντέλων που θα εμπλέκουν ταυτόχρονα δυο ή και τρεις από τις διαστάσεις παραγωγή, ποιότητα και συντήρηση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αποφάσεις για την αντιμετώπιση και διαχείριση των προβλημάτων που προέκυπταν για κάθε μια από αυτές, ανεξάρτητα, δεν ήταν οι βέλτιστες καθώς δεν συμπεριλάμβαναν στοιχεία και δεδομένα από κάθε διάσταση της παραγωγικής διαδικασίας Rahim και Ben-Daya (2001). Στην παρούσα εργασία θα επικεντρωθούμε στα μοντέλα που αναφέρονται στην ενσωμάτωση του προγραμματισμού παραγωγής και του προγράμματος συντήρησης για διάφορα συστήματα στη μεταποιητική βιομηχανία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Προγραμματισμός Συντήρησης

Εισαγωγή

Για τις περισσότερες επιχειρήσεις η συντήρηση αντιπροσωπεύει μια σημαντική λειτουργία ανάμεσα στο γενικό περιβάλλον παραγωγής. Οι εξελίξεις στον αυτοματισμό και η κατά συνέπεια αύξηση της πολυπλοκότητας των συστημάτων που εμπλέκονται στη παραγωγική διαδικασία, έχουν κάνει πιο σημαντική την αξιοπιστία των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται. Αυτό είναι πιο εμφανές στη μεταποιητική βιομηχανία, η οποία χαρακτηρίζεται από την χρησιμοποίηση ακριβού εξειδικευμένου εξοπλισμού και από διαφορετικές μεθόδους παραγωγής και προγραμμάτων συντήρησης.

Στο έντονα ανταγωνιστικό περιβάλλον, όπου τα περιθώρια κέρδους μειώνονται συνεχώς, είναι περισσότερο από εμφανής η ανάγκη για ένα πολύ καλό πρόγραμμα συντήρησης και ενός συστήματος ελέγχου. «Παρόλα αυτά, ο προγραμματισμός της συντήρησης για τις περισσότερες επιχειρήσεις δεν αποτελεί τη βασική επιχειρησιακή διαδικασία, καθώς θεωρούν ως κύρια και πιο σημαντική τη διαδικασία παραγωγής» (Ashayeri et al.1995, σελ.1). Η προηγούμενη αντίληψη αλλά και η πεποίθηση πως το κόστος συντήρησης δεν μπορεί να ελεγχθεί, είχε ως αποτέλεσμα να μην λαμβάνει η συντήρηση την απαραίτητη προσοχή από τη διοίκηση των επιχειρήσεων.

Τι εννοούμε όμως με τον όρο συντήρηση; Σύμφωνα με τους Budai et al.(2006, σελ 2) «"**Συντήρηση είναι το σύνολο των δραστηριοτήτων που προτίθενται να διατηρήσουν ένα σύστημα σε μια κατάσταση στην οποία μπορεί να εκτελεί την λειτουργία για την οποία είναι ορισμένο**"». Ένας ακόμη ορισμός δόθηκε από τον Weinstein L.(1996, σελ.70), ο οποίος ορίζει ως συντήρηση «"**Τις δραστηριότητες που έχουν ως σκοπό να διατηρήσουν ή να αποκαταστήσουν εγκαίρως την ασφάλεια, την απόδοση, την αξιοπιστία και την διαθεσιμότητα των κατασκευών, των συστημάτων και των εξαρτημάτων της βιομηχανίας ,ούτως ώστε να εξασφαλίσουν την ανώτερη απόδοση των λειτουργιών που προορίζονται όταν αυτό χρειαστεί**"».

Όπως προκύπτει και από τους πιο πάνω ορισμούς, η συντήρηση είναι άμεσα συνδεδεμένη με την παραγωγή με διάφορους τρόπους. Πρώτον, μπορεί να γίνεται συντήρηση κατά την διάρκεια μιας παραγωγικής διαδικασίας ή όταν η παραγωγή σταματήσει, όπως για παράδειγμα τα απογεύματα, τα σαββατοκύριακα και τις ημέρες των διακοπών. Μερικές φορές, όμως, απαιτείται το κλείσιμο μερικών παραγωγικών μονάδων για προγραμματισμένη συντήρηση

και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε "εντάσεις" μεταξύ των τμημάτων παραγωγής και συντήρησης της επιχείρησης. Αυτό γίνεται γιατί από τη μία το τμήμα παραγωγής χρειάζεται τη συντήρηση ώστε να διατηρεί τον εξοπλισμό του σε άριστη λειτουργική κατάσταση, αλλά από την άλλη αυτό μερικές φορές προϋποθέτει το κλείσιμο των μηχανημάτων ενώ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή. Δεύτερον, η συντήρηση μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μια παραγωγική διαδικασία η οποία χρειάζεται να προγραμματιστεί. Όμως, ο προγραμματισμός με αυτή την προοπτική, προϋποθέτει τον καθορισμό κατάλληλων επιπέδων χωρητικότητας των αποθηκών, ούτως ώστε να διασφαλιστεί η κάλυψη της ζήτησης για το χρονικό διάστημα που δεν θα υπάρχει παραγωγή. Η πολιτική αυτή, όμως, οδηγεί στην αύξηση του κόστους αποθέματος. Ο τρίτος τρόπος σύνδεσης τους είναι ο προγραμματισμός της παραγωγής λαμβάνοντας υπόψη το πρόγραμμα συντήρησης. Στην περίπτωση αυτή η συντήρηση γίνεται είτε λόγω βλάβης κάποιας μηχανής είτε επειδή η ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων δεν είναι η επιθυμητή (Budai et al. 2006).

Είναι αναγκαία λοιπόν η υιοθέτηση ενός προγράμματος συντήρησης το οποίο θα είναι ενσωματωμένο με το πρόγραμμα παραγωγής, ώστε να γίνεται σωστή διαχείριση του χρόνου και του κόστους συντήρησης.

1.1 Η λειτουργία της συντήρησης

Όταν αναφερόμαστε στη συντήρηση δεν εννοούμε μόνο τη διεκπεραίωση διορθωτικών ενεργειών σε κάποια μηχανή αλλά και στη ποιοτική λειτουργία της. Η ποιοτική λειτουργία του εξοπλισμού συνδέεται άμεσα με την αξιοπιστία όλων των επί μέρους κομματιών από τα οποία αποτελείται. Γενικά, μπορούμε να πούμε πως όσο υψηλότερη είναι η ποιότητα των επί μέρους κομματιών μιας μηχανής τόσο αυξάνεται η αξιοπιστία και συνεπώς η διάρκεια ζωής της. Παρόλα αυτά, ο εξοπλισμός κάθε είδους, πολύπλοκος ή απλός, φτηνός ή ακριβός είναι επιρρεπής σε βλάβες. Κατά συνέπεια η πιθανότητα για βλάβη καθώς και η διακοπή της λειτουργίας του εξοπλισμού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την διάρκεια του προγραμματισμού χωρητικότητας και του χρονοδιαγράμματος δραστηριοτήτων.

Επίσης, η ποιότητα σχετίζεται με το κόστος, καθώς συνήθως η υψηλή ποιότητα συνδυάζεται με μεγαλύτερο κόστος. Λόγο του ότι οι περισσότερες αγορές εξοπλισμού ή ανταλλακτικών γίνονται βάση του χαμηλού κόστους τους, αυτό έχει ως φυσικό επακόλουθο να είναι λιγότερο αξιόπιστα. Όμως, ανεξάρτητα από κόστος αγοράς τους, κάποια στιγμή θα σταματήσουν να λειτουργούν σε ικανοποιητικό βαθμό και σε τέτοια περίπτωση θα πρέπει είτε

να επιδιορθωθούν είτε να αντικατασταθούν. Ωστόσο, η ανάγκη αυτή για επιδιόρθωση ή αντικατάσταση μπορεί να μειωθεί σε κάποιο βαθμό, δια μέσου ενός αποτελεσματικού σέρβις και συντήρησης. Συνεπώς:

(α) τα περισσότερα εξαρτήματα και ο εξοπλισμός πρέπει να επιθεωρούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα, ούτως ώστε να ανιχνεύονται οποιαδήποτε σημάδια μείωσης της αποδοτικότητας ή επικείμενης βλάβης.

(β) για να εξασφαλιστεί η συνεχής και αποδοτική λειτουργία των μηχανημάτων πρέπει να γίνεται τακτικό σέρβις, όπως για παράδειγμα επαναρίθμηση, λίπανση κλπ..

(γ) πρέπει να γίνεται συχνά ή όποτε φαίνεται να απαιτείται προληπτική συντήρηση, έτσι ώστε να διατηρείται σε ικανοποιητικό βαθμό η λειτουργικότητα του εξοπλισμού. Κατά την διάρκεια της προληπτικής συντήρησης, εξαρτήματα των μηχανών τα οποία είναι πιθανόν να υποστούν κάποια βλάβη μπορεί να αντικατασταθούν πριν το τέλος της διάρκειας ζωής τους. Εν τούτοις:

(δ) απαιτείται η συντήρηση των μηχανών (πχ επισκευή) ούτως ώστε τα εξαρτήματα και ο εξοπλισμός να επαναφέρονται σε ικανοποιητικά επίπεδα λειτουργίας,

(ε) τα εξαρτήματα και ο εξοπλισμός θα πρέπει να αντικαθίστανται μόλις δεν ικανοποιούν πλέον τα επίπεδα λειτουργίας και είναι έξω από τα όρια οικονομικής επισκευής τους (Wild 1989).

1.2 Αντικειμενικός στόχος της συντήρησης

Ο βασικός σκοπός εφαρμογής της συντήρησης είναι η προσπάθεια μεγιστοποίησης της απόδοσης των μηχανημάτων παραγωγής, εξασφαλίζοντας πως ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται λειτουργεί κανονικά και κυρίως αποδοτικά (Wild 1989). «Αναλυτικότερα, η λειτουργία της συντήρησης μέσα σε ένα οργανισμό σκοπεύει κυρίως στο να διατηρεί διαθέσιμη την χωρητικότητα για την παραγωγή σε ένα σταθερό και αξιόπιστο επίπεδο, ούτως ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη εξυπηρέτηση των πελατών, η συνεχής ποιότητα των προϊόντων, η αξιοπιστία των τελικών προϊόντων, η αποδοτική λειτουργία με βέλτιστο κόστος και το υψηλό επίπεδο αξιοποίησης του εξοπλισμού» (Ettkin 1986).

Όλα τα παραπάνω μπορούν να επιτευχθούν αποτρέποντας τυχόν βλάβες ή αστοχίες των εξαρτημάτων και ελαχιστοποιώντας τις απώλειες στην παραγωγή οι οποίες οφείλονται συνήθως σε προβλήματα που παρουσιάζονται στα μηχανήματα κατά την διάρκεια της παραγωγής.

Ουσιαστικά, όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, η λειτουργία της συντήρησης έχει ως στόχο τη διατήρηση ή την αύξηση της αξιοπιστίας του λειτουργικού συστήματος στο σύνολό του.

Υπάρχουν πολλές ενέργειες που μπορούν να γίνουν για να εξασφαλίσουμε πως ο πιο πάνω στόχος μπορεί να επιτευχθεί, αλλά συνήθως μόνο μερικές από αυτές θεωρούνται πως ανήκουν στην υπευθυνότητα του τμήματος συντήρησης. Για παράδειγμα, το κάθε ένα από τα πιο κάτω σημεία θα μπορούσε να συμβάλει στη διατήρηση της αξιοπιστίας ενός λειτουργικού συστήματος:

α) Βελτίωση της ποιότητας του εξοπλισμού και των εξαρτημάτων δια μέσου καλύτερου σχεδιασμού και εφαρμογής πιο αυστηρών βιομηχανικών προτύπων.

β) Βελτιώσεις στο σχεδιασμό του εξοπλισμού ώστε να διευκολυνθεί η αντικατάσταση προβληματικών ή σπασμένων εξαρτημάτων, καθώς επίσης της επιθεώρησης και των καθημερινών εργασιών συντήρησης.

γ) Καλύτερη διαρρύθμιση της διάταξης του εξοπλισμού ώστε να είναι πιο εύκολη η διενέργεια της συντήρησης, πχ παρέχοντας περισσότερο χώρο γύρω ή κάτω από το σημείο που είναι τοποθετημένος ο εξοπλισμός.

δ) Παρέχοντας ευελιξία και κάποια “χαλαρότητα” στο σύστημα, π.χ. δίνοντας επιπλέον χωρητικότητα, ώστε σε περίπτωση βλάβης μέρους του εξοπλισμού να μην επηρεαστεί η απόδοση άλλου εξοπλισμού.

ε) Χρησιμοποιώντας μια ακολουθία εργασιών, ώστε μια πιθανή βλάβη κάποιου εξοπλισμού να μην έχει άμεσο αντίκτυπο σε υλικά ή εξαρτήματα άλλου εξοπλισμού.

στ) Δημιουργώντας εγκαταστάσεις στις οποίες θα επισκευάζονται τα εξαρτήματα ή ο εξοπλισμός που έχουν υποστεί κάποια βλάβη. Με τον τρόπο αυτό γίνεται πιο γρήγορα η επισκευή ή η αντικατάσταση τους και έτσι μειώνεται ο χρόνος καθυστέρησης που οφείλεται σε αστοχία του εξοπλισμού.

ζ) Διενεργώντας προληπτική συντήρηση, η οποία δια μέσου τακτικών επιθεωρήσεων ή και αντικατάστασης εξαρτημάτων που θεωρούνται κρίσιμα για τη λειτουργία του εξοπλισμού, μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης μηχανικής βλάβης.

Θα μπορούσαμε να συνοψίσουμε τα πιο πάνω σημεία σε δυο γενικούς αντικειμενικούς στόχους, οι οποίοι είναι:

1. Η προσπάθεια διασφάλισης πως δεν θα συμβούν μηχανικές βλάβες ή αστοχίες εξαρτημάτων (σημεία α και β).

2. Η προσπάθεια για ελαχιστοποίηση της διακοπής της λειτουργίας ή των απωλειών που οφείλονται σε μηχανικές βλάβες που συμβαίνουν στον εξοπλισμό (σημεία γ, δ, ε, στ και ζ) (Wild 1989).

Σημαντικό ρόλο στην επίτευξη των πιο πάνω στόχων διαδραματίζει η διοίκηση του κάθε οργανισμού. Εάν η διοίκηση θέλει ο εξοπλισμός να λειτουργεί στο μεγαλύτερο ποσοστό του παραγωγικού χρόνου, τότε πρέπει να αυξήσει το χρόνο προληπτικής συντήρησης που εφαρμόζεται στον εξοπλισμό αυτό (Mann 1976). Επίσης, όσο περισσότεροι πόροι προορίζονται για τις δραστηριότητες της προληπτικής συντήρησης, άλλο τόσο τείνουν να μειώνονται αυτοί που απαιτούνται για τις δραστηριότητες της έκτακτης συντήρησης και που συνήθως είναι πολύ περισσότεροι (Rishel 1991).

1.3 Αποφάσεις κατά τη συντήρηση

Από τα σημεία που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι εμφανές πως για τη σύσταση μιας αναλυτικής πολιτικής συντήρησης, για οποιοδήποτε σύνολο εγκαταστάσεων, απαιτείται η λήψη διαφόρων σημαντικών αποφάσεων. Οι αποφάσεις αυτές αφορούν το ποιες εγκαταστάσεις ή επί μέρους αντικείμενα θα συντηρηθούν, τί είδους συντήρηση θα εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση και πως θα οργανωθεί η συντήρηση.

Οποιαδήποτε δραστηριότητα συντήρησης και αν εφαρμοστεί εμπεριέχει κάποιο κόστος. Για παράδειγμα, η διαδικασία της επιθεώρησης είναι αρκετά δαπανηρή λόγο του ότι εμπλέκει κάποιον ο οποίος είναι αφοσιωμένος για κάποιο χρονικό διάστημα σε μια συγκεκριμένη εγκατάσταση ή μηχανή. Αυτό ίσως σημαίνει πως η λειτουργία της εγκατάστασης πρέπει να διακοπεί για κάποιο διάστημα και συνεπώς μειώνεται ο χρόνος παραγωγικότητας. Μεγάλο είναι και το κόστος της προγραμματισμένης συντήρησης λόγο του προσωπικού και των υλικών που απαιτούνται, αλλά και στο γεγονός πως πρέπει να διακοπεί η λειτουργία της εγκατάστασης αφού δεν είναι δυνατό να διεξαχθεί οποιαδήποτε ενέργεια καθώς βρίσκεται σε λειτουργία. Από την άλλη, η προληπτική συντήρηση δύναται να έχει μικρότερο κόστος καθώς υπό κανονικές συνθήκες γίνεται κατά την διάρκεια που η εγκατάσταση βρίσκεται εκτός λειτουργίας για κάποιο λόγο, π.χ έλλειψη πρώτων υλών, διακοπή ρεύματος, καθαρισμός μηχανών λόγο αλλαγής προϊόντων (CIP-Clean In Place) .

Σε κάποιο βαθμό, όλες οι παραπάνω διαδικασίες συντήρησης μπορούν να προγραμματιστούν να γίνουν σε χρόνο που η διακοπή λόγο της αδράνειας της εγκατάστασης ελαχιστοποιείται. Φυσικά, στην περίπτωση μηχανικής βλάβης που μπορεί να συμβεί οποιαδήποτε στιγμή και να προκαλέσει διακοπή στη λειτουργία της εγκατάστασης, η συντήρηση θα πρέπει να γίνει άμεσα. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε υψηλό κόστος και λόγω της άμεσης επιδιόρθωσης αλλά και λόγω του χρόνου που χάνεται καθώς επισκευάζεται η εγκατάσταση. Εάν το κόστος σε οποιαδήποτε από τις προαναφερόμενες διαδικασίες συντήρησης υπερβαίνει το ωφέλιμο κόστος τότε ίσως είναι καλύτερα να αντικαθιστούμε τα εξαρτήματα ή μηχανήματα όταν παθαίνουν σοβαρή μηχανική βλάβη. Γενικά, ο τρόπος λειτουργίας των μηχανημάτων ή εξαρτημάτων καθώς και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες χρησιμοποιούνται καθιστούν αναγκαία μια τέτοια προσέγγιση. Γι'αυτό το λόγο υπάρχουν περιπτώσεις όπου μερικά εξαρτήματα δεν θα πρέπει να συντηρούνται εκτός ίσως από μια συνηθισμένη επιθεώρηση και σέρβις, ώστε να αποφύγουμε τυχόν κινδύνους που αφορούν την ασφάλεια και υγεία των εργαζομένων. Επίσης, ο διαχωρισμός των εξαρτημάτων και μηχανημάτων τα οποία υπόκεινται σε μηχανική βλάβη ή αστοχία μπορεί καταστήσουν δύσκολη την ανάπτυξη μιας αποτελεσματικής στρατηγικής προληπτικής συντήρησης. Για παράδειγμα, εάν το κόστος μιας μονάδας χρόνου για την εφαρμογή προληπτικής συντήρησης είναι μεγαλύτερο από το κόστος μιας μονάδας χρόνου για εφαρμογή συντήρησης από μηχανική βλάβη, τότε πιο πιθανόν να βασιστούμε στην δεύτερη επιλογή.

Αν και σε μερικές περιπτώσεις η προληπτική συντήρηση μπορεί να μην είναι η κατάλληλη ή ακόμη και η συντήρηση μετά από μηχανική βλάβη, όπως για παράδειγμα επισκευή, μπορεί να μην γίνει, στις περισσότερες περιπτώσεις για τις εγκαταστάσεις απαιτούνται η μία ή και οι δύο αυτές προσεγγίσεις εκτός από την επιθεώρηση και το σέρβις. Σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να αποφασιστεί ποιες "μονάδες" των εγκαταστάσεων πρόκειται να συντηρηθούν. Υπάρχουν τρεις πιθανές προσεγγίσεις για το τι ορίζεται ως "μονάδα":

(1) Ένα μεγάλο σύστημα το οποίο αποτελείται από διάφορες αλληλοεξαρτώμενες εγκαταστάσεις μπορεί να θεωρηθεί ως μια "μονάδα" για σκοπούς συντήρησης.

(2) Εγκαταστάσεις οι οποίες είναι ανεξάρτητες μπορούν να θεωρηθούν ως μια "μονάδα".

(3) Μέρη ή υποτμήματα μιας συγκεκριμένης εγκατάστασης για τα οποία πρέπει να προγραμματιστεί συντήρηση μπορούν να θεωρηθούν ως μια "μονάδα".

Για παράδειγμα, στην περίπτωση μιας κατασκευαστικής βιομηχανίας, ένα σύστημα μπορεί να συμπεριλαμβάνει όλες τις αλληλοεξαρτώμενες και αλληλοσυνδεδεμένες μηχανές σε μια γραμμή συναρμολόγησης. Αυτό ισχύει δεδομένου ότι η προσέγγιση μιας ανεξάρτητης

εγκατάστασης μπορεί να περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός σχεδίου συντήρησης για κάθε μια από τις εργαλειομηχανές ή τις εγκαταστάσεις στο σύστημα αυτό ξεχωριστά. Η τρίτη προσέγγιση μπορεί να εμπεριέχει τον προγραμματισμό της συντήρησης για τα συγκεκριμένα εξαρτήματα αυτών των ξεχωριστών εγκαταστάσεων, όπως για παράδειγμα τα ηλεκτρικά μοτέρ, ιμάντες μεταφοράς, κ.τ.λ. (Wild 1989).

1.4 Τύποι συντήρησης

Η βέλτιστη πολιτική συντήρησης μπορεί να οριστεί σύμφωνα με τον Weinstein (1996, σελ.16) ως «η πολιτική αυτή που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος για μέγιστη απόδοση των δραστηριοτήτων προληπτικής και έκτακτης συντήρησης, καθώς και των χρηματοοικονομικών συνεπειών στον οργανισμό από τις διακοπές και τις καθυστερήσεις στο πρόγραμμα παραγωγής» Στη βιβλιογραφία συναντάμε ποικίλες απόψεις συγγραφέων για το ποιους ορίζουν ως τύπους συντήρησης. Μερικές από αυτές τις απόψεις αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Ο Lewis (1987) διαχώρισε τις δραστηριότητες συντήρησης σε δυο κύριες κατηγορίες: την έκτακτη ή λόγο μηχανικής βλάβης συντήρηση και την προληπτική συντήρηση. Στην πρώτη περίπτωση, οι δραστηριότητες έκτακτης συντήρησης περιλαμβάνουν την διενέργεια επισκευών στον εξοπλισμό της παραγωγής όταν και εφόσον παρουσιαστούν σημάδια βλάβης ή μετά που συμβεί κάποια βλάβη. Στην περίπτωση, όμως, που στηριχθούμε αποκλειστικά στην έκτακτη συντήρηση, η οποία χαρακτηρίζεται ως μια προσέγγιση αντίδρασης, αυτό μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ακεραιότητα του προγράμματος παραγωγής αλλά και τη ποιότητα των προϊόντων. Στη περίπτωση προληπτικής συντήρησης προτείνεται η σύσταση ενός περιβάλλοντος πραγματικού χρόνου όπου μελετούνται οι διάφορες καταστάσεις οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν διακοπή του προγράμματος παραγωγής. Σκοπός είναι η αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος, σε μακροπρόθεσμη περίοδο, μειώνοντας την φθορά, την διάβρωση, την καταπόνηση των επιμέρους εξαρτημάτων και οποιαδήποτε άλλα φαινόμενα σχετίζονται με τη μείωση της διάρκειας ζωής του συστήματος.

Σύμφωνα με τους Pham και Wang (1996) η συντήρηση θα μπορούσε να ταξινομηθεί σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με το βαθμό στον οποίο οι συνθήκες εργασίας ενός αντικειμένου έχουν αποκατασταθεί μετά από τις δραστηριότητες συντήρησης. Οι κατηγορίες αυτές είναι: (α) Απόλυτη επισκευή ή απόλυτη συντήρηση, (β) Ελάχιστη επισκευή ή ελάχιστη συντήρηση, (γ) Ελλιπής επισκευή ή ελλιπής συντήρηση, (δ) Χειρότερη επισκευή ή συντήρηση. Ειδικότερα,

ορίζουν την ελλιπή επισκευή ή ελλιπή συντήρηση ως τις ενέργειες της συντήρησης οι οποίες βελτιώνουν την αποτελεσματική διάρκεια ζωής και την κατάσταση του συστήματος, σε σύγκριση με εκείνες στις οποίες βρισκόταν ακριβώς πριν πραγματοποιηθεί η συντήρηση.

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετά μοντέλα για την ελλιπή συντήρηση. Οι Nguyen και Murthy (1981) μελέτησαν το πρόβλημα βέλτιστης πολιτικής προληπτικής συντήρησης για συστήματα τα οποία μπορούν να επισκευαστούν. Για την δημιουργία των μοντέλων τους εξέτασαν δυο πολιτικές προληπτικής συντήρησης, I και II, οι οποίες έχουν ως εξής:

(1) Πολιτική I: Το μοντέλο αυτό προληπτικής συντήρησης βασίζεται στη «διάρκεια ζωής» του συστήματος. Το σύστημα υφίσταται προληπτική συντήρηση σε περίπτωση βλάβης ή μόλις συμπληρωθούν οι ώρες από την τελευταία προληπτική συντήρηση ή αντικατάσταση, και αυτό εξαρτάται από το ποιο από τα δυο θα συμβεί πρώτο. Μετά από ένα προκαθορισμένο αριθμό συντηρήσεων το σύστημα αντικαθιστάται και σε περίπτωση βλάβης υπάρχει επιβάρυνση του οργανισμού με ένα επιπρόσθετο κόστος El-Ferik και Ben-Daya (2006).

(2) Πολιτική II: Στην περίπτωση εφαρμογής αυτής της πολιτικής γίνεται προληπτική συντήρηση σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα μετά από την προηγούμενη συντήρηση. Το σύστημα αντικαθιστάται μετά το πέρας συγκεκριμένου αριθμού συντηρήσεων και σε περίπτωση που έχουμε κάποια βλάβη ή αστοχία έχουμε ένα ελάχιστο κόστος επισκευής (Nakagawa 1988, Lin et al. 2000,2001).

Στην πολιτική II στηρίχθηκαν και οι Ben-Daya και Khursheed (2002), οι οποίοι επέκτειναν το μοντέλο των Lee και Srinivason's (2001) λαμβάνοντας υπόψη τις ελλιπείς δραστηριότητες που μπορεί να παρουσιαστούν κατά την προληπτική συντήρηση. Συγκεκριμένα, μελέτησαν ένα αντικείμενο του συστήματος το οποίο υπόκειται σε τυχαίες αστοχίες και των οποίων ο ρυθμός τους αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου. Στο μοντέλο που πρότειναν οι Ben-Daya και Khursheed (2002), οι δραστηριότητες που γίνονται κατά την προληπτική συντήρηση μειώνουν τον ρυθμό εμφάνισης αστοχιών στο αντικείμενο και αυξάνουν την διάρκεια ζωής του συστήματος.

Σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, η προληπτική συντήρηση μπορεί να αποκαταστήσει μόνο κάποιο μέρος της απόδοσης του συστήματος. Υπάρχουν πολλά τέτοια συστήματα, όπως για παράδειγμα τα αεροσκάφη, οι ιμάντες μεταφοράς, ο εξοπλισμός φωτοαντίγραφων, οι πρέσες σφραγίδων, οι τουρμπίνες, οι μηχανές λεωφορείων κ.τ.λ. Για τέτοιου είδους συστήματα τα μοντέλα μη τέλειας προληπτικής συντήρησης είναι ιδιαιτέρως χρήσιμα, λόγω του ότι οι επαναλαμβανόμενες επισκευές βελτιώνουν βραχυπρόθεσμα την κατάσταση τους. Ωστόσο, δεν

είναι τόσο αποτελεσματικά για μακροπρόθεσμη αποκατάσταση, αφού ο ρυθμός εμφάνισης βλαβών του συστήματος τείνει να αυξάνεται λόγο της καταπόνησης των επιμέρους συστημάτων του (El-Ferik 2008).

1.5 Εφαρμογή της συντήρησης

Η διενέργεια της συντήρησης σε μια εγκατάσταση ή μηχανή μπορεί να γίνει από: (α) τα άτομα που συνήθως χρησιμοποιούν τον εξοπλισμό, (β) από προσωπικό το οποίο ανήκει στο τμήμα συντήρησης της εταιρίας ή (3) από προσωπικό συντήρησης το οποίο ανήκει σε εξωτερικό οργανισμό, όπως για παράδειγμα, εταιρία με συγκεκριμένο συμβόλαιο σέρβις από τον προμηθευτή του συγκεκριμένου εξοπλισμού.

Η πρώτη προσέγγιση συνήθως εφαρμόζεται για επιθεώρηση του εξοπλισμού και μερικές φορές για εργασίες σέρβις. Επίσης, μπορεί να είναι κατάλληλη όταν οι δραστηριότητες της προληπτικής συντήρησης είναι σχετικά σαφής και λαμβάνονται όταν και αν χρειαστούν. Ένα παράδειγμα είναι όταν απαιτείται άμεση προληπτική ενέργεια από τους χειριστές του εξοπλισμού, εφόσον δεν υπάρχει καμία προειδοποίηση για την παρουσίαση της μηχανικής βλάβης.

Πιο συχνή, όμως, σε ένα οργανισμό είναι η ύπαρξη ειδικού τμήματος συντήρησης. Το προσωπικό και οι πόροι του τμήματος απασχολούνται και χρησιμοποιούνται στην επιθεώρηση, στο σέρβις, στην προληπτική συντήρηση και στις εργασίες επιδιόρθωσης του εξοπλισμού. Κάποιες από τις ενέργειες αυτές μπορεί να γίνονται σε καθημερινή βάση από συγκεκριμένα άτομα. Με την ύπαρξη τμήματος συντήρησης στον οργανισμό, όμως, προκύπτουν κάποια επιπρόσθετα θέματα που πρέπει να λυθούν κατά την οργάνωση της συντήρησης. Για παράδειγμα, πρέπει να αποφασιστεί ο αριθμός του προσωπικού της ομάδας συντήρησης, το εύρος κατάρτισης που απαιτείται, να γίνει υπολογισμός του αποθέματος εξαρτημάτων, αριθμός του εξοπλισμού που πρέπει να είναι σε ετοιμότητα κ.τ.λ..

Η συντήρηση αποτελεί ευθύνη ενός εξωτερικού οργανισμού είτε όταν εμπλέκεται ένας ειδικός εξοπλισμός στη διαδικασία είτε όταν παρέχεται ένα υποχρεωτικό ή κανονικό συμβόλαιο για σέρβις ή συντήρηση ως μέρος του συμβολαίου αγοράς για τον συγκεκριμένο εξοπλισμό. Παράδειγμα μιας τέτοιας συντήρησης από εξωτερικό οργανισμό είναι ο έλεγχος και το σέρβις των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε μια επιχείρηση μετά την εγκατάστασή τους ο οποίος γίνεται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα ή κάποιων ειδικών μηχανημάτων παραγωγής. Η

προσέγγιση αυτή της συντήρησης μπορεί να είναι επίσης κατάλληλη όταν οι εργασίες συντήρησης είναι πολύ εξειδικευμένες ή επικίνδυνες, αλλά πολύ σποραδικές, όπως για παράδειγμα η συντήρηση πολύπλοκων εξοπλισμών ή ακόμη εγκαταστάσεων που βρίσκονται σε μέρη όπου η πρόσβασή τους είναι δύσκολη (π.χ σε μεγάλο ύψος, υποβρύχια).

Όμως, η δέσμευση για προγραμματισμό μιας αποτελεσματικής συντήρησης απαιτεί την συλλογή και συντήρηση αρκετών δεδομένων. Συγκεκριμένα, είναι αναγκαία μια πλήρης λίστα με όλες τις εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται, με την ημερομηνία αγοράς τους και το ιστορικό συντήρησής τους, η οποία λίστα πρέπει να ενημερώνεται συνεχώς. Ακόμη, πρέπει να υπάρχουν στατιστικά στοιχεία σχετικά με το χρόνο λειτουργίας του εξοπλισμού μεταξύ των διαφόρων μηχανικών βλαβών και του χρόνου που απαιτήθηκε για την επισκευή τους. Τα στοιχεία αυτά πρέπει να συντηρούνται ώστε να βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων σχετικά με το πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης και τα πλεονεκτήματά της σε σχέση με την εφαρμογή της συντήρησης επισκευής.

Η «βάση δεδομένων» όλων των πληροφοριών που αφορούν κάθε εγκατάσταση πρέπει να ενημερώνεται τακτικά, ώστε να μπορούν να εξάγονται τα απαραίτητα στατιστικά στοιχεία και άλλα χρήσιμα δεδομένα. Συχνά τέτοια δεδομένα είναι αποθηκευμένα σε σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή, το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του προγράμματος συντήρησης, την ανάθεση των πόρων, την κατανομή του διαθέσιμου προσωπικού στις διάφορες εργασίες συντήρησης, κ.τ.λ. (Wild 1989).

1.6 Μοντέλα προγραμματισμού συντήρησης

Ο προγραμματισμός της συντήρησης περιλαμβάνει το σχεδιασμό των περιόδων κατά τις οποίες θα εκτελείται προληπτική συντήρηση, αλλά καθορίζει επίσης το μέγεθος του προσωπικού συντήρησης, το πότε και το πόσα υλικά πρέπει να αγοραστούν και τον προγραμματισμό των διαφόρων εργασιών συντήρησης. Η κάθε μια από αυτές τις λειτουργίες αναπτύσσεται στη συνέχεια.

Σύμφωνα με τους Ashayeri et al.(1995, σελ.4), «η προληπτική ή προγραμματισμένη συντήρηση κοστίζει λιγότερο από τη διορθωτική συντήρηση». Η προληπτική συντήρηση περιλαμβάνει προσχεδιασμένες και προγραμματισμένες ρυθμίσεις, εκτενείς επισκευές, επιθεωρήσεις και λιπάνσεις για να διατηρείται ο εξοπλισμός και οι εγκαταστάσεις σε τέτοια κατάσταση έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι βλάβες και οι επείγουσες επισκευές. Αντιθέτως, η

διορθωτική συντήρηση ή η συντήρηση σε περίπτωση έκτακτης βλάβης συμπεριλαμβάνει την επιδιόρθωση, αντικατάσταση ή επισκευή του εξοπλισμού σε λειτουργήσιμη κατάσταση αφού έχει συμβεί κάποια βλάβη. Για να οργανωθεί ένα αποτελεσματικό σχέδιο προληπτικής συντήρησης, η διοίκηση πρέπει να γνωρίζει τη χρονική περίοδο κατά την οποία το τμήμα λειτουργεί και τον χρόνο που χρειάζεται για να επισκευαστεί, υποδιαιρεμένο σε διαφορετικές φάσεις της διαδικασίας συντήρησης. Ποσοτικά μοντέλα που καθορίζουν πότε πρέπει να εκτελείται προληπτική συντήρηση παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία από τους Gertsbakh (1977) και Lyonnet (1991).

Ένα βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι διοικήσεις των οργανισμών είναι η απόφαση του μεγέθους της ομάδας συντήρησης και το οποίο συναντάμε σε πολλά άρθρα στην βιβλιογραφία. Οι περισσότεροι συγγραφείς χρησιμοποιούν την θεωρία της αναμονής ή την προσομοίωση για να αναλύσουν το πρόβλημα αυτό. Η πολυπλοκότητα των μοντέλων εξαρτάται από το εάν υπάρχουν τεχνίτες με λίγες ή πολλές δεξιότητες. Μια εκτεταμένη περίληψη της βιβλιογραφίας πάνω στο θέμα του μεγέθους του επιτελείου συντήρησης γίνεται από τον Mabini (1991).

Επίσης, σημαντικό ζήτημα αποτελεί το λειτουργικό πρόβλημα του προγραμματισμού των διαφορετικών εργασιών συντήρησης. Το πρόβλημα αυτό αναφέρεται στην ανάθεση συγκεκριμένων εργασιών σε ξεχωριστούς χειριστές οι οποίοι πρέπει να τις ολοκληρώσουν σε προκαθορισμένο χρόνο και με συγκεκριμένη σειρά διεκπεραίωσης. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ο προγραμματισμός PERT καθώς και άλλες σχετικές τεχνικές. Σχετική με το θέμα βιβλιογραφία παρουσιάζεται από τους French (1982) και Selen και Heuts (1990).

Καθοριστική σημασία για την δημιουργία ενός αποτελεσματικού προγράμματος συντήρησης έχει ο προγραμματισμός των υλικών συντήρησης, ο οποίος υποδηλώνει ένα καλό απόθεμα και μια καλή στρατηγική παραγγελιών. Μια εκτενής περίληψη των μεθοδολογιών προγραμματισμού υλικών συντήρησης δίνεται από τους Silver και Peterson (1985), στις οποίες συμπεριλαμβάνεται επίσης η περίπτωση αντικατάστασης του εξοπλισμού, που αποτελεί μια επενδυτική απόφαση του οργανισμού. Όσον αφορά τις περιπτώσεις αντικατάστασης, μπορούμε να βρούμε αρκετές πληροφορίες για τις μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί από τον Mabini (1991). Σύμφωνα με τους J.Ashayeri e.t (1995), «τα περισσότερα μοντέλα αντικατάστασης βασίζονται σε μια «Μαρκοβιανή» διαδικασία επιδείνωσης, δηλαδή, η επιδείνωση ενός συστήματος σε μια μελλοντική κατάσταση εξαρτάται μόνο από την άμεσα προηγούμενη κατάσταση».

Εξαιτίας της τεράστιας ποσότητας τεχνικών και οικονομικών δεδομένων που εμπλέκονται στη διαχείριση της συντήρησης, η βοήθεια με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι αναγκαία. Ο Pintelon (1990) αναφέρει ότι με την εγκατάστασή και χρήση ενός υπολογιστικού συστήματος στη διαδικασία προγραμματισμού της συντήρησης έχουμε τα παρακάτω οφέλη:

- μείωση χρόνου που ξοδεύεται στην προληπτική συντήρηση, λόγο καλύτερου σχεδιασμού
- λιγότερες υπερωρίες του προσωπικού συντήρησης
- μείωση του χρόνου που ξοδεύεται σε επιδιορθωτική συντήρηση
- μείωση της απώλειας παραγωγής εξαιτίας των μηχανικών βλαβών
- μείωση του χρόνου που ξοδεύεται σε διαχειριστικά θέματα της υπηρεσίας συντήρησης
- μεγαλύτερος χρόνος ζωής του εξοπλισμού, λόγο καλύτερης προληπτικής συντήρησης
- μείωση της κατανάλωσης ενέργειας

Όμως, όπως με όλες τις υπολογιστικά υποβοηθούμενες τεχνολογίες, ο σχεδιασμός της συντήρησης και ο έλεγχος πρέπει να είναι καλά δομημένες. Το λογισμικό σχεδιασμού συντήρησης πρέπει να ενσωματωθεί με όλες τις άλλες εφαρμογές του υπολογιστή όπως τον σχεδιασμό παραγωγής, σχεδιασμό καταλόγου ανταλλακτικών και το σχεδιασμό με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (CAD), καθώς ένα καλύτερο σχέδιο επηρεάζει τη συχνότητα και το μέγεθος εργασιών της απαιτούμενης συντήρησης. Εξειδικευμένα συστήματα θα μπορούσαν επίσης να είναι χρήσιμα σε επιθεωρήσεις και διαγνώσεις ελαττωμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προγραμματισμός Παραγωγής

Εισαγωγή

Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η διοίκηση μιας κατασκευαστικής βιομηχανίας είναι ο «Προγραμματισμός της Παραγωγής» αφού το πρόγραμμα θα πρέπει από τη μια να ικανοποιεί τους πελάτες της επιχείρησης ως προς τις ζητούμενες ποσότητες και χρόνους παράδοσης και από την άλλη να ελαχιστοποιεί τα λειτουργικά έξοδα και τις δαπάνες αποθήκευσης πρώτων υλών και τελειωμένων προϊόντων. Ο προγραμματισμός της παραγωγής γίνεται συνήθως σε ετήσια βάση, γίνεται στη συνέχεια ο τριμηνιαίος προγραμματισμός, ο μηνιαίος και τέλος εκδίδεται το αναλυτικό εβδομαδιαίο πρόγραμμα παραγωγής (Ιωαννίδου 2006). Οι χρονικές αυτές περίοδοι προγραμματισμού δεν είναι όμως ίδιες για όλες τις βιομηχανίες, καθώς διαφέρουν ανάλογα με το χώρο που δραστηριοποιείται η κάθε μια, τον τύπο και εποχικότητα των προϊόντων που παράγει, τη χωρητικότητα των αποθηκευτικών χώρων και της παραγωγής, αλλά κυρίως από τη στρατηγική που ακολουθεί η κάθε διοίκηση.

Αρκετές φορές υπάρχει η ανάγκη για αναθεώρηση των προγραμμάτων αυτών, ακόμα και του εβδομαδιαίου όταν μία οι περισσότερες παράμετροι που επηρεάζουν τη ζήτηση των τελικών προϊόντων ή τη διαθεσιμότητα των συντελεστών παραγωγής τροποποιούνται για διάφορους λόγους. Για να μειωθεί το κόστος των αποθεμάτων τα τελευταία χρόνια υιοθετήθηκε σε πολλές επιχειρήσεις η πολιτική του “just-in-time” τόσο στα τελειωμένα προϊόντα όσο και στις βασικές πρώτες ύλες με αποτέλεσμα τα προγράμματα να είναι περισσότερο ευάλωτα σε καθυστερήσεις στις παραδόσεις των προμηθευτών. Οι συχνές τροποποιήσεις των προγραμμάτων παραγωγής με τη σειρά τους αποτελούν πηγή κόστους αλλά και ψυχολογικής αναστάτωσης, ενώ μπορεί να αποτελέσουν αιτία λαθών και προβλημάτων ποιότητας.

Είναι, επίσης, χρήσιμο να καθοριστεί η σημασία αλλά και η θέση που κατέχει ο προγραμματισμός παραγωγής πάνω στο «puzzle» που ονομάζεται "Αλυσίδα της Αξίας”. Ο βαθμός στον οποίο μια επιχείρηση οργανώνει αποδοτικά τις δραστηριότητες της αποτελεί τη πηγή του ανταγωνιστικού της πλεονεκτήματος. Η διαφορά μεταξύ της τελικής τιμής που πληρώνει ο πελάτης και του αθροίσματος όλων των στοιχείων του κόστους παραγωγής και διάθεσης του προϊόντος αποτελεί το κέρδος που δημιουργεί η “Αλυσίδα της Αξίας” (Παππής 2006). Οι κύριες δραστηριότητες της “Αλυσίδα της Αξίας” είναι :

(1) *Οι δραστηριότητες προμηθειών* προς την επιχείρηση που περιλαμβάνουν τις παραγγελίες πρώτων υλών, την παραλαβή, τον έλεγχο και τη διαχείριση των αποθεμάτων τους.

(2) *Οι παραγωγικές δραστηριότητες* που μετασχηματίζουν τις εισροές σε τελικά προϊόντα όπως είναι η επεξεργασία, η συσκευασία, η συναρμολόγηση, η συντήρηση του εξοπλισμού, και ο ποιοτικός έλεγχος. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε σχέση με τις παραγωγικές δραστηριότητες είναι δύο ειδών:

(α) Στρατηγικές αποφάσεις που αφορούν ζητήματα όπως η επιλογή των προϊόντων, η τοποθεσία της μονάδας , ο χωροταξικός σχεδιασμός, η παραγωγική δυναμικότητα του συστήματος, το είδος των μηχανημάτων και η μέθοδος επεξεργασίας.

(β)Τακτικές ή λειτουργικές αποφάσεις που αφορούν τη πρόβλεψη της ζήτησης, τη διαχείριση των αποθεμάτων, <u>τον προγραμματισμό της παραγωγής</u> και τα συστήματα της συντήρησης.

(3) *Το Μάρκετινγκ και οι πωλήσεις*. Οι δραστηριότητες αυτές αφορούν τη προώθηση του προϊόντος στον πελάτη και περιλαμβάνουν τη διαφήμιση, την οργάνωση των πωλήσεων, την τιμολόγηση και εκπόνηση προσφορών, τη προώθηση με δώρα και διαγωνισμούς, τον σχεδιασμό νέων προϊόντων, συσκευασιών και άλλα.

(4) *Τις δραστηριότητες προμηθειών* από την επιχείρηση προς τους πελάτες που σχετίζονται με την αποθήκευση και φυσική διανομή των τελικών προϊόντων στους πελάτες , τη διαχείριση των παραγγελιών, την οργάνωση και έλεγχο των τοπικών πρατηρίων και των μέσων διανομής κ.λ.π.

(5) *Την εξυπηρέτηση των πελατών* που περιλαμβάνει δραστηριότητες που αυξάνουν ή συντηρούν την αξία ενός προϊόντος όπως η τοποθέτηση, η επισκευή, η προμήθεια ανταλλακτικών και η βελτίωση του προϊόντος.

Η αποτελεσματική διεξαγωγή των κύριων λειτουργιών εξαρτάται, σε ένα μεγάλο βαθμό, από τις δραστηριότητες υποστήριξης που είναι οι υπηρεσίες, οι ανθρώπινοι πόροι, η τεχνολογία και το σύστημα αγορών (Παππής 2006).

Ο επιτυχημένος προγραμματισμός της παραγωγής αποτελεί το στέρεο θεμέλιο πάνω στο οποίο βασίζεται η προσπάθεια του τμήματος παραγωγής για αύξηση της παραγωγικότητας, με στόχο να δώσει στην επιχείρηση ένα ισχυρό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Η όλη προσπάθεια για σωστό προγραμματισμό πρέπει να γίνεται μελετημένα και να βασίζεται σε επιστημονικές μεθόδους προσαρμοσμένες στις ιδιαιτερότητες της επιχείρησης. Σύμφωνα με τον Παππή (2006, σελ.80), τα βασικά συστατικά στοιχεία ενός σωστού προγραμματισμού είναι τα εξής:

1. Πρόβλεψη ζήτησης
2. Συγκεντρωτικός Προγραμματισμός
3. Καθορισμός Αποθεμάτων Τελειωμένων Προϊόντων
4. Προγραμματισμός Πρώτων Υλών

Για να μπορέσουν να ολοκληρωθούν οι πιο πάνω διεργασίες απαιτείται η συλλογή πληροφοριών από διαφορετικά τμήματα της επιχείρησης. Η επιχείρηση λειτουργεί σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον και καλείται να αντιμετωπίσει καθημερινά νέες προκλήσεις. Η πληροφόρηση αυτή αναπόφευκτα δεν μπορεί να είναι μονόδρομη ή στατική. Οι νέες πληροφορίες πρέπει να ρέουν απρόσκοπτα από το ένα τμήμα στο άλλο, να είναι ακριβείς και μη αντιφατικές. Η απαίτηση αυτή γεννά την αναγκαιότητα ύπαρξης μιας σχεσιακής βάσης δεδομένων στην οποία όλα τα τμήματα θα προσφέρουν αλλά και θα αντλούν όλη την απαραίτητη πληροφόρηση. Πρόσβαση σε αυτή θα μπορούν να έχουν οι προμηθευτές αλλά και οι πελάτες της επιχείρησης για να επιτευχθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας.

2.1 Μοντέλα προγραμματισμού παραγωγής

Ο προγραμματισμός παραγωγής περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός αναλυτικού προγράμματος το οποίο αναφέρεται στον τύπο των προϊόντων που πρέπει να παραχθούν, τις αντίστοιχες ποσότητες τους, την εγκατάσταση που θα γίνει η διαδικασία παραγωγής, τη σειρά παραγωγής τους και άλλες παραμέτρους που να διαφέρουν ανά επιχείρηση. Συνήθως τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του αναλυτικού αυτού προγράμματος παραγωγής δεν λαμβάνουν την παράμετρο «συντήρηση» καθόλου υπόψη τους ή την λαμβάνουν μερικώς κάνοντας γενικές υποθέσεις.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά μοντέλα που αναφέρονται στον προγραμματισμό της παραγωγής χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τη συντήρηση και τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικές

συναρτήσεις προς βελτιστοποίηση, διαφορετικούς περιορισμούς και διαφορετικές προσεγγίσεις ως προς τις μεθόδους επίλυσής τους.

Για παράδειγμα, το μοντέλο των Guo et al.(2007) αναφέρεται στο πρόβλημα προγραμματισμού παραγωγής για ένα σύστημα με περιορισμένη χωρητικότητα αποθέματος και επιτρεπόμενη έλλειψη στοκ. Οι συγγραφείς βασίστηκαν στο γεγονός πως κάποια συστήματα παραγωγής περιορίζονται από τη χωρητικότητα των αποθηκευτικών χώρων παρά από τη χωρητικότητα της παραγωγής, όπως για παράδειγμα στις βιομηχανίες χημικών, επεξεργασίας τροφίμων, κ.α. Αύξησαν, επίσης, την πολυπλοκότητα του προβλήματος λαμβάνοντας υπόψη πως: (1) οι συναρτήσεις του κόστους παραγωγής και χαμένων πωλήσεων ποικίλουν με το χρόνο και δεν αυξάνονται και (2) η χωρητικότητα του αποθέματος είναι σταθερή. Για την επίλυση του μοντέλου ανέπτυξαν ένα αλγόριθμο με χρονικά πολυώνυμα χρησιμοποιώντας την προσέγγιση ροής δικτύου.

Μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό της παραγωγής στη μεταποιητική βιομηχανία γίνεται από τον Kallrath (2002). Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στη βελτιστοποίηση με χρήση μεικτών ακέραιων αριθμών, η οποία παρέχει τη βάση για τη λήψη αποφάσεων που αφορούν την παραγωγή και ανταποκρίνεται πιο αποτελεσματικά σε πολύπλοκα προβλήματα. Αποτελεί επίσης μια χρήσιμη τεχνική για τη μείωση του κόστους παραγωγής και τη βελτιστοποίηση άλλων αντικειμενικών στόχων.

Τα μοντέλα προγραμματισμού παραγωγής που ενσωματώνουν την κατάσταση του εξοπλισμού στις αντικειμενικές τους συναρτήσεις, απλά επιτρέπουν την περίπτωση ο εξοπλισμός να βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Η περίπτωση εμφάνισης μηχανικής βλάβης, εξετάστηκε από τους Akella και Kumar (1986), Lou et al.(1992) μέσα στο πλαίσιο των μοντέλων ελέγχου συνεχούς ροής. Επίσης, οι Hong et al.(1992) και οι Taylor et al.(1982) εισήγαγαν την παράμετρο της συντήρησης στα μοντέλα που ανέπτυξαν, τα οποία αναφέρονταν στα συστήματα παραγωγής ιδιαίτερων τμημάτων. Η συντήρηση λήφθηκε υπόψη και στην ανάπτυξη των μοντέλων υπολογισμού μεγέθους παρτίδας (Lot-sizing) των Groenevelt et al.(1992a,1992b). Πρέπει να σημειωθεί πως σε όλα τα προαναφερόμενα μοντέλα έγινε η υπόθεση πως ο εξοπλισμός παραγωγής μπορεί να βρεθεί σε μόνο δύο καταστάσεις: τη λειτουργική και μη-λειτουργική κατάσταση. Επιπρόσθετα, έγινε η υπόθεση πως η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο εξοπλισμός δεν επηρεάζει την ποιότητα ή την απόδοση της διαδικασίας παραγωγής.

Άλλα μοντέλα παραγωγής, τα οποία σχετίζονται με το πρόβλημα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, περιλαμβάνουν εκτός από όλες τις άλλες παραμέτρους και την μεταβλητή της

απόδοσης του συστήματος. Οι Yano και Lee (1995) παρουσίασαν μια εκτενή ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που αναφέρεται στα μοντέλα αυτά.

Στην παρούσα εργασία δεν γίνεται περαιτέρω παρουσίαση ή ανάλυση των μοντέλων προγραμματισμού παραγωγής, καθώς στόχος μας είναι η ανάπτυξη των μοντέλων που χρησιμοποιούνται για τον ενιαίο προγραμματισμό της παραγωγής και της συντήρησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μοντέλα προγραμματισμού παραγωγής και συντήρησης

Εισαγωγή

Ο ταυτόχρονος προγραμματισμός της παραγωγής και της προληπτικής συντήρησης είναι ένα πρόβλημα που δεν έχει λάβει αρκετή προσοχή στη βιβλιογραφία. Τα περισσότερα άρθρα που αναφέρονται στο θέμα της συντήρησης ασχολούνται με τη λήψη της απόφασης για τα διαστήματα μεταξύ των οποίων πρέπει να εκτελείται προληπτική συντήρηση, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα το μοντέλο που βασίζεται στην "διάρκεια ζωής" του εξοπλισμού (Zimmerman and Sovereign 1974).

Οι Joshi και ο Gupta (1986) χρησιμοποίησαν ένα αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής και το ιστορικό διαφόρων αποτυχιών του εξοπλισμού για να οργανώσουν τη συντήρηση με στόχο να μειώσουν τα αναμενόμενα κόστη μηχανικών βλαβών. Κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το μοντέλο τους είναι ευαίσθητο σε αλλαγές στο πρόγραμμα παραγωγής και αυτό οδηγεί στην αύξηση των ωρών λειτουργίας του εξοπλισμού και κατά συνέπεια της πιθανότητας εμφάνισης μηχανικής βλάβης. Ο Pintelon (1990) ανάλυσε διάφορα μοντέλα για τον ταυτόχρονο σχεδιασμό παραγωγής και της συντήρησης, αλλά αυτά καθόριζαν το χρόνο μεταξύ δυο εργασιών προληπτικής συντήρησης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο προγραμματισμός της συντήρησης εκτός αυτών των διαστημάτων.

Επίσης, οι Aghezzaf et al. (2007) πρότειναν ένα μοντέλο το οποίο συνδυάζει τη παραγωγή και τη συντήρηση μέσα σε ένα σύστημα παραγωγής με παρτίδες. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τον καθορισμό ενός ενιαίου προγράμματος παραγωγής και συντήρησης, ικανοποιώντας τη ζήτηση καθ' όλο τον χρονικό ορίζοντα του προγράμματος, χωρίς εκκρεμείς παραγγελίες. Ταυτόχρονα, όμως, ελαχιστοποιούνται τα αναμενόμενα συνολικά κόστη παραγωγής και συντήρησης. Η περίπτωση που επιλέχθηκε για την δημιουργία του μοντέλου αφορούσε ένα σύστημα παραγωγής το οποίο υπόκειται σε τυχαίες βλάβες. Για το συγκεκριμένο σύστημα υιοθετήθηκε μια περιοδική πολιτική συντήρησης όπου εκτελείται η ελάχιστη δυνατή επισκευή σε περίπτωση βλάβης. Όμως, με ένα τέτοιο ενιαίο μοντέλο, οι δραστηριότητες συντήρησης σε κάθε περίοδο μειώνουν τη διαθέσιμη ικανότητα παραγωγής του συστήματος. Το συγκεκριμένο μοντέλο προγραμματισμού παρουσιάζεται αναλυτικά στην παράγραφο 3.2.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται μοντέλα που συναντάμε στη βιβλιογραφία και αναφέρονται στον ενιαίο προγραμματισμό παραγωγής και συντήρησης. Τα μοντέλα αυτά καταπιάνονται με διάφορους τύπους προβλημάτων, δηλαδή διαφορετικές συναρτήσεις προς βελτιστοποίηση, διαφορετικούς περιορισμούς και υποθέσεις. Επιπρόσθετα, για παρόμοια προβλήματα χρησιμοποιούνται διαφορετικές προσεγγίσεις και μέθοδοι επίλυσής.

3.1 Μοντέλο βασισμένο σε συνθήκη

Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε από τους Ashayeri, et al.(1995) και καθορίζει εάν θα προγραμματιστεί προληπτική συντήρηση όποτε προγραμματίζεται μια καινούργια εργασία. Ουσιαστικά, το μοντέλο αντιπραγματεύεται τα κόστη της προληπτικής συντήρησης, και το σύνολο της αποθήκευσης του αποθέματος, της επιδιορθωτικής συντήρησης (κόστη μηχανικών βλαβών), τις επιστρεφόμενες παραγγελίες και τα κόστη προετοιμασίας. Εν ολίγοις, κάθε φορά που ο χρόνος λειτουργίας μιας εργασίας είναι μεγάλος, ή το κόστος εγκατάστασης είναι υψηλό, ή χρησιμοποιεί ένα ακριβό υλικό, το μοντέλο αυτό εξετάζει κατά πόσο είναι καλύτερα να γίνεται πρώτα προληπτική συντήρηση ή να ξεκινάει κατευθείαν η εργασία και να υπάρχει, όμως, ο κίνδυνος μηχανικής βλάβης. Στην τελευταία περίπτωσή, η εργασία πιθανόν να καθυστερήσει, έχοντας ως αποτέλεσμα μια επιπλέον προετοιμασία της εργασίας για να επανεκκινήσει και χαμένα υλικά. Αυτό κάνει το μοντέλο συντήρησης ένα σύστημα συντήρησης βασισμένο σε συνθήκη, όπου οι συνθήκες καθορίζονται από τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας, του κόστους προετοιμασίας της εγκατάστασης και των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Σ’αυτό το μοντέλο, το περιβάλλον παραγωγής μπορεί να αποτελείται από διάφορες γραμμές παραγωγής και γίνεται η υπόθεση πως κάθε γραμμή έχει μια μηχανή. Στην περίπτωση που είναι διαθέσιμες πολλαπλές γραμμές, τότε, οι εργασίες που δεν μπορούν να εκτελεστούν στην γραμμή παραγωγής που έχει προεπιλεχθεί λόγο της προληπτικής συντήρησης, μπορούν να διεκπεραιωθούν στις άλλες γραμμές παραγωγής για την αποφυγή υψηλών κοστών λόγων επιστρεφόμενων παραγγελιών.

Η ανάπτυξη του βασίζεται σε ένα άλλο μοντέλο προγραμματισμού παραγωγής που προτάθηκε από τους Bruvold και Evans (1985) και το οποίο στηρίζεται σε ένα πρόγραμμα μικτών ακέραιων που ανέπτυξαν. Σε αυτό υπάρχουν λιγότερες δυαδικές μεταβλητές σε σύγκριση με άλλα σχετικά μοντέλα, και το οποίο επιτρέπει διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις. Το μοντέλο τροποποιήθηκε από τους συγγραφείς του μοντέλου που

παρουσιάζουμε ούτος ώστε να λαμβάνονται υπόψη και οι αποφάσεις για προληπτική συντήρηση.

Όπως ειπώθηκε και νωρίτερα, το μοντέλο αναφέρεται στον προγραμματισμό των εργασιών παραγωγής σε πολλαπλές γραμμές παραγωγής. Συνήθως, τα κοινά μοντέλα προγραμματισμού παραγωγής χρησιμοποιούν ως κύρια μεταβλητή απόφασης την ποσότητα που θα παραχθεί σε μια συγκεκριμένη περίοδο. Το μοντέλο δείχνει απλά κατά πόσο ή όχι πρέπει να παραχθεί ένα συγκεκριμένο προϊόν σε μια συγκεκριμένη περίοδο πάνω σε μια συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής. Η υπόθεση που γίνεται στην περίπτωσή αυτή είναι ότι το ποσοστό παραγωγής είναι συνεχές καθ'όλη τη περίοδο προγραμματισμού. Το μοντέλο των Ashayeri, et al.(1995) ελαχιστοποιεί: το συνολικό κόστος, συμπεριλαμβανομένου και του κόστους της προληπτικής συντήρησης, τα κόστη των αναμενόμενών βλαβών ή τα αναμενόμενα κόστη επιδιορθωτικής συντήρησης, τα κόστη αποθέματος, τα κόστη επιστρεφόμενων παραγγελιών και το κόστος προετοιμασίας. Τα κόστη παραγωγής δεν λαμβάνονται υπόψη καθώς δεν είναι σχετικά με την αντικειμενική συνάρτηση.

Μερικές επιπρόσθετες υποθέσεις που έγιναν είναι ότι:

- ο εξοπλισμός θεωρείται σαν καινούργιος μετά την ολοκλήρωση μιας προληπτικής συντήρησης
- όταν συμβεί μια μηχανική βλάβη, ο εξοπλισμός πρέπει να επιδιορθωθεί ή να αντικατασταθεί άμεσα
- τα αναμενόμενα κόστη βλαβών αυξάνονται σε μεγάλο βαθμό μετά από την τελευταία επισκευή
- μόνο ένα προϊόν μπορεί να παραχθεί σε μια συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής σε μια συγκεκριμένη περίοδο
- η συντήρηση διαρκεί τον ίδιο χρόνο σε όλες τις γραμμές παραγωγής
- τα κόστη προετοιμασίας δεν εξαρτώνται από την ακολουθία
- η ζήτηση είναι ντετερμινιστική

3.1.1 Παρουσίαση του μοντέλου

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο αναφέρονται στο τύπο των παραγόμενων προϊόντων, τις εναλλακτικές γραμμές παραγωγής όπου μπορεί να παραχθεί κάθε προϊόν και τον αντίστοιχο χρόνο που είναι διαθέσιμος για την παραγωγή των προϊόντων αυτών. Οι μεταβλητές αυτές ορίζονται ως ακολούθως:

i = *προϊόντα*, i=1,...,N

j = *γραμμές* παραγωγής, j=1,...,M

t = *χρόνος*, t=0,...,T

Σημειώνεται πως η περίοδος 0 συμπεριλαμβάνεται ως πλασματική περίοδος για τη ρύθμιση μερικών από τις μεταβλητές.

Οι μεταβλητές απόφασης που ορίστηκαν για το μοντέλο αυτό είναι οι εξής:

δ_{ijt} : 1 εάν το προϊόν *i* παράγεται στη γραμμή *j* στην περίοδο *t*
0 αλλιώς

Φ_{ijt} : 1 εάν το προϊόν *i* παράγεται στη γραμμή *j* την περίοδο *t* αλλά όχι στην περίοδο *t-1*
0 αλλιώς

m_{jt} : 1 εάν πραγματοποιείται προληπτική συντήρηση στη γραμμή *j* στην περίοδο *t*
0 αλλιώς

z_{jt} : 1 εάν έχει τελειώσει η προληπτική συντήρηση στη γραμμή *j* στην περίοδο *t* αλλά όχι στην περίοδο *t-1*
0 αλλιώς

y_{jmt} : 1 εάν στην περίοδο *t* η τελευταία εργασία της προληπτικής συντήρησης στη γραμμή *j* τελείωσε στην περίοδο *m*
0 αλλιώς

α_{ijmt} : 1 εάν το y_{jmt} και το δ_{ijt} είναι 1
0 αλλιώς

Γ^{+}_{it}: «Καθαρό» απόθεμα του προϊόντος *i* στο τέλος της περιόδου *t* (σε τόνους προϊόντος)

Γ^{-}_{it}: Επιστροφές προϊόντων του προϊόντος *i* στο τέλος της περιόδου *t* (σε τόνους προϊόντος)

Η μεταβλητή $\mathbf{y_{jmt}}$ χρησιμοποιείται για τη δήλωση πως όταν πραγματοποιηθεί η προληπτική συντήρηση, η γραμμή παραγωγής θεωρείται «σαν καινούργια», έτσι ώστε η πιθανότητα εμφάνισης μιας μηχανικής βλάβης να εξαρτάται αποκλειστικά στην τελευταία περίοδο που πραγματοποιήθηκε προληπτική συντήρηση.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται σε αυτό το μοντέλο προγραμματισμού παραγωγής και συντήρησης είναι οι εξής:

- ✓ $\mathbf{cp_j}$: κόστη προληπτικής συντήρησης για τη γραμμή παραγωγής *j*
- ✓ $\mathbf{cf_j}$: κόστη διορθωτικής συντήρησης για τη γραμμή παραγωγής *j*
- ✓ $\mathbf{h_i}$: κόστη αποθέματος του προϊόντος *i* ανά τόνο ανά περίοδο
- ✓ $\mathbf{l_i}$: κόστη εκπρόθεσμων παραγγελιών του προϊόντος *i* ανά τόνο ανά περίοδο
- ✓ $\mathbf{s_{ij}}$: κόστη προετοιμασίας του προϊόντος *i* στη γραμμή παραγωγής *j*
- ✓ $\mathbf{Cap_j}$: διαθέσιμη χωρητικότητα στη γραμμή παραγωγής *j* ανά περίοδο (σε μονάδες χρόνου ανά περίοδο)
- ✓ $\mathbf{p_{ij}}$: χρόνος επεξεργασίας του προϊόντος *i* στη γραμμή παραγωγής *j* (σε μονάδες χρόνου ανά περίοδο)
- ✓ $\mathbf{R_{ij}}$: ρυθμός παραγωγής του προϊόντος *i* στη γραμμή παραγωγής *j* (σε τόνους ανά περίοδο)
- ✓ $\mathbf{D_{it}}$: ζήτηση του προϊόντος *i* στην περίοδο *t* (σε τόνους)
- ✓ **RT**: χρονική διάρκεια της προληπτικής και διορθωτικής συντήρησης (σε περιόδους)
- ✓ $\boldsymbol{\lambda_{ij}}$: πιθανότητα μηχανικής βλάβης στη γραμμή παραγωγής *j* την περίοδο *t*, όταν η προηγούμενη συντήρηση έγινε την περίοδο 0

- ✓ $\mathbf{c_{jmt}}$: αναμενόμενο κόστος μηχανικής βλάβης την περίοδο *t* στη γραμμή παραγωγής *j*, όταν η προηγούμενη προληπτική συντήρηση τελείωσε την περίοδο *m*, όπου $c_{jmt} = cf_j * P\left[\underline{x}_j = t\right] = cf_j * \lambda_{jt}$ και $\underline{x}_j$ ισούται με τη διάρκεια ζωής της γραμμής παραγωγής *j*

Όπως και σε κάθε μοντέλο προς βελτιστοποίηση υφίστανται κάποιοι περιορισμοί, ούτως ώστε να εξασφαλιστεί η λήψη τουλάχιστον μιας βέλτιστης λύσης. Αν και προηγουμένως προσδιορίστηκαν αρκετές δυαδικές μεταβλητές, μόνο οι μεταβλητές δ_{ijt} και m_{jt} περιορίζονται στο 0 ή 1. Οι υπόλοιπες μεταβλητές προσδιορίζονται αποκλειστικά στο 0 ή 1 με τη χρήση άλλων περιορισμών. Για παράδειγμα η μεταβλητή Φ_{ijt} καθορίζεται αποκλειστικά από τον ακόλουθο περιορισμό:

$$\Phi_{ijt} \geq \delta_{ijt} - \delta_{ij,t-1} \qquad i=1,...,N, \quad j=1,...,M, \quad t=1,...,T \qquad (3.1)$$

Η μεταβλητή z_{jt} δηλώνει την περίοδο στην οποία ξεκινάει μια εργασία προληπτικής συντήρησης, και η οποία ορίζεται ως: $z_{jt} = (1 - m_{j,t-1})m_{jt}$. Λόγω του ότι η προηγούμενη εξίσωση είναι μη γραμμική, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τρεις περιορισμοί για την επίλυσή της:

$$z_{jt} \leq 1 - m_{j,t-1} \qquad j=1,...,M, \quad t=1,...,T \qquad (3.2)$$

$$z_{jt} \leq m_{jt} \qquad j=1,...,M, \quad t=1,...,T \qquad (3.3)$$

$$z_{jt} \geq (1 - m_{j,t-1}) + m_{jt} - 1 \qquad j=1,...,M, \quad t=1,...,T \qquad (3.4)$$

Για την αποφυγή προγραμματισμού εργασιών κατά την διάρκεια μιας προληπτικής συντήρησης χρησιμοποιείται ο ακόλουθος περιορισμός:

$$z_{jt} \leq m_{jk} \qquad j=1,...,M, \quad t=1,...,T \quad k=t,...,t+RT-1 \qquad (3.5)$$

Το υπόλοιπο απόθεμα των υλικών για κάθε περίοδο δηλώνεται ως η "Παραγωγή + Αρχικό απόθεμα - Τελικό απόθεμα = Ζήτηση" και ορίζεται με τη χρησιμοποίηση της πιο κάτω θεμελιώδους μαθηματικής εξίσωσης:

$$\sum_{j=1}^{M} R_{ij}\delta_{ijt} + (I_{i,t-1}^{+} - I_{i,t-1}^{-}) - (I_{it}^{+} - I_{it}^{-}) = D_{it} \qquad i=1,...,N \quad t=1,...,T \qquad (3.6)$$

Λόγω του ότι η συντήρηση και η παραγωγή δεν μπορούν να προγραμματιστούν να γίνουν την ίδια περίοδο σε μια συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής, ορίστηκε ο κάτωθι περιορισμός που αποτρέπει το πιο πάνω ενδεχόμενο:

$$\sum_{t=1}^{N} \delta_{ijt} + m_{jt} \leq 1 \qquad \text{j=1,...,M} \qquad \text{t=0,...,T} \qquad (3.7)$$

Η μεταβλητή y_{jmt} πρέπει να ισούται με 1 όταν συμβεί η τελευταία προληπτική συντήρηση στη γραμμή παραγωγής j την περίοδο m καθώς βρισκόμαστε στη χρονική περίοδο t. Για να εξασφαλιστεί η πιο πάνω συνθήκη η y_{jmt} ορίζεται ως:

$$y_{jmt} = (1 - m_{jt})(1 - m_{j,m-1})...(1 - m_{j,m+1})m_{jm} \qquad (3.8)$$

Επειδή και πάλι η εξίσωση είναι μη γραμμική χρησιμοποιούνται οι πιο κάτω περιορισμοί για τον υπολογισμό της μεταβλητής y_{jmt}:

$$y_{jmt} \leq 1 - m_{jk} \qquad \text{j=1,...,M,} \qquad \text{t=1,...,T} \quad \text{k=m+1,...,t} \qquad (3.9)$$

$$y_{jmt} \leq m_{jm} \qquad \text{j=1,...,M,} \qquad \text{t=1,...,T} \quad \text{m=0,...,t-1} \qquad (3.10)$$

$$y_{jmt} \geq \sum_{k=m+1}^{t} (1 - m_{jk}) + m_{jm} \text{-(t-m)} \qquad \text{j=1,...,M,} \quad \text{t=1,...,T,} \quad \text{m=0,...,t-1} \qquad (3.11)$$

Αρχικά, για τη ρύθμιση μερικών μεταβλητών δημιουργήθηκε μια πλασματική περίοδος 0, στην οποία έγινε η προηγούμενη προληπτική συντήρηση και όπου το απόθεμα ήταν μηδέν.

$$m_{j,0} 1 \qquad \text{j=1,...,M} \qquad (3.12)$$

$$I_{i,0}^{+} = I_{i,0}^{-} = 0 \qquad \text{i=1,...,N} \qquad (3.13)$$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αντικειμενική συνάρτηση μοντελοποιεί την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, συμπεριλαμβανομένου και του κόστους της προληπτικής συντήρησης, τα κόστη των αναμενόμενών βλαβών, τα κόστη αποθέματος, τα κόστη επιστρεφόμενων παραγγελιών και το κόστος προετοιμασίας. Στη συνέχεια δίνονται οι συναρτήσεις για τον υπολογισμό του κάθε προαναφερόμενου κόστους.

Τα κόστη προληπτικής συντήρησης είναι κόστη που υφίστανται μια φορά και αυτό γίνεται μόλις ξεκινήσει μια εργασία προληπτικής συντήρησης.

$$\sum_{j=1}^{M} \sum_{t=1}^{T} z_{jt} cp_j \qquad (3.14)$$

Τα αναμενόμενα κόστη λόγω μηχανικών βλαβών υφίστανται κάθε περίοδο όπου μια εργασία συντήρησης είναι σε εξέλιξη. Η μεταβλητή y_{jmt} στην πιο κάτω συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε για να επιβεβαιώσει πως για τη συγκεκριμένη περίοδο επιλέχτηκε η σωστή πιθανότητα εμφάνισης μηχανικής βλάβης.

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{\mathrm{M}}\sum_{t=1}^{T}\delta_{ijt}\sum_{m=0}^{t-1}y_{jmt}c_{jmt} \qquad (3.15)$$

Λόγω του ότι η συνάρτηση (3.15) δεν είναι γραμμική αντικαθιστάται ο όρος $\delta_{ijt}y_{jmt}$ με τη μεταβλητή a_{ijmt} και έτσι προκύπτει η γραμμική συνάρτηση (3.16), για την οποία υπάρχουν επιπλέον δυο περιορισμοί:

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=0}^{t-1}a_{ijmt}\ c_{jmt} \qquad (3.16)$$

Οι επιπλέον περιορισμοί για την συνάρτηση (3.16) είναι:

$$a_{ijmt} \le \frac{1}{2}(\delta_{ijt} + y_{jmt}) \qquad \text{i=1,...,N,} \quad \text{j=1,...,M,} \quad \text{t=1,...,T,} \quad \text{m=0,...,t-1} \qquad (3.17)$$

$$a_{ijmt} \ge \delta_{ijt} + y_{jmt} - 1 \qquad \text{i=1,...,N,} \quad \text{j=1,...,M,} \quad \text{t=1,...,T,} \quad \text{m=0,...,t-1} \qquad (3.18)$$

Τέλος, τα κόστη αποθέματος, επιστρεφόμενων παραγγελιών και προετοιμασίας δηλώνονται αντίστοιχα από τις ακόλουθες συναρτήσεις:

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}I_{it}^{+}h_i \qquad (3.19)$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}I_{it}^{-}l_i \qquad (3.20)$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\Phi_{ijt}s_{ij} \qquad (3.21)$$

Οι J.Ashayeri, et al.(1995) εφάρμοσαν το μοντέλο για δυο όμοιες γραμμές παραγωγής οι οποίες μπορούσαν να παράγουν πέντε διαφορετικά προϊόντα. Πειραματίστηκαν με διάφορα σενάρια συντήρησης, με διαφορετικά κόστη, θέτοντας διαφορετική λειτουργική κατάσταση στις δυο γραμμές παραγωγής, καθώς και με εναλλακτικές χρονικές περιόδους παραγωγής. Επίσης,

λόγω της μεγάλης διάρκειας των προσομοιώσεων που χρειαζόταν ο αλγόριθμος για την επίλυση του μοντέλου χρησιμοποίησαν μια μέθοδο διακλάδωσης για να μειώσουν το χρόνο αυτό. Όμως, ακόμη και μετά την εφαρμογή της μεθόδου διακλάδωσης διαπίστωσαν πως είναι δύσκολο για το μοντέλο να επιλύσει μεγάλης κλίμακας προβλήματα. Τέλος, οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα πως ορίζοντας αρχικές συνθήκες οι οποίες εξαρτώνται από μια ακολουθία μπορούν να οδηγήσουν στη μείωση του υπολογιστικού χρόνου και σε καλύτερα τελικά αποτελέσματα.

3.2 Μοντέλο για ένα σύστημα που υπόκειται σε τυχαίες βλάβες

Δεδομένου ενός συνόλου προϊόντων τα οποία πρέπει να παραχθούν σε παρτίδες από ένα σύστημα παραγωγής, με περιορισμένη χωρητικότητα, καθ'όλη την διάρκεια ενός προκαθορισμένου και περιορισμένου χρονικού ορίζοντα, το μοντέλο των Aghezzaf et al.(2007) έχει ως κύριο αντικειμενικό στόχο την ανεύρεση μιας ενιαίας στρατηγικής, μεγέθους παρτίδων και προληπτικής συντήρησης, που να ικανοποιεί τη ζήτηση όλων των προϊόντων για ολόκληρη την περίοδο προγραμματισμού, χωρίς εκκρεμείς παραγγελίες. Η στρατηγική αυτή ελαχιστοποιεί τα αναμενόμενα συνολικά κόστη παραγωγής και συντήρησης.

Γίνεται η υπόθεση πως το σύστημα παραγωγής υπόκειται σε τυχαίες βλάβες και πως οποιαδήποτε ενέργεια συντήρησης πραγματοποιείται στο σύστημα, σε μια περίοδο, μειώνει την διαθέσιμη χωρητικότητα παραγωγής του συστήματος κατά την διάρκεια εκείνης της περιόδου.

Η χρήση του μοντέλου αυτού δείχνει πως το πρόβλημα του ενιαίου προγραμματισμού παραγωγής και συντήρησης μπορεί να διατυπωθεί και να λυθεί ως ένα πρόβλημα μεγέθους παρτίδων πολλών προϊόντων, με περιορισμένη χωρητικότητα, πάνω σε ένα σύστημα το οποίο ανανεώνεται και επιδιορθώνεται ελάχιστα σε περίπτωση βλάβης.

3.2.1 Παρουσίαση του μαθηματικού μοντέλου

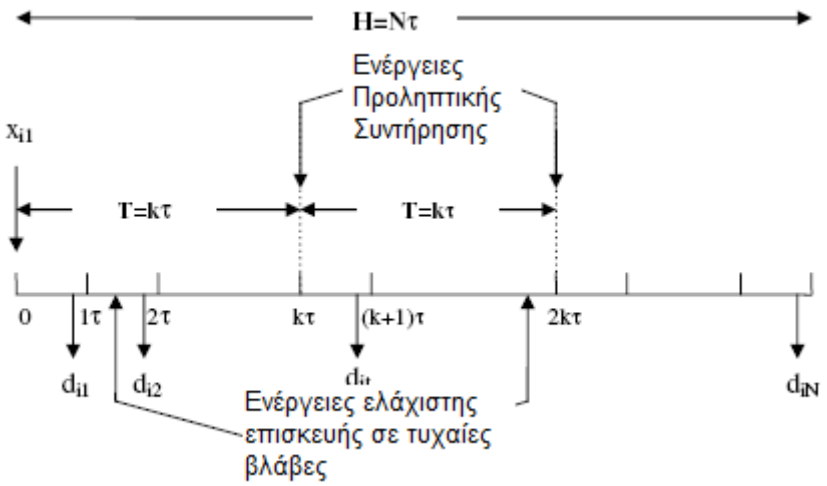
Όπως προαναφέρθηκε, στο μοντέλο αυτό δίνεται ένας ορίζοντας προγραμματισμού $\mathrm{H} = N\tau$ στον οποίο περιλαμβάνονται N περίοδοι με σταθερή χρονική διάρκεια τ, και ένα σύνολο προϊόντων P τα οποία πρέπει να παραχθούν κατά τη διάρκεια αυτού του ορίζοντα προγραμματισμού. Για κάθε προϊόν $\mathrm{i} \in P$ υπάρχει μια ζήτηση d_{it} η οποία πρέπει να ικανοποιηθεί μέσα σε κάθε περίοδο $t \in H$. Γίνεται η υπόθεση πως το σύστημα παραγωγής έχει γνωστή ονομαστική χωρητικότητα η οποία δηλώνεται από τη μεταβλητή $C_{\max}$ και πως κάθε ενέργεια

συντήρησης καταναλώνει ένα συγκεκριμένο ποσοστό αυτής της χωρητικότητας. Από την προηγούμενη υπόθεση προκύπτει πως κάθε προγραμματισμένη και μη προγραμματισμένη ενέργεια συντήρησης καταναλώνει αντίστοιχα τις ακόλουθες μονάδες χωρητικότητας: $L_p = aC_{\max}$ και $L_r = bC_{\max}$ με $0 \le \alpha \le b \le 1$.

Ισχύει, επίσης, ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας βλάβης *f(t)* και η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής *F(t)* του συστήματος παραγωγής είναι γνωστές. Ο ρυθμός αστοχίας του συστήματος τη χρονική περίοδο *t* είναι *r(t)* και δίνεται από τη σχέση:

$$r(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \tag{3.22}$$

Η πολιτική συντήρησης που χρησιμοποιείται στο μοντέλο προτείνει την αντικατάσταση του συστήματος παραγωγής σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές *T=kt,2kt,3kt,…* και την εφαρμογή μιας ελάχιστης επισκευής όταν συμβαίνει μια μη προγραμματισμένη βλάβη. Άλλη μια υπόθεση που συνηθίζεται να γίνεται σε τέτοια μοντέλα προγραμματισμού συντήρησης είναι πως όλες οι ενέργειες συντήρησης εκτελούνται σε τέλειο βαθμό από έμπειρο προσωπικό συντήρησης. Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται η συνδυασμένη στρατηγική παραγωγής και συντήρησης που εξετάζεται από το μοντέλο των Aghezzaf et al.(2007).



Σχήμα 3.1: Συνδυασμένη στρατηγική παραγωγής και συντήρησης [Aghezzaf et al. (2007)]

Στη συνέχεια αναφέρονται οι παράμετροι και οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του μοντέλου, καθώς και το μαθηματικό προγραμματιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε.

Παράμετροι του μοντέλου:

f_{it} : σταθερό κόστος για την παραγωγή του προϊόντος *i* στην περίοδο *t*

p_{it} : μεταβλητό κόστος για την παραγωγή μιας μονάδας προϊόντος *i* στην περίοδο *t*

h_{it} : μεταβλητό κόστος για την αποθήκευση μιας μονάδας προϊόντος *i* μέχρι το τέλος της περιόδου *t*

c_p : κόστος κάθε προληπτικής αντικατάστασης

c_r : κόστος εκτέλεσης μιας διορθωτικής ενέργειας συντήρησης ($c_p \le c_r$)

τ : διάρκεια κάθε μιας βασικής περιόδου προγραμματισμού

ρ_i : χρόνος επεξεργασίας για κάθε μονάδα προϊόντος *i*

Μεταβλητές του μοντέλου:

x_{it} : ποσότητα του προϊόντος *i* η οποία παράχθηκε την περίοδο *t*

I_{it} : απόθεμα του προϊόντος *i* στο τέλος της περίοδο *t*

y_{it} : δυαδική μεταβλητή (το y_{it} ισούται με 1 εάν το προϊόν *i* παράγεται την περίοδο *t* και 0 αλλιώς)

T : κύκλος προληπτικής συντήρησης

Μαθηματικό προγραμματιστικό μοντέλο:

Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης:

$$\sum_{t\in H}\sum_{i\in P}(f_{it}y_{it}+p_{it}x_{it}+h_{it}I_{it})+\frac{N\tau}{T}(c_p+c_r\int_0^T r(t)dt) \qquad (3.23)$$

η οποία υπόκειται στους πιο κάτω περιορισμούς:

$$x_{it}+I_{it-1}-I_{it}=d_{it} \quad \text{για } t\in H \text{ και } i\in P \qquad (3.24)$$

$$x_{it}\le(\sum_{s\in H,s\ge t}d_{is})y_{it} \quad \text{για } t\in H \text{ και } i\in P \qquad (3.25)$$

$$\sum_{i\in P}\rho_i x_{it}\le C(t) \quad \text{για } t\in H \qquad (3.26)$$

$$x_{it}, I_{it}, T \geq 0,\ \ y_{it} \in \{0,1\} \text{ για } t \in H \text{ και } i \in P \qquad (3.27)$$

Η συνάρτηση *C(t)* καθορίζει την διαθέσιμη χωρητικότητα σε κάθε περίοδο *t* και εάν η προληπτική συντήρηση γίνεται την περίοδο *t* δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C(t) = C_{\max} - L_p - L_r \int_0^{\tau} r(u + (t-1)\tau)du \qquad (3.28)$$

Για τις υπόλοιπες περιόδους *t* η χωρητικότητα *C(t)* δίνεται από τη σχέση:

$$C(t) = C_{\max} - L_r \int_0^{\tau} r(u + (t-1)\tau)du \qquad (3.29)$$

Από τις πιο πάνω σχέσεις υπολογισμού της χωρητικότητας γίνεται ξεκάθαρο πως εάν είναι γνωστή η χρονική διάρκεια του κύκλου προληπτικής συντήρησης μπορεί να καθοριστούν οι τιμές της συνάρτησης *C(t)*.

3.2.2 Αλγόριθμος για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου

Για την επίλυση του πιο πάνω μαθηματικού προγραμματιστικού μοντέλου (PPM) οι Aghezzaf et al.(2007) έκαναν χρήση ενός αλγορίθμου, ο οποίος περιγράφεται στη συνέχεια. Αρχικά, υπέθεσαν πως η χρονική διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού *H*, καθώς επίσης και του κύκλου προληπτικής συντήρησης *T* δίνεται συναρτήσει της βασικής διάρκειας περιόδου προγραμματισμού *τ* (για παράδειγμα *H=Nτ* και *T=kτ*).

Για να είναι ευκολότερο να επιλυθεί με τη χρήση του αλγορίθμου, το μοντέλο συντήρησης και προγραμματισμού (PPM_r) διατυπώθηκε εκ νέου ως εξής:

<u>Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης</u>:

$$Z(k) = \sum_{n=1}^{n_I} \left(c_p + \sum_{t=(n-1)k+1, t \leq N}^{nk} * \left(c_r \int_0^{\tau} r(u+(t-(n-1)k-1)\tau)du + \sum_{i \in P} (f_{it} y_{it} + p_{it} x_{it} + h_{it} I_{it}) \right) \right) \qquad (3.30)$$

όπου $n_I = \lfloor N/k \rfloor$ εάν η αναλογία *N/k* είναι ακέραιος αριθμός και $n_I = t \lfloor N/k \rfloor + 1$ αλλιώς.

Η πιο πάνω αντικειμενική συνάρτηση υπόκειται στους κάτωθι περιορισμούς:

$$x_{it} + I_{it-1} - I_{it} = d_{it} \quad \text{για } t \in H \text{ και } i \in P \tag{3.31}$$

$$x_{it} \le (\sum_{s \in H, s \ge t} d_{is}) y_{it} \quad \text{για } t \in H \text{ και } i \in P \tag{3.32}$$

$$\sum_{i \in P} \rho_i x_{it} \le C(t) = \begin{cases} C_{\max} - L_p - L_r \int_0^{\tau} r(u + (t-1)\tau) du & \text{εάν } t=(n-1)k+1 \\ C_{\max} - L_r \int_0^{\tau} r(u + (t-1)\tau) du & \text{εάν } (n-1)k+2 \le t \le nk \end{cases} \tag{3.33}$$

για $1 \le n \le n_I$ και $(n-1)k+1 \le t \le nk$ με $t \le N$

Επίσης,

$x_i, I_{it}, T \ge 0;\ k \in N;\ y_{it} \in \{0,1\}$ για $1 \le n \le n_I$ και $(n-1)k+1 \le t \le nk$ και $i \in P$

Οι μεταβλητές απόφασης παραμένουν για κάθε προϊόν *i* και κάθε περίοδο *t* οι x_{it}, I_{it}, y_{it} και υπάρχει ακόμη η μεταβλητή *k* η οποία καθορίζει την βέλτιστη χρονική διάρκεια του κύκλου προληπτικής συντήρησης $T(T=k\tau)$.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των βέλτιστων αξιών του προγράμματος παραγωγής και της χρονικής διάρκειας του κύκλου προληπτικής συντήρησης *T* αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

Για k=1,2,…,N, το οποίο ισοδυναμεί αντίστοιχα στις περιπτώσεις μιας προληπτικής συντήρησης σε κάθε βασική περίοδο προγραμματισμού κάνε τα βήματα 1 έως 3.

<u>Βήμα 1</u>: Βάση της τιμής της μεταβλητής *k*, υπολόγισε το n_I και τους αντίστοιχους όρους της συνάρτησης του κόστους συντήρησης, και στη συνέχεια υπολόγισε τις διαθέσιμες χωρητικότητες $C^k(t)$ την περίοδο *t*.

<u>Βήμα 2</u>: Επίλυσε το πρόβλημα προγραμματισμού παραγωγής που προκύπτει (PPM_r για τις σταθερές τιμές του *k*) χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε αλγόριθμο (στην περίπτωση που εξετάζουμε οι Aghezzaf et al.(2007) χρησιμοποίησαν τον μεικτό ακέραιο αλγόριθμο βελτιστοποίησης CPLEX- http://www.ilog.es/products/cplex/).

Βήμα 3: Σύγκρινε τις τιμές της συνάρτησης $Z(k)$ που προέκυψαν, και επέλεξε για τη βέλτιστη διάρκεια περιόδου προληπτικής συντήρησης την τιμή k^* ούτως ώστε η συνάρτηση $Z(k^*) = \min_k \{Z(k)\}$.

Για τον υπολογισμό των συνδυασμένων προγραμμάτων παραγωγής και συντήρησης ο αλγόριθμος επιλύει το κλασσικό πρόβλημα υπολογισμού μεγέθους παρτίδας με περιορισμένη χωρητικότητα *N* φορές. Μετά τον υπολογισμό όλων των δυνατών προγραμμάτων παραγωγής επιλέγεται ως τελικό πρόγραμμα αυτό που σχετίζεται με την βέλτιστη πολιτική $Z(k^*)$.

Το μοντέλο που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους αφορούσε τον ενιαίο προγραμματισμό παραγωγής και συντήρησης για ένα μόνο σύστημα παραγωγής το οποίο υπόκειται σε τυχαίες αστοχίες. Οι συγγραφείς ερευνούν την επέκταση του προτεινόμενου μοντέλου σε ένα σύστημα παραγωγής που αποτελείται από πολλαπλές μηχανές και ενσωματώνει ,επίσης, τις διάφορες στρατηγικές συντήρησης.

3.3 Μοντέλο απόφασης Markov για ένα σύστημα παραγωγής πολλαπλών προϊόντων

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της παρούσας εργασίας, τα προβλήματα δημιουργίας αναλυτικού προγράμματος παραγωγής και προγράμματος συντήρησης σε ένα περιβάλλον παραγωγής πολλών προϊόντων αντιμετωπίζονται συνήθως ανεξάρτητα. Τα μοντέλα προγραμματισμού συντήρησης δεν λαμβάνουν υπόψη το γεγονός πως η κατάσταση του εξοπλισμού έχει αντίκτυπο στην απόδοση του συστήματος, αλλά και τα μοντέλα προγραμματισμού παραγωγής, στα οποία η κατάσταση του εξοπλισμού επηρεάζει την απόδοσή τους, θεωρούν είτε πως παράγεται μόνο ένα προϊόν στο σύστημα παραγωγής ή πως όλα τα παραγόμενα προϊόντα επηρεάζονται το ίδιο. Με την αντιμετώπιση αυτή όμως παρουσιάζονται πολλά προβλήματα κατά την υλοποίησή τους καθώς οι δυο έννοιες, παραγωγή και συντήρηση, είναι άμεσα συνδεδεμένες και αλληλοεξαρτώμενες. Για το λόγο αυτό κατά τον προγραμματισμό τους πρέπει να συνδυάζονται στοιχεία και από τις δυο περιοχές σε μια κοινή και μοναδική μέθοδο λήψης αποφάσεων.

Οι Sloan και Shanthikumar (2000) ανέπτυξαν ένα μοντέλο απόφασης Markov, το οποίο καθορίζει ταυτόχρονα τα προγράμματα παραγωγής και συντήρησης για ένα σύστημα παραγωγής με μια μηχανή η οποία παράγει πολλά προϊόντα. Βασικός στόχος του μοντέλου είναι ο

καθορισμός του βέλτιστου αναλυτικού προγράμματος παραγωγής και συντήρησης το οποίο μεγιστοποιεί το μακροπρόθεσμο αναμενόμενο μέσο κέρδος. Για την ανάπτυξη του μοντέλου θεώρησαν πως η κατάσταση του εξοπλισμού επηρεάζει την απόδοση των διαφόρων τύπων προϊόντων διαφορετικά.

3.3.1 Διατύπωση του μοντέλου

Είναι δεδομένο πως η κατάσταση ενός συστήματος χειροτερεύει με το πέρασμα του χρόνου και πως η κατάσταση αυτή επηρεάζει την πιθανότητα επιτυχούς παραγωγής των διαφόρων προϊόντων. Για το λόγο αυτό, στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε η μεταβλητή X_n, η οποία υποδηλώνει την κατάσταση του συστήματος (μηχανής) την περίοδο *n*, όπου *n*=1,2,… .Η μηχανή μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε από τις *M+1* καταστάσεις, οι οποίες προσδιορίζονται από το *i*=0,1,…,*M*. Η κατάσταση 0 αντιστοιχεί στην καλύτερη πιθανή κατάσταση και η κατάσταση *M* στην χειρότερη.

Ανάλογα με την κατάσταση του συστήματος γίνονται και ανάλογες ενέργειες, οι οποίες είναι είτε παραγωγή ενός προϊόντος (ενέργειες 1,2,…,*K*) είτε ο καθαρισμός ή συντήρηση της μηχανής (ενέργεια K+1), και οι οποίες δηλώνονται με τη μεταβλητή a. Η πιθανότητα να ολοκληρωθεί επιτυχώς μια ενέργεια a καθώς βρίσκεται στην κατάσταση *i* δηλώνεται ως β_{ia}. Επίσης, η απόδοση ενός προϊόντος *k* (*k*=1,2,…,*K*) όταν βρίσκεται στην κατάσταση *i* αναφέρεται ως β_{ik}.

Μια από τις υποθέσεις που έκαναν οι Sloan και Shanthikumar (2000) κατά τη δημιουργία του μοντέλου, ήταν πως οι αλλαγές στην κατάσταση της μηχανής εξαρτώνται μόνο από την τρέχων κατάσταση και την ενέργεια που λαμβάνει χώρα εκείνη τη χρονική περίοδο. Η υπόθεση αυτή εκφράζεται ως εξής:

<u>Υπόθεση 1</u>:

$$p_{ij}^{a} = \Pr\{X_{n+1} = j \mid X_n = i,\ \ a_n = a; X_{n-1}, a_{n-1}; ...; X_1, a_1\} \Rightarrow$$
$$p_{ij}^{a} = \Pr\{X_{n+1} = j \mid X_n = i,\ \ a_n = a\}$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει πως η $\{X_n, n \geq 1\}$ παίρνει την μορφή μιας αλυσίδας Markov και συνεπώς το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μια διαδικασία απόφασης Markov.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κύριος αντικειμενικός σκοπός του μοντέλου είναι ο καθορισμός μιας πολιτικής, δηλαδή ενός κανόνα απόφασης που ορίζει μια ενέργεια σε κάποια

κατάσταση, η οποία μεγιστοποιεί το μακροπρόθεσμο αναμενόμενο μέσο κέρδος. Το αναμενόμενο αυτό κέρδος ανά μονάδα χρόνου εκφράζεται στο μοντέλο από τη μεταβλητή $\Phi_\pi(i)$, όπου π είναι η πολιτική που εφαρμόζεται και i η αρχική κατάσταση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα:

$$\Phi_\pi(i) = \lim_{N\to\infty} \frac{E_\pi[\sum_{n=1}^{N} r(X_n, a_n) \mid X_1 = i]}{N} \qquad (3.34)$$

όπου $r(X_n, a_n)$ είναι η "ανταμοιβή" μιας περιόδου η οποία κερδίζεται με την εφαρμογή της ενέργειας a_n στην κατάσταση X_n.

Για να εξασφαλίσουν την ύπαρξη μιας βέλτιστης πολιτικής οι συγγραφείς του μοντέλου οδηγήθηκαν σε διάφορες υποθέσεις, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια.

Αρχικά, υπόθεσαν πως οι "ανταμοιβές" για κάποια ενέργεια είναι περιορισμένες και πως το κόστος καθαρισμού μιας μηχανής, το οποίο δηλώνεται ως C, δεν εξαρτάται από την κατάσταση που βρίσκεται η συγκεκριμένη μηχανή (Υπόθεση 2) και είναι σταθερό για όλες τις καταστάσεις (Υπόθεση 3).

<u>Υπόθεση 2</u>:

$$|R_a| < \infty \quad \text{για όλα τα α}$$

<u>Υπόθεση 3</u>:

$$\beta_{i\alpha} \quad \text{δεν αυξάνεται στις καταστάσεις } i \text{ για όλα τα } \alpha$$

Υπέθεσαν, επίσης, πως καθώς η κατάσταση μιας μηχανής επιδεινώνεται η πιθανότητα επιτυχούς παραγωγής (απόδοση) μειώνεται και πως η απόδοση για όλα τα προϊόντα είναι 0 όταν η μηχανή βρίσκεται στην χειρότερή της κατάσταση (Υπόθεση 4). Ακόμη, η ενέργεια καθαρισμού μπορεί να μπει σε εφαρμογή από οποιαδήποτε κατάσταση και αν βρίσκεται η μηχανή και είναι επιτυχής με πιθανότητα 1 (Υπόθεση 5).

<u>Υπόθεση 4</u>:

$$\beta_{M\alpha} = 0 \quad \text{για} \quad \alpha \neq K+1$$

<u>Υπόθεση 5</u>:

$$\beta_{i,K+1} = 1 \quad \text{για όλες τις καταστάσεις i}$$

Όταν η μηχανή βρίσκεται στην κατάσταση M, δεν μπορεί να αλλάξει κατάσταση εάν δεν προηγηθεί η διαδικασία καθαρισμού της και εάν επιλεγεί η διαδικασία της παραγωγής το πιο από τα προϊόντα πρόκειται να παραχθεί δεν επηρεάζει την μετάβαση της κατάστασης. Ακόμη,

μετά την διαδικασία καθαρισμού της μηχανής η κατάσταση της επανέρχεται στην κατάσταση 0 με πιθανότητα 1. Αυτές οι συνθήκες εκφράζονται ως εξής:

Υπόθεση 6:

$$p_{ij}^{a} = \begin{cases} p_{ij}, & \text{για } \alpha=1,2,...,K \\ 1, & \text{για } \alpha=K+1, j=0 \\ 0, & \text{για } \alpha=K+1, j \neq 0 \end{cases}$$

Επίσης, καθώς η κατάσταση μιας μηχανής επιδεινώνεται είναι πιο πιθανό να βρεθεί σε κατάσταση χειρότερη από ότι βρισκόταν στα αρχικά στάδια λειτουργίας της, και αυτή η υπόθεση δίνεται από τη σχέση:

Υπόθεση 7:

$$\text{για κάθε } l, \sum_{j=1}^{M} p_{ij} \text{ δεν μειώνεται στο } i$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις πιο πάνω υποθέσεις κατέληξαν στο ακόλουθο θεώρημα: *«Εάν ισχύουν οι υποθέσεις 1 έως 7 τότε υπάρχει μια σταθερή βέλτιστη πολιτική μέσης ανταμοιβής».* Με τον όρο σταθερή πολιτική ορίζεται ένας κανόνας απόφασης ο οποίος δεν είναι τυχαίος και δεν εξαρτάται από τον χρόνο, όπως για παράδειγμα μια πολιτική η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από την παρούσα κατάσταση της μηχανής.

Θεώρημα 1: Εάν ισχύουν οι υποθέσεις 1 έως 7, τότε

(α) υπάρχει μια σταθερή πολιτική π^* τέτοια ώστε

$$\Phi_{\pi^*}(i) = \max_{\pi}\{\Phi_{\pi}(i)\}, \quad \text{για όλα τα } i \geq 0$$

και

(β) υπάρχει μια αρχική κατάσταση $\hat{i}$, τέτοια ώστε στη βέλτιστη πολιτική η μηχανή καθαρίζεται όταν η κατάσταση είναι i εάν $i \geq \hat{i}$ και όχι εάν $i < \hat{i}$.

Η απόδειξη για το θεώρημα 1 δίνεται από τους Sloan και Shanthikumar (2000, σελ.394-395).

Μέχρι τώρα, έγινε αναφορά σε υποθέσεις οι οποίες αφορούσαν τις βασικές μεταβλητές για διάφορες καταστάσεις της μηχανής. Στη συνέχεια εξετάζονται οι επιπτώσεις για τις μεταβλητές οι οποίες αφορούν τις διάφορες δραστηριότητες. Συγκεκριμένα, αναφέρεται το φαινόμενο όπου κάποια προϊόντα είναι πιο ευαίσθητα σε κάποιες διαδικασίες ή ενέργειες και

αυτό τα διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα, καθώς χρειάζονται ιδιαίτερη μεταχείριση και πιθανόν απαιτείται διαφορετικός προγραμματισμός για την παραγωγή τους. Γι'αυτό το λόγο τα προϊόντα κατατάσσονται σε φθίνουσα τάξη ανάλογα με την ευαισθησία τους στις καταστάσεις της μηχανής. Οι παραπάνω υποθέσεις εκφράζονται ως ακολούθως:

Υπόθεση 8:

το R_k δεν μειώνεται στο k

Υπόθεση 9:

το β_{ik} δεν μειώνεται στο k για όλα τα i

Προχωρώντας ένα βήμα περαιτέρω, οι συγγραφείς του μοντέλου υπόθεσαν πως καθώς η κατάσταση μιας μηχανής επιδεινώνεται, το αναμενόμενο κέρδος μειώνεται λιγότερο για τα λιγότερο ευαίσθητα προϊόντα απ'ότι για τα περισσότερο ευαίσθητα προϊόντα. Αυτό εκφράζεται ως εξής:

Υπόθεση 10:

$$R_{k-1}\beta_{i-1,k-1} - R_{k-1}\beta_{i,k-1} \geq R_k\beta_{i-1,k} - R_k\beta_{ik} \geq 0, \text{ για } k=2,3,...,K \text{ και } i=1,2,...,M-1$$

Βασιζόμενοι στο θεώρημα του Puterman (1994) οι Sloan και Shanthikumar (2000) κατέληξαν στο ακόλουθο θεώρημα 2: *« Εάν ισχύουν οι υποθέσεις 1 έως 10, τότε υπάρχει μια σταθερή βέλτιστη πολιτική μέσης ανταμοιβής. Επί πλέον, η βέλτιστη δραστηριότητα, α(i), δεν μειώνεται στο i »*

Η απόδειξη για το θεώρημα 2 δίνεται από τους Sloan και Shanthikumar (2000, σελ.395-396).

Επίσης, το γεγονός πως η βέλτιστη δραστηριότητα δεν μειώνεται σημαίνει ότι παράγονται περισσότερο ευαίσθητα προϊόντα όταν η κατάσταση της μηχανής είναι καλή και καθώς η κατάσταση της μηχανής επιδεινώνεται παράγονται τα λιγότερο ευαίσθητα προϊόντα. Τελικά, η κατάσταση της μηχανής φτάνει στο σημείο όπου πρέπει να καθαριστεί και μόνο τότε σταματάει η παραγωγή για να γίνει η διαδικασία καθαρισμού. Τέτοιου είδους μονότονες πολιτικές προτιμούνται γιατί είναι πολύ εύκολο να εφαρμοστούν.

3.3.2 Μέθοδος επίλυσης

Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων και για την ανεύρεση της βέλτιστης σταθερής πολιτικής μπορεί να χρησιμοποιηθεί γραμμικός προγραμματισμός, που για τέτοιου είδους προβλήματα χρησιμοποιήθηκε πρώτα από τον Manne (1960). Λαμβάνοντας υπόψη τυχαίες πολιτικές στις οποίες οι δραστηριότητες επιλέγονται σύμφωνα με κάποια πιθανότητα επιλύεται το πρόβλημα για την ανεύρεση της βέλτιστης πολιτικής.

Στο μοντέλο που εξετάζουμε δηλώνεται ως κανόνας απόφασης το $\pi(i,\alpha)$, ο οποίος καθορίζει την δραστηριότητα a δεδομένου ότι η μηχανή βρίσκεται στην κατάσταση i. Επίσης, ο όρος x_{ia} ορίζει την πιθανότητα να βρίσκεται η μηχανή στη κατάσταση i και να εκτελείται η δραστηριότητα a. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω μπορεί να βρεθεί η βέλτιστη πολιτική επιλύοντας το ακόλουθο γραμμικό πρόγραμμα το οποίο αναφέρετε και ως «LP-Linear Program»:

Μεγιστοποίηση της:

$$\sum_i \sum_a x_{ia} r(i,a) \tag{3.35}$$

η οποία υπόκειται στους περιορισμούς:

$$\sum_a x_{ja} = \sum_i \sum_a x_{ia} p_{ij}^a \quad \text{για όλα τα j} \tag{3.36}$$

$$\sum_i \sum_a x_{ia} = 1 \tag{3.37}$$

$$x_{ia} \geq 0 \quad \text{για όλα τα i,α} \tag{3.38}$$

όπου $r(i,a)$ είναι η "ανταμοιβή" που κερδίζεται για την εκτέλεση της δραστηριότητας a όταν η μηχανή βρίσκεται στην κατάσταση i. Η βέλτιστη πολιτική για το συγκεκριμένο γραμμικό πρόβλημα δηλώνεται ως $x^* = [x_{ia}^*]$ και η βέλτιστη σταθερή πολιτική ως $\pi^*(i,a) = \frac{x_{ia}^*}{\sum_a x_{ia}^*}$ σύμφωνα με τον Ross (1983).

3.3.3 Εκπλήρωση των απαιτήσεων της παραγωγής

Το μοντέλο που αναφέρθηκε πιο πάνω δεν λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις τις παραγωγής, ούτε στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά ούτε και στους περιορισμούς. Το περιβάλλον παραγωγής, όμως, επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και αυτό έχει άμεσο αντίκτυπο και στο πρόγραμμα συντήρησης και καθαρισμού των μηχανών. Πρέπει,

λοιπόν, να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό των μοντέλων βελτιστοποίησης πολιτικών συντήρησης και το περιβάλλον της παράγωγης.

Γίνεται η υπόθεση, λοιπόν, πως πρέπει να συμπεριλαμβάνει ένα αναλυτικό μακροπρόθεσμο πρόγραμμα παραγωγής, υπό την έννοια ότι ένα ορισμένο ποσοστό της συνολικής παραγωγής πρέπει να αποτελείται από ένα καθορισμένο τύπο προϊόντων. Συγκεκριμένα, θεωρείται πως ο όρος γ_k αντιστοιχεί στην μακροπρόθεσμη παραγωγή που απαιτείται, του προϊόντος k, όπου $k = 1, 2, ..., K$ και $\sum_k \gamma_k = 1$. Επίσης, ο όρος x_{ia} εκλαμβάνεται ως το μακροπρόθεσμο ποσοστό του χρόνου στον οποίο η διαδικασία βρίσκεται στην κατάσταση i και εκτελείται η δραστηριότητα a.

Έχοντας, τις νέες αυτές παραμέτρους το γραμμικό πρόγραμμα τροποποιείται συμπεριλαμβάνοντας επιπρόσθετους περιορισμούς για να εξασφαλιστεί πως οι μακροπρόθεσμες μέσες απαιτήσεις της παραγωγής τηρούνται, δηλαδή:

$$\frac{\sum_i x_{ik}\beta_{ik}}{\sum_k \sum_i x_{ik}\beta_{ik}} = \gamma_k \quad \text{για k=1,2,...,K} \tag{3.39}$$

Ο πιο πάνω περιορισμός μπορεί να γραφτεί ως γραμμική εξίσωση, ούτος ώστε να μπορεί να επιλυθεί το νέο γραμμικό πρόγραμμα (LP'). Έτσι προκύπτει η πιο κάτω εξίσωση:

$$\sum_i x_{ik}\beta_{ik} - \gamma_k \sum_k \sum_i x_{ik}\beta_{ik} = 0 \quad \text{για k=1,2,...,K} \tag{3.40}$$

Έχοντας το νέο γραμμικό πρόγραμμα (LP') με τους επιπλέον περιορισμούς μπορεί να καθοριστεί η βέλτιστη πολιτική ακλουθώντας τα εξής βήματα:

1. Βρες μια βασική βέλτιστη λύση για το γραμμικό πρόγραμμα (LP'), και θέσε την ως x^*.Καθόρισε το σύνολο S^* όπου $S^* = \{i : x_{ia}^* > 0, \text{ για κάποια } \alpha\}$.
2. Για $i \in S^*, \pi^*(i,a) = \pi^*(i,a) = \frac{x_{ia}^*}{\sum_a x_{ia}^*}$ και $i \notin S^*, \pi^*(i,a) = \pi^*(i,a) = 1$ για κάποια αυθαίρετα a.

Οι Sloan και Shanthikumar (2000) εφάρμοσαν το μοντέλο αυτό σε μια βιομηχανία παραγωγής ημιαγωγών και βάση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η κατάσταση μιας μηχανής, η οποία αλλάζει στοχαστικά κατά την διάρκεια

του χρόνου, επηρεάζει σε διαφορετικό βαθμό την απόδοση για διαφορετικά προϊόντα. Έδειξαν, επίσης, πως κάνοντας λογικές υποθέσεις σχετικά με τις "ανταμοιβές" και την χειροτέρευση της κατάστασης του εξοπλισμού υπάρχει μια σταθερή βέλτιστη πολιτική. Επιπρόσθετα, από τα αποτελέσματα προκύπτει πως αυξάνοντας την ποικιλία των παραγόμενων προϊόντων βελτιώνεται περαιτέρω η λύση που παρέχεται από την συνδυασμένη μέθοδο προγραμματισμού και συντήρησης.

3.4 Μοντέλο δημιουργίας οικονομικών παρτίδων παραγωγής για μια αναξιόπιστη μηχανή υπό μια πολιτική συντήρησης που βασίζεται στη διάρκεια ζωής της μηχανής

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούμε στην περίπτωση που έχουμε ταυτόχρονο καθορισμό μιας οικονομικής ποσότητας παραγωγής και τον αναλυτικό προγραμματισμό της προληπτικής συντήρησης υπό την ρεαλιστική υπόθεση πως ο εξοπλισμός της παραγωγής υπόκειται σε τυχαίες βλάβες και πως η διαδικασία της συντήρησης είναι ελλιπής.

Η κατάσταση του συστήματος παραγωγής θεωρείται πως επιδεινώνεται καθώς βρίσκεται σε λειτουργία με ένα αυξανόμενο ρυθμό εμφάνισης βλαβών. Επίσης, το σύστημα υπόκειται σε προληπτική συντήρηση είτε μετά από την εμφάνιση κάποιας βλάβης είτε αφότου έχει φτάσει σε μια προκαθορισμένη διάρκεια ζωής όπου πρέπει υποχρεωτικά γίνει συντήρηση, οποιοδήποτε από τα δυο συμβεί πρώτο. Τέλος, οι διαδικασίες της συντήρησης θεωρούνται ελλιπείς και μη ικανές να επαναφέρουν το σύστημα στην αρχική του τέλεια λειτουργική κατάσταση.

Το μοντέλο του El-Ferik (2008), που παρουσιάζεται στη συνέχεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό του βέλτιστου αριθμού περιόδων όπου εκτελείται παραγωγή και την συχνότητα διενέργειας προληπτικής συντήρησης, ελαχιστοποιώντας το μέσο μακροπρόθεσμο λειτουργικό κόστος.

3.4.1 Περιγραφή του μοντέλου

Όπως προαναφέραμε, το μοντέλο του El-Ferik (2008) καθορίζει τις οικονομικές ποσότητες παραγωγής για ένα σύστημα που υπόκειται σε βλάβες με τυχαία κατανομή και επίσης εξάγει το αναλυτικό πρόγραμμα της προληπτικής συντήρησης. Η προληπτική συντήρηση εφαρμόζεται μόλις παρουσιαστεί βλάβη στο σύστημα ή μόλις η διάρκεια ζωής του συστήματος

φτάσει μια συγκεκριμένη ηλικία T_p, οποιοδήποτε συμβεί πρώτο. Η ζήτηση και ο ρυθμός παραγωγής θεωρούνται σταθερά. Επίσης, η περίοδος παραγωγής μπορεί να επαναρχίσει μετά την εμφάνιση κάποιας βλάβης ή την διενέργεια κάποιας προληπτικής συντήρησης και το σύστημα πρέπει να αντικατασταθεί μετά από N κύκλους παραγωγής.

Σκοπός της χρήσης του μοντέλου είναι η ανεύρεση της βέλτιστης πολιτικής (T_p, N) η οποία ελαχιστοποιεί ένα γενικό μέσο μακροπρόθεσμο κόστος το οποίο συμπεριλαμβάνει: το κόστος εγκατάστασης, το κόστος λειτουργίας, το κόστος των χαμένων πωλήσεων λόγων μη παράδοσης των παραγγελιών ή ελαττωματικών παρτίδων, το κόστος αντικατάστασης, το κόστος λόγω μηχανικών βλαβών και το κόστος της προληπτικής συντήρησης.

3.4.2 Διατύπωση του προβλήματος

Πριν την παρουσίαση της συνάρτησης προς ελαχιστοποίηση και των περιορισμών του μοντέλου, αναφέρονται οι μεταβλητές οι οποίες υιοθετήθηκαν για την ανάπτυξη του προτεινόμενου μοντέλου. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι εξής:

$AVC(\{T_{p_i}\}, N)$ μακροπρόθεσμο μέσο κόστος

$TC(\{T_{p_i}\}, N)$ συνολικό κόστος ανά περίοδο

$CL(\{T_{p_i}\}, N)$ διάρκεια περιόδου παραγωγής

$SC(\{T_{p_i}\}, N)$ κόστος προετοιμασίας

$LS(\{T_{p_i}\}, N)$ κόστος χαμένων πωλήσεων

$HC(\{T_{p_i}\}, N)$ κόστος αποθέματος

$PM(\{T_{p_i}\}, N)$ κόστος προληπτικής συντήρησης

$BC(\{T_{p_i}\}, N)$ κόστος μηχανικών βλαβών

d Ρυθμός ζήτησης

u Ρυθμός παραγωγής

K_1 Κόστος προετοιμασίας

K_2 Κόστος προετοιμασίας μετά από αντικατάσταση

C_h Κόστος κατακράτησης στο απόθεμα μιας μονάδας προϊόντος ανά μονάδα χρόνου

$r_i(t)$ Ρυθμός αστοχίας για την i-οστή περίοδο παραγωγής

C_l Κόστος χαμένων πωλήσεων ανά μονάδα προϊόντος

C_B Κόστος επιπρόσθετης επισκευής σε περίπτωση αποτυχίας

C_{pm} Κόστος προληπτικής συντήρησης

C_r Κόστος αντικατάστασης ανά μονάδα χρόνου

N Αριθμός περιόδων παραγωγής ανά κύκλο

T_{p_i} Διάρκεια ζωής του συστήματος κατά την διάρκεια της i-οστής περιόδου παραγωγής

$F_i(t)$ η κατανομή πιθανότητας της διάρκειας ζωής της εγκατάστασης

$f_i(t)$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $\frac{dF_i(t)}{dt}$

$R_i(t)$ η συνάρτηση αξιοπιστίας $\overline{F_i} = 1 - F_i(t)$

$F_r(t)$ η κατανομή πιθανότητας του χρόνου που προηγείται

$f_r(t)$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $\frac{dF_r(t)}{dt}$

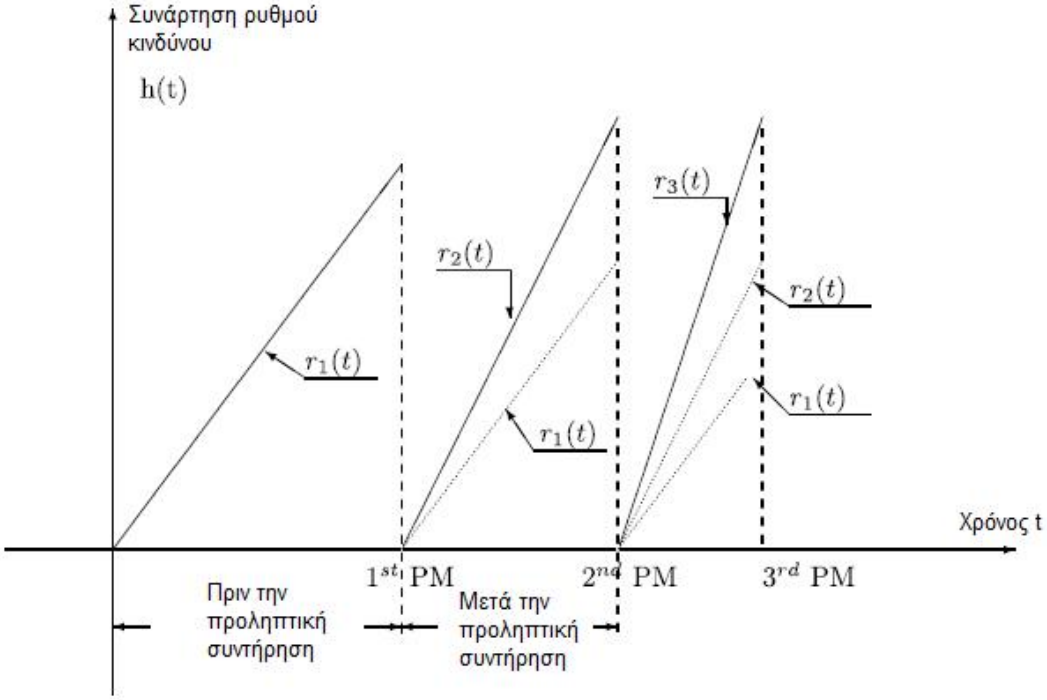
T_r η τυχαία μεταβλητή που αντιπροσωπεύει το χρόνο αντικατάστασης

E[.] η αναμενόμενη τιμή

LHS αριστερή πλευρά

RHS δεξιά πλευρά

Είναι γνωστό, από το κλασσικό μοντέλο παραγωγής οικονομικού μεγέθους παρτίδων, ότι ο ρυθμός ζήτησης, d, και ο ρυθμός παραγωγής, u, είναι και οι δυο σταθεροί με $u > d$. Στην περίπτωση αυτή ισχύει, επίσης, πως η κατάσταση του συστήματος επιδεινώνεται καθώς βρίσκεται σε λειτουργία και η προληπτική συντήρηση που εφαρμόζεται δεν είναι τέλεια, χωρίς να επαναφέρει τον εξοπλισμό στην αρχική του τέλεια λειτουργική κατάσταση. Για το λόγο αυτό, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2, μετά τη διενέργεια της διαδικασίας προληπτικής συντήρησης η κατάσταση του συστήματος βρίσκεται σε μέτρια επίπεδα σε σχέση με την αρχική του κατάσταση. Καθώς η διάρκεια ζωής του συστήματος αυξάνεται, τόσο μεγαλώνει και η πιθανότητα εμφάνισης βλάβης κατά την επόμενη περίοδο παραγωγής, με ρυθμό ο οποίος δίνεται από τη σχέση $r_i(t) = A_i r(t)$.



Σχήμα 3.2: Μη τέλεια προληπτική συντήρηση με αυξανόμενο ρυθμό κινδύνου για εμφάνιση βλάβης [El-Ferik (2008)]

Ανάμεσα στις μεταβλητές που δηλώθηκαν, συμπεριλαμβάνονται δυο τύποι κοστών, το κόστος προετοιμασίας πριν από την έναρξη κάθε περιόδου παραγωγής, (K_1), και το κόστος αποθήκευσης στο απόθεμα μιας μονάδας προϊόντος ανά μονάδα χρόνου, (C_h). Ο χρόνος προετοιμασίας και επισκευών θεωρείται αμελητέος, ενώ το σύστημα υπόκειται σε αντικατάσταση ή λεπτομερή επισκευή μετά από τη συμπλήρωση κάποιου συγκεκριμένου αριθμού προληπτικών επισκευών και συντήρησης. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα θεωρείται πως επαναφέρεται στην αρχική του τέλεια λειτουργική κατάσταση. Κάθε εφαρμογή προληπτικής συντήρησης έχει κόστος C_{PM} και εάν γίνει αφότου συμβεί κάποια βλάβη τότε υπάρχει επιπρόσθετο κόστος, C_B. Υπάρχει επίσης το ενδεχόμενο, κατά τη διάρκεια αντικατάστασης ή λεπτομερούς επισκευής του συστήματος το απόθεμα να μειωθεί στο 0, και η επόμενη περίοδος παραγωγής να μπορεί να ξεκινήσει μόνο μόλις ολοκληρωθεί η αποκατάσταση του συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση, λόγο του ότι δεν επιτρέπονται οι εκκρεμείς παραγγελίες, υπάρχει το ενδεχόμενο να μην καλυφθεί η ζήτηση με αποτέλεσμα να προκύψει επιπλέον κόστος λόγο χαμένων παραγγελιών για κάθε παραγόμενη μονάδα ανά μονάδα χρόνου, C_l. Επιπρόσθετα, ο χρόνος αντικατάστασης του συστήματος έχει μια μέση τιμή T_r, ακολουθεί μια κανονική κατανομή και το κόστος αντικατάστασης δίνεται από τη σχέση $C_R(t) = K_2 + C_r t$.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω γίνεται η προσπάθεια να καθοριστεί η βέλτιστη συχνότητα $\{T_{p_i}^*\}$, με i=1,2,...,N*, και ο βέλτιστος αριθμός περιόδων παραγωγής, N^*, τα οποία ελαχιστοποιούν το μέσο μακροπρόθεσμο κόστος, εφόσον εφαρμόζεται η πολιτική συντήρησης η οποία στηρίζεται στη διάρκεια ζωής του συστήματος. Συνοψίζοντας, για την επίλυση του μοντέλου έγιναν οι ακόλουθες υποθέσεις:

(1) Ο ρυθμός ζήτησης και παραγωγής θεωρείται πως είναι σταθερός.
(2) Ο χρόνος προετοιμασίας και επισκευής είναι αμελητέοι.
(3) Η *i*-οστή προληπτική συντήρηση θεωρείται ατελής.
(4) $r_{i+1}(0) = r_i(0) = ... = r_1(0) = 0$
(5) $r_{i+1}(t) \geq r_i(t)$ για όλα τα t και i=1,2,...,N

3.4.3 Μαθηματικό μοντέλο

Για την απλοποίηση των όρων οι οποίοι αναφέρονται στα διάφορα κόστη χρησιμοποιήθηκε το θεώρημα του El-Feric (2003) το οποίο αναφέρει πως: *«Ας είναι ο όρος $h(t)$ μια συνάρτηση L_2 και το $f(t)$ μια συνεχής συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μιας θετικής τυχαίας μεταβλητής, τότε*

$$\int_a^x h(t)f(t)dt + h(x)\bar{F}(x) = h(a)\bar{F}(a) + \int_a^x h'(t)\bar{F}(t)dt \qquad (3.41)$$

Η απόδειξη για το πιο πάνω θεώρημα δίνεται στο παράρτημα 1.

Χρησιμοποιώντας το προηγούμενο θεώρημα, οι διάφοροι όροι που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του μοντέλου απλοποιήθηκαν και εκφράστηκαν με πιο κατανοητό τρόπο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μόνο οι απλοποιημένοι όροι.

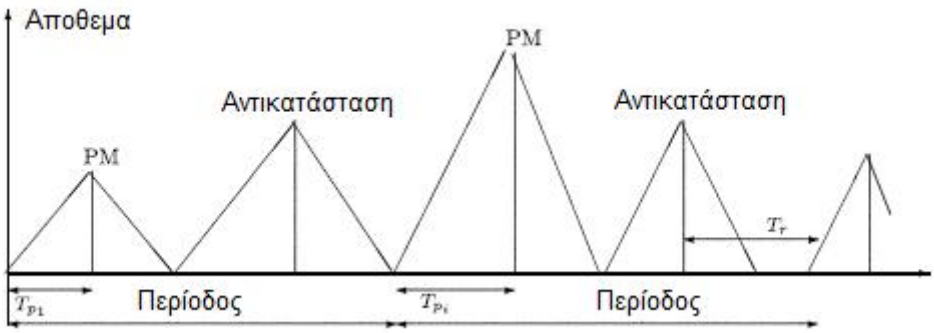
<u>Αναμενόμενη διάρκεια περιόδου:</u>
Η αναμενόμενη διάρκεια περιόδου, $(E[CL])$ δίνεται από τη σχέση:

$$E[CL] = \frac{u}{d}\left\{\sum_{i=1}^{N}\int_0^{T_{Pi}} R_i(\tau)d\tau\right\} + \bar{T}_r - \frac{u-d}{d}\left\{\int_0^{T_{PN}} R_N(\tau)d\tau - \int_0^{T_{PN}} F_r(\frac{u-d}{d}\tau)R_N(\tau)d\tau\right\} \qquad (3.42)$$

Αναμενόμενο κόστος φύλαξης αποθέματος:

Το αναμενόμενο κόστος φύλαξης του αποθέματος, $(E[HC])$, δίνεται από την παρακάτω σχέση και μπορεί να απεικονιστεί ως η περιοχή κάτω από κάθε δειγματοληψία του αποθέματος ανά περίοδο (Σχήμα 3.3).

$$E[HC] = \frac{C_h(u-d)u}{d}\sum_{i-1}^{N}\int_0^{T_{Pi}} \tau R_i(\tau)d\tau \qquad (3.43)$$



Σχήμα 3.3:Πορεία δειγματοληψίας υλοποίησης της παραγωγής [El-Ferik (2008)]

Αναμενόμενο κόστος χαμένων πωλήσεων:

Από τη στιγμή που οι χρόνοι προετοιμασίας, επισκευής και προληπτικής συντήρησης θεωρούνται αμελητέοι, η μόνη περίπτωση για να έχουμε χαμένες πωλήσεις είναι κατά την διάρκεια αντικατάστασης του συστήματος όπου δεν μπορεί να γίνει παραγωγή. Στην περίπτωση αυτή το απόθεμα εξαντλείται πλήρως και από τη στιγμή που δεν μπορεί να ξεκινήσει η παραγωγή για να καλυφθεί η ζήτηση έχουμε το φαινόμενο των χαμένων πωλήσεων. Η παραπάνω περίπτωση μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά με την πιο κάτω εξίσωση:

$$E[LS] = C_l d\left\{\overline{T}_r - \frac{u-d}{d}\left\{\int_0^{T_{PN}} R_N(\tau)d\tau - \int_0^{T_{PN}} F_r\left(\frac{u-d}{d}\right)R_N(\tau)d\tau\right\}\right\} \qquad (3.44)$$

Αναμενόμενο κόστος προληπτικής συντήρησης:

Το αναμενόμενο κόστος προληπτικής συντήρησης, $(E[PM])$, είναι το συνολικό κόστος επιβάρυνσης που οφείλεται στις δραστηριότητες της προληπτικής συντήρησης. Κατά συνέπεια,

$$E[PM] = (N-1)C_{PM} \qquad (3.45)$$

Αναμενόμενο κόστος λόγων βλαβών:

Το επιπρόσθετο κόστος που οφείλεται σε πιθανές βλάβες του συστήματος, $(E[BC])$, δίνεται από την εξίσωση:

$$E[BC] = C_B \sum_{i=0}^{N-1} F_i(T_{Pi}) \qquad (3.46)$$

Αναμενόμενο κόστος αντικατάστασης:

Το αναμενόμενο κόστος αντικατάστασης, $(E[RC])$, είναι μια γραμμική συνάρτηση του μέσου χρόνου αντικατάστασης $\overline{T}_r$ και του κόστους προετοιμασίας μετά από αντικατάσταση, K_2:

$$E[RC] = K_2 + C_r E[T_r] = K_2 + C_r \overline{T}_r \qquad (3.47)$$

Αναμενόμενο κόστος προετοιμασίας:

Το αναμενόμενο κόστος προετοιμασίας ανά περίοδο παραγωγής, $(E[SC])$, θεωρείται σταθερό και ίσο το K_1. Για N περιόδους παραγωγής το κόστος προετοιμασίας είναι:

$$E[SC] = NK_1 \qquad (3.48)$$

Το αναμενόμενο συνολικό κόστος ανά περίοδο προκύπτει από το άθροισμα όλων των προαναφερόμενων κοστών, δηλαδή:

Αναμενόμενο συνολικό κόστος =

Αναμενόμενο κόστος φύλαξης αποθέματος + Αναμενόμενο κόστος χαμένων πωλήσεων + Αναμενόμενο κόστος προληπτικής συντήρησης + Αναμενόμενο κόστος λόγων βλαβών + Αναμενόμενο κόστος προετοιμασίας + Αναμενόμενο κόστος αντικατάστασης

ή

$$E[TC(\{T_{Pi}\}, N)] = E[HC] + E[LS] + E[PM] + E[BC] + E[SC] + E[RC] \qquad (3.49)$$

3.4.4 Επίλυση του μοντέλου

Για τον καθορισμό της βέλτιστης πολιτικής για το πρόβλημα οικονομικής παραγωγής παρτίδων, χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος, ο οποίος λάμβανε υπόψη τις υποθέσεις που ορίστηκαν στην παράγραφο 3.4.1, καθώς και τις συναρτήσεις για τα διάφορα κόστη. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε βάση των πιο πάνω δεδομένων είναι ο ακόλουθος:

Αλγόριθμος

Θέσε $N=1$ και ας είναι το T_{PN}^{0} μια αυθαίρετη αρχική τιμή για τη μεταβλητή T_{PN} και ο όρος ε ένα κριτήριο ολοκλήρωσης του αλγορίθμου.

Βήμα 1: Βρες τη βέλτιστη συχνότητα $T_{Pi}s$, με i=1,2,...,N-1 καθορίζοντας την αναγκαία βέλτιστη συνθήκη $(q(k,T_{Pk})=0)$, η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$C_B r_N(T_{PN}) + \frac{(u-d)}{d}\{C_h u T_{PN} - C_l d\} - E[AVC] + \{C_l d - E[AVC]\}\left(\frac{u-d}{d}\right) F_r\left(\frac{u-d}{d}T_{PN}\right) = 0$$

Βήμα 2: Χρησιμοποιώντας το βέλτιστο $T_{Pi}s$, με i=1,2,...,N-1, που προέκυψε από το βήμα 1, βρες μια καινούργια τιμή του T_{Pi}, T'_{PN} χρησιμοποιώντας την πιο κάτω εξίσωση:

$$\Gamma\iota\alpha\ k = N$$

$$C_B f_N(T_{PN}) + C_h \frac{(u-d)u}{d} T_{PN} R_N(T_{PN}) -$$

$$\left\{ C_l d\left(\frac{u-d}{d}\right)\overline{F}_r\left(\frac{u-d}{d}T_{PN}\right) - \left\{1 + \frac{u-d}{d} F_r\left(\frac{u-d}{d}T_{PN}\right)\right\} E[AVC]\right\} R_N(T_{PN}) = 0$$

Βήμα 3: Εάν $|T'_{PN} - T_{PN}| < \varepsilon$ τότε πήγαινε στο βήμα 4, αλλιώς επέστρεψε στο βήμα 2 θέτοντας $T'_{PN} = T_{PN}$

Βήμα 4: Βρες το μακροπρόθεσμο μέσο κόστος, $E[AVC(\{T_{Pi}\},N)]$, για την παρούσα λύση.

Βήμα 5: Εάν $E[AVC(\{T_{Pi}\},N)] > E[AVC(\{T_{Pi}\},N-1)]$, τότε πήγαινε στο βήμα 6, αλλιώς επέστρεψε στο βήμα 1 θέτοντας $T_{PN} = T'_{PN}$ και N^{*}=N+1

Βήμα 6: Η βέλτιστη λύση είναι η $N^*=N-1$ και η βέλτιστη συχνότητα η $T_{Pi}s$, με $i=1,2,...,N$ που αντιστοιχεί στην N^*.

Ο El-Ferik (2008) προσομοίωσε το μοντέλο του για μια σειρά αστοχιών που ακολουθούσαν κατανομή Weibull με ρυθμό $r_k(t) = A_k \frac{t^\beta}{\theta}$ και κατέληξε στα ακόλουθα συμπεράσματα: (1) το μακροπρόθεσμο μέσο κόστος επηρεάζεται από αλλαγές στις αναλογίες των κρίσιμων συντελεστών κόστους, (2) ο μέσος χρόνος για την εμφάνιση βλάβης είναι ευαίσθητος σε αλλαγές του μέσου χρόνου αντικατάστασης, (3) η ποσότητα παραγωγής μειώνεται καθώς η κατάσταση του συστήματος επιδεινώνεται με την πάροδο του χρόνου και (4) χρησιμοποιώντας διαφορετικούς ρυθμούς παραγωγής μπορεί να επιτευχθούν αληθοφανείς λύσεις του προβλήματος, εφόσον εξασφαλιστεί μια σταθερή ποσότητα παραγωγής και κάθε περίοδο παραγωγής.

3.5 Μοντέλο για ένα κατασκευαστικό σύστημα το οποίο στηρίζεται στην διάρκεια ζωής του συστήματος

Έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους, πως οι περισσότερες πολιτικές προληπτικής συντήρησης είναι συνήθως πολύ απλοποιημένες, στηρίζονται σε μη ρεαλιστικές υποθέσεις και δεν λαμβάνουν υπόψη την διάρκεια ζωής του εξοπλισμού όσων αφορά τις μηχανικές βλάβες, αλλά ούτε και το απόθεμα όσων αφορά τα προϊόντα. Οι πολιτικές αυτές εμπεριέχουν μεγάλη πιθανότητα οικονομικής κρίσης γιατί υπάρχει ο κίνδυνος υπέρβασης των προβλεπόμενων κοστών λόγω λανθασμένου προγραμματισμού. Για την αποφυγή τέτοιων περιπτώσεων πρέπει να γίνεται μια πιο ρεαλιστική ανάλυση και κατά την διατύπωση των μοντέλων να λαμβάνονται υπόψη όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν τον προγραμματισμό της παραγωγής και της συντήρησης.

Παράδειγμα τέτοιου μοντέλου αποτελεί αυτό που διατύπωσαν οι Kenne et al.(2007), το οποίο στοχεύει στον καθορισμό μιας κοινής πολιτικής που συνδυάζει το προσωρινό απόθεμα και την προληπτική συντήρηση, σε ένα περιβάλλον παραγωγής το οποίο υπόκειται σε τυχαίες μηχανικές βλάβες. Το μοντέλο αυτό βελτιστοποίησης βασίζεται στην διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και αντικειμενικός του στόχος είναι η ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης συνολικού

κόστους, το οποίο συμπεριλαμβάνει το κόστος αποθέματος, το κόστος χαμένων πωλήσεων και το κόστος προληπτικής και διορθωτικής συντήρησης.

3.5.1 Περιγραφή του μοντέλου

Το μοντέλο ελέγχου βέλτιστων πιθανοτήτων αποσκοπεί στον καθορισμό μιας πολιτικής ελέγχου, συμπεριλαμβάνοντας τις στρατηγικές παραγωγής και συντήρησης, η οποία θα ελαχιστοποιεί τα αναμενόμενα συνολικά κόστη.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου λήφθηκε υπόψη η παραγωγή ενός μόνο προϊόντος σε μια παραγωγική διαδικασία με χωρητικότητα $u_{\max}$, για την ικανοποίηση ενός σταθερού ρυθμού ζήτησης d μονάδων ανά μονάδα χρόνου, όπου ισχύει $d < u_{\max}$. Για το σύστημα αυτό εντοπίστηκαν οι στοχαστικές διαδικασίες που οφείλονται σε όλα τα τυχαία γεγονότα και ειδικότερα της παραγωγής, των βλαβών, των επιδιορθώσεων και της προληπτικής συντήρησης. Ακολούθως, για τις διαδικασίες αυτές δημιουργήθηκε μια δομή πιθανοτήτων η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της απόδοσης του συστήματος. Το ενδεχόμενο αποτυχίας και επιδιόρθωσης του συστήματος οφείλεται στις μηχανικές βλάβες οι οποίες συμβαίνουν με τυχαίο τρόπο και αποτελούν πηγή αβεβαιότητας στην παραγωγική διαδικασία.

Επιπρόσθετα, ο χρόνος για την εμφάνιση μηχανικής βλάβης, T_b, χαρακτηρίζεται από μια συνάρτηση πυκνότητας $f(\cdot)$ και μια αθροιστική συνάρτηση κατανομής $F(\cdot)$. Ο ρυθμός αποτυχίας για το συγκεκριμένο σύστημα δίνεται από την πιο κάτω σχέση:

$$r(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \tag{3.50}$$

Στην περίπτωση που συμβεί οποιαδήποτε μηχανική βλάβη γίνεται αμέσως διορθωτική συντήρηση στο σύστημα, σε τυχαίες χρονικές στιγμές, για την επαναφορά της μηχανής στην αρχική της κατάσταση. Κατά την διάρκεια της περιόδου επισκευής μπορούν να συμβούν οι ακόλουθες καταστάσεις:

- η ζήτηση για τα διάφορα προϊόντα να καλύπτεται μόνο από το απόθεμα ασφαλείας
- όλη η ανικανοποίητη ζήτηση “χάνεται” κατά τη διάρκεια των δραστηριοτήτων συντήρησης (προληπτικής ή διορθωτικής)

Για την αποφυγή της δεύτερης περίπτωσης, η οποία αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, και για ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης βλάβης στο σύστημα, στο υπάρχον μοντέλο η προληπτική συντήρηση προγραμματίζεται και συνδυάζεται με το πρόγραμμα παραγωγής. Ο προγραμματισμός γίνεται με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας συντήρησης το σύστημα επαναφέρεται στις αρχικές συνθήκες λειτουργίας του.

Πριν την παρουσίαση της συνάρτησης προς ελαχιστοποίηση και των περιορισμών του μοντέλου, αναφέρονται οι μεταβλητές οι οποίες υιοθετήθηκαν για την ανάπτυξη του. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι εξής:

c^+ κόστος κατακράτησης στο απόθεμα ανά μονάδα χρόνου

c^- κόστος ποινής ανά μονάδα προϊόντος για ανικανοποίητη ζήτηση

c_{pm} κόστος προληπτικής συντήρησης

c_{cm} κόστος διορθωτικής συντήρησης

dA_j διάστημα j καταμεριμού διάρκειας ζωής του εξοπλισμού

d ρυθμός ζήτησης

f(t) συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του T_b

F(t) συσσωρευτική συνάρτηση πιθανότητας του T_b

g(t) συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του T_{cm}

G(t) συσσωρευτική συνάρτηση πιθανότητας του T_{cm}

k αριθμός κύκλων του καταμεριμού διάρκειας ζωής του εξοπλισμού

q(t) συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του T_{pm}

Q(t) άθροισμα συνάρτησης πιθανότητας του T_{pm}

r(t) ρυθμός εμφάνισης βλαβών στον εξοπλισμό

S επίπεδο αποθέματος ασφαλείας

S_i επίπεδο αποθέματος

T προγραμματισμένος χρόνος για τη προληπτική συντήρηση

T_b τυχαία μεταβλητή που περιγράφει το χρόνο για την εμφάνιση βλάβης στον εξοπλισμό

T_{cm} τυχαία μεταβλητή που περιγράφει το χρόνο για τη διορθωτική συντήρηση

T_{pm} τυχαία μεταβλητή που περιγράφει το χρόνο για την προληπτική συντήρηση

$u(\cdot)$ ρυθμός παραγωγής του συστήματος

u_{max} μέγιστος ρυθμός παραγωγής

μ μέσος χρόνος για την εμφάνιση βλάβης στον εξοπλισμό

Όπως συμβαίνει στα περισσότερα μοντέλα τέτοιου είδους, η δήλωση κάποιων παραδοχών και υποθέσεων κατά τον προγραμματισμό είναι αναπόφευκτη, καθώς χωρίς αυτές η επίλυση του προβλήματος είναι πολύ δύσκολη έως αδύνατη, και αυτό κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας που θα υπήρχε στις συναρτήσεις βελτιστοποίησης του μοντέλου. Για το μοντέλο που εξετάζουμε έγιναν οι εξής υποθέσεις:

(1) Το κόστος αντικατάστασης σε περίπτωση βλάβης (c_{cm}) είναι μεγαλύτερο από το κόστος προληπτικής συντήρησης (c_{pm}).

(2) Ο ρυθμός βλαβών $r(\cdot)$ είναι συνεχής, μονότονος και παραμένει ανεπηρέαστος από τις δραστηριότητες επιδιόρθωσης.

(3) Όλες οι βλάβες ανιχνεύονται και επιδιορθώνονται άμεσα.

(4) Κάθε ενέργεια συντήρησης (διορθωτική ή προληπτική) πριν ή μετά την εμφάνιση βλάβης επαναφέρει το σύστημα παραγωγής στη αρχική του κατάσταση (π.χ, η διάρκεια ζωής της μηχανής επαναφέρεται στο μηδέν).

(5) Η μέση τιμή του χρόνου που απαιτείται για τη λειτουργία μιας προληπτικής συντήρησης είναι μικρότερη σε σύγκριση με τη μέση τιμή για τη βλάβη της μηχανής (π.χ, $E[T_{pm}] < E[T_b] = \mu$)

3.5.2 Επίλυση του μοντέλου

Η κατάσταση του συστήματος δηλώνεται από το (a, x), όπου το a υποδηλώνει την κατάσταση του συστήματος και το x το επίπεδο του πλεονάσματος στο απόθεμα. Το σύνολο των αποδεκτών πολιτικών ελέγχου δίνεται από τη μεταβλητή Γ και αποτελεί μια οικογένεια από διαδικασίες F_t που μπορούν να υιοθετηθούν, με τιμές στο $\Pi(a) = \{u(\cdot) : 0 \le u(\cdot) \le u_{\max}\}$. Ο όρος $u(\cdot) \in R^+$ υποδηλώνει τον ρυθμό παραγωγής ο οποίος μπορεί να διαφέρει με το χρόνο, την

κατάσταση και τη χωρητικότητα της μηχανής. Γι'αυτό το λόγο $u(\cdot) \geq 0$ και υποβάλλεται στις τυχαίες διαδικασίες $\{a(t), t \geq 0\}$.

Έχοντας το συνολικό πλεόνασμα $x(\cdot) \in R^{+}$ και το ρυθμό της ζήτησης $d(\cdot) \in]0, \infty)$, μπορεί να περιγραφεί το συνεχές μέρος του δυναμικού συστήματος με την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{dx(t)}{dt} = u(t) - d \times Ind\{x(t) \geq 0\} \quad \text{με } x(0)=x_0 \qquad (3.51)$$

όπου $x_0 \in R^{+}$ είναι το αρχικό επίπεδο του πλεονάσματος και το $Ind(\cdot)$ ορίζεται ως εξής:

$$Ind\{\Theta(\cdot)\} = \begin{cases} 1 & \text{εάν } \Theta(\cdot) \text{ αληθεύει} \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$, για ένα δοσμένο θεώρημα $\Theta(\cdot)$

Το διακεκριμένο μέρος των δυναμικών του συστήματος περιγράφεται από τη κατάσταση του συστήματος $\alpha(t) \in \{1, 2, 3\}$, με $\alpha(t) = 1$ εάν η μηχανή είναι σε κατάσταση λειτουργίας, $\alpha(t) = 2$ εάν η μηχανή υπόκειται σε επισκευή και $\alpha(t) = 3$ εάν η μηχανή υπόκειται σε προληπτική συντήρηση. Η κατάσταση του συστήματος εναλλάσσεται μεταξύ των διαφόρων τρόπων λειτουργίας της διαδικασίας $a(t)$ σύμφωνα με τις τυχαίες μεταβλητές $T_{b,}$ T_{cm} και T_{pm}, οι οποίες καθορίζουν το χρόνο για εμφάνιση βλάβης στη μηχανή, το χρόνο διορθωτικής συντήρησης και το χρόνο προληπτικής συντήρησης αντίστοιχα.

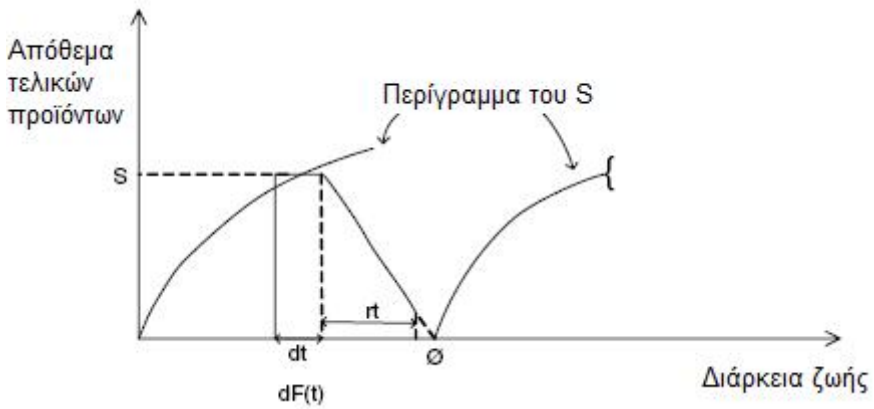
Στην περίπτωση που υφίσταται η κατάσταση λειτουργίας $\alpha(t) = 1$, δηλαδή, η μηχανή είναι σε κατάσταση λειτουργίας και δοθέντος μιας διάρκειας ζωής, ο ρυθμός παραγωγής δίνεται από μια «πολιτική οικονομικού σημείου». Η πολιτική αυτή καθορίζεται από ένα κατώφλι το οποίο ισχύει μόνο για την τιμή της διάρκειας ζωής, αναφέρεται ως $S(a)$ και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$u(x) = \begin{cases} u_{\max} & \text{εάν } x<S(a) \\ d & \text{εάν } x=S(a) \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \qquad (3.52)$$

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω παραμέτρους και υποθέσεις, για το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να προκύψουν τα ακόλουθα τρία σενάρια:

Σενάριο 1

Μπορεί να παρουσιαστεί μηχανική βλάβη πριν την προγραμματισμένη προληπτική συντήρηση και η επισκευή της βλάβης να τελειώσει τη στιγμή εξάντλησης του αποθέματος ή με κάποιο θετικό επίπεδο πλεονάσματος. Σε τέτοια περίπτωση το απόθεμα των τελικών προϊόντων είναι όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Πορεία αποθέματος στην περίπτωση αποτυχίας πριν την προληπτική συντήρηση χωρίς χαμένες πωλήσεις [Kenne et al. (2007)]

Το κόστος κράτησης του αποθέματος την περίοδο $[t, t+dt]$ δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$c^{+} \cdot S(t) \cdot \int_{t}^{t+dt} R(t)dt \qquad (3.53)$$

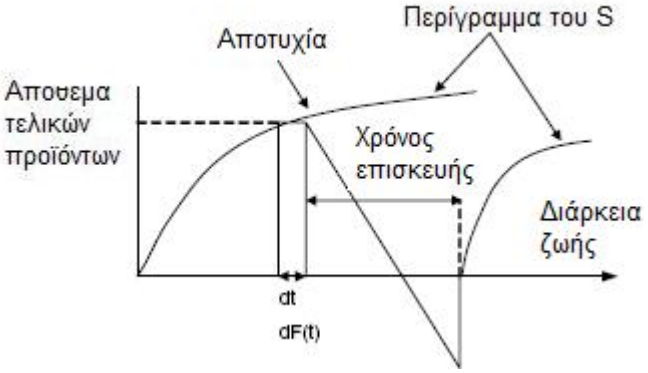
όπου $R(t)$ είναι η συνάρτηση αξιοπιστίας της μηχανής.

Επιπρόσθετα, το κόστος κράτησης του αποθέματος από την στιγμή της αστοχίας του συστήματος μέχρι την αρχή του επόμενου κύκλου παραγωγής δίνεται από τη σχέση

$$c^{+} \cdot \frac{S(t)^2}{2d} \qquad (3.54)$$

Σενάριο 2

Υπάρχει η περίπτωση να παρουσιαστεί βλάβη πριν από την προγραμματισμένη προληπτική συντήρηση και η επισκευή της βλάβης να τελειώσει με κατάσταση ανικανοποίητης ζήτησης ή με χαμένες πωλήσεις. Τότε το απόθεμα των τελικών προϊόντων είναι όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Πορεία πλεονάσματος στην περίπτωση αποτυχίας πριν την προληπτική συντήρηση με χαμένες πωλήσεις [Kenne et al. (2007)]

Ως εκ τούτου πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα της ανικανοποίητης ζήτησης με ένα κόστος ποινής λαμβάνεται το ακόλουθο κόστος:

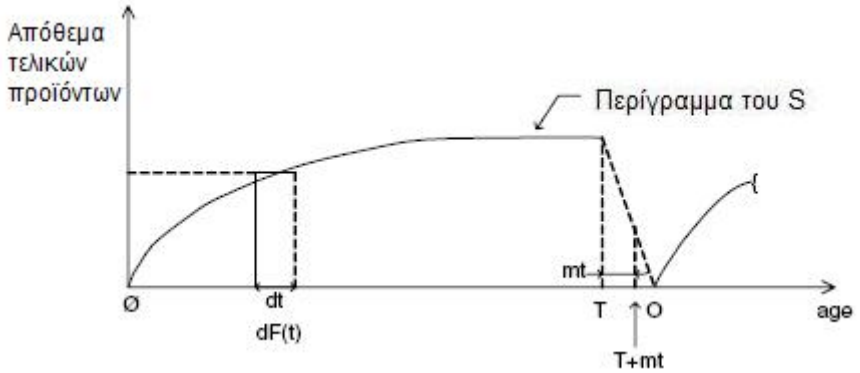
$$c^{-} \cdot \int_{S/d}^{\infty} \left(x - \frac{S(t)}{d} \right) \cdot g(x)dx \qquad (3.55)$$

Γίνεται, ακόμη, η υπόθεση πως μετά από μια επισκευή ο επόμενος κύκλος παραγωγής ξεκινάει με μηδέν απόθεμα, δηλαδή η ανικανοποίητη ζήτηση χάνεται. Λαμβάνοντας υπόψη μια χρονική περίοδο dt, το κόστος στο σενάριο αυτό περιλαμβάνει το κόστος κράτησης του αποθέματος και το κόστος ανικανοποίητης ζήτησης, και δίνεται από τη σχέση:

$$\int_{t}^{t+dt} \left[c^{+} \cdot \frac{S(t)^2}{2d} + c^{-} \cdot \int_{S/d}^{\infty} \left(x - \frac{S(t)}{d} \right) \cdot g(x)dx \right] dF(t) \qquad (3.56)$$

<u>Σενάριο 3</u>

Το τελευταίο σενάριο αναφέρεται στην περίπτωση που παρουσιαστεί βλάβη πριν την προγραμματισμένη προληπτική συντήρηση και η διαδικασία της συντήρησης τελειώσει είτε με ένα θετικό επίπεδο πλεονάσματος είτε με χαμένες πωλήσεις. Στο σενάριο αυτό εκτελείται προληπτική συντήρηση στη μηχανή στον προγραμματισμένο χρόνο T (Σχήμα 3.6) και ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή $T + T_{mp}$ (με $mt := T_{mp}$). Επίσης, δεν συμβαίνει καμία αστοχία πριν την χρονική στιγμή T, έτσι το κόστος υπολογίζεται όπως στο σενάριο 2 και απλά προστίθεται στο κόστος προληπτικής συντήρησης.



Σχήμα 3.6: Πορεία αποθέματος χωρίς αποτυχία της μηχανής πριν την προληπτική συντήρηση [Kenne et al. (2007)]

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις από τα προαναφερόμενα τρία σενάρια καταλήγουμε σε μια εξίσωση με την οποία υπολογίζονται όλα τα κόστη που επιβαρύνουν το σύστημα κατά την διάρκεια της περιόδου dt :

$$dL(S,t) = c^{+} \cdot S \cdot (t) \cdot \int_{t}^{t+dt} R(t)dt + dF(t) \cdot \left[c^{+} \cdot \frac{S(t)^{2}}{2d} + c^{-} \cdot \int_{S/d}^{\infty} \left(x - \frac{S(t)}{d} \right) \cdot g(x)dx \right] \qquad (3.57)$$

Για το διάστημα $[0,T]$, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να ξαναγραφτεί ως εξής:

$$L(S,T) = c^{+} \cdot S \cdot (t) \cdot \int_{t}^{T} R(t)dt + \int_{0}^{T} \left(c^{+} \cdot \frac{S(t)^{2}}{2d} + c^{-} \cdot \int_{S/d}^{\infty} \left(x - \frac{S(t)}{d} \right) \cdot g(x)dx \right) dF(t) \qquad (3.58)$$

Τελικά, βάση όλων των παραπάνω οι συγγραφείς κατέληξαν στο θεώρημα, πως: *«Ένα πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης T^{*} και ένα απόθεμα ασφαλείας S^{*} είναι βέλτιστα τη χρονική στιγμή t αν και μόνο αν*

$$\frac{\partial L(\cdot)}{\partial T} = 0 \quad \text{και} \quad \frac{\partial L(\cdot)}{\partial S} = 0 \qquad (3.59)$$

$$c^{+} \cdot S \cdot \int_{t}^{t+\Delta t} R(t)dt + \Delta F(t) \cdot \left[c^{+} \cdot \frac{S^{2}}{2d} + c_{mp} \left(-f_{r}\left(\frac{S}{d}\right) \cdot \frac{S}{d} \right) - \frac{R_{r}(S/d)}{d} + f_{r}\left(\frac{S}{d}\right) \cdot \frac{S}{d} \right] = 0 \qquad (3.60)$$

και ,

$$S^{*} \frac{c_{mp}}{c^{+}} \cdot R_{r}\left(\frac{S}{d}\right) = -d \cdot \frac{\int_{t}^{t+\Delta t} R(t)dt}{\Delta F(t)} \qquad (3.61)$$

3.5.3 Αλγόριθμος για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου

Για τον καθορισμό της πολιτικής ελέγχου και του αποθέματος, συμπεριλαμβάνοντας τις στρατηγικές παραγωγής και συντήρησης, τα οποία ελαχιστοποιούν τα αναμενόμενα συνολικά κόστη, χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος, Τα βήματα που ακολουθούνται από τον αλγόριθμο καθώς και το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Βήματα αλγορίθμου

Βήμα 1:

Διάβασε όλα τα δεδομένα εισόδου.

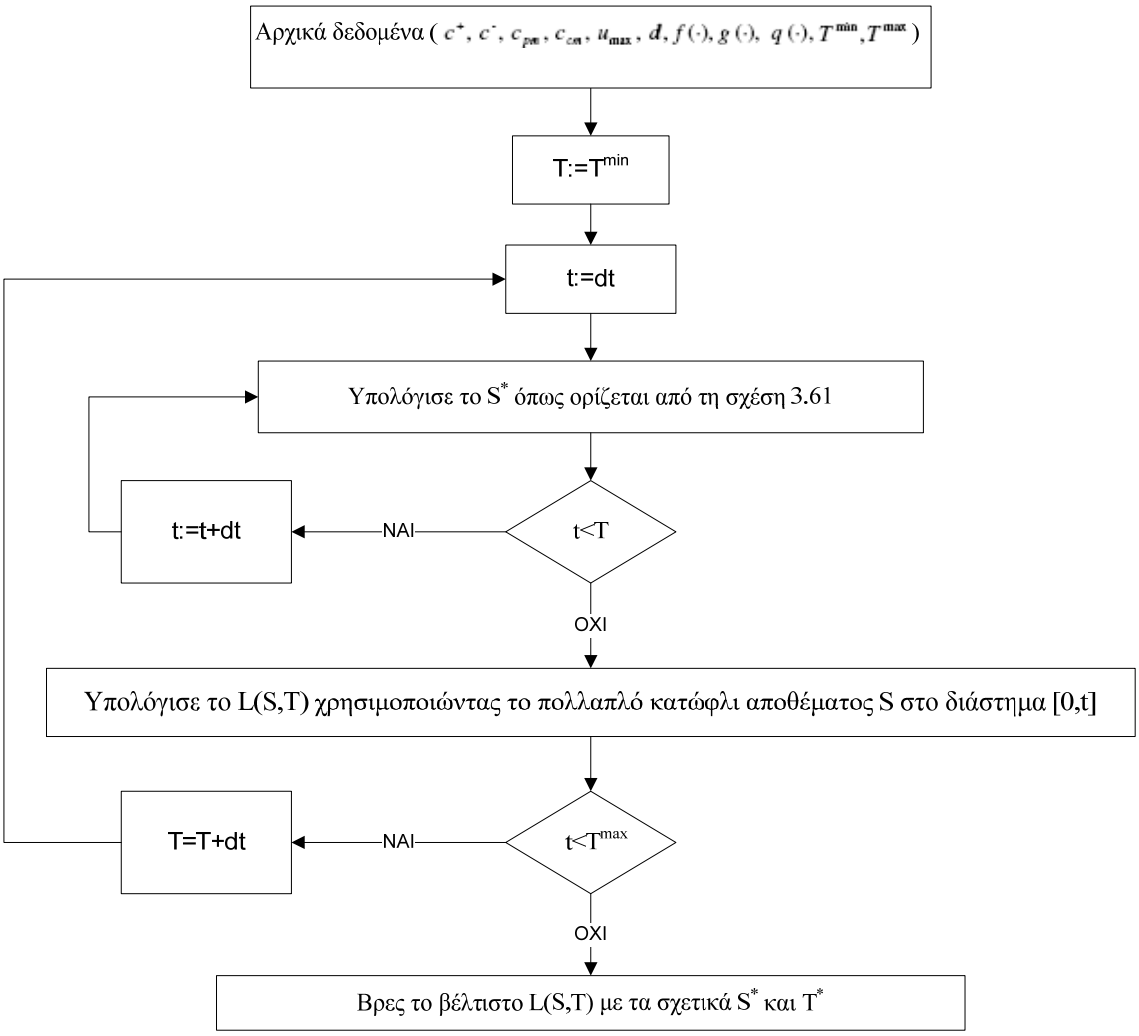
Βήμα 2:

Εξέτασε το δίκτυο υπολογισμού στο T για ένα δοσμένο κατώτερο όριο $T^{\min}$ και ένα ανώτερο όριο $T^{\max}$.

Βήμα 3:

Για κάθε εφικτό χρόνο T προγραμματισμού προληπτικής συντήρησης $(T^{\min} \le T \le T^{\max})$, θεώρησε ένα ξεχωριστό χρονικό διάστημα dt και επίλυσε την κατάσταση βελτιστοποίησης στο χρόνο t για την εύρεση του βέλτιστου κόστους και του σχετικού επιπέδου για το κατώφλι.

Αλγόριθμος για το πρόβλημα καθορισμού μιας πολιτικής που συνδυάζει το προσωρινό απόθεμα και την προληπτική συντήρηση



Σχήμα 3. 7: Αλγόριθμος για την επίλυση του μοντέλου [Kenne et al.(2007)]

Η επίλυση του μοντέλου έγινε προσομοιώνοντας διάφορα σενάρια, όπου για το σκοπό αυτό οι Kenne et al.(2007) χρησιμοποίησαν το λογισμικό "MATLAB". Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν συμπέραναν πως η προσέγγιση μοντελοποίησης που χρησιμοποίησαν αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη των επιπτώσεων που έχουν διάφορες παράμετροι (απόθεμα, εκκρεμείς παραγγελίες, κόστος συντήρησης, κ.τ.λ) στο συνολικό κόστος επιβάρυνσης. Το μοντέλο τους έχει τη δυνατότητα να επεκταθεί σε μεγάλα κατασκευαστικά συστήματα γενικεύοντας την πολιτική ελέγχου που χρησιμοποίησαν και εφαρμόζοντας προσομοιώσεις, αφότου γίνει παραμετροποίηση αυτής της πολιτικής ελέγχου.

3.6 Μοντέλο δημιουργίας βέλτιστων μεγεθών παρτίδων παραγωγής με επιδείνωση της διαδικασίας και μηχανικές βλάβες, υπό ένα πρόγραμμα ελέγχων

Το μοντέλο των Chakraborty et al.(2006) παρουσιάζει αρκετά κοινά στοιχεία με τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, καθώς αποτελεί ένα ενιαίο μοντέλο προγραμματισμού της παραγωγής, της συντήρησης, αλλά και του αποθέματος. Το σύστημα με το οποίο ασχολείται το μοντέλο δεν έχει σταθερή κατάσταση, καθώς η παραγωγική διαδικασία επιδεινώνεται με το πέρασμα του χρόνου και μπορεί να παρουσιάσει μηχανική βλάβη ανά πάσα στιγμή κατά την διάρκεια της παραγωγής. Στην περίπτωση αυτή η παραγόμενη παρτίδα εγκαταλείπεται και αφού αποκατασταθεί το σύστημα με την εφαρμογή διορθωτικής ενέργειας ξεκινάει η παραγωγή νέας παρτίδας.

Η διαδικασία παραγωγής ελέγχεται κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου παραγωγής για να διαπιστωθεί η λειτουργική κατάσταση του συστήματος. Εάν το σύστημα λειτουργεί κανονικά χωρίς να έχει οποιαδήποτε βλάβη τότε: (α) δεν λαμβάνεται καμία ενέργεια εκτός από τη χρονική στιγμή του τελευταίου ελέγχου, όπου γίνεται προληπτική συντήρηση (πολιτική ελέγχου I) ή (β) εκτελείται προληπτική συντήρηση (πολιτική ελέγχου II). Σε αντίθετη περίπτωση, εάν δηλαδή σε οποιοδήποτε έλεγχο το σύστημα δεν βρίσκεται σε πλήρη λειτουργική κατάσταση, γίνονται άμεσα οι απαραίτητες ενέργειες για αποκατάσταση του.

3.6.1 Διατύπωση του προβλήματος

Κύριος σκοπός του ενιαίου μοντέλου παραγωγής, αποθέματος και συντήρησης είναι η διερεύνηση των κοινών επιδράσεων που έχει η επιδείνωση της διαδικασίας παραγωγής, των μηχανικών βλαβών και των ελέγχων στις αποφάσεις για τον καθορισμό του βέλτιστου μεγέθους παρτίδων.

Στη συνέχεια δίνονται οι μεταβλητές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου:

X μη-αρνητική τυχαία μεταβλητή που δηλώνει το χρόνο μέχρι την εμφάνιση μηχανικής βλάβης

$F_X(t)$ κατανομή χρόνου μηχανικής βλάβης με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f_X(t) = dF_X(t)/dt, 0 \le t \le \infty$

$G(l)$ κατανομή χρόνου διορθωτικής επισκευής με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $g(l) = dG(l)/dl$

$d(>0)$ σταθερός ρυθμός ζήτησης

$p(>d)$ σταθερός ρυθμός παραγωγής

$c_0(>0)$ κόστος προετοιμασίας για κάθε κύκλο παραγωγής

$c_r(>0)$ κόστος διορθωτικής επισκευής ανά μονάδα χρόνου

$c_h(>0)$ κόστος κράτησης αποθέματος ανά μονάδα προϊόντος ανά μονάδα χρόνου

$c_s(>0)$ κόστος αποθήκευσης ανά μονάδα προϊόντος

$c_d(>0)$ επιπλέον κόστος λόγο παραγωγής ενός ελαττωματικού προϊόντος

$\upsilon(\geq 0)$ κόστος κάθε ελέγχου

$c_m(>0)$ κόστος προληπτικής συντήρησης

T πραγματικός χρόνος παραγωγής

τ τυχαία μεταβλητή που δηλώνει το χρόνο για τη μετάβαση από μια "ελεγχόμενη" κατάσταση του συστήματος σε μια "μη ελεγχόμενη"

$h(\tau), H(\tau)$ συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, αθροιστική συνάρτηση κατανομής του τ(>0)

R(·) κόστος αποκατάστασης, μια συνάρτηση της καθυστέρησης επισήμανσης

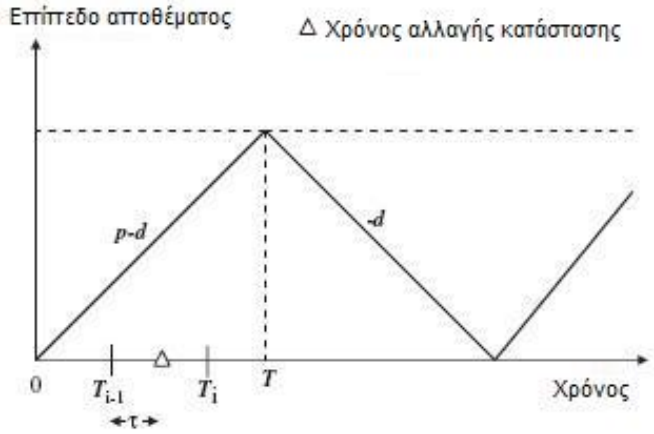
n(≥1) αριθμός ελέγχων που γίνονται κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου παραγωγής

α(0<α<1) ρυθμός στον οποίο η διαδικασία παράγει ελαττωματικά προϊόντα όταν βρίσκεται στην μη "ελεγχόμενη" κατάσταση

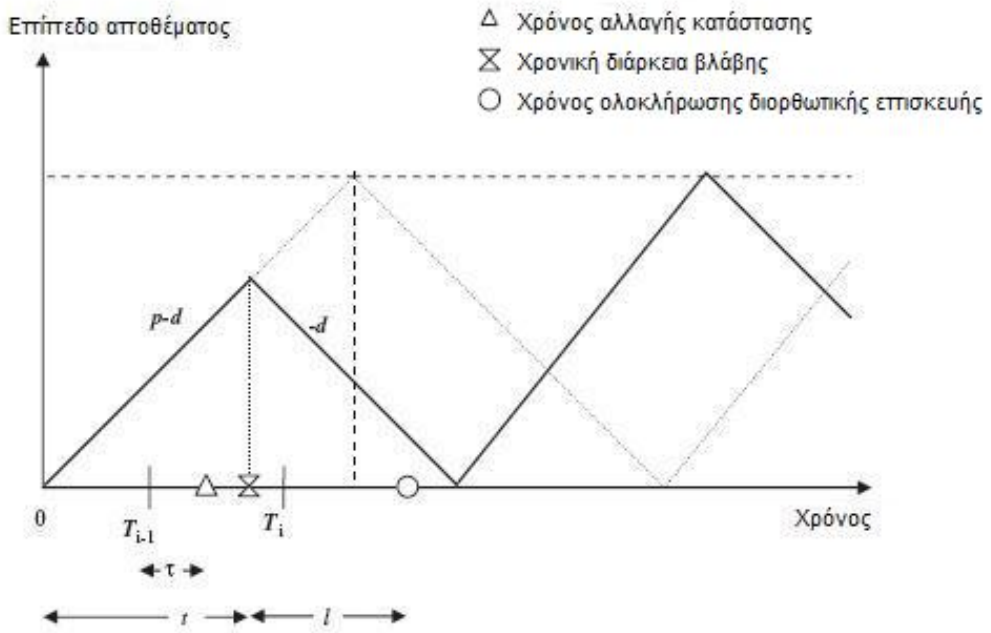
3.6.2 Περιγραφή του μοντέλου

Στο μοντέλο των Chakraborty et al.(2006) εξετάζεται η περίπτωση ενός απλού συστήματος παραγωγής το οποίο αποτελείται από μια μηχανή η οποία παράγει ένα μόνο προϊόν και το χρονικό διάστημα μεταξύ δυο ολοκληρωμένων παραγωγών θεωρείται ως ένας κύκλος παραγωγής. Κατά την έναρξη κάθε κύκλου παραγωγής το σύστημα θεωρείται πως βρίσκεται σε άριστη λειτουργική κατάσταση (“ελεγχόμενη”) και τα προϊόντα που παράγονται είναι ποιοτικά αποδεκτά. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, όμως, υπάρχει η πιθανότητα να παραχθούν ελαττωματικά προϊόντα ή μπορεί να παρουσιαστούν προβλήματα στη μηχανή κατά την διάρκεια της παραγωγής. Σε αυτή την περίπτωση εφαρμόζεται άμεσα η ενέργεια της διορθωτικής επισκευής, η παραγωγή του τρέχον κύκλου απορρίπτεται και ο επόμενος κύκλος παραγωγής μπορεί να ξεκινήσει μόλις εξαντληθεί το απόθεμα.

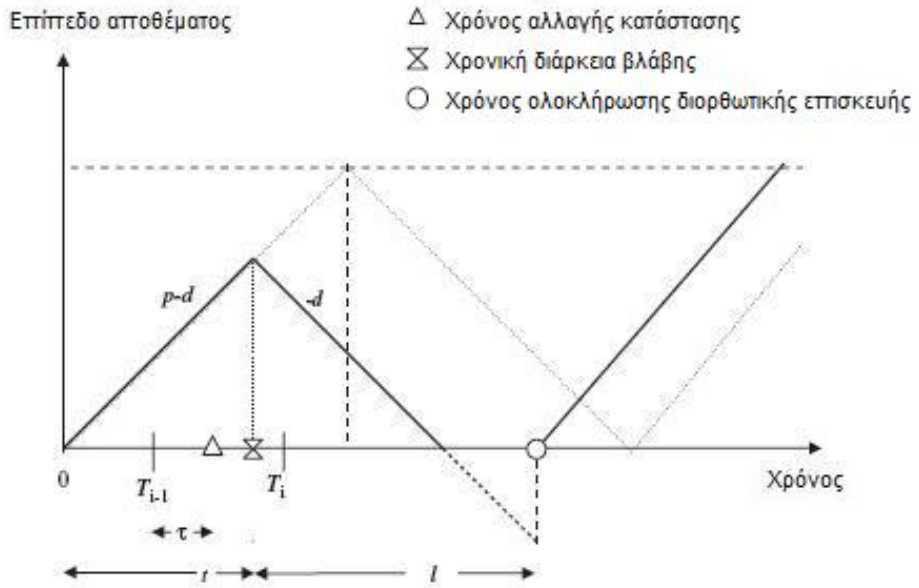
Γίνεται η υπόθεση πως κατά την διάρκεια ενός κύκλου παραγωγής διενεργούνται $n(\geq 1)$ έλεγχοι τις χρονικές στιγμές $T_1, T_2, ..., T_n (= T)$. Εάν σε κάποιο από τους ελέγχους αυτούς η διαδικασία παραγωγής βρεθεί να είναι σε "μη- ελεγχόμενη" κατάσταση, τότε γίνεται αποκατάσταση με κάποιο κόστος το οποίο είναι σε συνάρτηση του χρόνου καθυστέρησης επισήμανσης της βλάβης. Σε περίπτωση που παρουσιαστεί βλάβη στο διάστημα, μεταξύ των ελέγχων, τότε διενεργείται άμεσα διορθωτική συντήρηση (γενική επισκευή) και ο χρόνος διορθωτικής επισκευής συμπεριλαμβάνει επίσης το χρόνο προετοιμασίας της μηχανής για τον επόμενο κύκλο. Κατά την διάρκεια της διορθωτικής επισκευής μπορεί χρειαστεί περαιτέρω χρόνος για την ολοκλήρωση της, με αποτέλεσμα να προκύψουν ελλείψεις στο απόθεμα και συνεπώς να μην καλυφτεί όλη η ζήτηση. Η ζήτηση αυτή μπορεί να ικανοποιηθεί μόνο μετά το πέρας της επισκευής της μηχανής. Στα Σχήματα 3.8 έως 3.10 φαίνονται διαγραμματικά οι περιπτώσεις που αναφέρθηκαν σε αυτή την παράγραφο.



Σχήμα 3.8: Αλλαγή διαδικασίας στο i-οστό διάστημα ελέγχου χωρίς να παρουσιαστεί μηχανική βλάβη κατά τη διάρκεια της παραγωγής [Chakraborty et al.(2006)]



Σχήμα 3.9: Αλλαγή διαδικασίας και εμφάνιση μηχανικής βλάβης στο i-οστό διάστημα ελέγχου [Chakraborty et al.(2006)]



Σχήμα 3.10: Εμφάνιση μηχανικής βλάβης στο i-οστό διάστημα ελέγχου όπως επίσης και ανικανοποίητης ζήτησης λόγω επιπρόσθετου χρόνου επισκευής [Chakraborty et al.(2006)]

Από τα πιο πάνω διαγράμματα είναι εμφανές πως στο τέλος κάθε παραγωγής ($T_n = T$) διενεργείται πάντοτε προληπτική συντήρηση, ακόμη και αν κατά τον έλεγχο το σύστημα βρέθηκε να είναι σε "ελεγχόμενη" κατάσταση. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται πως το

σύστημα στην έναρξη κάθε κύκλου παραγωγής είναι σχεδόν σε τέλεια λειτουργική κατάσταση. Επιπρόσθετα, γίνεται η υπόθεση πως οι έλεγχοι που γίνονται κατά διαστήματα είναι πάντα σωστοί χωρίς πιθανότητα σφάλματος, όπως επίσης οι χρόνοι ελέγχου και προληπτικής συντήρησης είναι μηδαμινοί.

Οι Chakraborty et al.(2006) βασιζόμενοι σε όλα όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, πρότειναν δυο μοντέλα παραγωγής-αποθέματος, μοντέλο I και μοντέλο II, υπό τις πολιτικές ελέγχου I και II. Συγκεκριμένα τα μοντέλα αναφέρουν:

Πολιτική ελέγχου I: Εάν η διαδικασία βρεθεί να είναι εκτός "ελεγχόμενης" κατάστασης τη στιγμή που διενεργείται ο έλεγχος, τότε γίνεται αποκατάσταση του συστήματος, αλλιώς δεν λαμβάνεται καμία ενέργεια εκτός τη χρονική στιγμή του τελευταίου ελέγχου, T_n, όπου εκτελείται προληπτική συντήρηση.

Πολιτική ελέγχου II: Εάν η διαδικασία βρεθεί να είναι εκτός "ελεγχόμενης" κατάστασης τη στιγμή που διενεργείται ο έλεγχος, τότε γίνεται αποκατάσταση του συστήματος, αλλιώς εκτελείται προληπτική συντήρηση.

3.6.3 Επίλυση των μοντέλων I και II

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των δυο μοντέλων παραγωγής-αποθέματος I και II υπό τις αντίστοιχες πολιτικές ελέγχου. Παρουσιάζονται όλες οι συναρτήσεις κόστους που απαρτίζουν το μοντέλο καθώς και η συνάρτηση βελτιστοποίησης που αφορά το συνολικό κόστος ανά κύκλο παραγωγής.

3.6.3.1 Μοντέλο I

Στο μοντέλο I, το συνολικό κόστος του συστήματος παραγωγής-αποθέματος συμπεριλαμβάνει: το κόστος προετοιμασίας του συστήματος, το κόστος κράτησης αποθέματος, το κόστος ελέγχων του εξοπλισμού, το κόστος αποκατάστασης, το κόστος διορθωτικής και προληπτικής συντήρησης, το κόστος ανικανοποίητης ζήτησης και το κόστος λόγο παραγωγής ελαττωματικών προϊόντων. Στις επόμενες παραγράφους δίνονται αναλυτικά οι συναρτήσεις για τα αντίστοιχα κόστη.

Για τον υπολογισμό του κόστους αποκατάστασης, τέθηκε η μεταβλητή P_j ως η πιθανότητα εκείνη όπου η διαδικασία παραγωγής χρειάζεται να αποκατασταθεί τη χρονική στιγμή T_j, $\forall\, j = 1, 2, ...n$. Επίσης, για σκοπούς ευκολίας έκφρασης των μαθηματικών εξισώσεων που αναφέρονται στον αναμενόμενο αριθμό παραγόμενων ελαττωματικών προϊόντων και του αναμενόμενου κόστους αποκατάστασης, στο i-οστό διάστημα ελέγχου, έγινε η υπόθεση πως οι όροι τ_k και x_k υποδηλώνουν το χρόνο που παρέρχεται από την "ελεγχόμενη" έως την "μη-ελεγχόμενη" κατάσταση και το χρόνο εμφάνισης μηχανικής βλάβης αντίστοιχα, δοθέντος πως η προηγούμενη αποκατάσταση έγινε τη χρονική στιγμή T_k, k=0,1,2,...,i-1. Το κόστος αποκατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη τις πιο πάνω υποθέσεις, δίνεται από τη σχέση:

$$P_j = \sum_{i=0}^{j-1} P_i \{H(T_j - T_i) - H(T_{j-1} - T_i)\}, \quad \text{j=1,2,...,n} \quad \text{όπου } \mathrm{P}_0 = 1 \tag{3.62}$$

Ακολούθως, δίνεται η εξίσωση για τον υπολογισμό του αναμενόμενου αριθμού ελαττωματικών προϊόντων που πιθανόν να παραχθούν σε ένα κύκλο παραγωγής. Ο αριθμός αυτός δηλώνεται χρησιμοποιώντας τη μεταβλητή $E(N_i)$ και λαμβάνοντας υπόψη μια υποθετική πιθανότητα για τη χρονική στιγμή εμφάνισης μηχανικής βλάβης. Υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{n} E(N_i) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0}^{i-1} P_j \Bigg[& \int_{T_{i-1}-T_j}^{T_i-T_j} pa \times \left\{ \int_{T_{i-1}-T_j}^{x_j} (x_j - \tau_j) h(\tau_j) d\tau_j \right\} \times dF_X(x_j) + \\ & \int_{T_i-T_j}^{\infty} pa \left\{ \int_{T_{i-1}-T_j}^{T_i-T_j} \times (T_i - T_j - \tau_j) \times h(\tau_j) d\tau_j \right\} dF_X(x_j) \Bigg]\end{aligned} \tag{3.63}$$

Ομοίως, το κόστος αποκατάστασης του συστήματος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sum_{j=0}^{i-1} P_j \int_{T_i-T_j}^{\infty} \left\{ \int_{T_{i-1}-T_j}^{T_i-T_j} R(T_i - T_j - \tau_j) h(\tau_j) d\tau_j \right\} \times\, dF_X(x_j) \tag{3.64}$$

Συνεπώς, το άθροισμα του αναμενόμενου κόστους αποκατάστασης και προληπτικής συντήρησης ανά κύκλο παραγωγής μπορεί να δοθεί από την:

$$(RPC)_1 = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=0}^{i-1} P_j \int_{T_i-T_j}^{\infty} \left\{ \int_{T_{i-1}-T_j}^{T_i-T_j} \times R(T_i - T_j - \tau_j) h(\tau_j) d\tau_j \right\} dF_X(x_j) + \\ \sum_{j=0}^{n-1} P_j \int_{T_n-T_j}^{\infty} \left\{ \int_{T_{n-1}-T_j}^{T_n-T_j} \times R(T_n - T_j - \tau_j) h(\tau_j) d\tau_j + c_m \int_{T_n-T_j}^{\infty} h(\tau_j) d\tau_j \right\} dF_X(x_j) \tag{3.65}$$

Επιπρόσθετα, θέτοντας μια υποθετική πιθανότητα για το χρόνο εμφάνισης μηχανικής βλάβης, t, μπορούν να καθοριστούν οι ακόλουθες ποσότητες:

Αναμενόμενο κόστος κράτησης αποθέματος ανά κύκλο

$$(HC)_1 = c_h \left[\int_0^{T_n} \frac{(p-d)pt^2}{2d} dF_X(t) + \int_{T_n}^{\infty} \frac{(p-d)pT_n^2}{2d} dF_X(t) \right] \tag{3.66}$$

Αναμενόμενο κόστος διορθωτικής επισκευής ανά κύκλο

$$(RC)_1 = c_r \int_0^{T_n} \int_0^{\infty} l dG(l) dF_X(t) \tag{3.67}$$

Αναμενόμενο κόστος λόγο ελλείψεων ανά κύκλο

$$(SC)_1 = c_s d \int_0^{T_n} \left\{ \int_{(p-d)t/d}^{\infty} \left[l - \frac{(p-d)t}{d} \right] dG(l) \right\} \times dF_X(t) \tag{3.68}$$

Συνεπώς, έχοντας τις μαθηματικές εξισώσεις για όλα τα αναμενόμενα κόστη που μπορούν να προκύψουν κατά την διάρκεια ενός κύκλου παραγωγής, για το μοντέλο Ι, είναι εφικτό να υπολογιστεί το συνολικό αναμενόμενο κόστος ανά κύκλο:

$$
\begin{aligned}
&S_1(n,T_1,T_2,...,T_n)= \\
&\quad c_0+n\upsilon+c_r\int_0^{T_n}\int_0^{\infty} l dG(l)dF_X(t)+c_h\left[\int_0^{T_n}\frac{(p-d)pt^2}{2d}dF_X(t)+\int_{T_n}^{\infty}\frac{(p-d)pT_n^2}{2d}dF_X(t)\right] \\
&\quad +\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=0}^{i-1}P_j\int_{T_i-T_j}^{\infty}\times\left\{\int_{T_{i-1}-T_j}^{T_i-T_j}R(T_i-T_j-\tau_j)h(\tau_j)d\tau_j\right\}dF_X(x_j)+ \\
&\quad +\sum_{j=0}^{i-1}P_j\int_{T_n-T_j}^{\infty}\left\{\int_{T_{n-1}-T_j}^{T_n-T_j}R(T_n-T_j-\tau_j)\times h(\tau_j)d\tau_j+c_m\int_{T_n-T_j}^{\infty}h(\tau_j)d\tau_j\right\}dF_X(x_j) \\
&\quad +c_s d\int_0^{T_n}\left\{\int_{(p-d)t/d}^{\infty}\left[l-\frac{(p-d)t}{d}\right]dG(l)\right\}\times dF_X(t) \\
&\quad +\mathrm{pac_d}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=0}^{i-1}P_j\left[\int_{T_{i-1}-T_j}^{T_i-T_j}\left\{\int_{T_{i-1}-T_j}^{x_j}\times(x_j-\tau_j)h(\tau_j)d\tau_j\right\}dF_X(x_j)\right. \\
&\quad \left.+\int_{T_i-T_j}^{\infty}\left\{\int_{T_{i-1}-T_j}^{T_i-T_j}(T_i-T_j-\tau_j)h(\tau_j)d\tau_j\right\}\times dF_X(x_j)\right] \qquad (3.69)
\end{aligned}
$$

Ακόμη, θέτοντας μια υποθετική πιθανότητα για το χρόνο μέχρι την εμφάνιση μηχανικής βλάβης καθορίζεται η χρονική διάρκεια ενός κύκλου παραγωγής - αποθέματος:

$$
\begin{aligned}
P_1(T_n)&=\int_0^{\infty}E(\text{ διάρκεια ενός κύκλου }\mid X=t)dF_X(t) \\
&=\int_0^{\mathrm{T_n}}\left\{\int_0^{(p-d)t/d}\frac{pt}{d}dG(l)+\int_{(p-d)t/d}^{\infty}(t+l)dG(l)\right\}dF_X(t)+\int_{T_n}^{\infty}\frac{pT}{d}dF_X(t)
\end{aligned}
\qquad (3.70)
$$

Κατά συνέπεια, το αναμενόμενο κόστος ανά μονάδα χρόνου όταν το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση είναι:

$$
C_1(n,T_1,T_2,...,T_n)=\lim_{t\to\infty}\frac{E[\text{ το συνολικό κόστος στο (0,t)}]}{t}=\frac{S_1(n,T_1,T_2,...,T_n)}{P_1(T_n)} \qquad (3.71)
$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σκοπός του μοντέλου είναι ο καθορισμός του βέλτιστου αριθμού ελέγχων n^* και του αντίστοιχου χρονικού προγράμματος των ελέγχων, $\{T_1^*,T_2^*,...,T_n^*\}$, τα οποία ελαχιστοποιούν την συνάρτηση του αναμενόμενου κόστους ανά μονάδα χρόνου, $C_1(n,T_1,T_2,...,T_n)$. Όμως, λόγω του ότι ο αριθμός των ελέγχων n είναι διακεκριμένος και οι χρόνοι $T_1,T_2,...,T_n$ είναι συνεχείς, υπάρχει δυσκολία ταυτόχρονη εύρεση των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών $n,T_1,T_2,...,T_n$. Για το λόγο αυτό γίνεται προσπάθεια ανεύρεσης μιας υπο-

βέλτιστης πολιτικής (η ανάλυση της λύσης αυτής δεν εμπίπτει στους στόχους της παρούσας εργασίας, δες Munford (1981).

3.6.3.2 Εκτεταμένο μοντέλο Ι

Στο μοντέλο Ι, είναι πιθανόν να προκύψουν ελλείψεις στο απόθεμα μόνο όταν το ανά χείρας απόθεμα μειωθεί στο μηδέν πριν ολοκληρωθεί η επισκευή της μηχανής σε περίπτωση βλάβης (Σχήμα 3.10). Γίνεται, λοιπόν, η υπόθεση ότι όταν το επίπεδο του ανά χείρας αποθέματος μειωθεί στο μηδέν, τότε επιτρέπονται οι ελλείψεις κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου z. Σε περίπτωση μηχανικής βλάβης, η υπόθεση αυτή είναι αληθής όταν η επισκευή της μηχανής ολοκληρωθεί πριν το επίπεδο του ανά χείρας αποθέματος φτάσει στο επίπεδο μηδέν ή όταν η επισκευή της μηχανής ολοκληρωθεί μέσα στην επιτρεπόμενη περίοδο ελλείψεων z. Βάση των πιο πάνω υποθέσεων, το αναμενόμενο κόστος ελλείψεων ανά κύκλο μπορεί να δηλωθεί ως εξής:

$$(SC)_{1e} = \left[\int_0^{T_n} \left\{ \int_0^{(p-d)t/d+z} z dG(l) + \int_{(p-d)t/d+z}^{\infty} \left(l - \frac{(p-d)t}{d} \right) dG(l) \right\} \times dF_X(t) + \int_{T_n}^{\infty} z dF_X(t) \right] \quad (3.72)$$

Κατά συνέπεια, η εκτεταμένη χρονική διάρκεια ενός κύκλου παραγωγής – αποθέματος είναι:

$$P_{1e}(z,T_n) = \int_0^{T_n} \left\{ \int_0^{(p-d)t/d+z} \left(\frac{pt}{d} + z \right) dG(l) + \int_{(p-d)t/d+z}^{\infty} (t+l) dG(l) \right\} dF_X(t) + \int_{T_n}^{\infty} \left(\frac{pT_n}{d} + z \right) dF_X(t) \quad (3.73)$$

Τέλος, επειδή τα υπόλοιπα κόστη τα οποία σχετίζονται με το μοντέλο Ι παραμένουν τα ίδια, το αναμενόμενο κόστος ανά μονάδα χρόνου στην σταθερή κατάσταση δίνεται από τη ακόλουθη σχέση:

$$C_{1e}(n,z,T_1,T_2,...,T_n) = \frac{c_0 + n\upsilon + c_d \sum_{i=1}^{n} E(N_i) + (RC)_1 + (RPC)_1 + (SC)_{1e}}{P_{1e}(z,T_n)} \quad (3.74)$$

3.6.3.3 Μοντέλο ΙΙ

Το μοντέλο ΙΙ εφαρμόζεται υπό την πολιτική ελέγχου ΙΙ, όπου σε κάθε έλεγχο εκτελείται είτε προληπτική συντήρηση είτε αποκατάσταση του συστήματος. Συνεπώς, το σύστημα

παραγωγής βρίσκεται σε κατάσταση σχεδόν καινούργια αμέσως μετά από κάθε έλεγχο. Θέτοντας μια υποθετική πιθανότητα για το χρόνο εμφάνισης βλάβης στη μηχανή μπορεί να υπολογιστεί ο αναμενόμενος αριθμός ελαττωματικών προϊόντων που πιθανόν να παραχθούν σε ένα κύκλο παραγωγής, ως εξής:

$$\sum_{i=1}^{n} E(N_i) = pa\sum_{i=1}^{n}\left[\int_0^{T_i-T_{i-1}}\left\{\int_0^{t}(\mathrm{t}-\tau)\mathrm{h}(\tau)\mathrm{d}\tau\right\}\times dF_X(t)+\int_{T_i-T_{i-1}}^{\infty}\left\{\int_0^{T_i-T_{i-1}}(\mathrm{T_i}-\mathrm{T_{i-1}}-\tau)\times\mathrm{h}(\tau)\mathrm{d}\tau\right\}\ dF_X(t)\right] \quad (3.75)$$

Επίσης, το άθροισμα του αναμενόμενου κόστους αποκατάστασης και προληπτικής συντήρησης ανά κύκλο παραγωγής δίνεται από την:

$$(RPC)_2 = \sum_{i=1}^{n}\left[\int_{T_i-T_{i-1}}^{\infty}\left\{\int_0^{T_i-T_{i-1}} R(T_i-T_{i-1}-\tau)h(\tau)d\tau + c_m\int_{T_i-T_{i-1}}^{\infty} h(\tau)d\tau\right\}dF_X(t)\right] \quad (3.76)$$

Συνεχίζοντας με όμοιο τρόπο όπως στο μοντέλο Ι, μπορεί να καθοριστεί το συνολικό αναμενόμενο κόστος ανά κύκλο:

$$\begin{aligned}
&S_2(n,T_1,T_2,...,T_n) = \\
&\quad c_0 + n\upsilon + c_r\int_0^{T_n}\int_0^{\infty} l dG(l)dF_X(t) + c_h\left[\int_0^{T_n}\frac{(p-d)pt^2}{2d}dF_X(t)+\int_{T_n}^{\infty}\frac{(p-d)pT_n^2}{2d}dF_X(t)\right] \\
&\quad + \sum_{i=1}^{n}\left[\int_{T_i-T_{i-1}}^{\infty}\left\{\int_0^{T_i-T_{i-1}} R(T_i-T_{i-1}-\tau)\times h(\tau)d\tau + c_m\int_{T_n-T_{i-1}}^{\infty} h(\tau)d\tau\right\}dF_X(t)\right] \\
&\quad + \mathrm{c_s} d\int_0^{T_n}\left\{\int_{(p-d)t/d}^{\infty}\left[l-\frac{(p-d)t}{d}\right]dG(l)\right\}\times dF_X(t) \\
&\quad + \mathrm{pac_d}\sum_{i=1}^{n}\left[\int_0^{T_i-T_{i-1}}\left\{\int_0^{t}(t-\tau)h(\tau)d\tau\right\}\times dF_X(t)\right. \\
&\quad \left. + \int_{T_i-T_{i-1}}^{\infty}\left\{\int_0^{T_i-T_{i-1}}(T_i-T_{i-1}-\tau)h(\tau)d\tau\right\}\times dF_X(t)\right] \qquad (3.77)
\end{aligned}$$

Για τον υπολογισμό της χρονικής διάρκειας ενός κύκλου παραγωγής-αποθέματος ακολουθήθηκε η λογική που εφαρμόστηκε στο μοντέλο Ι, δηλαδή θέτοντας μια υποθετική πιθανότητα για το χρόνο μέχρι την εμφάνιση μηχανικής βλάβης. Έτσι προκύπτει η εξίσωση:

$$\begin{aligned}
P_2(T_n) &= \int_0^{\infty} E(\text{ διάρκεια ενός κύκλου } \mid X=t)dF_X(t) \\
&= \int_0^{\mathrm{T_n}}\left\{\int_0^{(p-d)t/d}\frac{pt}{d}dG(l)+\int_{(p-d)t/d}^{\infty}(t+l)dG(l)\right\}dF_X(t)+\int_{T_n}^{\infty}\frac{pT}{d}dF_X(t)
\end{aligned} \quad (3.78)$$

Συνεπώς, το αναμενόμενο κόστος ανά μονάδα χρόνου στην περίπτωση που το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση είναι:

$$C_2(n,T_1,T_2,...,T_n)=\lim_{t\to\infty}\frac{E[\text{ το συνολικό κόστος στο (0,t)}]}{t}=\frac{S_2(n,T_1,T_2,...,T_n)}{P_2(T_n)} \qquad (3.79)$$

Όπως και προηγουμένως ο σκοπός του μοντέλου ΙΙ είναι ο καθορισμός του βέλτιστου αριθμού ελέγχων n^* και του σχετικού προγράμματος ελέγχων, $\{T_1^*,T_2^*,...,T_n^*\}$, τα οποία ελαχιστοποιούν την συνάρτηση του αναμενόμενου κόστους ανά μονάδα χρόνου, $C_2(n,T_1,T_2,...,T_n)$.

Για το μοντέλο ΙΙ έγινε μια περαιτέρω ανάλυση, από τους συγγραφείς, όπου καθορίστηκαν κάποιοι συγκεκριμένοι αλλά αποδεκτοί τύποι κατανομής για τις μεταβλητές $h(\cdot), f(\cdot)$ και $g(\cdot)$ ως ακολούθως:

$$h(\tau)=\lambda_0\gamma(\lambda_0\tau)^{\gamma-1}\exp(-(\lambda_0\tau)^{\gamma}), \quad \tau>0,\quad \lambda_0>0,\quad \gamma\geq 1, \qquad (3.80)$$

$$f_X(t)=\lambda\beta(\lambda\beta)^{\beta-1}\exp(-(\lambda t)^{\beta}), \quad t>0,\quad \lambda>0,\quad \beta\geq 1, \qquad (3.81)$$

$$g(l)=\nu\mu(\mu l)^{\nu-1}\exp(-(\mu l)^{\nu}), \quad l>0,\quad \mu>0,\quad \nu\leq 1. \qquad (3.82)$$

Ακόμη, υπέθεσαν πως το κόστος αποκατάστασης είναι μια γραμμική συνάρτηση της καθυστέρησης εντοπισμού του προβλήματος το οποίο υπολογίζεται από την:

$$R(\tau)=k_0+k_1(T_i-T_{i-1}-\tau) \qquad \forall\ i=1,2,...,n \qquad (3.83)$$

όπου $k_0(\geq 0), k_1(>0)$ είναι πραγματικές σταθερές.

Αντικαθιστώντας, τους προηγούμενους τύπους κατανομής των $h(\cdot), f(\cdot), g(\cdot)$ και $R(\cdot)$ στην εξίσωση υπολογισμού του συνολικού αναμενόμενου κόστους ανά κύκλο,

$S_2(n,T_1,T_2,...,T_n)$, λαμβάνεται το συνολικό αναμενόμενο κόστος ανά μονάδα χρόνου στη σταθερή κατάσταση του συστήματος:

$$C_3(n,T_1,T_2,...,T_n)=\frac{S_3(n,T_1,T_2,...,T_n)}{P_3(T_n)} \tag{3.84}$$

όπου

$$\begin{aligned}
&S_3(n,T_1,T_2,...,T_n)= \\
&\quad c_0+n\upsilon+c_r\int_0^{T_n}\times\left\{\int_0^{\infty}\nu(\mu l)^{\nu}\exp(-(\mu l)^{\nu})dl\right\}\times\lambda\beta(\lambda\beta)^{\beta-1}\exp(-(\lambda t)^{\beta})dt \\
&\quad +\mathrm{c_h}\frac{(p-d)p}{2d}\left[\int_0^{T_n}\beta\lambda^{\beta}t^{\beta+1}\exp(-(\lambda t)^{\beta})dt+\int_{T_n}^{\infty}T_n^2\lambda\beta(\lambda t)^{\beta-1}\exp(-(\lambda t)^{\beta})dt\right] \\
&\quad +\sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{n}}\left[\int_{\mathrm{T_i}-T_{i-1}}^{\infty}\left\{\int_0^{T_i-T_{i-1}}\times(k_0+k_1(T_i-T_{i-1}-\tau))\times\lambda_0\gamma(\lambda_0\tau)^{\gamma-1}\exp(-(\lambda_0\tau)^{\gamma})d\tau\right.\right. \\
&\quad \left.\left.+\mathrm{c_m}\int_{\mathrm{T_i}-T_{i-1}}^{\infty}\lambda_0\gamma(\lambda_0\tau)^{\gamma-1}\exp(-(\lambda_0\tau)^{\gamma})d\tau\right\}\times\lambda\beta(\lambda t)^{\beta-1}\exp(-(\lambda t)^{\beta})dt\right] \\
&\quad +\mathrm{c_s}d\int_0^{T_n}\left\{\int_{(p-d)t/d}^{\infty}\left[l-\frac{(p-d)t}{d}\right]\times\mu\nu(\mu l)^{\nu-1}\exp(-(\mu l)^{\nu})dl\right\}\times\lambda\beta(\lambda t)^{\beta-1}\exp(-(\lambda t)^{\beta})dt \\
&\quad +\mathrm{pac_d}\sum_{i=1}^{n}\left[\int_0^{\mathrm{T_i}-T_{i-1}}\times\left\{\int_0^{t}(t-\tau)\lambda_0\gamma(\lambda_0\tau)^{\gamma-1}\exp(-(\lambda_0\tau)^{\gamma}dt\right\}\times\lambda\beta(\lambda t)^{\beta-1}\exp(-(\lambda t)^{\beta})dt\right. \\
&\quad \left.+\int_{\mathrm{T_i}-T_{i-1}}^{\infty}\left\{\int_0^{T_i-T_{i-1}}(T_i-T_{i-1}-\tau)\times\lambda_0\gamma(\lambda_0\tau)^{\gamma-1}\exp(-(\lambda_0\tau)^{\gamma})dt\right\}\times\lambda\beta(\lambda\beta)^{\beta-1}\exp(-(\lambda t)^{\beta})dt\right]
\end{aligned} \tag{3.85}$$

και

$$\begin{aligned}
P_3(T_n)=&\int_0^{T_n}\left\{\int_0^{(p-d)t/d}\frac{pt}{d}\mu\nu(\mu l)^{\nu-1}\exp(-(\mu l)^{\nu})dl+\int_{(p-d)t/d}^{\infty}(t+l)\mu\nu(\mu l)^{\nu-1}\exp(-(\mu l)^{\nu})dl\right\} \\
&\times\lambda\beta(\lambda t)^{\beta-1}\exp(-(\lambda t)^{\beta})dt+\int_{T_n}^{\infty}\frac{pT}{d}\lambda\beta(\lambda t)^{\beta-1}\exp(-(\lambda t)^{\beta})dt
\end{aligned} \tag{3.86}$$

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του μοντέλου οι συγγραφείς παρατήρησαν πως στην περίπτωση ταυτόχρονης επίδρασης μιας διαδικασίας αλλαγής και μιας μηχανικής βλάβης, αυτό έχει σημαντικό αντίκτυπο στις αποφάσεις επιλογής μεγέθους παρτίδας. Επίσης, επισήμαναν πως τα προτεινόμενα μοντέλα επιθεωρήσεων επέφεραν ως αποτέλεσμα χαμηλότερα κόστη, παρά τα μοντέλα χωρίς επιθεωρήσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Χρήση γενετικών αλγορίθμων στον προγραμματισμό παραγωγής και συντήρησης

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αναφορά σε ευρετικές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν γενετικούς αλγορίθμους για την εύρεση του βέλτιστου ενιαίου προγράμματος παραγωγής και συντήρησης. Η λογική που ακολουθείται για τη δημιουργία των μοντέλων είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται για τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, καθώς γίνονται υποθέσεις για την κατάσταση του εξοπλισμού μετά από την διενέργεια οποιαδήποτε μορφής συντήρησης, για τα αναμενόμενα κόστη βλαβών, για τους επιτρεπόμενους χρόνους παραγωγής, κ.τ.λ.

4.1 Χρήση ευρετικού αλγορίθμου για την επίλυση ενός ενιαίου μοντέλου προγραμματισμού παραγωγής και συντήρησης για μια μηχανή

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται ένα ενιαίο μοντέλο προγραμματισμού παραγωγής και συντήρησης το οποίο ανέπτυξαν οι Sortrakul et al.(2004). Οι συγγραφείς βασίστηκαν σε ένα σύστημα μιας μηχανής, το οποίο εισηγήθηκε από τους Cassady και Kutanoglu (2005). Επίσης, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας των ευρετικών γενετικών αλγορίθμων, οι οποίοι αποτελούν και τη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος προγραμματισμού.

4.1.1 Περιγραφή του μοντέλου

Όπως προαναφέρθηκε, για τη δημιουργία του μοντέλου λήφθηκαν υπόψη οι διαδικασίες παραγωγής και συντήρησης. Συγκεκριμένα, όσων αφορά την παραγωγή εξετάστηκε το πρόβλημα προγραμματισμού ενός ντετερμινιστικού συστήματος μιας μηχανής όπου οι διάφορες εργασίες έχουν κάποια βαρύτητα και αντικειμενικός σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης τους. Για την περίπτωση αυτή, γίνεται η υπόθεση πως κάθε εργασία είναι έτοιμη στο ξεκίνημα της περιόδου παραγωγής και δεν επιτρέπεται η προτίμηση μιας εργασίας έναντι μιας άλλης. Η βέλτιστη λύση για το πρόβλημα αυτό μπορεί να βρεθεί

χρησιμοποιώντας τον κανόνα ελαχίστου χρόνου διαδικασίας υπό κάποια βαρύτητα (WSPT-Weighted Shortest Process Time).

Όσων αφορά τη συντήρηση, γίνεται η υπόθεση πως ο χρόνος για να εμφανιστεί βλάβη στη μηχανή ελέγχεται από μια κατανομή πιθανότητας Weibull, η οποία έχει ως παράμετρο διαβάθμισης την n και παράμετρο μορφής την β η οποία είναι μεγαλύτερη από μονάδα. Όταν παρουσιαστεί βλάβη στη μηχανή διενεργείται ελάχιστη επισκευή για την επαναφορά της σε λειτουργική κατάσταση, χωρίς να μεταβάλλεται η αποτελεσματική διάρκεια ζωής της. Καθώς το $\beta > 1$, ο ρυθμός εμφάνισης βλαβών αυξάνεται με τον χρόνο και γι'αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η προληπτική συντήρηση για να μειωθεί ο αυξανόμενος κίνδυνος βλάβης της μηχανής, επαναφέροντας την μηχανή σχεδόν στην αρχική λειτουργική της κατάσταση. Έχοντας αυτό ως δεδομένο η απόδοση της μηχανής μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία ανανέωσης, όπου τα σημεία ανανέωσης αντιστοιχούν στην ολοκλήρωση μιας δραστηριότητας προληπτικής συντήρησης. Ακόμη, λόγω του ότι η συντήρηση που εφαρμόζεται στο σύστημα είναι η ελάχιστη μπορούν να προκύψουν βλάβες κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου της διαδικασίας ανανέωσης, σύμφωνα με μια μη ομοιογενή διαδικασία Poisson (NHPP) η οποία έχει συνάρτηση $z(t)$ και αντιστοιχεί στη συνάρτηση κινδύνου για μια καινούργια μηχανή. Ως αποτέλεσμα των πιο πάνω υποθέσεων ο αναμενόμενος αριθμός βλαβών που μπορεί να συμβούν κατά την διάρκεια ενός μόνο κύκλου της διαδικασίας ανανέωσης δίνεται από τη σχέση:

$$m(t) = \int_0^{\tau} z(t)dt = \int_0^{\tau} \frac{\beta}{\eta^{\beta}} t^{\beta-1} dt = \left(\frac{\tau}{\eta}\right)^{\beta} \tag{3.87}$$

Επομένως, ένας μέσος κύκλος της διαδικασίας ανανέωσης περιλαμβάνει τ χρονικές μονάδες της λειτουργίας, $m(\tau)$ επισκευές της μηχανής με χρονική διάρκεια t και μια μοναδική δράση προληπτικής συντήρησης χρονικής διάρκειας t_p. Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά η διαθεσιμότητα της μηχανής σε σταθερή κατάσταση είναι:

$$A(\tau) = \frac{\tau}{\tau + m(\tau)t_r + t_p} \tag{3.88}$$

Έχοντας, λοιπόν, τα παραπάνω ανεξάρτητα μοντέλα παραγωγής και συντήρησης οι συγγραφείς κατέληξαν σε ένα ενιαίο μοντέλο, όπου η μηχανή ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις της παραγωγής που καθορίστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Επιπρόσθετα, οι εργασίες παραγωγής δεν μπορούν να ματαιωθούν για να εφαρμοστεί προληπτική συντήρηση και όταν διακοπεί μια εργασία λόγω μηχανικής βλάβης μπορεί να ξαναρχίσει μετά την επισκευή της μηχανής χωρίς επιπρόσθετη επιβάρυνση χρόνου.

Για το πρόβλημα αυτό εξετάζονται ταυτόχρονα δυο σημαντικά θέματα. Πρώτον, είναι η ανεύρεση της καλύτερης συχνότητας των εργασιών n από ένα σύνολο $n!$ πιθανών συχνοτήτων. Δεύτερον, είναι η λήψη της απόφασης κατά πόσο πρέπει να γίνει οποιαδήποτε προληπτική συντήρηση πριν την έναρξη κάθε εργασίας που εμπίπτει σε μια συγκεκριμένη συχνότητα εργασιών. Για το λόγο αυτό υπάρχουν 2^n πιθανά σύνολα αποφάσεων προληπτικής συντήρησης για κάθε συχνότητα εργασιών και το ενιαίο μοντέλο προγραμματισμού έχει ένα σύνολο $(n!)2^n$ εφικτές λύσεις.

Επίσης, για το ενιαίο πρόβλημα, οι χρόνοι ολοκλήρωσης των εργασιών θεωρούνται πως είναι στοχαστικοί και αυτό επειδή η μηχανή μπορεί να υποστεί βλάβη αλλά ίσως και όχι, κατά την διάρκεια εκτέλεσης κάθε εργασίας. Κατά συνέπεια η απόφαση για υλοποίηση προληπτικής συντήρησης μπορεί να επηρεάσει τη στοχαστική διαδικασία η οποία ελέγχει τη συχνότητα εμφάνισης βλαβών στη μηχανή.

Στο μοντέλο χρησιμοποιούνται διάφορες μεταβλητές για την περιγραφή των διαφόρων χρόνων της διαδικασίας. Ο χρόνος επεξεργασίας της *i*-οστής εργασίας σε μια συχνότητα εργασιών δηλώνεται από τον όρο $p_{[i]}$, η μεταβλητή $\overline{a}_{[i-1]}$ δηλώνει την χρονική διάρκεια ζωής της μηχανής αμέσως πριν την επεξεργασία της *i*-οστής εργασίας και η χρονική διάρκεια ζωής της μηχανής αμέσως μετά την ολοκλήρωση της *i*-οστής εργασίας δηλώνεται από την $\overline{a}_{[i]}$.

Για την δήλωση της εφαρμογής ή μη εφαρμογής προληπτικής συντήρησης χρησιμοποιείται η μεταβλητή $y_{[i]}$, όπου

$$y_{[i]} = \begin{cases} 1 & \text{εάν έγινε προληπτική συντήρηση πριν την i-οστή εργασία} \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}, \quad i = 1, 2, ..., n.$$

Καθώς η προληπτική συντήρηση που εφαρμόζεται είναι η ελάχιστη δυνατή και η μηχανή επαναφέρεται στην αρχική της, σχεδόν, λειτουργική κατάσταση ισχύουν τα ακόλουθα:

$$\overline{a}_{[i-1]} = a_{[i-1]}(1 - y_{[i]}) \qquad \text{i=1,2,...,n} \quad \text{και}$$

$$a_{[i]} = \overline{a}_{[i-1]} + p_{[i]} \qquad \text{i=1,2,...,n}$$

όπου $a_{[0]}$ είναι η διάρκεια ζωής της μηχανής πριν την λήψη οποιασδήποτε απόφασης.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω μεταβλητές και το γεγονός ότι οι βλάβες στη μηχανή συμβαίνουν σύμφωνα με μια μη ομοιογενή διαδικασία Poisson (NHPP), προκύπτει η συνάρτηση

υπολογισμού της αναμενόμενης τιμής του χρόνου ολοκλήρωσης της *i*-οστής εργασίας, η οποία είναι η εξής:

$$E(C_{[i]}) = \sum_{k=1}^{i} \left\{ t_p y_{[k]} + p_{[k]} + t_r \left[m(a_{[k]}) - m(\bar{a}_{[k-1]}) \right] \right\} \qquad \text{i=1,2,...,n} \qquad (3.89)$$

Για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης του ενιαίου προβλήματος, η οποία αναφέρεται στον συνολικό αναμενόμενο χρόνο ολοκλήρωσης των εργασιών με κάποια βαρύτητα, χρησιμοποιείται η ακόλουθη συνάρτηση:

$$\sum_{i=1}^{n} w_{[i]} E(C_{[i]}) \qquad (3.90)$$

όπου $w_{[i]}$ είναι το βάρος της i-οστής εργασίας στη συχνότητα εργασιών.

4.1.2 Γενική περιγραφή των γενετικών αλγορίθμων

Η χρήση των διαδικασιών γενετικών αλγορίθμων στην επίλυση τέτοιων προβλημάτων βελτιστοποίησης προγραμματισμού ξεκίνησε την τελευταία δεκαετία, καθώς προηγουμένως εφαρμοζόταν σε άλλα ερευνητικά θέματα, όπως για παράδειγμα την τεχνητή νοημοσύνη. Σήμερα αποτελούν μια από τις πιο γνωστές ευρετικές μεθόδους και χρησιμοποιείται για την επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβανομένου και τον προγραμματισμό μηχανών.

Γενικά, οι γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν "συγκρατώντας" ένα πληθυσμό με σταθερό αριθμό υποψήφιων λύσεων, οι οποίες ονομάζονται «χρωμοσώματα», και αναπαριστώνται από μια συχνότητα αριθμών. Κάθε στοιχείο (ή «γονίδιο») ενός χρωμοσώματος χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό της λύσης. Ο πληθυσμός για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ονομάζεται «γενιά» και σε κάθε γενιά υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος για το κάθε χρωμόσωμα. Στη συνέχεια, βασιζόμενοι σε μια προκαθορισμένη αναπαραγωγική στρατηγική επιλέγονται συγκεκριμένα χρωμοσώματα ως «γονιοί», τα οποία χωρίζονται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία «διασταύρωσης» για την δημιουργία ενός νέου συνόλου χρωμοσωμάτων, τα οποία αναφέρονται ως «απόγονοι». Ακολούθως, οι επιλεγμένοι απόγονοι επιδέχονται μια ακόμη διαδικασία αναπαραγωγής, την «μετάλλαξη», βάση ενός προκαθορισμένου πλάνου μετάλλαξης. Τέλος, δημιουργείται μια νέα γενιά από τον συνδυασμό των καλύτερων χρωμοσωμάτων «γονιών» και «απογόνων». Η

διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου φτάσουμε σε μια προκαθορισμένη συνθήκη όπου σταματά η αναπαραγωγή χρωμοσωμάτων.

4.1.2.1 Γενετικοί αλγόριθμοι για το ενιαίο πρόβλημα προγραμματισμού

Για την επίλυση του ενιαίου προβλήματος οι Sortrakul et al.(2004), ανέπτυξαν τρεις ευρετικούς γενετικούς αλγόριθμους. Ο πρώτος γενετικός αλγόριθμος (GA1) είναι παρόμοιος με αυτόν που παρουσίασαν οι Cassady και Kutanoglu (2005), ο οποίος χρησιμοποιεί τη συχνότητα εργασιών ελαχίστου χρόνου επεξεργασίας υπό κάποια βαρύτητα για τον καθορισμό μόνο αποφάσεων που σχετίζονται με την προληπτική συντήρηση. Ο δεύτερος ευρετικός αλγόριθμος (GA2) εφαρμόζει την διαδικασία των γενετικών αλγορίθμων για τον ταυτόχρονο προγραμματισμό των εργασιών παραγωγής και των λειτουργιών προληπτικής συντήρησης. Ο τρίτος ευρετικός αλγόριθμος (GA3) προέκυψε από την τροποποίηση του δεύτερου γενετικού αλγόριθμου (GA2). Στην περίπτωση αυτή εκτελείται ο γενετικός αλγόριθμος για τον προγραμματισμό των εργασιών κάθε φορά που έχει αξιολογηθεί ένας σταθερός αριθμός «γενιών» του γενετικού αλγόριθμου για τον προγραμματισμό της προληπτικής συντήρησης. Το πλεονέκτημα του GA3, είναι ότι έχει περισσότερες πιθανότητες να καταλήξει σε καλύτερες αποφάσεις αναφορικά με την προληπτική συντήρηση για τα χρωμοσώματα των εξεταζόμενων συχνοτήτων εργασιών, από τον GA2, προτού προχωρήσει στην επόμενη γενιά.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων που εφαρμόστηκαν για τις παραπάνω ευρετικές μεθόδους.

4.1.2.2 Χαρακτηριστικά γενετικών αλγορίθμων

Για την απεικόνιση ενός χρωμοσώματος χρησιμοποιείται μια συχνότητα αριθμών, οι οποίοι αριθμοί αντιπροσωπεύουν τις διάφορες διαδικασίες. Για παράδειγμα, για την απεικόνιση της λύσης ενός ενιαίου προβλήματος προγραμματισμού τριών εργασιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί το χρωμόσωμα $\{\underline{1}\ 3\ \underline{0}\ 2\ \underline{1}\ 1\}$. Στην περίπτωση αυτή η εργασία 3 εκτελείται πρώτη, μετά η εργασία 2 και ακολούθως η εργασία 1. Οι δυαδικοί αριθμοί (0 και 1) που είναι υπογραμμισμένοι στο χρωμόσωμα υποδηλώνουν εάν γίνεται ή όχι προληπτική συντήρηση πριν από κάθε εργασία. Για το συγκεκριμένο χρωμόσωμα έχει προγραμματιστεί να γίνει συντήρηση πριν την έναρξη της εργασίας 3 και της εργασίας 1. Είναι εμφανές, όμως, πως από την μορφή του χρωμοσώματος δεν είναι ξεκάθαρες οι διαδικασίες της «διασταύρωσης» και της

«μετάλλαξης». Γι'αυτό το λόγο για το συγκεκριμένο μοντέλο δημιουργήθηκαν δυο χρωμοσώματα, ένα για τη συχνότητα εργασιών και ένα για τις αποφάσεις της προληπτικής συντήρησης. Έτσι, το χρωμόσωμα του προηγούμενου παραδείγματος αντικαθιστάται από το χρωμόσωμα συχνότητας εργασιών $\{3\ 2\ 1\}$ και το χρωμόσωμα προληπτικής συντήρησης $\{1\ 0\ 1\}$.

Η στρατηγική αναπαραγωγής που ακολουθείται στο μοντέλο βασίζεται στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αντιστοιχεί σε κάθε χρωμόσωμα Όσο καλύτερη είναι η τιμή αυτή τόσο υψηλότερη είναι η κατάταξη του σε σχέση με τα άλλα χρωμοσώματα και άρα αυξάνεται η πιθανότητα να επιλεγεί έναντι κάποιων χρωμοσωμάτων με χαμηλότερη κατάταξη. Επίσης, για την δημιουργία των επόμενων γενιών εφαρμόζεται η στρατηγική «ελιτισμού», δηλαδή κάθε νέα γενιά αποτελείται από την καλύτερη λύση (χρωμόσωμα) της παρούσας γενιάς και τον πληθυσμό που επιλέχθηκε από τους «απογόνους».

Η διαδικασία «διασταύρωσης» γίνεται μόνο για ένα σημείο του χρωμοσώματος και η σειρά του συνόλου των αριθμών μετά την μετάλλαξη εφαρμόζεται και στο χρωμόσωμα των αποφάσεων προληπτικής συντήρησης με την αντίστοιχη δυαδική κωδικοποίηση. Η πιθανότητα μετάλλαξης P_c για το πρόβλημα καθορίστηκε στην τιμή 1.

Για το χρωμόσωμα της προληπτικής συντήρησης χρησιμοποιείται η «μετάλλαξη» ενός σημείου, όπου η τιμή του «γονιδίου» στο τυχαίο επιλεγόμενο σημείο μετάλλαξης αλλάζει από 0 σε 1 και αντίστροφα. Για το χρωμόσωμα της συχνότητας εργασιών εφαρμόζεται μια μετάλλαξη μετακίνησης, στην οποία ένα τυχαίο γονίδιο μετακινείται στα δεξιά για ένα τυχαίο αριθμό θέσεων. Σε περίπτωση που οι θέσεις μετακίνησης είναι πέρα από την τελευταία εργασία στη συχνότητα, τότε η αρίθμηση συνεχίζει από την πρώτη εργασία και συνεχίζει στην επόμενη εργασία στη συχνότητα. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τον Reeves (1995), οι γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν καλύτερα εάν η πιθανότητα για την εφαρμογή μετάλλαξης αλλάζει καθώς αυξάνεται ο αριθμός των επαναλήψεων. Για το λόγο αυτό οι συγγραφείς του μοντέλου ερεύνησαν τη σταθερή πιθανότητα μετάλλαξης αλλά και την προσαρμοστική πιθανότητα μετάλλαξης. Στην δεύτερη περίπτωση η πιθανότητα μετάλλαξης (P_m) της επόμενης γενιάς μειώνεται από τον ρυθμό μείωσης μετάλλαξης (R_m). Ωστόσο, η P_m επαναφέρεται στην αρχική της τιμή εάν το ποσοστό $\nu_{\min} / \nu_{\max}$ είναι υψηλότερο από το όριο διαφοράς (D), όπου ν είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης κάθε χρωμοσώματος σε μια συγκεκριμένη γενιά.

Το μέγεθος του πληθυσμού ενός γενετικού αλγόριθμου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να καλύπτει επαρκώς το διάστημα όλων των λύσεων, χωρίς όμως να προκαλεί επιπλέον υπολογιστική επιβάρυνση.

Το τελευταίο χαρακτηριστικό των γενετικών αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του ενιαίου μοντέλου προγραμματισμού αναφέρεται στον αρχικό πληθυσμό. Αν και συνήθως οι ευρετικοί γενετικοί αλγόριθμοι επιλέγουν τυχαία των αρχικό πληθυσμό, οι συγγραφείς του μοντέλου επέλεξαν δυο μεθόδους για την επιλογή αυτή, οι οποίες είναι: (α) τυχαία επιλογή του αρχικού πληθυσμού και (β) ένας καλός αρχικός πληθυσμός ο οποίος προκύπτει από τον κανόνα ελαχίστου χρόνου διαδικασίας υπό κάποια βαρύτητα (WSPT-Weighted Shortest Process Time).

Για τη σύγκριση της απόδοσης των διαφορετικών ευρετικών αλγορίθμων, οι συγγραφείς εξέτασαν προβλήματα διαφορετικών μεγεθών (μικρό, μέτριο, μεγάλο). Βάση των αποτελεσμάτων, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως οι γενετικοί αλγόριθμοι, τους οποίους πρότειναν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την επίλυση τέτοιων ενιαίων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στόχος τους είναι η ανάπτυξη παρόμοιων ευρετικών γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση προεκτάσεων του συγκεκριμένου προβλήματος, όπως για παράδειγμα χρονικών αντικειμενικών συναρτήσεων και συστημάτων πολλαπλών μηχανών.

4.2 Επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού κατασκευαστικών συστημάτων που υποβάλλονται σε συντήρηση

Το μοντέλο που παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους αναπτύχθηκε από τους Felix et al.(2006). Οι συγγραφείς προτείνουν κάποιους γενετικούς αλγόριθμους με “κυρίαρχα” γονίδια (GADG-Genetic Algorithms with Dominant Genes) για την αντιμετώπιση των προβλημάτων κατανομής προγραμματισμού (DS-Distributed Scheduling) που υπόκεινται σε περιορισμούς συντήρησης της μηχανής. Η βασική λειτουργία των “κυρίαρχων” γονιδίων είναι η αναγνώριση και η καταγραφή των καλύτερων γονιδίων και την αντίστοιχη δομή του χρωμοσώματος, όπου η δομή είναι κατάλληλα κτισμένη ώστε να μεταχειρίζεται τους περιορισμούς συντήρησης της μηχανής.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι περιορισμοί, αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος, ο προτεινόμενος γενετικός αλγόριθμος και ο μηχανισμός «διασταύρωσης» που χρησιμοποιείται.

4.2.1 Περιγραφή του μοντέλου

Στο πρόβλημα κατανομής προγραμματισμού όταν λαμβάνεται ένας αριθμός εργασιών (N), πρέπει να καθορίζεται πως πρέπει να ανατεθούν στο κατάλληλο εργοστάσιο παραγωγής $F(=1,2,...,l)$ και να δημιουργείται το αντίστοιχο αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής για το κάθε ένα. Κάθε εργοστάσιο διαθέτει H_l αριθμό μηχανών και μπορεί να παράγει όλους τους τύπους προϊόντων με διαφορετική, όμως, απόδοση. Αντίστοιχα, κάθε εργασία έχει μέχρι N_i αριθμό λειτουργιών και κάθε μια λειτουργία μπορεί να εκτελεστεί σε περισσότερες από μια κατάλληλες μηχανές (όχι όμως σε όλες) με διαφορετικό χρόνο επεξεργασίας.

Γίνεται η υπόθεση πως κάθε μηχανή υπόκειται σε ένα υποθετικό σχέδιο συντήρησης, έχοντας μία μέγιστη διάρκεια ζωής M η οποία ισοδυναμεί με το συνολικό χρόνο επεξεργασίας των διαφόρων λειτουργιών. Βάση αυτής της υπόθεσης, εάν η διάρκεια ζωής της μηχανής φτάσει στο σημείο M τότε πρέπει να γίνει συντήρηση αμέσως μετά την ολοκλήρωση της λειτουργίας που βρίσκεται σε εξέλιξη. Όπως ισχύει και σε πολλά μοντέλα, τα οποία αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, μετά από εκτέλεση συντήρησης σε κάποια μηχανή αυτή θεωρείται πως επαναφέρεται σχεδόν στην αρχική της λειτουργική κατάσταση και πως η διάρκεια ζωής επανατίθεται στο μηδέν.

Οι μεταβλητές που υιοθετήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου είναι οι εξής:

χ_{il} δυαδικός ακέραιος αριθμός, που ορίζεται ως

$$\begin{cases} 1 \text{ εάν η εργασία i ανατεθεί στο εργοστάσιο } l, \\ \text{αλλιώς είναι } 0 \end{cases}$$

δ_{ijkhl} δυαδικός ακέραιος αριθμός, που ορίζεται ως

$$\begin{cases} 1 \text{ εάν η λειτουργία } j \text{ της εργασίας } i \text{ καταλαμβάνει τον κενό χρόνο } k \text{ στη μηχανή } h \text{ στο εργοστάσιο } l \\ 0 \quad \text{αλλιώς} \end{cases}$$

γ_{ijhl} δυαδικός ακέραιος αριθμός, που ορίζεται ως

$$\begin{cases} 1 \text{ εάν η μηχανή } h \text{ στο εργοστάσιο } l \text{ πρόκειται να συντηρηθεί μετά την λειτουργία } j \text{ της εργασίας } i \\ 0 \quad \text{αλλιώς} \end{cases}$$

F αριθμός εργοστασίου

N αριθμός εργασιών

N_i αριθμός λειτουργιών της εργασίας i

H_l αριθμός μηχανών στο εργοστάσιο l

D_{li} χρόνος διαδρομής μεταξύ του εργοστασίου l και της εργασίας i

K χρόνος ορίζοντας υπό εξέταση

T_{ijhl} χρόνος επεξεργασίας λειτουργίας j της εργασίας i στη μηχανή h στο εργοστάσιο l

A_{hl} διάρκεια ζωής της μηχανής h στο εργοστάσιο l

M μέγιστη διάρκεια ζωής μηχανής

S_{ij} χρόνος έναρξης της λειτουργίας j της εργασίας i

E_{ij} χρόνος περάτωσης της λειτουργίας j της εργασίας i

C_i χρόνος ολοκλήρωσης της εργασίας i

Για την επίλυση του μοντέλου γίνεται η υπόθεση πως οι τιμές των F, N, N_i, H_l, T_{ijhl} είναι γνωστές και πως βάση αυτών μπορούν να υπολογιστούν οι μεταβλητές απόφασης $\chi_{il}, \delta_{ijkhl}$ και γ_{ijhl}. Συνεπώς, έχοντας τις τιμές των μεταβλητών απόφασης μπορούν να υπολογιστούν οι χρόνοι επεξεργασίας S_{ij} και E_{ij}, καθώς και ολοκλήρωσης εργασιών C_i, οι οποίοι συνθέτουν την συνάρτηση προς βελτιστοποίηση Z, όπου:

$$\mathrm{Z} : \min(\max\{C_i\}) \tag{3.91}$$

Ο χρόνος ολοκλήρωσης (C_i) της εργασίας i ισοδυναμεί με το άθροισμα του χρόνου ολοκλήρωσης της τελευταίας λειτουργίας (N_i) της εργασίας i και του χρόνου διαδρομής μεταξύ του εργοστασίου l και της εργασίας i, η οποία ορίζεται ως:

$$C_i = E_{iN_i} + \sum_l D_{li}\chi_{il} \tag{3.92}$$

Το πρόβλημα υπόκειται, όπως και κάθε πρόβλημα προς βελτιστοποίηση, σε κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια.

Ο περιορισμός προτεραιότητας ορίζει ότι κάθε λειτουργία μπορεί να ξεκινήσει μόνο μετά την ολοκλήρωση της προηγούμενης της λειτουργίας, και δηλώνεται από τη σχέση:

$$S_{ij} \geq E_{i(j-1)} \qquad (i = 1,2,...,N; j = 1,2,...,N_i) \qquad (3.93)$$

Ο περιορισμός επεξεργασίας ορίζει πως από τη στιγμή που ξεκινήσει μια λειτουργία ολοκληρώνεται χωρίς διακοπή:

$$E_{i(j-1)} - S_{ij} = \sum_{\mathrm{hl}} \chi_{\mathrm{il}} T_{ijhl} \qquad (i = 1,2,...,N; j = 1,2,...,N_i) \qquad (3.94)$$

Για τις διάφορες λειτουργίες ισχύει ο περιορισμός πως κάθε μία λειτουργία επιβάλλεται να εκτελεστεί σε μια μηχανή καθ'όλη τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα:

$$\sum_{khl} \delta_{ijkhl} \geq 1 \qquad (i = 1,2,...,N; j = 1,2,...,N_i) \qquad (3.95)$$

Ο περιορισμός που αναφέρεται στις λειτουργίες επεξεργασίας δίνεται στη συνέχεια, ο οποίος επιβάλλει σε κάθε λειτουργία να εκτελεστεί μόνο σε μια μηχανή σε κάθε χρονική μονάδα:

$$\sum_{hl} \delta_{ijkhl} \leq 1 \qquad (i = 1,2,...,N; j = 1,2,...,N_i; k = 1,2,...,K) \qquad (3.96)$$

Ο περιορισμός για τη χωρητικότητα των μηχανών ορίζει πως κάθε μηχανή θα εκτελεί μόνο μια λειτουργία κάθε χρονική μονάδα και είναι ο εξής:

$$\sum_{ijl} \delta_{ijkhl} \leq 1 \qquad (k = 1,2,...,K; h = 1,2,...,H_l) \qquad (3.97)$$

Ο τελευταίος περιορισμός αναφέρεται στην κατανομή των εργασιών στα διάφορα εργοστάσια και ορίζει πως όλες οι λειτουργίες μιας εργασίας πρέπει να ολοκληρώνονται στο ίδιο εργοστάσιο από όπου ξεκίνησε η πρώτη εργασία:

$$\sum_{l} \chi_{il} = 1 \qquad (i = 1,2,...,N) \qquad (3.98)$$

4.2.2 Παρουσίαση του γενετικού αλγορίθμου

Ο γενετικός αλγόριθμος των Felix et al.(2006), αναπτύχθηκε σε τρία επίπεδα. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η κωδικοποίηση του χρωμοσώματος των Jia et al.(2002), για να δημιουργηθεί ένα πιο εξελιγμένο χρωμόσωμα το οποίο αναφερόταν σε ένα απλό γενετικό αλγόριθμο. Σε

δεύτερο στάδιο, προστέθηκε στο υπάρχον χρωμόσωμα ακόμη μια παράμετρος συμπεριλαμβάνοντας στο πρόβλημα και το αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής. Η παράμετρος αυτή αναφερόταν στην ύπαρξη κάποιων «κυριάρχων» γονιδίων στις υποψήφιες λύσεις. Τέλος, λήφθηκε υπόψη ο παράγοντας συντήρηση, ο οποίος δηλώνεται με την παράμετρο *S*.

4.2.2.1 Απλός γενετικός αλγόριθμος

Αρχικά παρουσιάζεται το απλό μοντέλο του γενετικού αλγορίθμου. Όπως και στο μοντέλο των Sortrakul et al.(2004) έτσι και σ'αυτό για την απεικόνιση του χρωμοσώματος χρησιμοποιείται μια συχνότητα αριθμών. Κάθε χρωμόσωμα αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση της κατανομής των εργασιών σε ένα εργοστάσιο και το πρόγραμμα παραγωγής κάθε εργοστασίου. Αποτελείται από $\sum_i N_i$ αριθμό γονιδίων και στη συγκεκριμένη περίπτωση κάθε χρωμόσωμα απαρτίζεται από τέσσερις παραμέτρους που αντιπροσωπεύουν το εργοστάσιο, τη μηχανή, την εργασία και τη λειτουργία (FMJO – Factory Machine Job Operation).

Για παράδειγμα, η πιο κάτω ακολουθία αριθμών ή χρωμόσωμα (Σχήμα 4.1), αντιπροσωπεύει τη λύση για ένα πρόβλημα με τρεις εργασίες, η κάθε μια με τρεις λειτουργίες, που εκτελούνται σε δυο εργοστάσια, όπου κάθε εργοστάσιο έχει τρεις μηχανές, και καθορίζει επίσης το πρόγραμμα παραγωγής που πρέπει να ακολουθηθεί σε κάθε εργοστάσιο:

$$1233-1212-1111-2221-1113-2123-2322-1131-1332$$

Σχήμα 4.11: Παράδειγμα κωδικοποίησης χρωμοσώματος [Felix et al.(2006)]

Συγκεκριμένα, για το πιο πάνω παράδειγμα ισχύει ότι: το πρώτο «γονίδιο» (1233) απεικονίζει πως η λειτουργία 3 (*O3*) της εργασίας 3 (*J3*) ανατίθεται στην μηχανή 2 (*M2*) στο εργοστάσιο 1 (*F1*). Η προτεραιότητα εκτέλεσης των εργασιών στις μηχανές ταξινομείται σε σειρά, δηλαδή η εργασία με την μεγαλύτερη προτεραιότητα βρίσκεται στα αριστερά και αυτή με την χαμηλότερη στα δεξιά. Συνεπώς, για το παράδειγμα ισχύει πως: η λειτουργία 3 (*O3*) της εργασίας 3 (*J3*) – (1233) – θα προγραμματιστεί πριν την λειτουργία 2 (*O2*) της εργασίας 1 (*J1*) – (1212) – στη μηχανή 2 (*M2*) στο εργοστάσιο 1 (*F1*). Το πλεονέκτημα της κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται είναι ότι μπορεί να τροποποιηθεί και έτσι επιτρέπει τη μοντελοποίηση εναλλακτικών προβλημάτων δρομολόγησης εργασιών. Δηλαδή, κάθε εργασία μπορεί να εκτελεστεί σε οποιοδήποτε εργοστάσιο, άρα προκύπτουν εναλλακτικές λύσεις για το πρόβλημα κατανομής των εργασιών. Παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης αποτελεί η εκτέλεση της λειτουργίας

3 (*O3*) της εργασίας 3 (*J3*) στη μηχανή 3 (*M3*) η οποία απεικονίζεται ως (1333) στο νέο χρωμόσωμα που προκύπτει (Σχήμα 4.2).

$$1\underline{3}33-1212-1111-2221-1113-2123-2322-1131-1332$$

Σχήμα 4.12: Παράδειγμα κωδικοποίησης εναλλακτικής δρομολόγησης εργασίας [Felix et al.(2006)]

Για την αναπαραγωγή των γονιδίων χρησιμοποιούνται οι διαδικασίες «διασταύρωσης» και «μετάλλαξης». Κατά τη διάρκεια της διασταύρωσης επιλέγεται τυχαία ένα ζεύγος χρωμοσωμάτων χρησιμοποιώντας τη προσέγγιση επιλογής του «τροχού της ρουλέτας» και επίσης επιλέγεται, τυχαία, ένας αριθμός γονιδίων σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο ρυθμό διενέργειας μετάλλαξης. Υπάρχει όμως η πιθανότητα να προκύψουν χρωμοσώματα που δεν μπορούν να υφίστανται στην πραγματικότητα, όπως για παράδειγμα υπεράριθμες λειτουργίες και εργοστάσιο μη συνεπές στις υποχρεώσεις. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων τα επιλεγμένα γονίδια και τα σχετικά τους γονίδια (στον ίδιο αριθμό εργασίας) κληρονομούνται στους απογόνους τους. Παράδειγμα τέτοιου είδους διασταύρωσης δίνεται στο Σχήμα 4.3.

$$\Gamma ονιός\_1: 1233-1212-1111-2221-1113-2123-2322-1131-1332$$
$$\Gamma ονιός\_2: 2223-2111-2213-2321-2122-2312-1131-1332-1233$$

$B ήμα\ 1:$

1 $\quad A πόγονος\_1: 2233-0000-0000-2321-2122-0000-0000-1131-0000$

2 $\quad A πόγονος\_1: 2233-1233-1212-2321-2122-1111-1113-1131-1332$

$B ήμα\ 2:$

1 $\quad A πόγονος\_2: 1233-0000-0000-0000-0000-0000-0000-1131-1332$

2 $\quad A πόγονος\_2: 1233-2223-2111-2213-2321-2122-2312-1131-1332$

Σχήμα 4.13: Παράδειγμα διασταύρωσης ενός απλού γενετικού αλγόριθμου [Felix et al.(2006)]

Όσον αφορά τη μετάλλαξη, χρησιμοποιούνται δυο τύποι. Σύμφωνα με τον πρώτο τύπο μετάλλαξης ένα ζεύγος γονιδίων επιλέγεται τυχαία και στη συνέχεια γίνεται αλλαγή μεταξύ δυο γονιδίων εντός του ιδίου χρωμοσώματος. Σκοπός αυτού του τύπου μετάλλαξης είναι η δημιουργία νέου προγράμματος για την προτεραιότητα των λειτουργιών των εργασιών. Παράδειγμα του πρώτου τύπου μετάλλαξης φαίνεται στο Σχήμα 4.4.

$$\Gamma ονιός\_1: 1233 - 1212 - 1111 - 2221 - 1113 - 2123 - 2322 - 1131 - 1332$$

$$\square \quad \square$$

$$Απόγονος\_1: 1212 - 1233 - 1111 - 2221 - 1113 - 2123 - 2322 - 1131 - 1332$$

Σχήμα 4.14: Παράδειγμα διαδικασίας μετάλλαξης τύπου 1 [Felix et al.(2006)]

Στο δεύτερο τύπο μετάλλαξης επιλέγονται τυχαία γονίδια και η μετάλλαξη εκτελείται μόνο σε μια παράμετρο, όπως για παράδειγμα αλλαγή του εργοστασίου ή της μηχανής στα οποία εκτελείται η λειτουργία μιας εργασίας. Ο αριθμός των μεταλλαγμένων γονιδίων καθορίζεται από ένα προεπιλεγμένο ρυθμό μεταλλάξεων και σκοπός είναι η αύξηση της ποικιλίας των χρωμοσωμάτων. Παράδειγμα μετάλλαξης τύπου 2 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.

$$\Gamma ονιός\_1: 1233 - \underline{1}212 - 1111 - 2221 - 1113 - 2123 - 2322 - 1131 - 1332$$

$$\Downarrow$$

$$Απόγονος\_1: 1212 - \underline{2}233 - 1111 - 2221 - 1113 - 2123 - 2322 - 1131 - 1332$$

Σχήμα 4.15: Παράδειγμα διαδικασίας μετάλλαξης τύπου 2 [Felix et al.(2006)]

Μια ακόμη σημαντική διαδικασία των γενετικών αλγορίθμων, που εξετάστηκε, είναι η επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής ελιτισμού, δηλαδή η επιλογή των καλύτερων λύσεων που προκύπτουν. Για την απόκτηση όλων των βέλτιστων λύσεων χωρίς την περίπτωση απώλειας μερικών κατά την εξέλιξη του «πληθυσμού», τα καλύτερα χρωμοσώματα αναγνωρίζονται και αποθηκεύονται.

Επιπρόσθετα, για την αποφυγή του ενδεχομένου ο αλγόριθμος να εγκλωβιστεί και να ψάχνει για λύσεις σε ένα τοπικό βέλτιστο, σε κάθε εξέλιξη ελέγχεται η ομοιότητα των χρωμοσωμάτων. Στην περίπτωση που η ομοιότητα είναι μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο κατώφλι, επιλέγεται ένας αριθμός χρωμοσωμάτων και αυτά αντικαθιστώνται από νέα. Ο έλεγχος του ποσοστού ομοιότητας καθορίζεται από τη σχέση:

Ομοιότητα = Πανομοιότυπα / Συγκρίσεις,

όπου ο όρος «Πανομοιότυπα» ορίζει τον αριθμό των όμοιων ζευγών χρωμοσωμάτων και ο όρος «Συγκρίσεις» τον συνολικό αριθμό συγκρίσεων που συντελέστηκαν.

4.2.2.2 Προσθήκη κυρίαρχων γονιδίων στον απλό γενετικό αλγόριθμο

Όπως αναφέρθηκε και στη παράγραφο 4.2.2, στο χρωμόσωμα προστέθηκε ακόμη μια παράμετρος (*D*) η οποία αναφέρετε στο αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής. Άρα, κάθε χρωμόσωμα αποτελείται τώρα από πέντε παραμέτρους οι οποίες αντιπροσωπεύουν: το εργοστάσιο, τη μηχανή, την εργασία, τη λειτουργία και την "κυριαρχία" του γονιδίου (FMJOD – Factory Machine Job Operation Domination). Εάν κάποιο γονίδιο καταταχθεί στην κατηγορία των κυρίαρχων γονιδίων, τότε η παράμετρος *D* δηλώνεται με την μονάδα (1), αλλιώς με το μηδέν (0). Για παράδειγμα στο σχήμα 4.6, το γονίδιο (12331) είναι ένα κυρίαρχο γονίδιο.

$$12331-12121-11110-22210-11130-21230-23220-11311-13320$$

Σχήμα 4.16: Παράδειγμα κυρίαρχου γονιδίου σε ένα χρωμόσωμα [Felix et al.(2006)]

Όπως ισχύει στους περισσότερους γενετικούς αλγορίθμους τα γονίδια επιλέγονται τυχαία χρησιμοποιώντας τις διαδικασίες διασταύρωσης και μετάλλαξης για την παραγωγή νέων γενιών. Με τις διαδικασίες αυτές, όμως, δεν εξασφαλίζεται η επιλογή των καλύτερων χρωμοσωμάτων για την δημιουργία των απογόνων. Για το λόγο αυτό, στον συγκεκριμένο αλγόριθμο χρησιμοποιείται η παράμετρος των κυρίαρχων γονιδίων (DG-Dominated Genes) για τον καθορισμό και αποθήκευση των καλύτερων χρωμοσωμάτων, καθώς επίσης και της αντίστοιχης δομής τους. Ως κυρίαρχα γονίδια ορίζονται αυτά που αυξάνουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προς βελτιστοποίηση για το συγκεκριμένο χρωμόσωμα. Επίσης, τα γονίδια αυτά επιλέγονται κατά την διασταύρωση και μετάλλαξη για να μεταφερθούν στην επόμενη γενιά χρωμοσωμάτων.

Η διαδικασία της μετάλλαξης διαφέρει μερικώς από αυτήν που γίνεται στον απλό γενετικό αλγόριθμο. Συγκεκριμένα, ορίζονται μερικά κυρίαρχα γονίδια στον αρχικό πληθυσμό και κάθε χρωμόσωμα μπορεί να περιέχει περισσότερα από ένα τέτοια γονίδια. Στην προσέγγιση αυτή ο ρυθμός διασταύρωσης εξαρτάται από τον αριθμό των κυρίαρχων γονιδίων σε κάθε χρωμόσωμα και μπορεί να χωριστεί σε δυο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση ελέγχεται η ύπαρξη αντικρουόμενων κυρίαρχων γονιδίων μεταξύ των δυο γονέων στην ίδια θέση και στην δεύτερη περίπτωση η ύπαρξη όμοιων κυρίαρχων εργασιών στους δυο γονείς. Εάν δεν ισχύει κάποια από τις περιπτώσεις αυτές τότε το χρωμόσωμα κατατάσσεται ως γονέας.

Ο μηχανισμός μετάλλαξης είναι παρόμοιος με αυτόν που περιγράφτηκε για τον απλό γενετικό αλγόριθμο, όπου υφίστανται δυο τύποι μεταλλάξεων. Η μόνη διαφοροποίηση της διαδικασίας είναι ότι εάν ένας απόγονος είναι καλύτερος από τον γονέα του, τότε τα μεταλλαγμένα γονίδια δηλώνονται ως κυρίαρχα γονίδια.

4.2.2.3 Προσθήκη διαδικασίας συντήρησης στο γενετικό αλγόριθμο με κυρίαρχα γονίδια

Η τελευταία παράμετρος που προστέθηκε από τους συγγραφείς στον γενετικό αλγόριθμο του προβλήματος κατανομής προγράμματος παραγωγής αναφέρεται στη συντήρηση και αποτελεί το πιο σημαντικό στοιχείο σε σχέση με τον σκοπό της εργασίας, δηλαδή τον ενιαίο προγραμματισμό παραγωγής και συντήρησης. Η εφαρμογή συντήρησης σε μια μηχανή, δηλώνεται στο γενετικό αλγόριθμο από την παράμετρο (*S*) και συνεπώς το χρωμόσωμα τροποποιείται ξανά με την προσθήκη ενός ακόμη στοιχείου. Η παράμετρος *S* παίρνει την τιμή 1 εάν μια μηχανή πρόκειται να συντηρηθεί μετά την ολοκλήρωση της τρέχουσας λειτουργίας και 0 εάν όχι. Στο Σχήμα 4.7 δίνεται ένα παράδειγμα χρωμοσώματος, όπου το πρώτο γονίδιο (123311) υποδηλώνει πως η μηχανή 2 (*M2*) στο εργοστάσιο 1 (*F1*) πρόκειται να συντηρηθεί μετά την ολοκλήρωση της λειτουργίας 3(*O3*) της εργασίας (*J3*) και αποτελεί επίσης κυρίαρχο γονίδιο.

Συντήρηση μηχανής 2

$\Downarrow$

$1233\underline{1}1-121201-111100-2221\underline{1}0-111300-212300-232200-113101-133200$

Σχήμα 4.17: Παράδειγμα χρωμοσώματος που περιλαμβάνει τη παράμετρο συντήρησης (S) [Felix et al.(2006)]

4.2.3 Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου για το πρόβλημα κατανομής προγράμματος παραγωγής

Ο γενετικός αλγόριθμος που αναλύθηκε στις προηγούμενες παραγράφους είχε ο αντικειμενικό σκοπό την επίλυση προβλημάτων κατανομής προγραμμάτων παραγωγής, με μηχανές που υπόκεινται σε συντήρηση. Οι συγγραφείς πρότειναν τρεις τύπους χρωμοσωμάτων οι οποίοι αντιστοιχούσαν σε τρεις γενετικούς αλγορίθμους: (1) στον απλό (SGA), (2) με κυρίαρχα γονίδια (GADG) και (3) λαμβάνοντας υπόψη την συντήρηση των μηχανών. Αρχικά εφάρμοσαν τον απλό γενετικό αλγόριθμο και σύγκριναν τα αποτελέσματά του με άλλα μοντέλα που εξετάζουν το ίδιο πρόβλημα, καταλήγοντας στο συμπέρασμα πως έχει καλύτερα αποτελέσματα απ'ότι οι άλλες μέθοδοι. Καθώς, όμως, αύξησαν το μέγεθος του προβλήματος διαπίστωσαν πως η απόκλιση των λύσεων του απλού γενετικού αλγόριθμου αυξανόταν σε μεγάλο βαθμό. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού χρησιμοποίησαν την μέθοδο των κυρίαρχων γονιδίων, με την εφαρμογή των διαφορετικών χαρακτηριστικών διασταύρωσης και

μετάλλαξης των χρωμοσωμάτων. Η ιδιαιτερότητα που παρουσιάζει η μέθοδος αυτή είναι ότι τα καλύτερα χρωμοσώματα αναγνωρίζονται και αποθηκεύονται ώστε να χρησιμοποιηθούν στην δημιουργία της νέας γενιάς. Ακολούθως, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δυο αναφερόμενων γενετικών αλγορίθμων, επισήμαναν πως με την χρήση κυρίαρχων γονιδίων βελτιώνεται η ποιότητα των λύσεων και ταυτόχρονα μειώνεται η απόκλισή μεταξύ τους. Η περαιτέρω αναβάθμιση του γενετικού αλγορίθμου, με την προσθήκη του παράγοντα συντήρηση, έδειξε πως λαμβάνοντας την υπόψη κατά τη διάρκεια της κατανομής προγραμματισμού μπορεί να μειωθεί το χρονικό διάστημα ολοκλήρωσής του βελτιώνοντας την εκμετάλλευση των μηχανών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ερωτηματολόγιο

Μέσα στα πλαίσια αυτής της βιβλιογραφικής έρευνας θεωρήθηκε χρήσιμο να χρησιμοποιηθεί ερωτηματολόγιο με ερωτήσεις ανοικτού τύπου προς ομάδα επιλεγμένων μηχανικών για να διερευνηθούν διάφορα θέματα συντήρησης και παραγωγής. Το ερωτηματολόγιο αποτελείτο από 18 ερωτήσεις ανοικτού τύπου έτσι ώστε οι ερωτηθέντες να μπορούν να εξηγήσουν τις διαδικασίες που περιλαμβάνει η λειτουργία της συντήρησης στην εταιρία όπου εργάζονται. Στάλθηκε σε μηχανικούς που εργάζονται τόσο σε Κυπριακές όσο και σε Ελληνικές εταιρίες οι οποίες ασχολούνται με την μεταποιητική βιομηχανία, ώστε να υπάρχει μια πιο συγκεκριμένη εικόνα των τάσεων που αφορούν θέματα προγραμματισμού συντήρησης. Η επιλογή των ερωτηθέντων έγινε λαμβάνοντας υπόψη τη θέση εργασίας που κατέχουν στις αντίστοιχες εταιρίες και τη σχέση που έχουν με το αντικείμενο που εξετάζεται.

Συγκεκριμένα, σε σύνολο δέκα ερωτηθέντων οι οχτώ από αυτούς είχαν άμεση σχέση με τη λειτουργία της συντήρησης, καθώς κατείχαν θέσεις όπως Διευθυντής-Προιστάμενος Συντήρησης ή Μηχανολόγος Μηχανικός. Οι άλλοι δυο είχαν έμμεση σχέση με τη λειτουργία της συντήρησης, καθώς κατέχουν θέση Προϊστάμενου Παραγωγής και συνεπώς εμπλέκονται στη διαδικασία προγραμματισμό της συντήρησης. Αντίτυπο του ερωτηματολογίου δίνεται στο Παράρτημα 2.

Στη συνέχεια γίνεται ποιοτική ανάλυση των απαντήσεων καθώς οι ερωτήσεις ήταν ανοικτού τύπου και δεν θα ήταν δυνατή η ποσοτική κατηγοριοποίησή τους. Λόγο της ποικιλομορφίας των εταιριών (ζυθοποιείο, τσιμεντοποιείο, μεταλλουργείο, μεταποιητική βιομηχανία, λιανικό εμπόριο) θεωρήθηκε πιο χρήσιμο να μελετηθούν οι απαντήσεις μεμονωμένα έτσι ώστε να μπορούν να επεξεργαστούν.

5.1 Ανάλυση του ερωτηματολογίου

Βασικός σκοπός της χρήσης του ερωτηματολογίου ήταν η συλλογή στοιχείων για να διαπιστωθεί η κατάσταση που επικρατεί, σήμερα, στις επιχειρήσεις όσων αφορά τον προγραμματισμό της συντήρησης, σε συνδυασμό με την παραγωγή. Το ερωτηματολόγιο δόθηκε στα επιλεγμένα άτομα, δοθέντος μιας συγκεκριμένης προθεσμίας παράδοσης. Ο χρόνος που δόθηκε ήταν αρκετός, ούτως ώστε να μπορέσουν οι ερωτηθέντες να συμπληρώσουν το

ερωτηματολόγιο με σύνεση και ειλικρίνεια. Πρέπει να αναφερθεί πως το ερωτηματολόγιο ήταν ανώνυμο και η χρήση του περιορίζεται στους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Στις επόμενες παραγράφους δίνεται μια σύντομη περιγραφή του τι ειπώθηκε από τους ερωτηθέντες στο ερωτηματολόγιο για τις συγκεκριμένες ερωτήσεις.

Αρχικά ζητήθηκαν κάποια γενικά στοιχεία τα οποία αφορούσαν τη θέση εργασίας των ερωτηθέντων, τα χρόνια υπηρεσίας που έχουν στη συγκεκριμένη εταιρία και τον τομέα στον οποίο δραστηριοποιείται η εταιρία στην οποία εργάζονται. Με τα δεδομένα αυτά θέλουμε να βεβαιωθούμε πως αυτός/αυτή που έχει συμπληρώσει το ερωτηματολόγιο έχει σχέση με τον τομέα που εξετάζουμε και συνεπώς τις απαραίτητες γνώσεις για να απαντήσει στις επόμενες ερωτήσεις. Από τις απαντήσεις που λήφθηκαν διαπιστώθηκε πως οι περισσότεροι είχαν άμεση σχέση με την συντήρηση, καθώς κατείχαν θέσεις Διευθυντή Συντήρησης ή Τεχνικού συντήρησης, ενώ ελάχιστοι άνηκαν στον τομέα της παραγωγής, έχοντας όμως έμμεση σχέση με την δημιουργία του προγράμματος συντήρησης,

Στη δεύτερη ερώτηση, η οποία αναφέρεται στο ποιος είναι υπεύθυνος για τον καταρτισμό του προγράμματος συντήρησης, όλοι απάντησαν πως την υπευθυνότητα έχει ο Διευθυντής ή Προϊστάμενος συντήρησης, σε συνεργασία όμως με τον υπεύθυνο παραγωγής και μερικές φορές και με άλλα τμήματα της επιχείρησης.

Σχετικά με το εάν χρησιμοποιείται κάποιο μοντέλο προγραμματισμού ή κάποιο άλλο λογισμικό εργαλείο για τη δημιουργία του προγράμματος συντήρησης δόθηκαν ποικίλες απαντήσεις. Βάση αυτών, οι περισσότερες εταιρίες χρησιμοποιούν ένα απλό πρόγραμμα προγραμματισμού στο υπολογιστικό πρόγραμμα Excel, ενώ μερικές εταιρίες κάνουν χρήση και του προγράμματος Access. Λίγες είναι οι εταιρίες που χρησιμοποιούν κάποιο εξειδικευμένο πρόγραμμα, το οποίο να λαμβάνει υπόψη του διάφορες παραμέτρους (π.χ εποχικότητα, κλιματολογικές συνθήκες, πιθανές καθυστερήσεις) και περιορισμούς (π.χ χωρητικότητας αποθηκών και παραγωγής) για τον καταρτισμό του αναλυτικού προγράμματος συντήρησης.

Η βέλτιστη πολιτική συντήρησης θεωρείται από τους περισσότερους πως είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου που απαιτείται για την υλοποίηση των διαφόρων ενεργειών συντήρησης, επισκευής ή επιδιόρθωσης. Σημαντική είναι, επίσης, η ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης το οποίο αποτελείται από τις ανθρωποώρες, τα υλικά ή τις ώρες που δεν γίνεται παραγωγή λόγω επιδιόρθωσης κάποιας βλάβης ή συντήρησης. Λιγότερο σημαντική, όπως αναμενόταν, είναι για τους υπεύθυνους συντήρησης η ελαχιστοποίηση του κόστους και χρόνου παραγωγής, χωρίς αυτό να σημαίνει πως δεν λαμβάνονται οι δυο αυτές παράμετροι υπόψη κατά τον προγραμματισμό της συντήρησης. Η τελευταία δήλωση προκύπτει μέσα από τις

απαντήσεις που δόθηκαν για την ερώτηση 5, όπου όλοι δήλωσαν πως η παραγωγή είναι αναπόσπαστο κομμάτι του προγράμματος συντήρησης, τα τμήματα παραγωγής και συντήρησης πρέπει να συνεργάζονται για την δημιουργία του βέλτιστου προγράμματος, καθώς οι δυο αυτές λειτουργίες είναι αλληλοεξαρτώμενες.

Σύμφωνα, πάντα, με τα στοιχεία που αποκτήθηκαν από τα ερωτηματολόγια, όλες οι εταιρίες διαθέτουν δικό τους τμήμα συντήρησης, ενώ χρησιμοποιείται εξωτερικός οργανισμός για την εφαρμογή συντήρησης μόνο σε ειδικές περιπτώσεις ή έκτακτη ανάγκη. Συγκεκριμένα, το τμήμα συντήρησης ασχολείται περισσότερο με τεχνικά θέματα (βλάβες, επισκευές, συντηρήσεις), ενώ εξειδικευμένα συνεργεία είναι υπεύθυνα για άλλους τομείς όπως περιφερειακά μηχανήματα (compressors, boilers, electrical station) ή πιο εξειδικευμένα μηχανήματα των οποίων η συντήρηση γίνεται μόνο από την προμηθεύτρια εταιρία βάση συμβολαίου. Και στις δυο περιπτώσεις, η επιλογή του προσωπικού, εσωτερικού ή εξωτερικού, για την διεκπεραίωση οποιασδήποτε ενέργειας συντήρησης καθορίζεται βάση της εμπειρίας, της γνώσης του αντικειμένου και ακολούθως από το κόστος της επιλογής.

Οι περισσότεροι υποστηρίζουν την άποψη πως σε μια βιομηχανία ο προγραμματισμός της παραγωγής και της συντήρησης πρέπει να γίνεται παράλληλα, καθώς έχουν άμεση σύνδεση και αλληλοεξαρτώνται και έτσι ακολουθείται η σωστή μέθοδος για την μεγιστοποίηση των θετικών αποτελεσμάτων στην παραγωγή με την μείωση των καθυστερήσεων, όπως επίσης και την ομαλοποίηση των εξόδων συντήρησης και λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Μερικοί, όμως, ενώ πιστεύουν πως ο προγραμματισμός παραγωγής-συντήρησης είναι πιο αποτελεσματικός όταν γίνεται παράλληλα, αναφέρουν το γεγονός πως σε πολλές περιπτώσεις ο προγραμματισμός γίνεται σε βάρος της συντήρησης δίνοντας περισσότερη έμφαση στη διαδικασία της παραγωγής. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η διοίκηση της επιχείρησης θέτει ως προτεραιότητα την ικανοποίηση των παραγγελιών των πελατών, ώστε να εξασφαλιστούν τα αναμενόμενα κέρδη και προφανώς δίνεται περισσότερη βαρύτητα στη λειτουργία της παραγωγής και λιγότερο της συντήρησης, χωρίς αυτό να σημαίνει πως είναι η επιθυμητή προσέγγιση. Συναντάται και η άποψη πως ανάλογα με τον τύπο συντήρησης και τον εξοπλισμό που πρόκειται να συντηρηθεί, θα ήταν καλύτερα ο προγραμματισμός συντήρησης να γίνεται ανεξάρτητα, ούτως ώστε να μειωθούν οι αστάθμητοι παράγοντες που επηρεάζουν συνεχώς το ενιαίο πρόγραμμα και να εξασφαλιστεί μια κάποια σταθερότητα στην εφαρμογή του προγράμματος συντήρησης.

Τα κυριότερα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από τον ενιαίο προγραμματισμό της παραγωγής και της συντήρησης, όπως αναφέρθηκαν από τους ερωτηθέντες είναι: (1) “σύγκρουση” μεταξύ των τμημάτων παραγωγής και συντήρησης, (2) ελάχιστος χρόνος για

διενέργεια συντήρησης λόγω βαρυφορτωμένου προγράμματος παραγωγής, (3) συνεχείς αλλαγές στο πρόγραμμα συντήρησης λόγω ανάγκης για παραγωγή, (4) αλλαγή του προγράμματος συντήρησης λόγο καθυστερημένης ή λανθασμένης παραλαβής ανταλλακτικών που απαιτούνται για την συντήρηση του εξοπλισμού, (5) αλλαγή του προγράμματος παραγωγής λόγω εμφάνισης μηχανικών βλαβών που οδηγούν σε αναδιάρθρωση του προγράμματος παραγωγής και συνεπώς αυτού της συντήρησης, (6) μη επαρκές προσωπικό για την εκτέλεση των προγραμματισμένων συντηρήσεων λόγου φόρτου εργασίας.

Σημαντικός παράγοντας στην εκτέλεση αποτελεσματικών ενεργειών συντήρησης είναι και η ύπαρξη των απαραίτητων πόρων, οι οποίοι συνεπάγονται επαρκές προσωπικό, υλικά και απόθεμα ανταλλακτικών. Αρκετοί είναι εκείνοι που δήλωσαν πως οι πόροι οι οποίοι διατίθενται για τις δραστηριότητες συντήρησης και γενικά για το τμήμα συντήρησης, καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό τις απαιτούμενες ανάγκες. Εν αντιθέσει με αυτούς κάποιοι δήλωσαν πως θα επιθυμούσαν την παροχή περισσότερων πόρων στο τμήμα συντήρησης, για την κάλυψη επιπλέων εξόδων. Τα επιπλέον αυτά έξοδα προκύπτουν από υπερωρίες, προσλήψεις επιπλέον προσωπικού αφού αυτοί που υφίστανται αναλώνονται στην αποκατάσταση βλαβών αφήνοντας κατά μέρος την προληπτική συντήρηση και αγορά λογισμικού για τον καλύτερο και πιο αποτελεσματικό προγραμματισμό της συντήρησης

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα σημεία και τις διάφορες παραμέτρους που αναφέρθηκαν στο ερωτηματολόγιο, ζητήθηκε από τους ερωτηθέντες να απαντήσουν στο ερώτημα για το ποια από τις δυο διαδικασίες, παραγωγή και συντήρηση, πιστεύουν πως πρέπει να αποτελεί τη βασική επιχειρησιακή διαδικασία για τη διοίκηση μιας εταιρίας,. Επικράτησε η άποψη πως και οι δυο είναι εξίσου σημαντικές για την βιωσιμότητα μιας επιχείρησης, καθώς η μονομερής εφαρμογή μιας από τις δύο διαδικασίες θα έχει ως άμεσο αντίκτυπο τη μείωση της αποτελεσματικότητας της άλλης. Η παραγωγή είναι η βασική επιχειρησιακή διαδικασία μιας εταιρίας και συνήθως στη μεταποιητική βιομηχανία η μόνη πηγή εισοδήματος της. Η συντήρηση διατηρεί και δίνει υψηλή αξία στα περιουσιακά στοιχεία μιας επιχείρησης και εξασφαλίζει την απρόσκοπτη παραγωγή και κατ’ επέκταση την εισροή εισοδήματος στην εταιρεία.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διατριβή αυτή πραγματεύτηκε το θέμα του ενιαίου προγραμματισμού παραγωγής και συντήρησης για συστήματα που αποτελούνται από μια ή περισσότερες μηχανές. Αρχικά, έγινε περιγραφή της διαδικασίας συντήρησης, αναλύοντας τον αντικειμενικό της στόχο, που είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης των μηχανημάτων παραγωγής, εξασφαλίζοντας πως ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται λειτουργεί κανονικά και κυρίως αποδοτικά. Ακολούθως, αναφερθήκαμε στα σημεία που μπορούν να συμβάλουν στη διατήρηση της αξιοπιστίας του συστήματος, καθώς και στις αποφάσεις που πρέπει να λαμβάνονται πριν την έναρξη οποιασδήποτε ενέργειας συντήρησης, οι οποίες αφορούν το ποιες εγκαταστάσεις θα συντηρηθούν, τί είδους συντήρηση θα εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση και πως θα οργανωθεί η συντήρηση από το αντίστοιχο τμήμα. Στο πρώτο κεφάλαιο ορίστηκαν οι πολιτικές συντήρησης που εφαρμόζονται για διάφορες περιπτώσεις αστοχιών, όπως παρουσιάστηκαν από διάφορους συγγραφείς στη διεθνή βιβλιογραφία (Ben-Daya και Khursheed 2002, El-Ferik και Ben-Daya 2006, El-Ferik 2008).

Σε επόμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά στη διαδικασία του προγραμματισμού παραγωγής, η οποία είναι από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει μια μεταποιητική βιομηχανία και όχι μόνο, καθώς η παραγωγή αποτελεί την κύρια επιχειρησιακή διαδικασία τέτοιων επιχειρήσεων. Αν και έχουν προταθεί πάρα πολλά μοντέλα για τον ανεξάρτητο προγραμματισμό της παραγωγής (Guo et al. 2007, Akella και Kumar 1986, Kallrath 2002), επειδή η διαδικασία της παραγωγής είναι άμεσα συνυφασμένη με τη συντήρηση είναι πιο αποτελεσματικός ο παράλληλος προγραμματισμός των δυο αυτών διαδικασιών, συμπεριλαμβάνοντας στις συναρτήσεις προς βελτιστοποίηση τους παράγοντες που επηρεάζουν και τις δυο λειτουργίες.

Μέσα από μια αναλυτική και εκτεταμένη παρουσίαση μοντέλων τα οποία πραγματεύονται το πρόβλημα προγραμματισμού παραγωγής και συντήρησης ως ενιαίο πρόβλημα, αναζητήθηκαν κοινά στοιχεία και ομοιότητες που θα μας βοηθούσαν να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο ανάπτυξης αλλά και επίλυσης τέτοιων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν μοντέλα τα οποία καταπιάνονται με το πρόβλημα ενός συστήματος με μια μηχανή το οποίο μπορεί να παράγει μόνο ένα προϊόν, όπως αυτά των El-Ferik (2008), Kenne et al.(2007), Sloan και Shanthikumar (2000) και Chakraborty et al.(2006) ή πολλά προϊόντα, όπως το μοντέλο των Aghezzaf et al.(2007) ή ακόμη συστήματα με πολλαπλές γραμμές αλλά μια μηχανή ανά γραμμή (Ashayeri, et al.1995). Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν αρκετά κοινά στοιχεία, καθότι για την ανάπτυξη τους χρησιμοποιήθηκαν παρόμοιες παράμετροι, όπως για παράδειγμα κόστη προληπτικής συντήρησης, κόστος

προετοιμασίας, κόστος αποθέματος, κύκλος εργασιών παραγωγής, ρυθμοί ζήτησης και παραγωγής. Τα μοντέλα αυτά είναι εφικτό αν επεκταθούν για συστήματα παραγωγής που αποτελούνται από πολλαπλές μηχανές και ενσωματώνουν, επίσης, διάφορες στρατηγικές συντήρησης. Επιπρόσθετα, η εφαρμογή των παραπάνω μοντέλων σε διαφορετικά κατασκευαστικά συστήματα (παραγωγή τροφίμων, χημική βιομηχανία), αποδεικνύουν την ευρεία εφαρμογή που μπορούν να έχουν τέτοιου είδους μοντέλα προγραμματισμού. Παρατηρείται επίσης, τα μοντέλα αυτά υπόκεινται σε αρκετές υποθέσεις αλλά και περιορισμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι πολύ σταθερά και να έχουν αυξημένη ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων που τις απαρτίζουν, μη δίνοντας έτσι τις βέλτιστες λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Θέλοντας να παρουσιάσουμε εναλλακτικούς τρόπους επίλυσης τέτοιων προβλημάτων προγραμματισμού, γίνεται αναφορά σε δυο μοντέλα που χρησιμοποιούν ευρετικούς γενετικούς αλγόριθμους για την επίλυση του προβλήματος. Οι Sortrakul et al.(2004) και Felix et al.(2006), ακολουθούν παρόμοιο τρόπο ανάπτυξης με τα προαναφερόμενα μοντέλα, δηλαδή, θέτοντας αντικειμενική συνάρτηση, περιορισμούς και κάνοντας και τις απαραίτητες υποθέσεις, ούτος ώστε να μπορεί να υπάρξει βέλτιστη λύση και να μην "παγιδευτεί" το μοντέλο σε κάποιο τοπικό βέλτιστο. Η διαφορά τους έγκειται στον τρόπο επίλυσης του μοντέλου, η οποία γίνεται με την χρήση ευρετικών γενετικών αλγορίθμων. Για τα διάφορα βήματα του αλγόριθμου χρησιμοποιούνται γνωστά χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων, όπως είναι δηλαδή η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Το πλεονέκτημα της επίλυσης με τις μεθόδους αυτές βρίσκεται στην ευελιξία δημιουργίας πολλών λύσεων σε μικρό χρονικό διάστημα, αντίθετα με άλλες μεθόδους που απαιτείται πολύ περισσότερος χρόνος χωρίς να είμαστε σίγουροι πως οι λύσεις που προκύπτουν από τέτοιες μεθόδους είναι οι βέλτιστες.

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε και συμπληρώθηκε, από άτομα που έχουν άμεση σχέση με τη λειτουργία της συντήρησης, ένα ερωτηματολόγιο για την καταγραφή διαφόρων απόψεων σχετικά με τη χρησιμότητα του ενιαίου προγραμματισμού παραγωγής και συντήρησης στις βιομηχανίες. Μέσα από 18 ερωτήσεις ανοικτού τύπου έγινε η προσπάθεια συλλογής των βασικότερων και κυρίως σχετικών με το θέμα μας πληροφοριών για διάφορες πτυχές του προγραμματισμού συντήρησης. Το κυριότερο συμπέρασμα αυτής της έρευνας είναι ότι οι απόψεις όλων των ερωτηθέντων, δεν απείχαν πολύ. Αυτό σημαίνει πως στις βιομηχανίες και συγκεκριμένα στις μεταποιητικές βιομηχανίες, τομέα στον οποίο ανήκουν οι εταιρίες όπου εργάζονται οι ερωτηθέντες, η κατάσταση που υφίσταται είναι λίγο έως πολύ η ίδια για όλες εκτός από μερικές διαφορές. Οι διαφορές αυτές συναντώνται: πρώτον στις μεθόδους εξαγωγής

του προγράμματος συντήρησης, για το οποίο μερικές εταιρίες χρησιμοποιούν εξελιγμένα προγραμματιστικά λογισμικά πακέτα σε σύγκριση με άλλες που χρησιμοποιούν απλά προγράμματα σε υπολογιστικά φύλλα όπως το Excel και Access και δεύτερον στους διαθέσιμους πόρους που έχει το τμήμα συντήρησης για να βγάλει σε πέρας το δύσκολο και απρόβλεπτο έργο του. Μερικοί θεωρούν πως οι πόροι που διατίθενται από τις εταιρίες τους για τη συντήρηση μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις τους, ενώ άλλοι υποστηρίζουν πως δεν επαρκούν λόγο των πολλών καθημερινών απρόβλεπτων προβλημάτων και για το λόγο ότι η διοίκηση δίνει συνήθως περισσότερη βαρύτητα στη διαδικασία της παραγωγής αντί να υπάρχει κάποια ίση μεταχείριση μεταξύ των δυο διαδικασιών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Απόδειξη θεωρήματος

Απόδειξη του θεωρήματος του El-Ferik (2003):

Το θεώρημα χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο του El-Ferik (2008) για την απλοποίηση των όρων οι οποίοι αναφέρονται στα διάφορα κόστη και το οποίο αναφέρει: *«Ας είναι ο όρος* $h(t)$ *μια συνάρτηση* L_2 *και το* $f(t)$ *μια συνεχής συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μιας θετικής τυχαίας μεταβλητής, τότε*

$$\int_a^x h(t)f(t)dt + h(x)\bar{F}(x) = h(a)\bar{F}(a) + \int_a^x h'(t)\bar{F}(t)dt$$

Η απόδειξη του θεωρήματος παρουσιάζεται στη συνέχεια:

$$\int_a^x h(t)f(t)dt + h(x)\bar{F}(x) = \left[h(t)F(t)\right]_a^x - \int_a^x h'(t)F(t)dt + h(x) - h(x)F(X)$$

$$= -h(a)F(a) - \int_a^x h'(t)F(t)dt + h(x) - h(a) + h(a)$$

$$= h(a)(1 - F(a)) - \int_a^x h'(t)F(t)dt + \int_a^x h'(t)dt$$

$$= h(a)\bar{F}(a) + \int_a^x h'(t)\bar{F}(t)dt$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Ερωτηματολόγιο

ΟΛΑ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΙΝΑΙ ΕΜΠΙΣΤΕΥΤΙΚΑ ΚΑΙ ΘΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΟΥΝ ΜΟΝΟ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΣΚΟΠΟΥΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΘΕΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΤΑΙΡΙΑ : ……..…

ΧΡΟΝΙΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΣΕ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΘΕΣΗ: ……..

ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΙΑΣ : ……..

ΠΡΟΦΙΛ ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΙΑΣ :
- ☐ Ένα συγκεκριμένο προϊόν
- ☐ Μικρή ποικιλία προϊόντων (λιγότερα από 5)
- ☐ Μεσαία ποικιλία προϊόντων (μέχρι 20)
- ☐ Μεγάλη ποικιλία προϊόντων (πάνω από 20)

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΤΑΧΥΔΡΟΜΙΟ (email) : …….....
(Εάν θέλετε να έχετε οποιαδήποτε ενημέρωση για τα αποτελέσματα του ερωτηματολογίου)

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

(Οι ερωτήσεις αναφέρονται στον οργανισμό για τον οποίο εργάζεστε)

Ερώτηση 1: Η συντήρηση, λαμβάνοντας υπόψη τη θέση εργασίας που κατέχετε, έχει άμεση σχέση με την ιδιότητα σας και πως;

Ερώτηση 2: Ποιος/ποιοι είναι ο/οι υπεύθυνος/οι για τον καταρτισμό του προγράμματος συντήρησης (τίτλος θέσης);

Ερώτηση 3: Για τον προγραμματισμό της συντήρησης χρησιμοποιείται κάποιο μοντέλο προγραμματισμού ή κάποιο άλλο λογισμικό εργαλείο; Αν ναι ποιο και δώστε μια περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του (δεδομένα που απαιτούνται, ευελιξία μοντέλου, δυνατότητες, περιορισμοί). Αν όχι τότε με ποιο τρόπο συντάσσεται το πρόγραμμα συντήρησης (περιγραφή);

Ερώτηση 4: Κατά τον προγραμματισμό της συντήρησης ποια ορίζεται ως η βέλτιστη πολιτική συντήρησης (ελαχιστοποίηση χρόνου συντήρησης, ελαχιστοποίηση κόστους συντήρησης, μεγιστοποίηση χρόνου παραγωγής, ελαχιστοποίηση κόστους παραγωγής, κ.τ.λ.);

Ερώτηση 5: Κατά την δημιουργία του προγράμματος συντήρησης λαμβάνεται υπόψη και το πρόγραμμα παραγωγής ή γίνεται ανεξάρτητα από αυτό? Υπάρχει συνεργασία και με άλλα τμήματα του οργανισμού (τμήμα παραγωγής, αποθήκη, τμήμα αγορών, κ.τ.λ.);

Ερώτηση 6: Υπάρχει στην εταιρία ειδικό τμήμα συντήρησης ή η συντήρηση αποτελεί ευθύνη ενός εξωτερικού οργανισμού? (Στην περίπτωση που υφίστανται και οι δυο περιπτώσεις, αναφέρετε τους τομείς υπευθυνότητας του κάθε τμήματος);

Ερώτηση 6.1^{A}: Στην περίπτωση ύπαρξης ειδικού τμήματος συντήρησης, ποια είναι τα κριτήρια για την επιλογή του αριθμού του προσωπικού της ομάδας συντήρησης, του εύρους κατάρτισης που απαιτείται;

Ερώτηση 6.1^{B}: Ποιός έχει την ευθύνη του υπολογισμού του αποθέματος εξαρτημάτων;

Ερώτηση 6.2^{A}: Στη περίπτωση ύπαρξης εξωτερικού οργανισμού, ποια είναι τα κριτήρια για την επιλογή του εξωτερικού οργανισμού ο οποίος θα έχει την ευθύνη της συντήρησης του εξοπλισμού;

Ερώτηση 6.2^{B}: Σε ποιες περιπτώσεις χρειάζεται η ύπαρξη εξωτερικού οργανισμού για την διενέργεια της συντήρησης;

Ερώτηση 7: Αναφέρετε τα είδη συντήρησης που εφαρμόζονται στον εξοπλισμό παραγωγής;

Ερώτηση 8: Ποια η συχνότητα επιθεώρησης των εξαρτημάτων και του εξοπλισμού παραγωγής και από ποιους γίνεται (προσωπικό παραγωγής, τμήμα συντήρησης, εξωτερικός οργανισμός);

Ερώτηση 9: Ποια η συχνότητα διενέργειας τακτικού σέρβις, όπως για παράδειγμα επαναρίθμηση, λίπανση στον εξοπλισμό και από ποιους γίνεται (προσωπικό παραγωγής, τμήμα συντήρησης, εξωτερικός οργανισμός);

Ερώτηση 10: Ποια η συχνότητα εκτέλεσης προληπτικής συντήρησης στον εξοπλισμό και από ποιους γίνεται (προσωπικό παραγωγής, τμήμα συντήρησης, εξωτερικός οργανισμός);

Ερώτηση 11: Ποια διαδικασία ακολουθείται για τα εξαρτήματα και τον εξοπλισμό που δεν ικανοποιούν πλέον τα επίπεδα λειτουργίας και είναι έξω από τα όρια οικονομικής επισκευής?;

Ερώτηση 12: Κατά την εγκατάσταση κάποιου εξοπλισμού παραγωγής γίνεται οποιοσδήποτε σχεδιασμός της διαρρύθμισης της διάταξης του εξοπλισμού ώστε να είναι πιο εύκολη η διενέργεια της συντήρησης;

ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

Ερώτηση 13: Σε μια βιομηχανία ο προγραμματισμός της παραγωγής και της συντήρησης μπορεί να γίνεται είτε ανεξάρτητα και να μην συνδέονται μεταξύ τους, είτε παράλληλα και να αλληλοεξαρτώνται. Σχολιάστε τις δυο αυτές περιπτώσεις και αναφέρετε ποια περίπτωση εφαρμόζεται στην εταιρία σας. Ποια από τις δυο πιστεύετε πως έχει καλύτερα αποτελέσματα και γιατί;

Ερώτηση 14: Ποια κατά την γνώμη σας είναι τα κυριότερα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από τον ενιαίο προγραμματισμό της παραγωγής και της συντήρησης; Εάν από την εμπειρία σας έχετε κάποια παραδείγματα που σχετίζονται με το θέμα αυτό αναφερθείτε σε μερικά από αυτά.

Ερώτηση 15: Το πρόγραμμα συντήρησης και η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την δημιουργία του, σήμερα, στην εταιρία σας πιστεύετε πως είναι αποτελεσματικά; Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη μέθοδος προγραμματισμού; Αναφέρετε τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν τον προγραμματισμό της συντήρησης και τα προβλήματα που οδηγούν στην μη πιστή εφαρμογή του προγράμματος συντήρησης.

Ερώτηση 16: Οι πόροι οι οποίοι διατίθενται από την εταιρία για τις δραστηριότητες της συντήρησης και γενικότερα για το τμήμα συντήρησης σε πιο βαθμό πιστεύεται πως καλύπτουν τις απαιτούμενες ανάγκες; Με ποια κριτήρια γίνεται η κατανομή των πόρων στις διάφορες λειτουργίες του τμήματος συντήρησης (ονομάστε τις κυριότερες);

Ερώτηση 17: Με ποιο τρόπο πιστεύεται πως ο προγραμματισμός των διαδικασιών παραγωγής και συντήρησης θα γινόταν πιο αποτελεσματικός, αξιόπιστος και με λιγότερος κόστος, χωρίς να «θυσιάζονται» η ποιότητα των προϊόντων, η ασφάλεια του προσωπικού και η σωστή λειτουργία του εξοπλισμού;

Ερώτηση 18: Λαμβάνοντας υπόψη τα σημεία τα οποία αναλύθηκαν στις προηγούμενες ερωτήσεις, η παραγωγή ή η συντήρηση πιστεύετε πως πρέπει να αποτελεί τη βασική επιχειρησιακή διαδικασία για την διοίκηση μιας εταιρίας;

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AKELLA, R. P. R. KUMAR: Optimal Control of Production Rate in a Failure Prone Manufacturing System. *IEEE Transactions on Automatic Control,* Vol.31, No.2, 1986), 116-126

AGHEZZAF, E.H., M.A.JAMALI, D.AIT-KADI: An integrated production and preventive maintenance planning model. *European Journal of Operational Research* 181, 679-685 ,2007)

ASHAYERI, J.A.TEELEN, W.SELEN: A Production and Maintenance Planning Model for the process industry. 1995)

BEN-DAYA, M, MAKHDOOM ,M: Integrated Production and Quality Model Under Various Preventive Maintenance Policies. *Journal of the Operational Research Sosiety,* Vol.49, 1998), 840-853

BEN-DAYA, M: Integrated Production, Maintenance, and Quality Model For Imperfect Ptocesses. *IIE Transactions,* Vol.31, 1999), 491-501

BEN-DAYA, M, RAHIM, M.A: Effect of Maintenance on the Economic Design of x-Chart. *The European Journal of Operational Research,* Vol.120, 2000), 131-143

BEN-DAYA, M., KHURSHEED, S.N: The Economic Production Lot- Sizing Problem with Deteriorating Manufacturing Processes and Preventive Maintenance. *In: Proceedings IFRIM, Vaxjo, Sweden, 6-8th May.*, 2002)

BRUVOLD, N.T., J.R. EVANS: Flexible Mixed-Integer Programming Formulations for Production Scheduling Problems. *IIE Transactions,* Vol.17, No.1 1985)

CASSADY, C.R., E. KUTANOGLU: Integrating preventive Maintenance Planning and Production Scheduling for a Single Machine. *Working Paper*, 2005)

CHO, D., PARLAR,M.: A Survey of Maintenance Models for Multi-Unit systems. *European Journal of Operational Research,* Vol.51, 1991), 1-23

CHUNG, KUN-JEN: Approximations to production lot sizing with machine breakdowns. *Computers & Operations Research* 30, 2003), 1499-1507

CONSTANTINOS G. VASSILIADIS. , MARIA G. VASSILIADOU, LAZAROS G. PAPAGEORGIOU,EFSTRATIOS N. PISTIKOPOULOS: Simultaneous maintenance considerations and production planning in multi-purpose plants. *Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2000 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity* No.00CH37055, 228 2000), 33

EDUARD SANMARTI, ANTONIO ESPUNA, LUIS PUIGJANER: Batch production and preventive maintenance scheduling under equipment failure uncertainty. *Computers chem.. Engng.,* Vol.21, No.10, 1997), 1157-1168

EDWARD A. SILVER, DAVD F. PYKE, REIN PETERSON: Inventory Management and Production Planning and Scheduling. (1998).

EL-FERIK, S.: Optimal control for a failure prone manufacturing system under imperfect age-based maintenance. In *In: Second International Conference on Signals Systems Decision and Information Technology.* (2003), pp. 187-193.

EL-FERIK, S., BEN-DAYA, M: Age- based hybrid model for imperfect preventive maintenance. *IIE Transactions Norcross* Vol.38, No.4, 2006), 365-375

EL-FERIK, SAMI: Economic production lot-sizing for an unreliable machine under imperfect age-based maintenance policy. *European Journal of Operational Research* 186, 2008), 150-163

ETTKIN L.P, JAHNIG D.G: Adapting MRPII for maintenance resource management can provide a strategic advantage. *Industrial Engineering,* 50, 9, 1986)

FELIX T.S. CHAN, S.H. CHUNG, L.Y. CHAN, G.FINKE, M.K. TIWARI: Solving distributed FMS scheduling problems subject to maintenance: Genetic algorithms approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 22, 2006), 493-504

FRENCH, S.: Sequencing and Scheduling - An Introduction to the Mathematics of the Job-Shop. (1982).

GABRIELLA BUDAI, ROMMERT DEKKER, ROBIN P. NIKOLAI: A Review of Planning Models for Maintenance & Production. *Econometric Institute* Report 2006-44, 2006)

GERTSBAKH, I.B.: Models of Preventive Maintenance. (1977).

GROENEVELT, H., L. PINTELON, A. SEIDMANN: Production Batching with Machine Breakdowns and Safety Stocks. *Operations Research,* Vol.40, No.5, 1992a), 959-971

GROENEVELT, H., L. PINTELON, A. SEIDMANN: Production Lot Sizing with Machine Breakdowns. *Management Science,* Vol.38, No.1, 1992b), 77-83

GUO, Y., A.LIM, B.RODRIGUES, S.YU: Machine scheduling performance with maintenance and failure. *Machine scheduling performance with maintenance and failure,* 45, 2007), 1067-1080

HARISH D.GOEL, J.GRIEVINK, M.P.C. WEIJNEN: Integrated optimal reliable design, production, and maintenance planning for multipurpose process plants. *Computers and Chemical Engineering,* 27, 2003), 1543-1555

HONG, Y., C. R. GLASSEY, D. SEONG: The Analysis of a Production Line with Unreliable Machines and Random Processing Times. *IIE Transactions,* Vol.4, No.1, 1992), 77-83

JARDINE, A.K.S: Maintenance, replacement and Reliability. (1973).

JIA HZ, FUH JYH, NEE AYC, ZHENG YF,: Web-based multi-functional scheduling system for a distributed manufacturing environment. *Concurrent Eng: Res Appl 2002,* Vol.10, No.1, 2002), 27-39

JOSEF KALLRATH: Planning and scheduling in the process industry. *OR Spectrum,* Vol.24, 2002), 219-250

JOSHI, S., R. GUPTA,: Scheduling of routine Maintenance Using Production Schedules and Equipment Failure History. *Computers & Industrial Engineering,* Vol.10, No.1, 1986)

KENNE, J.-P., A. GHARBI, M. BEIT: Age-dependent production planning and maintenance strategies in unreliable manufacturing systems with lost sale. *European Journal of Operational Research,* 178, 2007), 408-420

KIANFAR, FARHAD: A numerical method to approximate optimal production and maintenance plan in a flexible manufacturing system. *Applied Mathematics and Computation,* 170, 2005), 924-940

LARRY WEINSTEIN, CHEN-HUA CHUNG: Integrating maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment. *Computers and Operations Research,* 26, 1999), 1059-1074

LEE, H.S., SRINIVASON, M.M.,: A production inventory policy for an unreliable machine. In: Rahim, M.A., Ben Daya, M. (Eds.), Integrated Modeling in Production, Planning, Inventory, Quality and Maintenance. (2001).

LEWIS, EE.,: Introduction to reliability engineering. (1987).

LIN, D., ZUO, M.J., YAM, R.C.M: Sequential imperfect preventive maintenance models. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering* Vol.7, No.3 2000), 253-266

LIN, D., ZUO, M.J., YAM, R.C.M: Sequential imperfect preventive maintenance models with two categories of failure modes. *Naval Research Logistics Quarterly,* Vol.48, No.2, 2001), 172-183

LOU, S., S. SETHI, G. SORGER: Stability of Real-Time Lot Scheduling Policies for an Unreliable Machine. *IEEE Transactions on Automatic Control,* Vol.37, No.12, 1992), 1966-1970

LYONNET, P.: Maintenance Planning - Methods and Mathematics. (1991).

MABINI, M.C: Maintenance in the Service Environment: Organization and Resource Planning.(1991).

MANN, L: Maintenance management. (1976).

MANNE A.: Linear Programming and Sequential Decisions. *Management Science,* Vol.6, No.3, 1960), 259-267

MUNFORD, AG.: Comparison among certain inspection policies. *Management Science* Vol.27, 1981), 261-267

NAKAGAWA, T.A: Summary of Imperfect Preventive Maintenance Policies with Minimal Repair. *Operations Research,* Vol.14, No.3, 1980), 249-255

NAKAGAWA, T.A: Sequential imperfect preventive maintenance policies. *IEEE Transactions on Reliability,* Vol.37, No.3, 1988), 295-298

NGUYEN, D.G., MURTHY, D.N.P.,: Optimal preventive maintenance policies for repairable systems. *Operations Research* Vol.29, 1981), 1181-1194

PHAM, H., WANG, H., : Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research,* 94, 1996), 425-438

PIERSKALLA W.P, VOELKER, J.A: A Survey of Maintenance Models:The Control and Surveillance of Detriorating Systems. *Naval Research Logistics Quarterly,* Vol.23, 1976), 353-388

PINTELON L.: Performance Reporting and Decision Tools for Maintenance Management. (1990).

PUTERMAN M. L.: Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming. (1994).

RAHIM M A, BEN-DAYA M: Integrated Models in Production Planning, Inventory, Quality, and Maintenance. (2001).

RAHIM M.A, BEN-DAYA M.A: A generalized economic model for joint determination of production run, inspection schedules and control chart design. *International Journal of Production Research,* Vol.26, No.1, 1998), 277-289

RAHIM, M A: Joint Determination of Production Quantity, Inspection Schedule and Control Chart Design. *IIE Transactions,* Vol.26, No.6 1994), 2-11

RAHIM, M.A,: Joint Determination of Production Quantity, Inspection Schedule and Control Chart Design. *IIE transactions,* Vol.26, No.6, 1994), 2-11

REEVES, C.R.: A genetic algorithm for flow shop sequencing. *Computers and Operations Research,* Vol.22, 1995), 5-13

RICHARD CASSADY, ERHAN KUTANOGLU: Minimizing job tardiness using integrated preventive maintenance planning and production scheduling. *IIE Transactions* 35, 2003), 503-513

RISHEL, TD.: A model of the efect of scheduled maintenance on manufacturing system capacity. *Dissertation, The Pennsylvania State University*, 1991)

ROSS, S. M.: *Introduction to Stochastic Dynamic Programming.* Academic Press, New York. 1993.

SANJAY V. MEHTA, REHA UZSOY: Predictable scheduling of a single machine subject to breakdowns. *Int. J. Computer Integrated Manufacturing,* Vol.12, No.1, 1999), 15-38

SELEN W. AND HEUTS R.: Operational Production Planning in a Chemical Manufacturing Environment. *European Journal of Operational Research,* Vol.45, 1990), 33-46

SHERIF, V.S M.L SMITH: Optimun Maintenance Models for Systems Subject to Failure: A Review. *Naval Research Logistics Quarterly,* Vol.28, 1981), 47-74

SILVER, E.A., R, PETERSON, : Decision Systems for Inventory Management and Production Planning. (1985).

SILVER, E.A, PYKE, D.F: Inventory Management and Production Planning & Scheduling. (1998).

SORTRAKUL, N., H.L NACHTMANN, C.R. CASSADY: Genetic algorithms for integrated preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine. *Computers in Industry* 56, 2004), 161-168

TAGARAS, G: An Integrated Cost Model for the Joint Optimization of Process Control and Maintenance. *J.Opl Res.Soc,* Vol.39, No.8, 1988), 757-766

TAYLOR, B. W., E. R. CLAYTON, E. T. GRASSO: Simulation of a Production System with Machine Breakdowns Using Network Modeling. *Computers and Operations Research,* Vol.9, No.4 1982), 255-264

THOMAS W.SLOAN, J GEORGE SHANTHIKUMAR: Combined production and maintenance scheduling for a multiple-product, single-machine production system. *Production and Operations management,* Vol9, No.4, Winter 2000)

TULIKA CHAKRABORTY, B.C.GIRI, K.S. CHAUDHURI: Production lot sizing with process deterioration and machine breakdown under inspection schedule. *The International Journal of Management Science*, 2006)

VALDEZ-FLORES, C. FELDMAN, R.M.: A Survey of Preventive Maintenance Models for Stochastically Deteriorating Single Unit Systems. *Naval Research Logistics Quarterly,* Vol.36, 1989), 419-446

WEINSTEIN, L.,: Decision support for the integration of maintenance activities with fron end production planning activities. *Dissertation, The University of Kentucky*, 1996)

WILD, RAY: Production and Operations Management, Principles and Techniques. (1989).

YANO, C. A. H. L. LEE: Lot Sizing with Random Yields: A Review. *Operations Research,* Vol.43, No.2, 1995), 311-334

ZIMMERMAN, H.J., M.G. SOVEREIGN,: Quantitative Models for Production Management. (1974).

ΙΩΑΝΝΊΔΟΥ, ΙΩΆΝΝΑ: Προγραμματισμός Παραγωγής Σε Ένα Εργοστάσιο Αναψυκτικών. (2006).

ΠΑΠΠΗ, ΚΏΣΤΑ: *Προγραμματισμός Παραγωγής* Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε. Αθήνα.Β' Έκδοση 2006.

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Διαφορές μεταξύ μεταποιητικών και διακεκριμένων βιομηχανιών [Ashayeri et al. 1995, σελ.3] 13

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1: Συνδυασμένη στρατηγική παραγωγής και συντήρησης [Aghezzaf et al. (2007)] 42

Σχήμα 3.2: Μη τέλεια προληπτική συντήρηση με αυξανόμενο ρυθμό κινδύνου για εμφάνιση βλάβης [El-Ferik (2008)] 56

Σχήμα 3.3:Πορεία δειγματοληψίας υλοποίησης της παραγωγής [El-Ferik (2008)] 58

Σχήμα 3.4: Πορεία αποθέματος στην περίπτωση αποτυχίας πριν την προληπτική συντήρηση χωρίς χαμένες πωλήσεις [Kenne et al. (2007)] 66

Σχήμα 3.5: Πορεία πλεονάσματος στην περίπτωση αποτυχίας πριν την προληπτική συντήρηση με χαμένες πωλήσεις [Kenne et al. (2007)] 67

Σχήμα 3.6: Πορεία αποθέματος χωρίς αποτυχία της μηχανής πριν την προληπτική συντήρηση [Kenne et al. (2007)] 68

Σχήμα 3. 7: Αλγόριθμος για την επίλυση του μοντέλου [Kenne et al.(2007)] 70

Σχήμα 3.8: Αλλαγή διαδικασίας στο i-οστό διάστημα ελέγχου χωρίς να παρουσιαστεί μηχανική βλάβη κατά τη διάρκεια της παραγωγής [Chakraborty et al.(2006)] 73

Σχήμα 3.9: Αλλαγή διαδικασίας και εμφάνιση μηχανικής βλάβης στο i-οστό διάστημα ελέγχου [Chakraborty et al.(2006)] 74

Σχήμα 3.10: Εμφάνιση μηχανικής βλάβης στο i-οστό διάστημα ελέγχου όπως επίσης και ανικανοποίητης ζήτησης λόγω επιπρόσθετου χρόνου επισκευής [Chakraborty et al.(2006)] 74

Σχήμα 4.11: Παράδειγμα κωδικοποίησης χρωμοσώματος [Felix et al.(2006)] 93

Σχήμα 4.12: Παράδειγμα κωδικοποίησης εναλλακτικής δρομολόγησης εργασίας [Felix et al.(2006)] ... 94

Σχήμα 4.13: Παράδειγμα διασταύρωσης ενός απλού γενετικού αλγόριθμου [Felix et al.(2006)] 94

Σχήμα 4.14: Παράδειγμα διαδικασίας μετάλλαξης τύπου 1 [Felix et al.(2006)] 95

Σχήμα 4.15: Παράδειγμα διαδικασίας μετάλλαξης τύπου 2 [Felix et al.(2006)] 95

Σχήμα 4.16: Παράδειγμα κυρίαρχου γονιδίου σε ένα χρωμόσωμα [Felix et al.(2006)] 96

Σχήμα 4.17: Παράδειγμα χρωμοσώματος που περιλαμβάνει τη παράμετρο συντήρησης (S) [Felix et al.(2006)] 97