



**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΡΥΘΜΙΣΗΣ
ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ**

(Α.Σ.Ρ.Χ.Δ.Ε)

**Ψηφιοποίηση Δεδομένων και Βέλτιστος Χρονοπρογραμματισμός
Παραγωγής βιομηχανικής μονάδας παραγωγής κονιαμάτων**

Διπλωματική εργασία του

Αλέξανδρου Καραβασίλη

A.E.M.: 5161

Επιβλέπων: Καθηγητής Μιχαήλ Χ. Γεωργιάδης

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Μάιος 2023

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP) για τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής της βιομηχανικής μονάδας κονιαμάτων της εταιρείας ISOMAT. Η διαδικασία παραγωγής των κονιαμάτων αποτελείται από το στάδιο της ζύγισης και της ανάμιξης των υλικών και το στάδιο της συσκευασίας των προϊόντων και χαρακτηρίζεται από μεγάλο όγκο δεδομένων (συνταγολόγια παραγωγής, χρόνοι αλλαγής προϊόντων κλπ). Αρχικά, τα δεδομένα αυτά συγκεντρώθηκαν και ψηφιοποιήθηκαν σε κατάλληλη μορφή, ώστε να χρησιμοποιηθούν στην βελτιστοποίηση του προγραμματισμού παραγωγής. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο επικεντρώνεται στο στάδιο της συσκευασίας, το οποίο αποτελεί και το στάδιο της συμφόρησης της μονάδας και χαρακτηρίζεται ως ημί-συνεχής διεργασία. Η παραγωγική μονάδα αποτελείται από 4 γραμμές παραγωγής, μέσω των οποίων παράγονται 448 προϊόντα, ενώ για τη συσκευασία τους χρησιμοποιούνται 5 συσκευαστικές μηχανές. Το μοντέλο που αναπτύσσεται είναι άμεσης προτεραιότητας για ημί-συνεχή διεργασία και περιλαμβάνει όλους τους περιορισμούς που προκύπτουν από τη παραγωγή με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων σε χρονικό ορίζοντα μιας εβδομάδας. Το μοντέλο επιλύεται με τη βοήθεια του λογισμικού GAMS και συγκεκριμένα με χρήση του επιλυτή CPLEX. Αρχικά, ο χρονοπρογραμματισμός της παραγωγής μελετάται για 5 διαφορετικές εβδομαδιαίες ζητήσεις και στη συνέχεια εξετάζονται διάφορες μελέτες περίπτωσης. Συγκεκριμένα, και με δεδομένο ότι οι χρόνοι εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα, εξετάζεται η περίπτωση αύξησης και μείωσης τους, ώστε να ληφθεί υπόψη η κάλυψη σφαλμάτων που συμβαίνουν κατά την εναλλαγή προϊόντων. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά, αφού η μονάδα μπορεί να καλύψει θεωρητική αύξηση του χρόνου εναλλαγών έως κατά 50% και μείωση κατά 20%. Ακόμα, μελετάται η περίπτωση επέκτασης του ημερήσιου ωραρίου, κατά την οποία η μονάδα καλύπτει τη ζήτηση. Επιπλέον, εξετάζεται η περίπτωση κατάργησης των προτεραιοτήτων που θέτει η μονάδα στην παραγωγή των προϊόντων με βάση τη ζήτηση, ώστε να παραχθούν συγκεκριμένα προϊόντα πιο γρήγορα. Τέλος, εξετάστηκε και η περίπτωση αύξησης της ζήτησης κατά 30%. Καταληκτικά, παρατίθενται τα

συμπεράσματα της παρούσας μελέτης και γίνεται αναφορά σε προτάσεις για περαιτέρω έρευνα του συγκεκριμένου μοντέλου.

Abstract

This thesis aims to develop a Mixed-Integer Linear programming model (MILP) for the optimization of the production scheduling of an industrial mortar facility belonging to the ISOMAT company. The mortar production process consists of the weighing and mixing stage of the materials and the product packaging stage and it is characterized by a vast number of data (production recipes, product changeover times, etc). First these data were collected and efficiently digitalized in order to be efficiently utilized by the mathematical model which focuses on the packaging stage, which is characterized as a semi-continuous process. The production plant consists of 4 production lines, through which 448 products are produced, and 5 packaging machines are used for packaging. The proposed developed is of immediate priority for a semi-continuous process and includes all the constraints arising from the production in order to minimize the total changeover time between products within a time horizon of one week. The model is solved using the GAMS optimization tool, and specifically using the CPLEX solver. Initially the production scheduling is considered for 5 different weekly demands and then several case studies are studied. Since changeover times are uncertain parameters their effect on the production schedule was studied through a parametric analysis by increasing and decreasing their values. The results obtained are satisfactory, since the plant can successfully cope with an increase in changeover times time by 50% and a decrease by 20%. Furthermore, the case of extending the working hours, in which the plant meets the demand is studied. In addition, the case of disregarding the priorities set by the plant in order to produce certain products more quickly is considered. The case of a 30% increase in demand is additionally considered. Finally, the conclusions of this study are presented and suggestions for further research on this model are mentioned.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Μιχαήλ Γεωργιάδη, τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω τη παρούσα μελέτη και την αμέριστη υποστήριξη του καθ'όλη τη διάρκεια της διπλωματικής. Οι συμβουλές και η εμπειρία του συνέβαλαν στην επίτευξη ενός ποιοτικού αποτελέσματος.

Θα ήθελα, ακόμη, να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτωρ Μαρία-Ελένη Σαμουηλίδου για την πολύτιμη βοήθεια της στην καθοδήγηση μου κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω την εταιρεία ISOMAT A.B.E.E. για την ευκαιρία που μου έδωσε να συλλέξω τα κατάλληλα δεδομένα, για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης, με έμμισθη εργασία. Συγκεκριμένα, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Κωνσταντίνο Αβραμίδη, διευθυντή προγραμματισμού παραγωγής, που χωρίς τη βοήθεια του και το χρόνο που μου αφιέρωσε η μελέτη δε θα είχε έρθει εις πέρας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς και τους φίλους μου που με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1 Χρονοπρογραμματισμός παραγωγής	1
2. Παραγωγική Διαδικασία	13
2.1 Η εταιρεία ISOMAT S.A.....	13
2.2 Διαδικασία Παραγωγής.....	14
2.3 Δεδομένα Παραγωγικής Διαδικασίας.....	21
3. Μαθηματικό Μοντέλο	25
3.1 Ονοματολογία	25
3.2 Ορισμός προβλήματος.....	27
3.3 Μαθηματική Διατύπωση Μοντέλου	27
3.4 Το λογισμικό GAMS	33
4. Αποτελέσματα - Μελέτες Περίπτωσης	35
4.1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης εβδομαδιαίου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής	36
4.2 Αύξηση Χρόνου Εναλλαγών.....	47
4.3 Μείωση Χρόνου Εναλλαγών	51
4.4 Επέκταση Ωραρίου.....	55
4.5 Κατάργηση Προτεραιοτήτων	59
4.6 Αύξηση Ζήτησης.....	63
5. Συμπεράσματα – Προτάσεις	67
5.1 Συμπεράσματα	67
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	69
Βιβλιογραφία	70
Παράρτημα Α – Δεδομένα παραγωγικής διαδικασίας	74
Παράρτημα Β - Αποτελέσματα	95

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Μεταβολή του αποθέματος με τον χρόνο κατά την διαλείπουσα και την συνεχή διεργασία (Harjunkoski et al., 2014).....	3
Σχήμα 1.2: Διακριτή και συνεχής αναπαράσταση χρονικού ορίζοντα (Floudas και Lin, 2004).....	4
Σχήμα 1.3: Απεικόνιση δικτύου STN (Floudas και Lin, 2004).....	5
Σχήμα 1.4: Απεικόνιση δικτύου RTN (Floudas και Lin, 2004)	6
Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της μεταφοράς υλικών από τα φορτηγά σε σιλό αποθήκευσης μέσω κοχλιών	15
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση του αναδευτήρα	17
Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση της συσκευαστικής μηχανής.....	18
Σχήμα 2.4: Διάγραμμα ροής.....	20
Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση των μεταβλητών άμεσης προτεραιότητας $X_{p,pp,j,n}$	28
Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση του περιορισμού 3.3	28
Σχήμα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση των περιορισμών 3.12 και 3.13.....	32
Σχήμα 4.1: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης.....	37
Σχήμα 4.2: Ωρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση....	38
Σχήμα 4.3: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 2 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης.....	39
Σχήμα 4.4: Ωρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 2 ^η εβδομαδιαία ζήτηση...	40
Σχήμα 4.5: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 3 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης.....	41
Σχήμα 4.6: Ωρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 3 ^η εβδομαδιαία ζήτηση...	42

Σχήμα 4.7: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης.....	43
Σχήμα 4.8: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση...	44
Σχήμα 4.9: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 5 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης.....	45
Σχήμα 4.10: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 5 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.	46
Σχήμα 4.11: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης με αύξηση του χρόνου εναλλαγών	47
Σχήμα 4.12: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση με αύξηση του χρόνου εναλλαγών	48
Σχήμα 4.13: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 2 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης με αύξηση του χρόνου εναλλαγών	49
Σχήμα 4.14: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 2 ^η εβδομαδιαία ζήτηση με αύξηση του χρόνου εναλλαγών	50
Σχήμα 4.15: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης με μείωση του χρόνου εναλλαγών	51
Σχήμα 4.16: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση με μείωση του χρόνου εναλλαγών.....	52
Σχήμα 4.17: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης με μείωση του χρόνου εναλλαγών	53
Σχήμα 4.18: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση με μείωση του χρόνου εναλλαγών.....	54
Σχήμα 4.19: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης με επέκταση ωραρίου.....	55
Σχήμα 4.20: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση με	

επέκταση ωραρίου	56
Σχήμα 4.21: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης με επέκταση ωραρίου.....	57
Σχήμα 4.22: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση με επέκταση ωραρίου	58
Σχήμα 4.23: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 2 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης με κατάργηση προτεραιοτήτων.....	59
Σχήμα 4.24: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 2 ^η εβδομαδιαία ζήτηση με κατάργηση προτεραιοτήτων	60
Σχήμα 4.25: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης με κατάργηση προτεραιοτήτων.....	61
Σχήμα 4.26: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση με κατάργηση προτεραιοτήτων	62
Σχήμα 4.27: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 3 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης με αύξηση ζήτησης.....	63
Σχήμα 4.28: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 3 ^η εβδομαδιαία ζήτηση με αύξηση ζήτησης	64
Σχήμα 4.29: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 5 ^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης με αύξηση ζήτησης.....	65
Σχήμα 4.30: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 5 ^η εβδομαδιαία ζήτηση με αύξηση ζήτησης	66

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Διάμετροι κόκκου που διαχωρίζει το κάθε κόσκινο	15
Πίνακας 2.2: Μέγιστα κιλά που ζυγίζει κάθε ζυγός	16
Πίνακας 2.3: Γραμμές παραγωγής	21
Πίνακας 2.4: Κατηγοριοποίησή υλικών ανάλογα το αδρανές υλικό και τη διάμετρο κόκκου.....	23
Πίνακας 4.1: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής, 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση ..	38
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου, 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	39
Πίνακας 4.3: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής, 2 ^η εβδομαδιαία ζήτηση ..	40
Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου, 2 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	40
Πίνακας 4.5: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής, 3 ^η εβδομαδιαία ζήτηση ..	42
Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου, 3 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	43
Πίνακας 4.7: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής, 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση ..	44
Πίνακας 4.8: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου, 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	44
Πίνακας 4.9: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής, 5 ^η εβδομαδιαία ζήτηση ..	46
Πίνακας 4.10: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου, 5 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	46
Πίνακας 4.11: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με αύξηση του χρόνου εναλλαγών, 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	48
Πίνακας 4.12: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με αύξηση του χρόνου εναλλαγών, 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	49
Πίνακας 4.13: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με αύξηση του χρόνου εναλλαγών, 2 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	50
Πίνακας 4.14: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με αύξηση του χρόνου εναλλαγών, 2 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	50
Πίνακας 4.15: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με μείωση του χρόνου	

εναλλαγών, 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	52
Πίνακας 4.16: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με μείωση του χρόνου εναλλαγών, 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	52
Πίνακας 4.17: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με μείωση του χρόνου εναλλαγών, 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	54
Πίνακας 4.18: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με μείωση του χρόνου εναλλαγών, 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	54
Πίνακας 4.19: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με επέκταση ωραρίου, 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	56
Πίνακας 4.20: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με επέκταση ωραρίου, 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	57
Πίνακας 4.21: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με επέκταση ωραρίου, 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	58
Πίνακας 4.22: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με επέκταση ωραρίου, 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	58
Πίνακας 4.23: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με κατάργηση προτεραιοτήτων, 2 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	60
Πίνακας 4.24: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με κατάργηση προτεραιοτήτων, 2 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	60
Πίνακας 4.25: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με κατάργηση προτεραιοτήτων, 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	62
Πίνακας 4.26: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με κατάργηση προτεραιοτήτων, 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	62
Πίνακας 4.27: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με αύξηση ζήτησης, 3 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	64

Πίνακας 4.28: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με αύξηση ζήτησης, 3 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	64
Πίνακας 4.29: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με αύξηση ζήτησης, 5 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	66
Πίνακας 4.30: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με αύξηση ζήτησης, 5 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	66
Πίνακας A 1: Γραμμή συσκευασίας, ρυθμός συσκευασίας και βάρος συσκευασίας για κάθε προϊόν.....	75
Πίνακας A 2: 1η εβδομαδιαία ζήτηση.....	85
Πίνακας A 3: 2η εβδομαδιαία ζήτηση.....	87
Πίνακας A 4: 3η εβδομαδιαία ζήτηση.....	89
Πίνακας A 5: 4η εβδομαδιαία ζήτηση.....	91
Πίνακας A 6: 5η εβδομαδιαία ζήτηση.....	93
Πίνακας B 1: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα, 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	95
Πίνακας B 2: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα, 2 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	95
Πίνακας B 3: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα, 3 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	95
Πίνακας B 4: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα, 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	95
Πίνακας B 5: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα, 5 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	95

Πίνακας Β 6: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με αυξημένους χρόνους εναλλαγής, 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	96
Πίνακας Β 7: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με αυξημένους χρόνους εναλλαγής, 2 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	96
Πίνακας Β 8: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με μειωμένους χρόνους εναλλαγής, 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	96
Πίνακας Β 9: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με μειωμένους χρόνους εναλλαγής, 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	96
Πίνακας Β 10: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με επέκταση ωραρίου, 1 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	96
Πίνακας Β 11: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με επέκταση ωραρίου, 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση.....	96
Πίνακας Β 12: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με κατάργηση προτεραιοτήτων, 2 ^η εβδομαδιαία ζήτηση	97
Πίνακας Β 13: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με κατάργηση προτεραιοτήτων, 4 ^η εβδομαδιαία ζήτηση	97
Πίνακας Β 14: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με αύξηση ζήτησης, 3 ^η εβδομαδιαία ζήτηση	97
Πίνακας Β 15: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με αύξηση ζήτησης, 5 ^η εβδομαδιαία ζήτηση	97

1. Εισαγωγή

1.1 Χρονοπρογραμματισμός παραγωγής

Στις σύγχρονες βιομηχανίες, η πίεση για την αύξηση της παραγωγικότητας και τη μείωση του κόστους είναι πιο έντονη από ποτέ. Αυτή η πίεση οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπως ότι οι επιχειρήσεις ανταγωνίζονται μεταξύ τους σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι βιομηχανίες βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην τεχνολογία και στην καινοτομία, και η σταθερή αναβάθμιση και βελτίωση του εξοπλισμού και των διαδικασιών παραγωγής απαιτείται για να διατηρηθεί η ανταγωνιστικότητα των βιομηχανιών. Επιπλέον, οι μεγάλες μεταβολές στην παγκόσμια οικονομία, έχουν ενισχύσει την ανάγκη για πιο αποδοτικές και ευέλικτες διαδικασίες παραγωγής. Για να ανταπεξέλθουν σε αυτές τις προκλήσεις, ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής και η βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία των βιομηχανιών στη σύγχρονη ανταγωνιστική αγορά. Ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει την ανάλυση των χρονικών αναγκών για την παραγωγή ενός προϊόντος, το σχεδιασμό της ροής εργασιών και τη διαχείριση των πόρων, με στόχο τη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας και τη μείωση του κόστους. Η παραγωγή απαιτεί συνήθως πολύπλοκες διαδικασίες και είναι απαραίτητη η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος και η χρήση υπολογιστικών εργαλείων για την καλύτερη λήψη αποφάσεων.

Σύμφωνα με τον Pinedo (2012), ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την κατανομή πόρων, όπως ανθρώπινο δυναμικό, πρώτες ύλες, μηχανές κ.α., σε εργασίες για μια συγκεκριμένη περίοδο τόσο στον τομέα της παραγωγής όσο και στον τομέα των υπηρεσιών. Ο κύριος στόχος του χρονοπρογραμματισμού είναι η βελτιστοποίηση των βιομηχανικών δραστηριοτήτων με παράλληλη επίτευξη ενός ή περισσότερων στόχων. Η διαδικασία αυτή είναι πολύπλοκη και περιλαμβάνει την αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων παραγωγής, τα οποία μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν προηγούμενα αποτελέσματα χρονοπρογραμματισμού.

Ο χρονοπρογραμματισμός είναι ένα δύσκολο έργο που απαιτεί τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον τρόπο χρήσης περιορισμένων πόρων, την ανάθεση καθηκόντων σε μια χρονική περίοδο και την τήρηση συγκεκριμένων οδηγιών επεξεργασίας για την παραγωγή ενός συνόλου προϊόντων εντός ενός συγκεκριμένου χρονικού πλαισίου. Η φύση αυτών των αποφάσεων, όπως η ανάθεση εξοπλισμού και η κατανομή διεργασιών, περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό δυνατοτήτων και συνεπώς καθίσταται ένα δύσκολο πρόβλημα προς επίλυση από άποψη υπολογιστικής πολυπλοκότητας (Floudas και Lin, 2004).

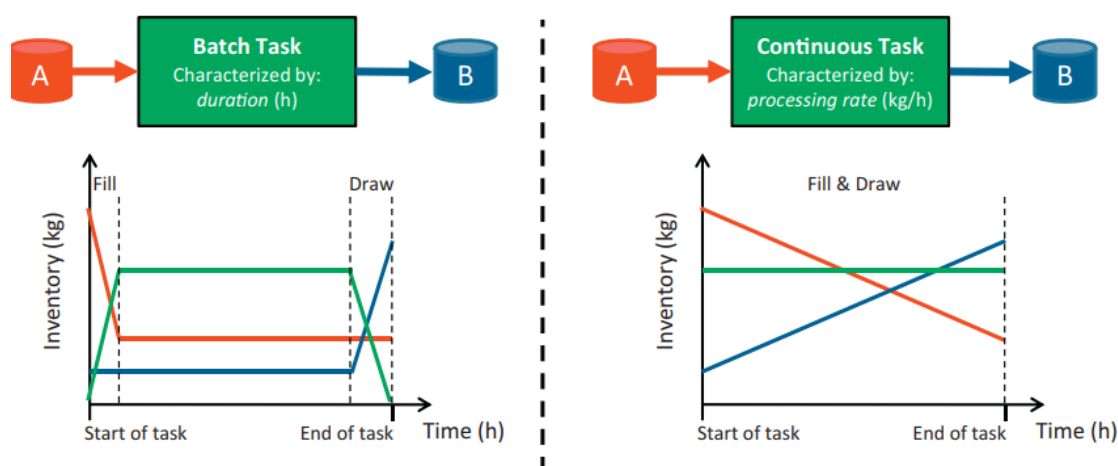
Για τον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής είναι σημαντικό να είναι γνωστό το είδος της παραγωγικής διαδικασίας που χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες. Ειδικότερα, η παραγωγική διαδικασία μπορεί ταξινομηθεί σε συνεχή, ημι-συνεχή και διαλείπουσας λειτουργίας. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ συνεχής και διαλείπουσας λειτουργίας. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή του κάθε είδους παραγωγικής διαδικασίας (Koranos, 2010).

Η παραγωγή που περιέχει συνεχείς διεργασίες, περιλαμβάνει μια σταθερή ροή παραγωγής προϊόντων, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σταθερή παραγωγή με αυξημένη οικονομική αποδοτικότητα, ιδίως για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων παρόμοιων προϊόντων. Ωστόσο, σε αντίθεση με τη διαλείπουσα λειτουργία, η συντήρηση των γραμμών παραγωγής και οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά του προϊόντος, όπως το μέγεθος, το χρώμα ή η ποιότητα, πρέπει να γίνονται σε πραγματικό χρόνο, με αποτέλεσμα να χρειάζεται ειδική μεταχείριση (Koranos, 2010).

Η ημι-συνεχής διεργασία, προσφέρει μια πιο ευέλικτη λειτουργία για ιδιαίτερα δυναμικά και αβέβαια περιβάλλοντα. Οι ημι-συνεχείς διεργασίες χαρακτηρίζονται από το ρυθμό επεξεργασίας τους, που λειτουργεί συνεχώς με περιοδικές εκκινήσεις και τερματισμούς για συχνή εναλλαγή προϊόντων. Οι περισσότερες βιομηχανικές μονάδες συνδυάζουν συνεχείς και διαλείπουσες διεργασίες για την επεξεργασία των προϊόντων, λειτουργώντας έτσι σε ημι-συνεχή λειτουργία, δεδομένου ότι η παραγωγή γίνεται πιο ευέλικτη και ο εξοπλισμός μπορεί να αξιοποιηθεί αποδοτικότερα. (Koranos, 2010)

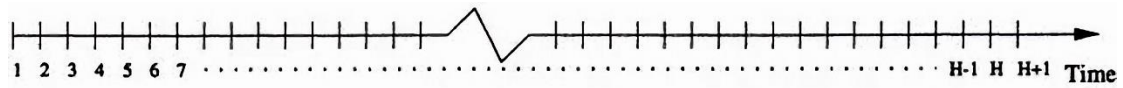
Στη διαλείπουσα λειτουργία, κατά τη παραγωγή των προϊόντων, θα πρέπει μια διεργασία να ολοκληρώνεται αφού ξεκινήσει η επόμενη. Η συγκεκριμένη λειτουργία

είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε βιομηχανίες, στις οποίες η ζήτηση χαρακτηρίζεται ως απρόβλεπτη. Επιπλέον, η διαλείπουσα λειτουργία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αρχικής κεφαλαιακής δαπάνης, επειδή μια γραμμή παραγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πολλών προϊόντων (Koranos, 2010).

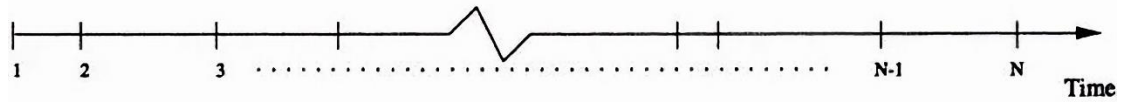


Σχήμα 1.1: Μεταβολή του αποθέματος με τον χρόνο κατά την διαλείπουσα και την συνεχή διεργασία (Harjunkoski et al., 2014)

Το βασικό ζήτημα για τα προβλήματα χρονοπρογραμματισμού διεργασιών αφορά τον τρόπο αναπαράστασης του χρόνου. Οι υπάρχουσες διατυπώσεις χρονοπρογραμματισμού μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες, μοντέλα διακριτής αναπαράστασης (discrete time representation) και συνεχούς αναπαράστασης του χρόνου (continuous time representation). Στα μοντέλα χρονοπρογραμματισμού διεργασιών με διακριτή αναπαράσταση του χρόνου, ο χρόνος διαιρείται σε έναν αριθμό χρονικών διαστημάτων ίδιας διάρκειας και γεγονότα, όπως η έναρξη και η λήξη μιας διεργασίας, συνδέονται με τα όρια αυτών των χρονικών διαστημάτων. Τα χρονικά διαστήματα πρέπει να είναι αρκετά μικρά, όπως για παράδειγμα ο μεγαλύτερος κοινός διαιρέτης των χρόνων επεξεργασίας. Κατά τη συνεχή αναπαράσταση του χρόνου, οι διεργασίες λαμβάνουν χώρα σε οποιοδήποτε σημείο στο συνεχές πεδίο του χρόνου. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου εξαρτάται από το είδος της διεργασίας, τα δεδομένα του προβλήματος και από την αντικειμενική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση. Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η διακριτή και συνεχής αναπαράσταση του χρόνου (Floudas και Lin, 2004).



Discrete-time representation



Continuous-time representation

Σχήμα 1.2: Διακριτή και συνεχής αναπαράσταση χρονικού ορίζοντα (Floudas και Lin, 2004)

Ανάλογα με τη διαχείριση των παρτίδων και ειδικότερα το μέγεθος των παρτίδων, ο προγραμματισμός ταξινομείται σε 2 κατηγορίες:

Απεικόνιση δικτύου (Network-Based Formulation)

Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι προσεγγίσεις που πραγματοποιούνται αντιμετωπίζουν ταυτόχρονα το πρόβλημα του μεγέθους της παρτίδας και του χρονοπρογραμματισμού. Ωστόσο, αυτές οι προσεγγίσεις συχνά καταλήγουν σε μεγάλα μοντέλα που περιορίζουν την εφαρμογή τους σε διεργασίες με μικρό αριθμό εργασιών και σύντομο χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού. Συνεπώς, οι προσεγγίσεις αυτές έχουν πρακτικούς περιορισμούς λόγω του μεγάλου μεγέθους τους και είναι κατάλληλες μόνο για μικρότερες και απλούστερες διεργασίες (Κοραπος, 2010).

Απεικόνιση παρτίδων (Batch-Based Formulation)

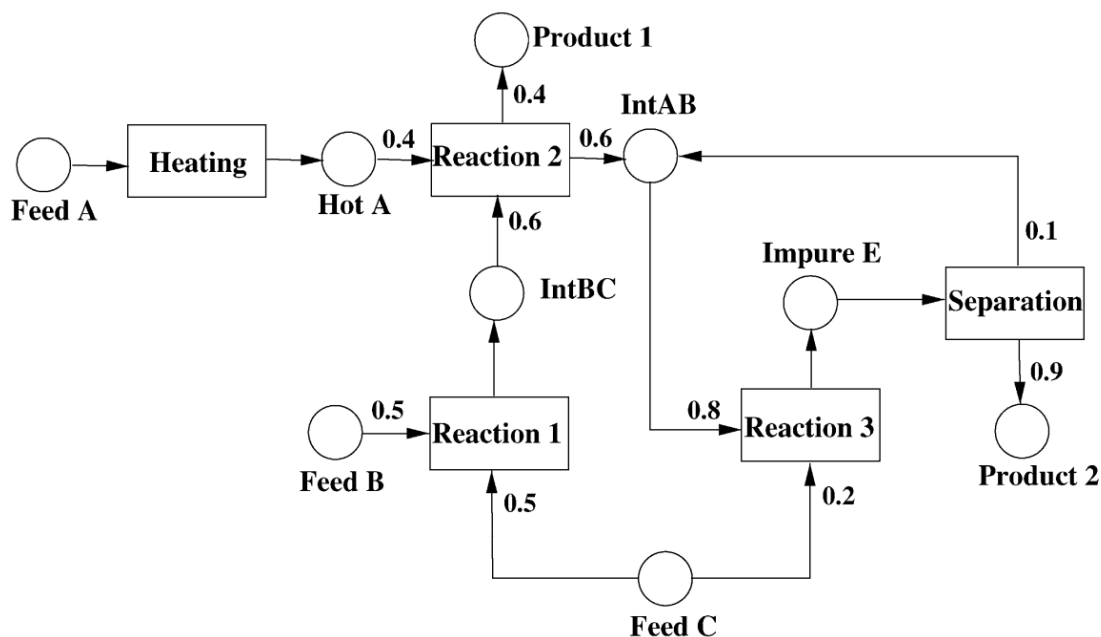
Η απεικόνιση παρτίδων χρησιμοποιείται για διεργασίες ενός σταδίου, πολλαπλών σταδίων και πολλαπλών χρήσεων, όπου οι παρτίδες υποβάλλονται σε διαδοχική επεξεργασία, κατά την οποία δεν επιτρέπεται η διάσπαση και η ανάμειξη των παρτίδων, ενώ δεν υπάρχουν ρεύματα ανακύκλωσης. Σε αυτές τις προσεγγίσεις, ο αριθμός και το μέγεθος των παρτίδων είναι γνωστά εκ των προτέρων. Ο στόχος είναι η βελτιστοποίηση ενός κριτηρίου με τη μετατροπή της ζήτησης του προϊόντος σε μεμονωμένες παρτίδες, ακολουθούμενη από την κατανομή των πόρων παραγωγής στις παρτίδες με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται ευρέως στις βιομηχανίες και μπορεί να χειριστεί μεγαλύτερα πρακτικά προβλήματα που περιλαμβάνουν έναν σημαντικό αριθμό εργασιών παρτίδων που σχετίζονται με

διαφορετικά ενδιάμεσα ή τελικά προϊόντα (Koranos, 2010).

Στην απεικόνιση δικτύου, για την αναπαράσταση του προβλήματος χρησιμοποιούνται τα State-Task Network (STN) και Resource-Task Network (RTN). Αυτές οι αναπαραστάσεις διεργασιών παρέχουν έναν δομημένο τρόπο περιγραφής της κατάστασης του συστήματος των εργασιών που πρέπει να εκτελεστούν και των διαθέσιμων πόρων για την ολοκλήρωση αυτών των εργασιών (Koranos, 2010).

State-Task Network (STN)

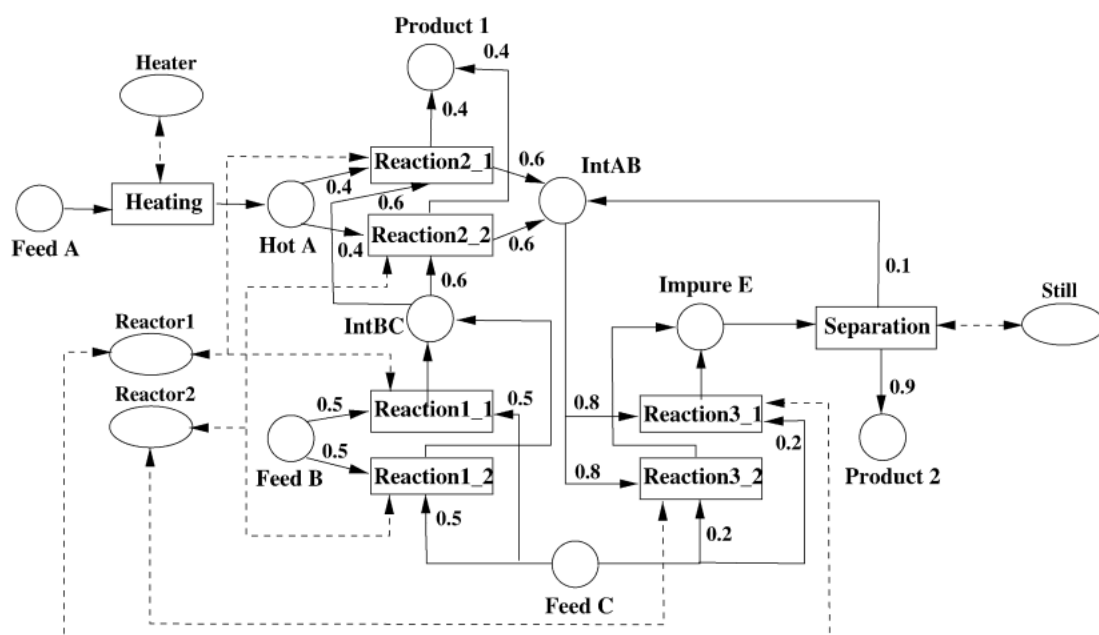
Οι Kondili et al. (1993) πρότειναν ένα γενικό πλαίσιο του State-Task Network για την αναπαράσταση διεργασιών. Η αναπαράσταση STN μιας διεργασίας είναι ένα γράφημα με δύο τύπους διακριτών κόμβων, τους κόμβους κατάστασης που συμβολίζονται με έναν κύκλο και αντιπροσωπεύουν πρώτες ύλες, ενδιάμεσα υλικά ή τελικά προϊόντα, και τους κόμβους εργασιών που συμβολίζονται με ένα ορθογώνιο πλαίσιο και αντιπροσωπεύουν μια λειτουργία. Το κλάσμα μιας κατάστασης που καταναλώνεται ή παράγεται από μια εργασία, αν δεν ισούται με ένα, δίνεται δίπλα στο τόξο που συνδέει τον αντίστοιχο κόμβο κατάστασης και εργασίας. Στο Σχήμα 1.3 δίνεται ένα παράδειγμα STN Δικτύου (Floudas και Lin, 2004).



Σχήμα 1.3: Απεικόνιση δικτύου STN (Floudas και Lin, 2004)

Resource-Task Network (RTN)

Ο Pantelides (1994), επέκτεινε το μοντέλο του State-Task Network στο Resource-Task Network, το οποίο προσφέρει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αναπαράσταση του εξοπλισμού επεξεργασίας, της αποθήκευσης, της μεταφοράς υλικών και των βοηθητικών παροχών ως πόρους. Επιπλέον, οι εργασίες που συμβαίνουν σε διαφορετικές μονάδες, αντιμετωπίζονται ως διαφορετικές εργασίες. Στο Σχήμα 1.4 δίνεται ένα παράδειγμα RTN Δικτύου (Floudas και Lin, 2004).



Σχήμα 1.4: Απεικόνιση δικτύου RTN (Floudas και Lin, 2004)

Η ικανότητα διαχείρισης δραστηριοτήτων που εξαρτώνται από τη σειρά με την οποία εκτελούνται, όπως οι αλλαγές ή οι μεταφορές μεταξύ εργασιών, είναι ζωτικής σημασίας για τη επίλυση του προβλήματος του χρονοπρογραμματισμού. Η χρήση τέτοιων μαθηματικών μοντέλων που βασίζονται στην προτεραιότητα (precedence-based models) είναι η πιο αποτελεσματική προσέγγιση όταν υπάρχουν αλλαγές ή μεταφορές στο σύστημα που εξαρτώνται από τη σειρά, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. Συγκεκριμένα τα μαθηματικά μοντέλα διακρίνονται σε 3 κατηγορίες (Aquirre et al., 2017):

Μοντέλα γενικής προτεραιότητας (General Precedence Models)

Στο τομέα της βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού, το μοντέλο της γενικής προτεραιότητας έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την αποτελεσματική επίλυση διαφόρων τύπων προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού. Το συγκεκριμένο μοντέλο στηρίζεται στο γεγονός ότι η μελέτη της προτεραιότητας των διεργασιών πραγματοποιείται σε σχέση με όλες τις διεργασίες και όχι με την αμέσως προηγούμενη. Τα γενικά μοντέλα προτεραιότητας απαιτούν λιγότερες μεταβλητές, οπότε είναι πιο αποδοτικά από υπολογιστική άποψη (Georgiadis et al., 2019).

Μοντέλα άμεσης προτεραιότητας (Immediate Precedence Models)

Αντίθετα με τα μοντέλα γενικής προτεραιότητας, η έννοια της άμεσης προτεραιότητας διερευνά τη σχέση μεταξύ κάθε ζεύγους διαδοχικών εργασιών χωρίς να εξετάζει αν οι εντολές ανατίθενται ή όχι στην ίδια μονάδα (Korpanos, 2010).

Μοντέλα γενικής προτεραιότητας για κάθε επιμέρους συσκευή (Unit-Specific General Precedence Models)

Τα μοντέλα γενικής προτεραιότητας για κάθε επιμέρους συσκευή βασίζονται στην έννοια της άμεσης προτεραιότητας, αλλά με τη διαφορά ότι λαμβάνουν υπόψη μόνο την άμεση προτεραιότητα των εργασιών που έχουν ανατεθεί στην ίδια μονάδα (Korpanos, 2010).

Το πρόβλημα του προγραμματισμού παραγωγής έχει προσεγγιστεί με διάφορα μαθηματικά μοντέλα και δεν περιορίζεται μόνο στην επίλυση ακαδημαϊκών παραδειγμάτων. Ερευνητές έχουν δείξει μεγάλο ενδιαφέρον για την αντιμετώπιση βιομηχανικών περιπτώσεων, χρησιμοποιώντας ένα ευρύ φάσμα προσεγγίσεων και μεθόδων μοντελοποίησης, καλύπτοντας διαφορετικούς βιομηχανικούς τομείς.

Οι Lin και Floudas (2002) εισήγαγαν ένα μαθηματικό μοντέλο MILP για το προγραμματισμό σε συνεχείς μονάδες παραγωγής πολλαπλών προϊόντων. Ανέπτυξαν, επίσης, έναν αλγόριθμο (decomposition methodology) για τον χειρισμό βιομηχανικών περιπτώσεων μεγάλης κλίμακας. Εφάρμοσαν αυτή τη προσέγγιση σε μια πραγματική μελέτη ενός χημικού εργοστασίου με 3 στάδια, 35 τελικά προϊόντα και 10 μηχανήματα εξοπλισμού. Ανάλογα με τη πολυπλοκότητα του προβλήματος, ο υπολογιστικός χρόνος

που απαιτείται για τη προτεινόμενη προσέγγιση κυμαίνεται από 15 λεπτά έως 7 ώρες.

Οι Mendez και Cerda (2002) ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο MILP βασισμένο σε αναπαράσταση συνεχούς χρόνου, το οποίο λαμβάνει υπόψη τους εξαρτώμενους από την ακολουθία χρόνους αλλαγής και τις ημερομηνίες λήξης των προϊόντων. Ενσωμάτωσαν επίσης αποτελεσματικούς κανόνες προπαραγγελίας για την επίλυση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού σε βιομηχανικά σενάρια. Το μοντέλο δοκιμάστηκε στον προγραμματισμό έως και 18 τελικών προϊόντων που παράγονται από πέντε ενδιάμεσα προϊόντα σε πέντε ημέρες και ο απαιτούμενος χρόνος υπολογισμού μειώθηκε σταδιακά σε λιγότερο από 10 δευτερόλεπτα για μικρά προβλήματα και έως και 10 λεπτά για μεγαλύτερα, με τη χρήση των προτεινόμενων μεθόδων και κανόνων προπαραγγελίας.

Οι Giannelos και Georgiadis (2003) ανέπτυξαν ένα μοντέλο MILP για την αντιμετώπιση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού σε γρήγορες διαδικασίες παραγωγής καταναλωτικών αγαθών. Το προτεινόμενο μοντέλο MILP βασίστηκε στην αναπαράσταση της διαδικασίας STN και χρησιμοποιήθηκε μια διατύπωση συνεχούς χρόνου για να μειωθεί η υπολογιστική πολυπλοκότητα του προβλήματος. Η διατύπωση δοκιμάστηκε σε μια μεσαίου μεγέθους βιομηχανική μονάδα παραγωγής καταναλωτικών αγαθών, εξετάζοντας περιπτώσεις με έως 35 τελικά προϊόντα και 5 γραμμές συσκευασίας. Δημιουργήθηκαν εφικτά χρονοδιαγράμματα σε υπολογιστικούς χρόνους μικρότερους από 5 λεπτά.

Οι Entrup et al. (2005) παρουσίασαν 3 διαφορετικές διατυπώσεις MILP για προβλήματα σχεδιασμού και προγραμματισμού στο στάδιο της συσκευασίας της παραγωγής γιαουρτιού. Χρησιμοποιήθηκε μια συνδυασμένη διακριτή-συνεχής αναπαράσταση, ενώ λήφθηκε υπόψιν και η διάρκεια ζωής των προϊόντων.

Οι Bongers και Bakker (2006) δημιούργησαν ένα απλουστευμένο μοντέλο ενός εργοστασίου τροφίμων με βάση ένα μεσαίου μεγέθους εργοστάσιο παραγωγής παγωτού. Αυτό το πέτυχαν αναπτύσσοντας ένα μοντέλο χρονοπρογραμματισμού πολλαπλών σταδίων που περιέγραφε την υποδομή του εργοστασίου, τα προϊόντα που παράγονταν και τον τρόπο λειτουργίας του εργοστασίου. Ο στόχος ήταν να μεταφραστεί η πολυπλοκότητα της εγκατάστασης και των λειτουργιών σε ένα

απλουστευμένο, αλλά ρεαλιστικό μοντέλο χρονοπρογραμματισμού πολλαπλών σταδίων. Ο προγραμματισμός του εργοστασίου στο σύνολό του επέτρεψε σημαντική αύξηση της διαθέσιμης συνολικής δυναμικότητας του εργοστασίου και ήταν σε θέση να αυξήσει τη χωρητικότητα κατά 10% έως και 30%.

Οι Westerlund et al. (2007) παρουσίασαν μια διατύπωση για την αντιμετώπιση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού εγκαταστάσεων πολλαπλών προϊόντων με περιορισμούς ενδιάμεσης αποθήκευσης. Σε αντίθεση με τις προσεγγίσεις που στοχεύουν στη βέλτιστη λύση, η εστίασή τους είναι στην επίτευξη λύσεων υψηλής ποιότητας σε εύλογο υπολογιστικό χρόνο, προσανατολισμένη σε βιομηχανικές εφαρμογές. Σε σύγκριση με την προσέγγιση διακριτού χρόνου, το μεικτό μοντέλο διακριτού-συνεχούς χρόνου προσφέρει καλύτερες λύσεις με μικρότερο υπολογιστικό κόστος.

Οι Doganis και Sarimveis (2007) έλυσαν το πρόβλημα προγραμματισμού μιας ενιαίας γραμμής παραγωγής γιαουρτιού λαμβάνοντας υπόψη τα αποθέματα, το ανθρώπινο δυναμικό και τους περιορισμούς δυναμικότητας. Το μοντέλο δοκιμάστηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα από μια γραμμή παραγωγής γιαουρτιού μιας γαλακτοβιομηχανίας, όπου παρήχθησαν 18 προϊόντα και εξήχθησαν συνολικά βέλτιστα χρονοδιαγράμματα σε λιγότερο από 15 δευτερόλεπτα.

Οι Koranos et al. (2011) ανέπτυξαν μια νέα διατύπωση που χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό διακριτών και συνεχών μεταβλητών για το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού μιας μονάδας παραγωγής γιαουρτιού. Υιοθετήθηκε η έννοια των οικογενειών προϊόντων και εφαρμόστηκε στη διατύπωση του προβλήματος. Ο προγραμματισμός του σταδίου συσκευασίας αντιμετωπίστηκε λεπτομερώς, ενώ οι περιορισμοί του ισοζυγίου μάζας που σχετίζονται με το στάδιο παραγωγής αναπαρίστανται με τη χρήση διακριτού χρόνου. Το μοντέλο αποσκοπούσε στην κατανομή 93 τελικών προϊόντων που ομαδοποιούνται σε 23 οικογένειες προϊόντων μεταξύ τεσσάρων γραμμών συσκευασίας. Για να εξασφαλιστεί η εφικτότητα και να ληφθούν υπόψη ρεαλιστικοί περιορισμοί διαφόρων πόρων, όπως το ανθρώπινο δυναμικό, το μοντέλο περιλάμβανε νέους περιορισμούς πόρων που επέτρεπαν τη δημιουργία βέλτιστων λύσεων εντός 10 λεπτών, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

Οι Stefansson et al. (2011) μελέτησαν μια μεγάλης κλίμακας βιομηχανική μελέτη περίπτωσης από μια φαρμακευτική εταιρεία, η οποία περιελάμβανε 73 προϊόντα και 35 οικογένειες προϊόντων. Προτάθηκαν μαθηματικά πλαίσια που βασίζονται τόσο σε αναπαραστάσεις διακριτού όσο και συνεχούς χρόνου και παρουσιάστηκε η σύγκρισή τους. Το πρόβλημα αναλύθηκε σε δύο υπό προβλήματα και το στάδιο που αποτελεί το κύριο σημείο συμφόρησης της παραγωγής προγραμματίζεται πρώτο. Η διατύπωση σε συνεχή χρόνο μπορεί να παρέχει καλύτερες λύσεις ακόμη και για μεγαλύτερες περιπτώσεις προβλημάτων.

Οι Li et al. (2012) εξέτασαν το πρόβλημα του προγραμματισμού των βιομηχανιών παραγωγής χάλυβα, εστιάζοντας κυρίως στη διαδικασία συνεχούς χύτευσης χάλυβα, καθώς αποτελεί το κύριο σημείο συμφόρησης της παραγωγής. Προτάθηκε ένα νέο μοντέλο MILP συνεχούς χρόνου, το οποίο στηρίχθηκε σε περιορισμούς τεχνολογικών απαιτήσεων, προκειμένου να διασφαλιστεί η παραγωγή εφικτών χρονοδιαγραμμάτων.

Οι Koranos et al. (2012) εξέτασαν το πρόβλημα του προγραμματισμού παραγωγής για μια βιομηχανική μονάδα παγωτού. Επικεντρώθηκαν σε μια πραγματική περίπτωση που περιλάμβανε 8 τελικά προϊόντα παγωτού, έξι δοχεία παλαίωσης και δύο γραμμές συσκευασίας. Οι ερευνητές κατάφεραν να βελτιστοποιήσουν όλα τα στάδια επεξεργασίας ταυτόχρονα και κατέληξαν σε βέλτιστες λύσεις για 50 περιπτώσεις του προβλήματος. Για την αντιμετώπιση ζητημάτων χρονοπρογραμματισμού σε βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων μεγάλης κλίμακας, πρότειναν μια στρατηγική αποσύνθεσης με βάση τον μεικτό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό (MILP). Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική, δημιούργησαν λύσεις υψηλής ποιότητας για μεγαλύτερες περιπτώσεις που αφορούσαν έως και 24 τελικά προϊόντα.

Οι Moniz et al. (2014) ανέπτυξαν ένα μοντέλο χρονοπρογραμματισμού με τη χρήση μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP). Το μοντέλο δημιουργήθηκε για την επίλυση ενός πραγματικού προβλήματος χρονοπρογραμματισμού που αφορούσε 35 μονάδες παραγωγής παρτίδων. Το μοντέλο δοκιμάστηκε σε μια βιομηχανική μονάδα που είχε 4 προϊόντα, 9 κοινές μονάδες επεξεργασίας και 40 εργασίες. Οι λύσεις που παρήγαγε το μοντέλο ήταν αποδεκτές από

άποψη υπολογιστικών χρόνων, ενώ για μεγαλύτερα προβλήματα το μοντέλο παρείχε καλής ποιότητας λύσεις σε 1 ώρα.

Οι Touil et al. (2016) δημιούργησαν ένα μοντέλο MILP για μικρή γαλακτοβιομηχανία, με στόχο την ελαχιστοποίηση της διάρκειας της παραγωγικής διαδικασίας. Συγκεκριμένα, προγραμματίστηκαν τα στάδια της ομογενοποίησης, της παστερίωσης και της συσκευασίας για τέσσερα διαφορετικά προϊόντα χρησιμοποιώντας επτά γραμμές συσκευασίας, δύο μονάδες παστερίωσης και έναν ομογενοποιητή. Το μοντέλο παρήγαγε αποτελεσματικές λύσεις και βέλτιστο χρονοπρογραμματισμό σε μόλις 2 λεπτά χρόνου.

Οι Georgiadis et al. (2018) διεξήγαγαν μια μελέτη σχετικά με τον τρόπο προγραμματισμού των σταδίων αποστείρωσης και συσκευασίας σε μια βιομηχανία κονσερβοποιημένων ψαριών. Χρησιμοποίησαν έναν αλγόριθμο βασισμένο στον μεικτό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό (MILP) για να αντιμετωπίσουν το υψηλό υπολογιστικό κόστος. Ο αλγόριθμος λειτουργεί προσθέτοντας ένα προς ένα τα προϊόντα μέχρι να δημιουργηθεί το τελικό πρόγραμμα. Χρησιμοποιήθηκε ένα γενικό μοντέλο προτεραιότητας για τη περιγραφή των διεργασιών παρτίδας (αποστείρωση) και των συνεχών διεργασιών (συσκευασία) του εργοστασίου. Έτσι δημιουργήθηκαν σχεδόν βέλτιστα χρονοδιαγράμματα και για τα δύο στάδια μιας μεγάλης κλίμακας περίπτωσης προβλήματος, η οποία περιλάμβανε 100 τελικά προϊόντα και 362 παρτίδες προϊόντων, σε λιγότερο από 20 λεπτά.

Οι Elekidis et al. (2019) διερεύνησαν το πρόβλημα του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού μιας βιομηχανίας καταναλωτικών αγαθών μεγάλης κλίμακας. Παρουσιάστηκε ένα μοντέλο με βάση την άμεση-γενική προτεραιότητα, εστιάζοντας στο στάδιο της συσκευασίας. Περιορισμοί που σχετίζονται με προηγούμενα στάδια λήφθηκαν υπόψιν για τη μοντελοποίηση του προβλήματος. Εξετάστηκαν διάφορες πραγματικές μελέτες περίπτωσης που περιλαμβάνουν έως και 6 γραμμές συσκευασίας και 130 τελικά προϊόντα.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε μια βιομηχανική μονάδα που παράγει κονιάματα. Τα προϊόντα παράγονται με συνεχές ρυθμό, ενώ γίνονται συχνές παύσεις λειτουργίας των γραμμών παραγωγής για τον καθαρισμό τους και την εναλλαγή των προϊόντων. Ο στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων (changeover time), για το οποίο αναπτύχθηκε ένα MILP μοντέλο άμεσης προτεραιότητας (Immediate Precedence Model). Στη δεύτερη ενότητα, πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας των κονιαμάτων, ενώ παράλληλα δίνονται τα δεδομένα για την επίλυση του προβλήματος. Στην Τρίτη ενότητα, περιγράφεται αναλυτικά το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος, καθώς και οι περιορισμοί που περιλαμβάνονται στο μοντέλο. Στην τέταρτη ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού GAMS σε διάφορες μελέτες περιπτώσεων, ενώ η αναπαράσταση τους πραγματοποιείται με τη βοήθεια των Gantt Charts. Τέλος, στην πέμπτη ενότητα αναλύονται τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν μαζί με προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη του μοντέλου.

2. Παραγωγική Διαδικασία

2.1 Η εταιρεία ISOMAT S.A.

Η ISOMAT είναι ένας ελληνικός πολυεθνικός όμιλος παραγωγής δομικών χημικών, κονιαμάτων και χρωμάτων. Για περισσότερα από 40 χρόνια γράφει μια ιστορία ποιότητας, αξιοπιστίας, τεχνογνωσίας και αδιάκοπης επιχειρηματικής ανάπτυξης. Ο όμιλος διαθέτει 3 μονάδες παραγωγής, εκ των οποίων η μία βρίσκεται στη μητρική εταιρία στην Ελλάδα και οι άλλες δύο στις θυγατρικές της εταιρίες στη Ρουμανία και στη Σερβία. Επιπλέον, έχει 5 εμπορικές θυγατρικές σε Γερμανία, Ρωσία, Τουρκία, Βουλγαρία και Σλοβενία, ενώ πραγματοποιεί εξαγωγικές πωλήσεις σε περισσότερες από 80 χώρες παγκοσμίως.

Ο όμιλος παράγει και διαθέτει ένα μεγάλο εύρος προϊόντων προηγμένης τεχνολογίας σε προσιτές, όμως, τιμές. Συγκεκριμένα, παράγει και διαθέτει τις εξής 8 βασικές κατηγορίες προϊόντων:

- Στεγανοποίηση
- Εξωτερική Θερμομόνωση
- Χρώματα και Προστασία Επιφανειών
- Κόλληση Πλακιδίων και Φυσικών Λίθων
- Βελτιωτικά και Επισκευαστικά Σκυροδέματος
- Κατασκευή και Επισκευή Τοιχοποιίας
- Βιομηχανικά Δάπεδα
- Πατητές Τσιμεντοκονίες και Διακοσμητικά Δάπεδα

Η ISOMAT δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στην καινοτομία και στη συνεχή ανάπτυξη νέων προϊόντων, σύμφωνα με τις ανάγκες της αγοράς, αλλά και των τεχνολογικών εξελίξεων του κατασκευαστικού κλάδου. Στα 7 διαφορετικά χημεία Έρευνας και Ανάπτυξης και στα 3 χημεία Ποιοτικού Ελέγχου που διαθέτει σε Ελλάδα και εξωτερικό απασχολεί εξειδικευμένο επιστημονικό προσωπικό που στόχος τους είναι η ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων και ολοκληρωμένων συστημάτων για κάθε κατασκευαστική εφαρμογή.

2.2 Διαδικασία Παραγωγής

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται λεπτομερής περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας των κονιαμάτων της εταιρείας ISOMAT S.A.. Η παραγωγή χωρίζεται σε 2 στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η εισαγωγή των πρώτων υλών στο σύστημα και η προετοιμασία τους μέχρι το στάδιο της ανάδευσης. Το δεύτερο στάδιο αποτελείται από την ανάμιξη των πρώτων υλών προς το τελικό συσκευασμένο προϊόν. Ακολούθως, αναφέρονται οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται και στη συνέχεια πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας.

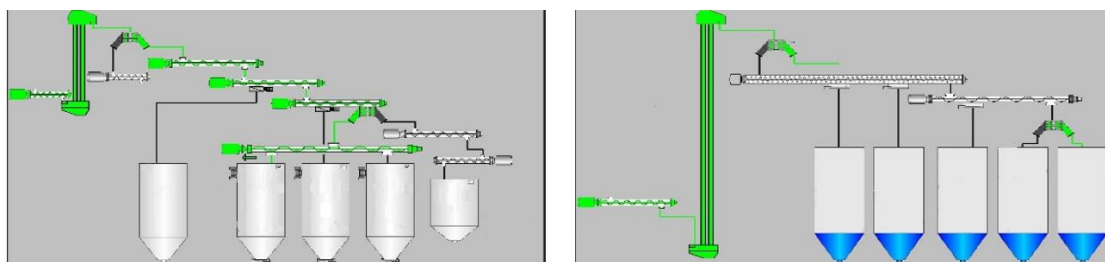
Κονίαμα ονομάζεται το μίγμα ενός ή περισσοτέρων συνδετικών υλικών, αδρανών, νερού και μερικές φορές και ειδικών προσθέτων, που εφαρμόζεται ως συνδετικό-συγκολλητικό μεταξύ των δομικών στοιχείων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, πρόκειται για ξηρό κονίαμα εργοστασιακής παραγωγής, το οποίο περιέχει αναμεμιγμένα μόνο τα ξηρά συστατικά, που απαιτεί μόνο τη προσθήκη νερού για χρήση.

Αρχικά, ως κύρια πρώτη ύλη χρησιμοποιείται το τσιμέντο, το οποίο μπορεί να είναι γκρι ή άσπρο. Το τσιμέντο έχει την ιδιότητα του ανόργανου συνδετικού υλικού στο κονίαμα, το οποίο χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η συγκράτηση στερεών σωματιδίων σε μορφή συνεχούς μάζας. Επιπλέον, πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι η μαρμαρόσκονη, ο χαλαζίτης και το ανθρακικό ασβέστιο, οι οποίες είναι αδρανή υλικά σε μορφή κόκκων, που δε συμμετέχουν στην αντίδραση σκλήρυνσης του κονιάματος. Τέλος, κάθε κονίαμα που παράγεται έχει ειδικά πρόσθετα, τα οποία ποικίλουν ανάλογα το προϊόν και τη συνταγή που χρησιμοποιείται. Τυπικά πρόσθετα που χρησιμοποιούνται είναι η ρητίνη, η οποία δίνει στο προϊόν κολλώδεις ιδιότητες, χρωστικές ουσίες που δίνουν χρώμα στα προϊόντα και ίνες, οι οποίες προσδίδουν στο προϊόν μηχανικές αντοχές.

Στάδιο 1

Αρχικά, εισέρχονται στο χώρο της βιομηχανίας φορτηγά που μεταφέρουν χύδην υλικά, τα οποία είναι η μαρμαρόσκονη, το τσιμέντο, ο χαλαζίτης και το ανθρακικό ασβέστιο. Μέσω κοχλιών μεταφέρονται τα υλικά από τα φορτηγά σε σιλό αποθήκευσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Η παραλαβή, η αποθήκευση και η προετοιμασία των

πρώτων υλών πραγματοποιείται σε δύο μονάδες του εργοστασίου, οι οποίες τροφοδοτούν τις γραμμές παραγωγής.



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της μεταφοράς υλικών από τα φορτηγά σε σιλό αποθήκευσης μέσω κοχλιών

Η μαρμαρόσκονη οδηγείται προς τα κόσκινα, ώστε να διαχωριστεί ανάλογα με την κοκκομετρία της. Στο Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι διάμετροι κόκκου που διαχωρίζει το κάθε κόσκινο. Η διαδικασία της κοσκίνισης επαναλαμβάνεται μέχρι να διαχωριστούν τα κλάσματα σε ένα ικανοποιητικό βαθμό. Αφού τελειώσει η κοσκίνιση, κάθε κλάσμα της μαρμαρόσκονης αποθηκεύεται σε σιλό. Επιπλέον πρώτες ύλες, όπως πρόσθετα, προστίθενται στο σύστημα χειρωνακτικά και αποθηκεύονται σε σιλό. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε προϊόν έχει τη δικιά του συνταγή, με αποτέλεσμα κάθε προϊόν να απαιτεί διαφορετικές αναλογίες σε πρώτες ύλες, άρα και διαφορετικά κιλά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι πρώτες ύλες να οδηγούνται σε ζυγούς. Στο Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται τα μέγιστα κιλά που μπορούν να ζυγίσει ο κάθε ζυγός. Αφού ζυγιστούν οι πρώτες ύλες, οδηγούνται προς τον αναδευτήρα (mixer), για να γίνει η ανάμιξη.

Πίνακας 2.1: Διάμετροι κόκκου που διαχωρίζει το κάθε κόσκινο

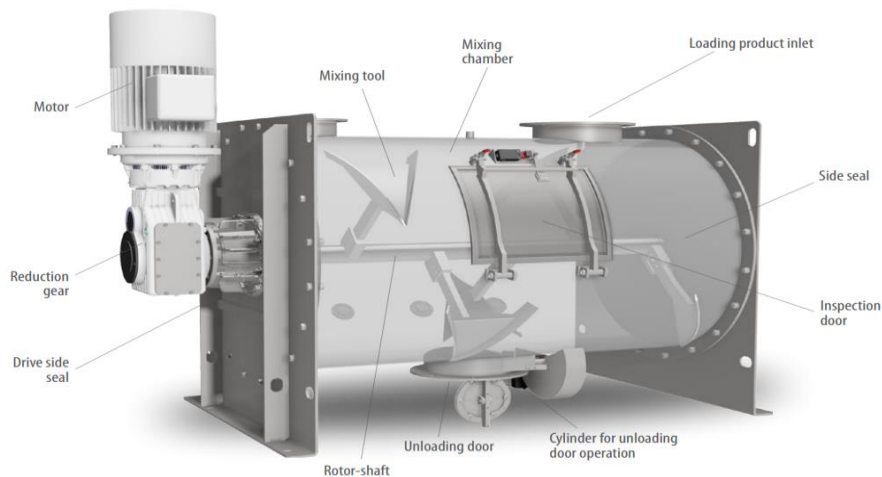
Κόσκινο (No.)	Διάμετρος κόκκου (mm)
1	0-0.2 , 0-0.4 , 0.4-1.31
2	0.4-1.31
3	0.4-1.31
4	0.4-1.31
5	0-0.2 , 0-0.4
6	0-0.4
7	0.4-1.31

Πίνακας 2.2: Μέγιστα κιλά που ζυγίζει κάθε ζυγός

Ζυγός (No.)	Κιλά
1	80
2	40
3	3000
4	50
5	1500
6	40
7	40
8	3000
9	40
10	150
11	2000

Στάδιο 2

Ο αναδευτήρας που χρησιμοποιείται στο Σχήμα 2.2 είναι ταχείας ανάδευσης, ο οποίος αναδύει το μίγμα με μεγάλες ταχύτητες. Τα υλικά εισάγονται από το πάνω μέρος του αναδευτήρα και με τη βοήθεια δύο συμμετρικών επιφανειών σε σχήμα αρότρου αναδύεται το μίγμα. Πραγματοποιείται φυγοκεντρικός στροβιλισμός των προϊόντων, ο οποίος επιτυγχάνει άριστη ποιότητα ανάμιξης σε πολύ σύντομο χρόνο. Ο αναδευτήρας γεμίζει ως τη μέση για να μην υπερχειλίσει το προϊόν και η ανάδευση διαρκεί το πολύ 90 δευτερόλεπτα.

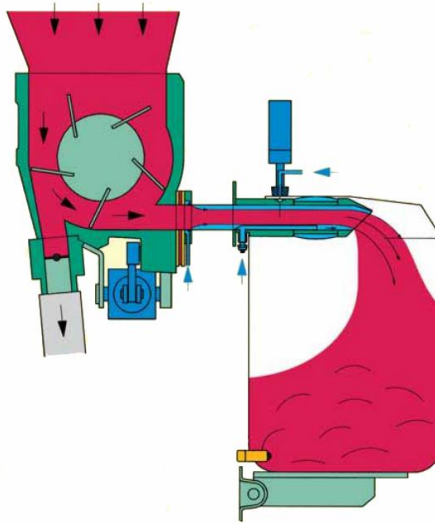


Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση του αναδευτήρα

Αφού τελειώσει η ανάμιξη, το προϊόν οδηγείται προς τη συσκευαστική μηχανή, αφού πρώτα αποθηκευτεί σε ένα ενδιάμεσο σιλό. Χρησιμοποιούνται δύο ειδών συσκευαστικές μηχανές ανάλογα τα κιλά που συσκευάζονται. Ειδικότερα, 2 συσκευαστικές μηχανές, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα και συσκευάζουν έως 5 κιλά, και 1 συσκευαστική μηχανή που συσκευάζει έως 30 κιλά.

Η πρώτη συσκευαστική μηχανή που χρησιμοποιείται για σάκους έως 5 κιλά, λειτουργεί με τη βοήθεια ενός περιστρεφόμενου κοχλία σε σχήμα έλικα. Μια τέτοια μηχανή πλήρωσης είναι ογκομετρική, πράγμα που σημαίνει ότι η δοσομέτρηση γίνεται μόνο με τον αριθμό περιστροφής του κοχλία, ο οποίος στη συνέχεια παρέχει έναν όγκο κονιάματος, που αντιστοιχεί στο βάρος του σάκου.

Η δεύτερη συσκευαστική μηχανή έχει δικό της σιλό, στο οποίο εισάγεται το υλικό που πρόκειται να συσκευασθεί. Με τη βοήθεια ενός πτερυγίου, το κονίαμα ωθείται προς τον σάκο μέχρι να γεμίσει όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Τα κιλά του κονιάματος πρέπει να είναι ίσα με τα κιλά που αναγράφονται στο σάκο, για αυτό το λόγο το συσκευασμένο προϊόν ζυγίζεται μετά τη συσκευαστική. Σε περίπτωση που είναι λιγότερο τα κιλά του κονιάματος, το προϊόν εισάγεται ξανά στο σύστημα ως πρώτη ύλη.



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση της συσκευαστικής μηχανής

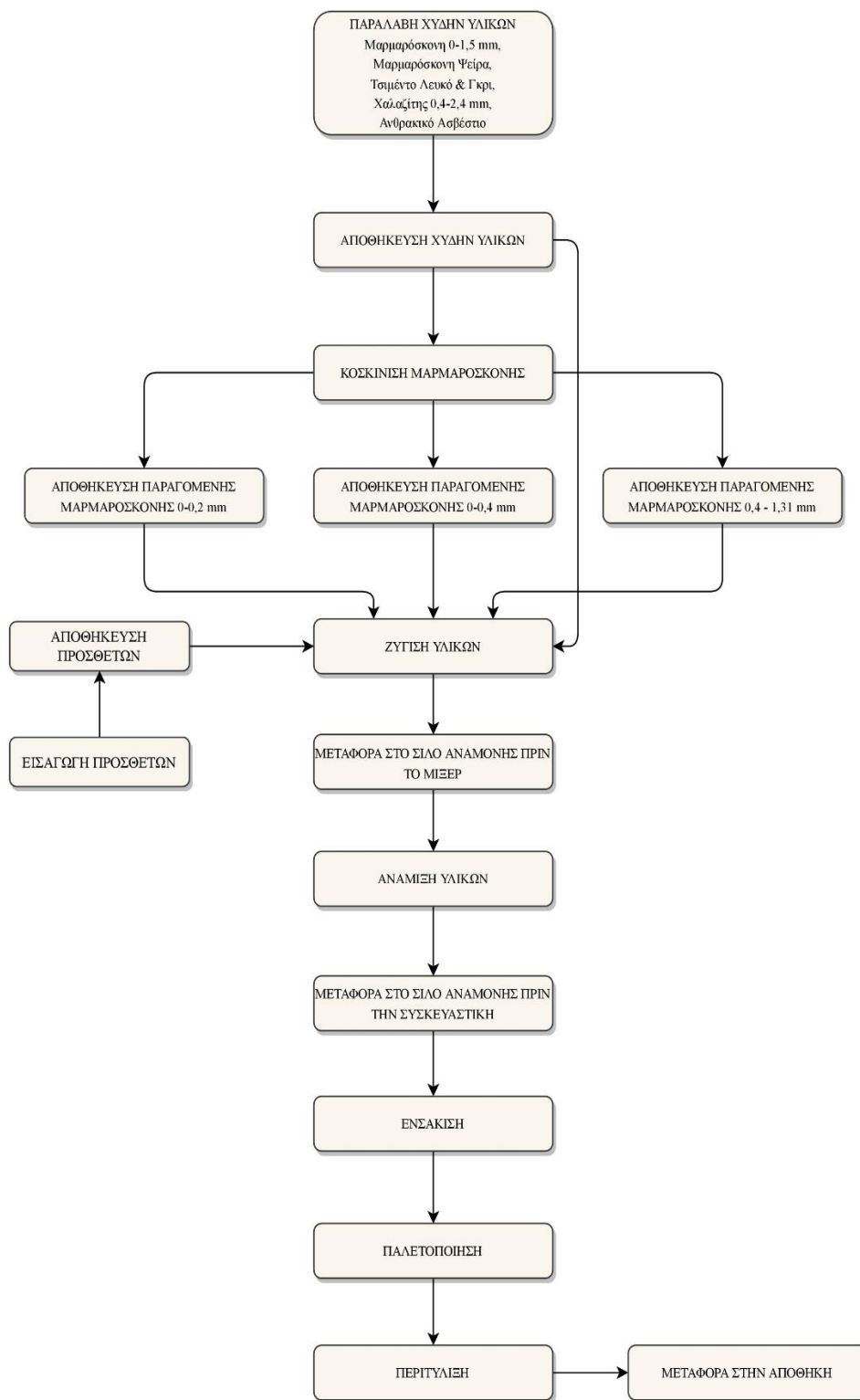
Ένας αριθμός προϊόντων συσκευάζονται σε σάκους των 1000 κιλών. Αυτό πραγματοποιείται με τη βοήθεια μιας δεύτερης εξόδου από το σιλό μετά τον αναδευτήρα.

Για κάθε προϊόν που παράγεται λαμβάνεται ο πρώτος σάκος της συσκευαστικής, ο οποίος οδηγείται στο εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου, όπου ελέγχεται αν έχει τα κατάλληλα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Μετά τη συσκευαστική, οι σάκοι μεταφέρονται στο στάδιο της παλετοποίησης, όπου εισάγονται σε παλέτες. Η παλέτα πηγαίνει στη περιτύλιξη και οδηγείται στις αποθήκες της εγκατάστασης με τη βοήθεια ειδικών οχημάτων (κλαρκ), όπου και φυλάσσεται μέχρι να γίνει η διανομή του στον πελάτη.

Κατά τη παραγωγική διαδικασία, παράγονται προϊόντα με υποβαθμισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά (φύρα). Επειδή τα προϊόντα αποτελούνται από αδρανές υλικό, ένα μικρό ποσοστό επαναχρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη, ενώ το υπόλοιπο οδηγείται σε ειδικούς κάδους. Επιπλέον, για να καθαριστούν οι γραμμές παραγωγής χρησιμοποιείται μαρμαρόσκονη, ώστε να παρασύρει ότι υπόλειμμα έχει μείνει στα μηχανήματα μέχρι το στάδιο της συσκευαστικής. Η μαρμαρόσκονη αφού καθαρίσει τη γραμμή, πέφτει σε μια τσάντα του ενός τόνου ή συσκευάζεται σε σάκους. Αφού τελειώσει ο καθαρισμός, ένα μέρος της μαρμαρόσκονης που χρησιμοποιήθηκε επανεισάγεται στο σύστημα ως πρώτη ύλη, ενώ το υπόλοιπο οδηγείται σε κάδο. Οι

κάδοι όταν γεμίσουν μεταφέρονται σε εταιρεία ανακύκλωσης αδρανών υλικών.

Στη συνέχεια στο Σχήμα 2.4, παρουσιάζεται το απλοποιημένο διάγραμμα ροής της παραγωγής κονιαμάτων.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα ροής

2.3 Δεδομένα Παραγωγικής Διαδικασίας

Η μονάδα παράγει πάνω από 400 προϊόντα, με κάθε προϊόν να έχει τουλάχιστον μια συνταγή. Η ανάμιξη και η συσκευασία των προϊόντων πραγματοποιείται σε 4 διαφορετικές γραμμές παραγωγής όπως φαίνεται στο Πίνακα 2.3, οι οποίες δεν επικοινωνούν μεταξύ τους.

Πίνακας 2.3: Γραμμές παραγωγής

Production Line	Name
1	25kg Νεα
2	25kg Παλιά
3	5kg
4	STUCCOCRET

Η 3η γραμμή συσκευάζει έως 5 κιλά, ενώ οι υπόλοιπες συσκευάζουν από 10 μέχρι και 30 κιλά. Κάθε γραμμή παραγωγής είναι αυτόνομη και περιέχει 1 μηχάνημα για κάθε στάδιο. Εξάιρεση αποτελεί η 3η γραμμή, η οποία έχει 2 συσκευαστικές μηχανές, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα, ενώ ο καθαρισμός τους γίνεται ταυτοχρόνως (θεωρείται ως 1 για την απλοποίηση του προβλήματος). Η 4^η γραμμή λειτουργεί σπάνια και παράγει μόλις 4 προϊόντα με αποτέλεσμα ο προγραμματισμός της παραγωγής της να μην αποτελεί πρόβλημα και έτσι, δεν εισάγεται στο μαθηματικό μοντέλο.

Το σύνολο των πρώτων υλών που εισέρχονται στον αναδευτήρα αποτελούν μια παρτίδα (batch). Αφού τελειώσει η ανάμιξη μιας παρτίδας, οδηγείται στο σιλό πριν τη συσκευαστική μηχανή και εισέρχεται στον αναδευτήρα η επόμενη παρτίδα. Όταν αδειάζει το σιλό, ο αναδευτήρας εκκενώνει την επόμενη παρτίδα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σιλό πριν τη συσκευαστική να είναι πάντα γεμάτο με υλικό για να μπορεί να τροφοδοτεί την συσκευαστική, η οποία λειτουργεί με συνεχή ρυθμό. Η δυναμικότητα των συσκευών είναι μεγαλύτερη από τα κιλά κάθε παρτίδας.

Ο ρυθμός συσκευασίας, ο οποίος εκφράζεται σε τεμάχια ανά ώρα, μεταβάλλεται ανάλογα το προϊόν που συσκευάζεται. Αρχικά, κάθε προϊόν αποτελείται από διαφορετικές πρώτες ύλες, με αποτέλεσμα να υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο

ειδικό βάρος και σε πρόσθετα που χρησιμοποιούνται. Επομένως, κάποια προϊόντα είναι πιο βαριά και συσκευάζονται πιο δύσκολα. Επιπλέον, οι συσκευαστικές μηχανές παρουσιάζουν αποκλίσεις από το ρυθμό που λειτουργούν λόγω του ότι κάποιοι σάκοι κατά την εφαρμογή τους πάνω στη μηχανή δεν κουμπώνουν καλά με αποτέλεσμα να πέσουν και να μην συσκευαστεί το προϊόν. Επίσης, αφού συσκευαστεί το προϊόν ζυγίζεται και αν το σακί δεν είναι στα επιθυμητά κιλά τότε αφαιρείται από τη γραμμή και πηγαίνει για επαναχρησιμοποίηση στην επόμενη παρτίδα. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η συσκευαστική παρουσιάζει τυχαία σφάλματα με αποτέλεσμα να είναι δύσκολος ο καθορισμός του ακριβή ρυθμού συσκευασίας. Για το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού χρησιμοποιήθηκαν μέσοι ρυθμοί συσκευασίας από ιστορικά δεδομένα παραγωγής προϊόντων και δίνονται στο Παράρτημα Α στον Πίνακα Α1.

Τα προϊόντα κατηγοριοποιούνται ανάλογα το αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη και την κοκκομετρία του, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.4. Κάθε εναλλαγή προϊόντος με διαφορετικό αδρανές υλικό απαιτεί καθαρισμό της γραμμής παραγωγής, για την αποφυγή υπολειμμάτων. Επιπλέον, στις εναλλαγές μεταξύ προϊόντων με ίδιο αδρανές υλικό αλλά με μετάβαση από μεγαλύτερη διάμετρο κόκκου σε μικρότερη απαιτείται καθαρισμός. Ένας μεγάλος αριθμός προϊόντων περιέχει χρωστικές ουσίες, οι οποίες λερώνουν τη γραμμή. Στη περίπτωση που υπάρχει εναλλαγή προϊόντων από ένα σκούρο χρώμα σε πιο ανοιχτό, η γραμμή καθαρίζεται καλά πριν την εισαγωγή του επόμενου προϊόντος. Τέλος, όταν υπάρχει εναλλαγή προϊόντων με διαφορετική περιεκτικότητα σε ρητίνη και συγκεκριμένα όταν αλλάζει ένα προϊόν από υψηλής περιεκτικότητας ρητίνη σε μικρότερη, τότε καθαρίζεται καλά για να μην αλλοιωθεί η περιεκτικότητα της ρητίνης στο προϊόν.

Ο καθαρισμός γίνεται με τη βοήθεια ενός αδρανές υλικού και συγκεκριμένα της μαρμαρόσκονης. Η μαρμαρόσκονη καθώς περνάει από τη γραμμή παραγωγής παρασύρει ότι υπόλειμμα έχει μείνει στη γραμμή. Το αδρανές υλικό περνάει από τη γραμμή έως και 3 φορές, ανάλογα πόσο υλικό έχει μείνει στη γραμμή ως υπόλειμμα. Αφού τελειώσει ο καθαρισμός, ένα μικρό ποσοστό της μαρμαρόσκονης εισάγεται στο σύστημα ως πρώτη ύλη, ενώ η υπόλοιπη οδηγείται σε κάδο για ανακύκλωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε περίπτωση που υπάρχει εναλλαγή προϊόντος από χοντρόκοκη μαρμαρόσκονη σε λεπτόκοκη, η γραμμή καθαρίζεται με τη βοήθεια μιας λεπτόκοκης κόλλας πλακιδίων, η οποία αποτελεί ένα από τα βασικά προϊόντα της εταιρείας. Αυτό

συμβαίνει διότι οι κόλλες πλακιδίων μπαίνουν κάτω από το πλακάκι και δεν επηρεάζει το υλικό να περιέχει χοντρούς κόκκους. Αυτός ο σχεδιασμός γίνεται για να μην υπάρχει μεγάλη σπατάλη μαρμαρόσκονης ενώ παράλληλα με τον καθαρισμό παράγεται και προϊόν. Τέλος, από τα παραπάνω αποτελεί εξαίρεση η πρώτη γραμμή παραγωγής, η οποία είναι χτισμένη καθ' ύψος και δεν υπάρχουν γωνίες στη γραμμή ώστε να μείνουν υπολείμματα, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται να καθαριστεί.

Πίνακας 2.4: Κατηγοριοποίησή υλικών ανάλογα το αδρανές υλικό και τη διάμετρο κόκκου

Αδρανές υλικό	Διάμετρος κόκκου (mm)
Μαρμαρόσκονη	0-0,2
	0-0,4
	0,4-1,31
	1,2-2,5 (Ψείρα)
Χαλαζίτης	0-0,3
	0,4-2,4

Κάθε εναλλαγή προϊόντος απαιτεί ένα χρόνο προετοιμασίας της γραμμής παραγωγής. Στη τελευταία παρτίδα, με τη βοήθεια ενός δονητή, αδειάζει όσο γίνεται το σιλό και το μίγμα εισέρχεται στη συσκευαστική μηχανή. Αφού συσκευαστούν τα τελευταία κιλά, η μηχανή κλείνει και ξεκινάει η προετοιμασία της γραμμής. Αρχικά, αδειάζει χειρωνακτικά η συσκευαστική μηχανή από τα υπολείμματα που έχουν μείνει. Αφού τελειώσει το άδειασμα, γίνεται αλλαγή των σάκων συσκευασίας και ρυθμίζεται η συσκευή για το νέο προϊόν. Όταν πέσει η πρώτη παρτίδα του επόμενου προϊόντος στη συσκευαστική, συσκευάζονται οι πρώτοι σάκοι και η γραμμή σταματάει να λειτουργεί. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει περίπτωση να μείνει υπόλειμμα στη συσκευαστική και με τους πρώτους σάκους να το παρασύρει. Οι σάκοι που περιέχουν υπολείμματα από το προηγούμενο προϊόν πηγαίνουν για ανακύκλωση. Τέλος, γίνεται έλεγχος για την ορθή εκτύπωση της ετικέτας του προϊόντος και ξεκινάει η παραγωγή. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πρώτος σάκος οδηγείται στο εργαστήριο της εταιρείας για ποιοτικό έλεγχο. Στο τελείωμα της βάρδιας γίνεται ένας μικρός τυπικός καθαρισμός του χώρου.

Η βιομηχανία λειτουργεί 5 μέρες την εβδομάδα και απασχολεί το πολύ 2 βάρδιες των 8 ωρών την μέρα. Ο προγραμματισμός γίνεται σε εβδομαδιαία βάση και η

παραγωγή οργανώνεται βάσει της ζήτησης των πελατών (make to order), ενώ ένα ποσοστό των προϊόντων αποθηκεύεται ως απόθεμα (make to stock). Μέχρι να γίνει η διανομή των προϊόντων στον πελάτη, αποθηκεύονται στις αποθήκες της εγκατάστασης, οι οποίες διαθέτουν απεριόριστη αποθηκευτική δυναμικότητα. Οι πρώτες ύλες δεν παράγονται στη βιομηχανία, αλλά παραλαμβάνονται από άλλους προμηθευτές.

3. Μαθηματικό Μοντέλο

3.1 Ονοματολογία

Σύνολα στοιχείων

$p, pp, ppp \in P$	Το σύνολο προϊόντων
$j, jj \in J$	Το σύνολο γραμμών παραγωγής
$n, nn \in N$	Το σύνολο διακριτών χρονικών περιόδων

Υποσύνολα στοιχείων

$P_{j,p,j}$	Το σύνολο των προϊόντων p που μπορούν να παραχθούν από τη γραμμή παραγωγής j
-------------	--

Παράμετροι

$Prior_p$	Η προτεραιότητα του προϊόντος p προς παραγωγή
$Size_p$	Τα κιλά της συσκευασίας του προϊόντος p , σε κιλά
$Demand_{p,n}$	Η ζήτηση του προϊόντος p τη χρονική περίοδο n , σε τεμάχια
Min_p	Η ελάχιστη παραγόμενη ποσότητα του προϊόντος p , σε τεμάχια
$Max_{p,j,n}$	Η μέγιστη παραγόμενη ποσότητα του προϊόντος p , στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , σε τεμάχια
$Rate_{p,j}$	Ο ρυθμός παραγωγής του προϊόντος p , στη γραμμή συσκευασίας j , σε τεμάχια ανά ώρα
Set_j	Ο χρόνος προετοιμασίας της γραμμής j , σε ώρες
$Fason_{p,pp}$	Προϊόντα p τα οποία έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά και είναι φασόν του προϊόντος pp
Tr	Ο χρόνος ανάμιξης παρτίδας, σε ώρες
$Shutdown$	Ο χρόνος καθαρισμού πριν τον τερματισμό της παραγωγής, σε ώρες
W	Ο χρόνος λειτουργίας της παραγωγής ανά μέρα, σε ώρες
$Ch_{j,p,pp}$	Ο χρόνος εναλλαγής μεταξύ του προϊόντος p και pp στη γραμμή παραγωγής j , σε ώρες

Συνεχείς μεταβλητές

$S_{p,j,n}$	Ο χρόνος εκκίνησης παραγωγής του προϊόντος p στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , σε ώρες
$T_{p,j,n}$	Ο χρόνος επεξεργασίας του προϊόντος p στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , σε ώρες
$C_{p,j,n}$	Ο χρόνος ολοκλήρωσης επεξεργασίας του προϊόντος p στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , σε ώρες
$I_{p,n}$	Το απόθεμα του προϊόντος p , τη χρονική περίοδο n , σε τεμάχια
$Q_{p,j,n}$	Η συνολική ποσότητα του προϊόντος p , που παράγεται στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , σε τεμάχια
$Qkg_{p,j,n}$	Η συνολική ποσότητα του προϊόντος p , που παράγεται στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , σε κιλά
<i>Changeover</i>	Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων, σε ώρες
<i>Hours_{j,n}</i>	Οι συνολικές ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής j , για κάθε χρονική περίοδο n , σε ώρες

Δυαδικές μεταβλητές

$V_{j,n}$	Λαμβάνει την τιμή 1, αν η γραμμή j χρησιμοποιείται τη χρονική περίοδο n
$X_{p,pp,j,n}$	Λαμβάνει τη τιμή 1, αν το προϊόν p , επεξεργάζεται ακριβώς πριν το προϊόν pp , όταν και τα δύο επεξεργάζονται στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n
$Y_{pp,j,n}$	Λαμβάνει τη τιμή 1, αν το προϊόν p , επεξεργάζεται στη γραμμή j , τη χρονική περίοδο n
$WF_{p,j,n}$	Λαμβάνει τη τιμή 1, αν το προϊόν p , επεξεργάζεται πρώτο τη χρονική περίοδο n , στη γραμμή παραγωγής j
$WL_{p,j,n}$	Λαμβάνει τη τιμή 1, αν το προϊόν p , επεξεργάζεται τελευταίο τη χρονική περίοδο n , στη γραμμή παραγωγής j
$Xin_{p,pp,j,n}$	Λαμβάνει τη τιμή 1, αν το προϊόν p τη χρονική περίοδο $n-1$, ακολουθείται από το προϊόν pp , τη περίοδο n

3.2 Ορισμός προβλήματος

Το πρόβλημα που μελετάται είναι η βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής της βιομηχανικής μονάδας κονιαμάτων της εταιρείας ISOMAT S.A. Η διαδικασία της παραγωγής χαρακτηρίζεται ως ημι-συνεχής και επικεντρώνεται στο συνεχές στάδιο της συσκευασίας. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι μοντέλου μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP) και επικεντρώνεται στην αλληλουχία και κατανομή των προϊόντων στις γραμμές παραγωγής κατά το χρονικό ορίζοντα που μελετάται. Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου εναλλαγής μεταξύ των προϊόντων (changeover time).

Το μαθηματικό μοντέλο απαρτίζεται από τους ακόλουθους περιορισμούς:

- Περιορισμοί μεγέθους παρτίδας προϊόντων
- Περιορισμοί αλληλουχίας προϊόντων
- Χρονικοί περιορισμοί
- Αντικειμενική συνάρτηση – Ελαχιστοποίηση χρόνου εναλλαγών

Στη συνέχεια ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή όλων των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης του μαθηματικού μοντέλου.

3.3 Μαθηματική Διατύπωση Μοντέλου

Περιορισμοί αλληλουχίας Προϊόντων και Χρονικοί περιορισμοί

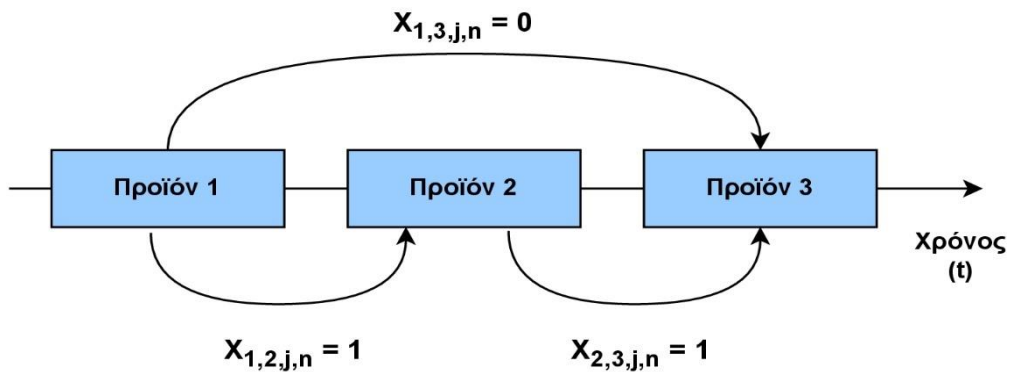
Το μαθηματικό μοντέλο είναι άμεσης προτεραιότητας, με αποτέλεσμα να εισάγεται η δυαδική μεταβλητή $X_{p,pp,j,n}$, η οποία παίρνει τη τιμή 1, όταν το προϊόν p επεξεργάζεται ακριβώς πριν από το προϊόν pp , στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εισαχθούν οι παρακάτω περιορισμοί:

$$\sum_{pp \in Pj, p \neq pp} X_{pp,p,j,n} \leq Y_{p,j,n} \quad \forall p \in Pj, j \in J, n \in N \quad (3.1)$$

$$\sum_{pp \in Pj, p \neq pp} X_{p,pp,j,n} \leq Y_{p,j,n} \quad \forall p \in Pj, j \in J, n \in N \quad (3.2)$$

Σύμφωνα με τους περιορισμούς (3.1) και (3.2), εάν ένα προϊόν p επεξεργάζεται στη γραμμή παραγωγής j , το χρονικό διάστημα n , τότε το πολύ ένα προϊόν

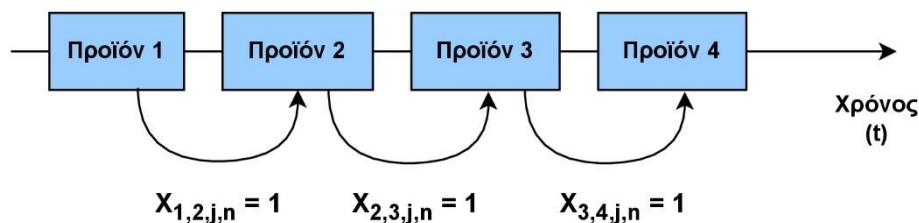
επεξεργάζεται ακριβώς πριν ή ακριβώς μετά από αυτό. Σε περίπτωση που ένα προϊόν p επεξεργάζεται τελευταίο, τότε όλες οι δυαδικές μεταβλητές $X_{p,pp,j,n}$ παίρνουν τιμή ίση με το 0. Τα παραπάνω γίνονται εύκολα αντιληπτά με τη βοήθεια του Σχήματος 3.1.



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση των μεταβλητών άμεσης προτεραιότητας $X_{p,pp,j,n}$

$$\sum_{p \in P_j} \sum_{pp \in P_j, p \neq pp} X_{p,pp,j,n} + V_{j,n} = \sum_{p \in P_j} Y_{pp,j,n} \quad \forall j \in J, n \in N \quad (3.3)$$

Σύμφωνα με τον περιορισμό (3.3) αν η γραμμή παραγωγής j , το χρονικό διάστημα n , χρησιμοποιείται ($V_{j,n} = 1$), τότε ο συνολικός αριθμός εναλλαγών σε μια συσκευή j οφείλει να είναι ίσος με τον συνολικό αριθμό παραγόμενων προϊόντων μειωμένος κατά 1. Για την καλύτερη κατανόηση αυτού του περιορισμού παρουσιάζεται το Σχήμα 3.2, στο οποίο φαίνεται ότι αν στη γραμμή παραγωγής j , παράγονται 4 προϊόντα τότε ο συνολικός αριθμός των ενεργών δυαδικών μεταβλητών θα πρέπει να είναι ίσος με 3.



Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση του περιορισμού 3.3

$$V_{j,n} \geq Y_{p,j,n} \quad \forall p,j \in P, j, n \in N \quad (3.4)$$

Ο περιορισμός (3.4) χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι η δυαδική μεταβλητή $V_{j,n}$, η οποία λαμβάνει τη τιμή 1 αν η γραμμή παραγωγής j χρησιμοποιείται τη χρονική περίοδο n , θα ενεργοποιηθεί αν το προϊόν p , συσκευάζεται στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n ($Y_{p,j,n} = 1$).

$$C_{p,j,n} + cht_{j,p,pp} * X_{p,pp,j,n} \leq S_{pp,j,n} + (w - shutdown) * (1 - X_{p,pp,j,n}) \\ \forall p \neq pp, p, j \in P, j, n \in N \quad (3.5)$$

Ο περιορισμός (3.5) αναφέρεται και ως περιορισμός μεγάλου αριθμού M (big-M constraint), επειδή μέσα στην ανισότητα εμπεριέχεται μια σταθερά M ($M = w - shutdown$) σε έναν όρο ο οποίος ενεργοποιείται όταν κάποια δυαδική τιμή λαμβάνει μια συγκεκριμένη τιμή. Όταν ενεργοποιείται ο όρος M , το δεξιό μέλος του ανισοτικού περιορισμού λαμβάνει μια πολύ υψηλή τιμή, που έχει ως αποτέλεσμα στην απενεργοποίηση του περιορισμού. Συγκεκριμένα, ο περιορισμός εξασφαλίζει ότι όταν ένα προϊόν p , επεξεργάζεται ακριβώς πριν το προϊόν pp , στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , ($X_{p,pp,j,n} = 1$), τότε ο χρόνος κατά τον οποίο ξεκινάει να παράγεται το προϊόν pp είναι μεγαλύτερος από το χρόνο κατά τον οποίο ολοκληρώνεται η παραγωγή του p συν το χρόνο εναλλαγής μεταξύ των 2 προϊόντων.

$$C_{p,j,n} \geq set_j * V_{j,1} + \sum_{pp,ppp \in P} cht_{j,pp,ppp} * X_{in_{pp,ppp,j,n}} + T_{p,j,n} \\ + \sum_{pp \in P, p \neq pp} cht_{j,pp,p} * X_{pp,p,j,n} - w * (1 - Y_{p,j,n}) \\ \forall p, j \in P, j, n \in N \quad (3.6)$$

Ο περιορισμός (3.6) εξασφαλίζει ότι ο χρόνος ολοκλήρωσης της παραγωγής του προϊόντος p , στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , είναι μεγαλύτερος από το άθροισμα του χρόνου επεξεργασίας του προϊόντος p συν το χρόνο εναλλαγής μεταξύ του προηγούμενου προϊόντος pp και του p . Σε περίπτωση που το n λαμβάνει τη

τιμή 1, δηλαδή τη πρώτη χρονική περίοδο, τότε στο άθροισμα εισάγεται και ο χρόνος προετοιμασίας της γραμμής j . Τέλος, ο τελευταίος όρος του δεξιού μέλους της ανισότητας έχει το ρόλο του μεγάλου αριθμού M (big-M constraint), δηλαδή αν το προϊόν p δεν επεξεργάζεται στη γραμμή j , τη χρονική περίοδο n , ($Y_{p,j,n} = 0$), τότε το δεξιό μέλος παίρνει μια μεγάλη τιμή και απενεργοποιεί τον περιορισμό.

$$\sum_{p \in P_j} T_{p,j,n} \leq (w - \text{shutdown}) * V_{j,n} - \sum_{p, pp \in P_j, pp \neq p} \text{cht}_{j,p,pp} * (X_{p,pp,j,n} + X_{in_{p,pp,j,n}}) \quad \forall j \in J, n \in N \quad (3.7)$$

Σύμφωνα με τον περιορισμό (3.7), ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας των προϊόντων στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , είναι πάντα μικρότερος από το χρόνο λειτουργίας της γραμμής j , μείον το συνολικό χρόνο εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων.

$$C_{p,j,n} \leq (w - \text{shutdown}) * Y_{p,j,n} \quad \forall p, j \in P_j, n \in N \quad (3.8)$$

$$S_{p,j,n} = C_{p,j,n} - T_{p,j,n} \quad \forall p, j \in P_j, n \in N \quad (3.9)$$

Η παραπάνω ανισότητα (3.8) δηλώνει ότι ο χρόνος ολοκλήρωσης του προϊόντος p , στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , είναι μικρότερος από το χρόνο λειτουργίας της γραμμής παραγωγής j , όταν είναι ενεργοποιημένη η δυαδική μεταβλητή $Y_{p,j,n}$ δηλαδή όταν το προϊόν p , επεξεργάζεται στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n . Επιπλέον, στην εξίσωση (3.9), ο χρόνος εκκίνησης του προϊόντος p ισούται με τη διαφορά του χρόνου ολοκλήρωσης παραγωγής και του χρόνου επεξεργασίας.

$$\sum_{pp \neq p, pp \in P} X_{pp,p,j,n} + WF_{p,j,n} = Y_{p,j,n} \quad \forall p \in P, j \in J, n \in N \quad (3.10)$$

$$\sum_{pp \neq p, pp \in P} X_{p,pp,j,n} + WL_{p,j,n} = Y_{p,j,n} \quad \forall p \in P, j \in J, n \in N \quad (3.11)$$

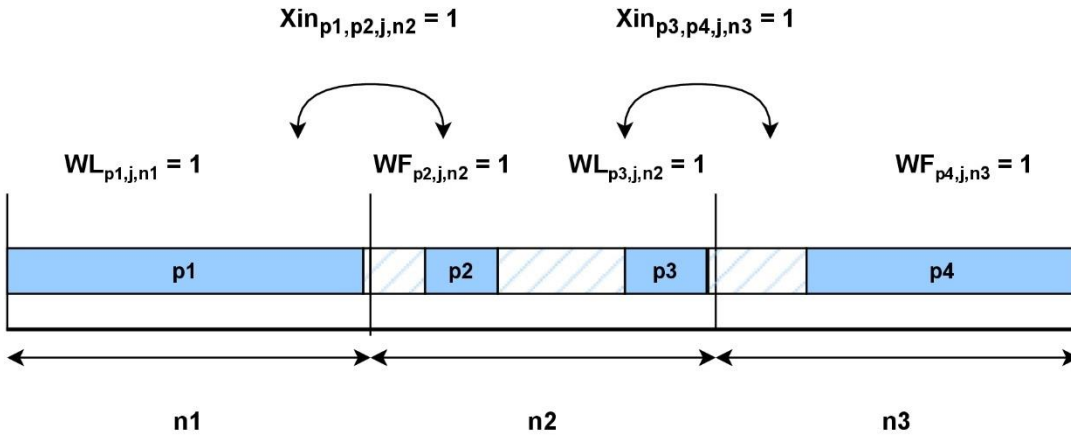
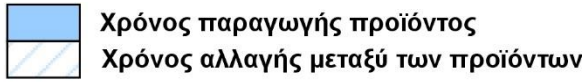
Οι περιορισμοί (3.10) και (3.11) εξασφαλίζουν ότι εάν το προϊόν p συσκευάζεται στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n ($Y_{p,j,n}=1$) τότε το πολύ ένα προϊόν pp συσκευάζεται πριν και μετά από το p . Σε περίπτωση που το προϊόν p , συσκευάζεται πρώτο στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , ($WF_{p,j,n}=1$), τότε δεν προηγείται άλλο προϊόν. Αντίστοιχα, αν το προϊόν p συσκευάζεται τελευταίο στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , ($WL_{p,j,n}=1$), τότε δεν συσκευάζεται άλλο προϊόν μετά από αυτό.

Περιορισμοί εναλλαγών μεταξύ προϊόντων σε διαφορετικό χρονικό διάστημα

$$WF_{p,j,n} = \sum_{pp \in P} X_{in_{pp,p,j,n}} \quad \forall p \in P, j \in J, n \in N, n > 1 \quad (3.12)$$

$$WL_{p,j,n-1} = \sum_{pp \in P} X_{in_{p,pp,j,n}} \quad \forall p \in P, j \in J, n \in N, n > 1 \quad (3.13)$$

Οι περιορισμοί (3.12) και (3.13) δηλώνουν ότι μπορεί να υπάρχει το πολύ ένα προϊόν που παράγεται πρώτο και το πολύ ένα προϊόν που παράγεται τελευταίο σε κάθε υποδιάστημα n . Για την καλύτερη κατανόηση των περιορισμών, παρουσιάζεται η απεικόνιση τους στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση των περιορισμών 3.12 και 3.13

Περιορισμοί Μεγέθους Παρτίδας Προϊόντων

$$Q_{p,j,n} = T_{p,j,n} * rate_{p,j} \quad \forall p \in P, j \in J, n \in N \quad (3.14)$$

Σύμφωνα με τη παραπάνω εξίσωση (3.14), η ποσότητα του προϊόντος p , που παράγεται στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , ισούται με γινόμενο του ρυθμού συσκευασίας του προϊόντος p , στη γραμμή παραγωγής j , επί το χρόνο επεξεργασίας του.

$$Q_{p,j,n} \leq \max_p p_{j,n} * Y_{p,j,n} \quad \forall p, j \in P, j, n \in N \quad (3.15)$$

$$Q_{p,j,n} \geq \min_p p * Y_{p,j,n} \quad \forall p, j \in P, j, n \in N \quad (3.16)$$

Οι περιορισμοί (3.15) και (3.16) αποτελούν το ανώτατο και κατώτερο όριο τεμαχίων που μπορούν να παραχθούν. Συγκεκριμένα όταν ένα προϊόν p , παράγεται στη γραμμή παραγωγής j , τη χρονική περίοδο n , ($Y_{p,j,n} = 1$), τότε τα τεμάχια που μπορούν να παραχθούν έχουν μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή.

Αντικειμενική Συνάρτηση

Πρωταρχικό μέλημα των βιομηχανιών είναι η ελαχιστοποίηση των εξόδων που έχουν, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με διάφορα μέσα. Ένας από τους κύριους τρόπους που συμβάλλει στη μείωση των εξόδων που έχει μια βιομηχανία είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων. Ως εκ τούτου, ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των απαιτούμενων εναλλαγών και να επιλεγθούν οι εναλλαγές που καταναλώνουν το λιγότερο χρόνο και πόρους.

Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται στο μαθηματικό μοντέλο αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του χρόνου των εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων κατά τη παραγωγή.

$$OBJ = \sum_{p,j \in P_{p,j}, n \in N} Y_{p,j,n} * prior_p + 100 * \sum_{p \neq pp, p, j \in P_{p,j}, pp \in P_{pp,j}, n \in N} X_{p,pp,j,n} * Cht_{j,p,pp} + 100 * \sum_{p \neq pp, p, j \in P_{p,j}, pp \in P_{pp,j}, n \in N} Xin_{p,pp,j,n} * Cht_{j,p,pp} \quad (3.17)$$

Συγκεκριμένα, ο πρώτος όρος της συνάρτησης εξασφαλίζει την προτεραιότητα με την οποία παράγονται τα προϊόντα, την οποία χρησιμοποιεί η βιομηχανία για να καλύψει με βεβαιότητα ένα ποσοστό της ζήτησης των προϊόντων. Οι άλλοι 2 όροι είναι το σύνολο του χρόνου εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων, όταν υπάρχει εναλλαγή ($X_{p,pp,j,n} = 1, Xin_{p,pp,j,n} = 1$), ενώ οι συντελεστές χρησιμοποιούνται για να έρθουν οι όροι στην ίδια τάξη μεγέθους. Το μαθηματικό μοντέλο εισάγεται στο λογισμικό GAMS και επιλύεται με τη βοήθεια του επιλυτή CPLEX.

3.4 Το λογισμικό GAMS

Το GAMS (General Algebraic Modeling System) είναι ένα εργαλείο λογισμικού που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Παρέχει μια υψηλού επιπέδου γλώσσα μοντελοποίησης που επιτρέπει στους χρήστες να περιγράψουν σύνθετα μοντέλα βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας αλγεβρικές εξισώσεις και περιορισμούς. Υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού, συμπεριλαμβανομένου του γραμμικού προγραμματισμού, του μη γραμμικού προγραμματισμού, του μεικτού ακέραιου προγραμματισμού και του στοχαστικού

προγραμματισμού. Μόλις διατυπωθεί ένα μοντέλο στο GAMS, μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας έναν από τους διάφορους ισχυρούς επιλυτές βελτιστοποίησης που περιλαμβάνονται στο λογισμικό. Το GAMS υποστηρίζει τόσο εμπορικούς όσο και ανοιχτού κώδικα επιλυτές βελτιστοποίησης, δίνοντας στους χρήστες ένα ευρύ φάσμα επιλογών για την επίλυση των μοντέλων τους.

Ένα μοντέλο GAMS αποτελείται συνήθως από δύο κύρια στοιχεία, την αντικειμενική συνάρτηση και το σύνολο των περιορισμών. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι μια μαθηματική έκφραση που ορίζει την ποσότητα την οποία το μοντέλο επιδιώκει να βελτιστοποιήσει. Για παράδειγμα, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να εκφράζει το χρόνο ολοκλήρωσης παραγωγής των προϊόντων μιας βιομηχανικής μονάδας. Το σύνολο των περιορισμών ορίζει το σύνολο των συνθηκών που πρέπει να ικανοποιεί η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να εκφραστούν χρησιμοποιώντας αλγεβρικές εξισώσεις, λογικές εκφράσεις ή ανισώσεις. Επιπλέον, ένα μοντέλο GAMS περιλαμβάνει ένα σύνολο μεταβλητών απόφασης, οι οποίες είναι οι μεταβλητές για τις οποίες το μοντέλο επιδιώκει να δώσει λύση. Οι μεταβλητές αυτές μπορεί να είναι συνεχείς, ακέραιες ή δυαδικές, ανάλογα τη φύση του προβλήματος. Για τη διαμόρφωση ενός μοντέλου GAMS, ο χρήστης ορίζει πρώτα τις μεταβλητές απόφασης, την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς χρησιμοποιώντας τη γλώσσα μοντελοποίησης. Μόλις οριστεί το μοντέλο, ο χρήστης μπορεί στη συνέχεια να καθορίσει τις τιμές των δεδομένων για τις μεταβλητές και τις παραμέτρους και να επιλέξει έναν κατάλληλο επιλυτή για την επίλυση του μοντέλου και τη δημιουργία μιας λύσης.

Ο μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός MILP είναι ένας τύπος μαθηματικού προβλήματος βελτιστοποίησης στο οποίο ορισμένες από τις μεταβλητές απόφασης περιορίζονται σε ακέραιες τιμές, ενώ άλλες επιτρέπεται να λαμβάνουν συνεχείς τιμές. Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί ενός προβλήματος MILP είναι γραμμικοί, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να εκφραστούν χρησιμοποιώντας γραμμικές εξισώσεις ή ανισώσεις. Η παρουσία ακέραιων μεταβλητών σε ένα πρόβλημα MILP καθιστά την επίλυση του πιο δύσκολη από ένα τυπικό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο περιλαμβάνει μόνο συνεχείς μεταβλητές.

4. Αποτελέσματα - Μελέτες Περίπτωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής της βιομηχανικής μονάδας κονιαμάτων, σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2. Ειδικότερα, με την εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού ελαχιστοποιείται ο συνολικός χρόνος εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής για 5 διαφορετικά εβδομαδιαία σενάρια ζήτησης, τα οποία βασίζονται σε ιστορικές εβδομαδιαίες παραγωγής της βιομηχανίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η βιομηχανία παράγει τα προϊόντα με σειρά προτεραιότητας, η οποία συμπεριλαμβάνεται στις εβδομαδιαίες ζητήσεις. Στη συνέχεια, μελετώνται διάφορες μελέτες περίπτωσης (case studies), με σκοπό την αναλυτική εμβάθυνση του προβλήματος. Συγκεκριμένα, αναλύεται η περίπτωση αύξησης και μείωσης των χρόνων εναλλαγών των προϊόντων, αύξηση της ζήτησης, επέκταση ωραρίου και τέλος αφαίρεση των προτεραιοτήτων.

Για την επίλυση των μαθηματικών μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GAMS, το οποίο είναι μια γλώσσα μοντελοποίησης υψηλού επιπέδου που χρησιμοποιείται για τη διατύπωση και επίλυση μαθηματικών προβλημάτων βελτιστοποίησης σε μεγάλη κλίμακα. Ο επιλυτής που χρησιμοποιείται για τις παραπάνω περιπτώσεις είναι ο επιλυτής ILOG CPLEX, ο οποίος είναι κατάλληλος για την επίλυση προβλημάτων μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού.

Η ζήτηση παρατίθεται στο Παράρτημα Α και συγκεκριμένα στους Πίνακες Α2-Α6. Επιπλέον, πραγματοποιείται αναπαράσταση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα Gantt (Gantt Charts), τα οποία κατασκευάστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB. Τα διαγράμματα Gantt (Gantt Charts) είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την απεικόνιση της διάρκειας των διεργασιών που πραγματοποιούνται στη βιομηχανία με συγκεκριμένη σειρά. Η παραγωγική μονάδα λειτουργεί 5 μέρες την εβδομάδα με αποτέλεσμα τα διαγράμματα Gantt να εκτείνονται μέχρι τις 120 ώρες. Στον κάθετο άξονα των διαγραμμάτων απεικονίζονται οι γραμμές παραγωγής της βιομηχανίας. Κάθε χρώμα στο διάγραμμα αντιπροσωπεύει το χρόνο παραγωγής ενός προϊόντος, ενώ τα κενά ενδιάμεσα αφορούν τον χρόνο εναλλαγής των προϊόντων. Επιπλέον, στα κενά διαστήματα συμπεριλαμβάνονται τα διαλλείματα των εργαζομένων, κατά τα οποία η

παραγωγή παύει να λειτουργεί, οι χρόνοι προετοιμασίας της γραμμής κατά την έναρξη ή τον τερματισμό της παραγωγής στη γραμμή και οι νεκροί χρόνοι κατά τους οποίους δε δουλεύει η γραμμή.

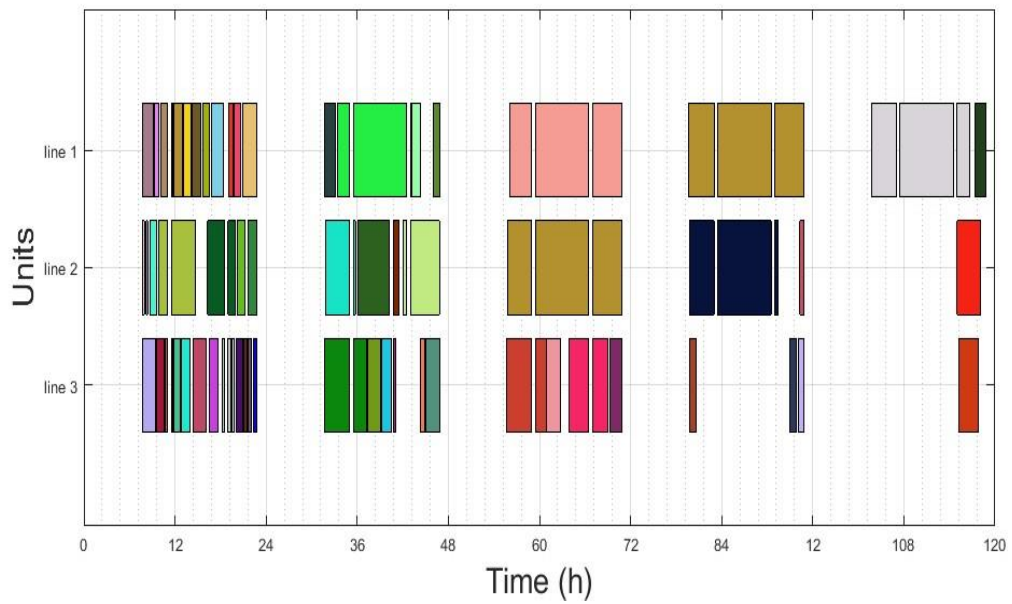
4.1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης εβδομαδιαίου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής

Σε αυτήν την υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής κονιαμάτων της ISOMAT S.A. Η διαδικασία παραγωγής των κονιαμάτων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την ενότητα 2 ενώ η επίλυση του προβλήματος έγινε με τη βοήθεια του μαθηματικού μοντέλου της ενότητας 3. Η ζήτηση κάθε εβδομάδας βασίζεται σε ιστορικές παραγόμενες ποσότητες της βιομηχανίας σε διάφορες εποχές του χρόνου. Παρατηρήθηκε ότι κατά τις χειμερινές περιόδους η ζήτηση ήταν αρκετά χαμηλή, ενώ κατά τη θερινή περίοδο η ζήτηση ήταν σημαντικά υψηλή.

Σκοπός της βελτιστοποίησης του εβδομαδιαίου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εναλλαγής των προϊόντων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη καλύτερη κατανομή των προϊόντων στη παραγωγή, ώστε να ικανοποιείται η εβδομαδιαία ζήτηση και να υπάρχει δυνατότητα προσθήκης επιπλέον προϊόντων στη παραγωγή με σκοπό την αύξηση των εσόδων.

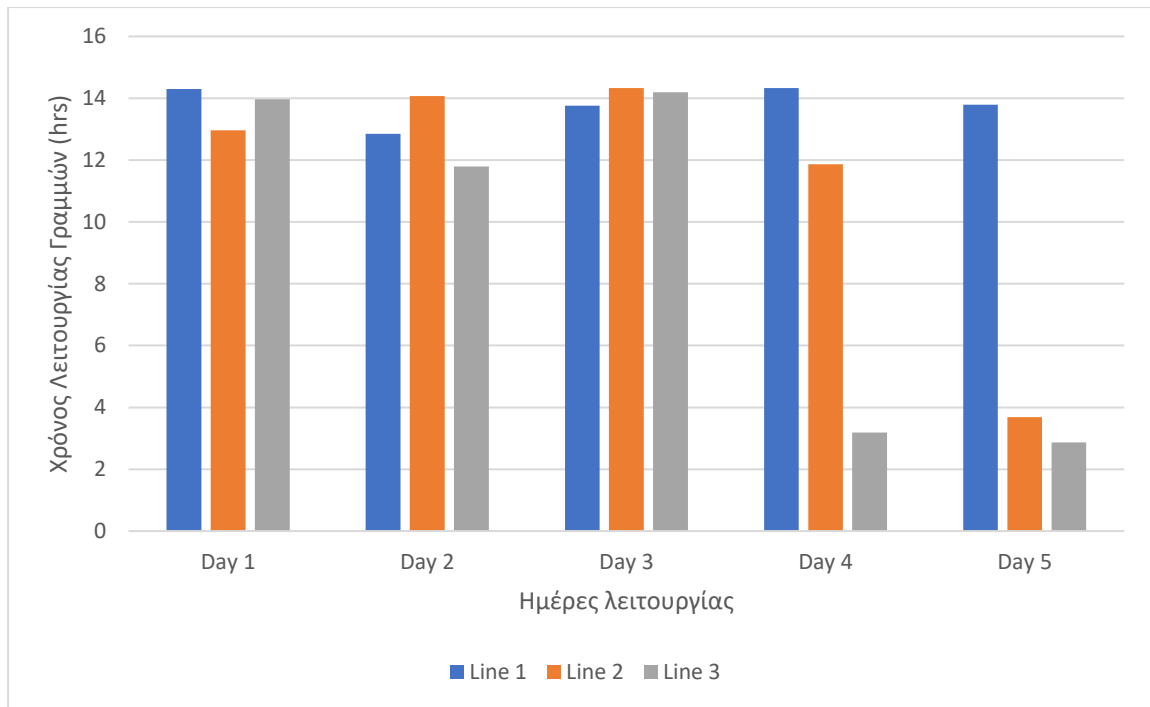
1^η εβδομαδιαία ζήτηση

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής, που προκύπτει από τη επίλυση του μαθηματικού μοντέλου με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εναλλαγών για την πρώτη εβδομαδιαία ζήτηση, η οποία παρατίθεται στον Πίνακα Α2 στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 4.1: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1^{ης} εβδομαδιαίας ζήτησης

Από το παραπάνω Σχήμα παρατηρείται ότι η γραμμή παραγωγής με τη μεγαλύτερη ζήτηση προϊόντων είναι η 1 αφού δεν υπάρχει διαθέσιμος χώρος στο πρόγραμμα. Επιπλέον, η 3^η γραμμή έχει τη μεγαλύτερη διάρκεια χρόνων αλλαγής μεταξύ των προϊόντων σε σχέση με τις άλλες δύο. Κάθε γραμμή παραγωγής παρουσιάζει 2 διαστήματα ανά ημέρα που αντιπροσωπεύουν τα διαλλείματα των εργαζομένων, όπου σταματάει η παραγωγή. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 1η εβδομαδιαία ζήτηση

Από το Σχήμα 4.2 παρατηρείται ότι η γραμμή 1, η οποία έχει τη μεγαλύτερη δυναμικότητα, χρησιμοποιείται σχεδόν όλες τις ώρες της εβδομάδας. Στις γραμμές 2 και 3 παρατηρείται πτώση των ωρών λειτουργίας στη 4^η και 5^η μέρα, με αποτέλεσμα να υπάρχει δυνατότητα προσθήκης επιπλέον προϊόντων σε αυτές τις γραμμές. Αναλυτικότερα οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα παρουσιάζονται στον Πίνακα Β1 στο Παράρτημα Β.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για την πρώτη εβδομαδιαία ζήτηση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.1: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής, 1^η εβδομαδιαία ζήτηση

Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	3.54
LINE 2	4.50
LINE 3	5.91

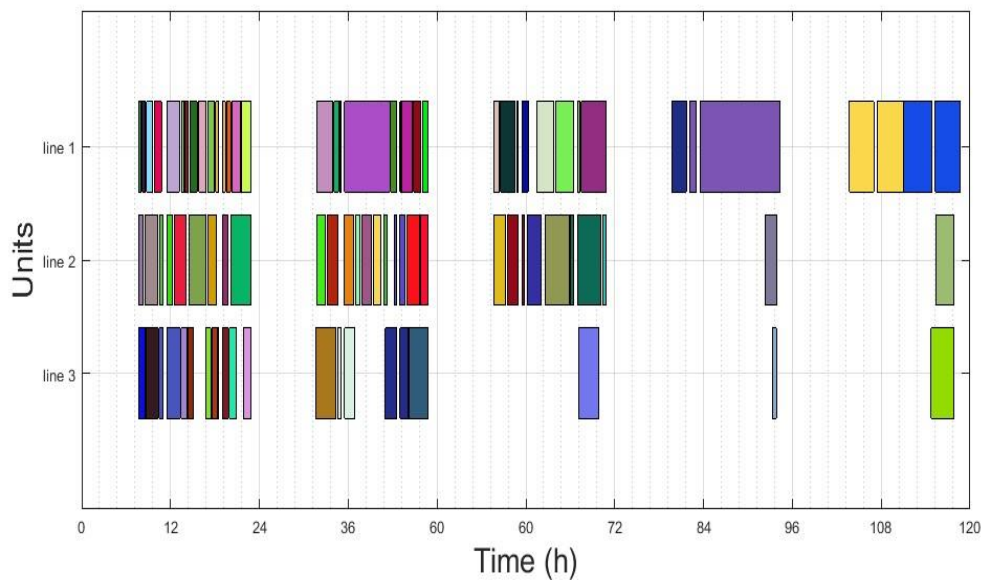
Τέλος, στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου, 1^η εβδομαδιαία ζήτηση

Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	11.37

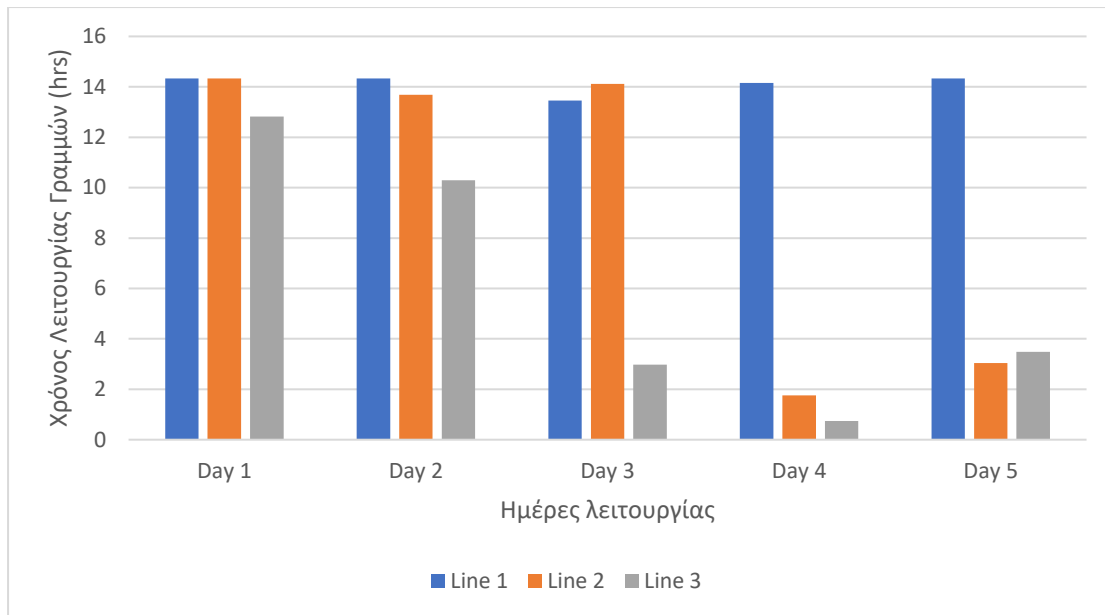
2^η εβδομαδιαία ζήτηση

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής, που προκύπτει από τη επίλυση του μαθηματικού μοντέλου με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εναλλαγών για τη δεύτερη εβδομαδιαία ζήτηση, η οποία παρατίθεται στον Πίνακα Α3 στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 4.3: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 2ης εβδομαδιαίας ζήτησης

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.3 χρησιμοποιούνται και οι 3 γραμμές παραγωγής όλη την εβδομάδα. Η πρώτη γραμμή λειτουργεί όλες τις μέρες της εβδομάδας αφού έχει τη μεγαλύτερη ζήτηση και τους μικρότερους χρόνους εναλλαγής μεταξύ των προϊόντων. Επιπλέον, παρατηρείται πτώση στην παραγωγή από τη 4^η μέρα στη γραμμή 2 ενώ στη γραμμή 3 παρατηρείται πτώση της παραγωγής από την 3^η μέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι 2 αυτές γραμμές να χαρακτηρίζονται από χαμηλή ζήτηση τη συγκεκριμένη εβδομάδα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 2η εβδομαδιαία ζήτηση

Από το Σχήμα 4.4 συμπεραίνεται ότι η πρώτη γραμμή παραγωγής είναι σε λειτουργία όλες τις μέρες της εβδομάδας. Στη δεύτερη γραμμή παραγωγής παρατηρείται πτώση των ωρών λειτουργίας στην 4^η και 5^η μέρα, ενώ η τρίτη γραμμή παραγωγής από τη 3^η μέρα και μετά λειτουργεί ελάχιστες ώρες. Αναλυτικότερα οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα παρουσιάζονται στον Πίνακα Β2 στο Παράρτημα Β.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη πρώτη εβδομαδιαία ζήτηση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.3: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής, 2η εβδομαδιαία ζήτηση

Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	6.08
LINE 2	7.60
LINE 3	3.46

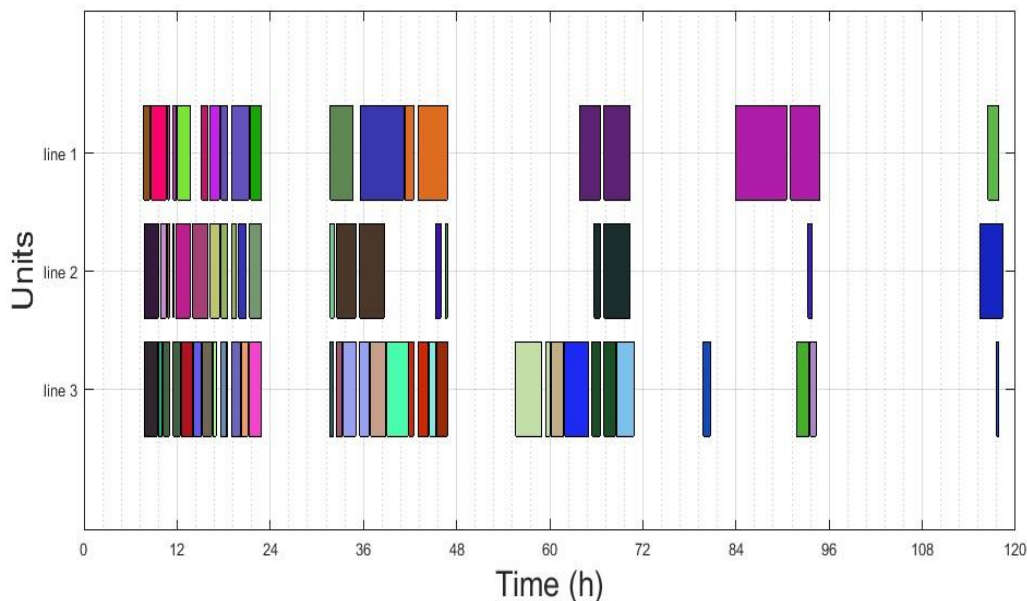
Τέλος, στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου, 2η εβδομαδιαία ζήτηση

Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	9.96

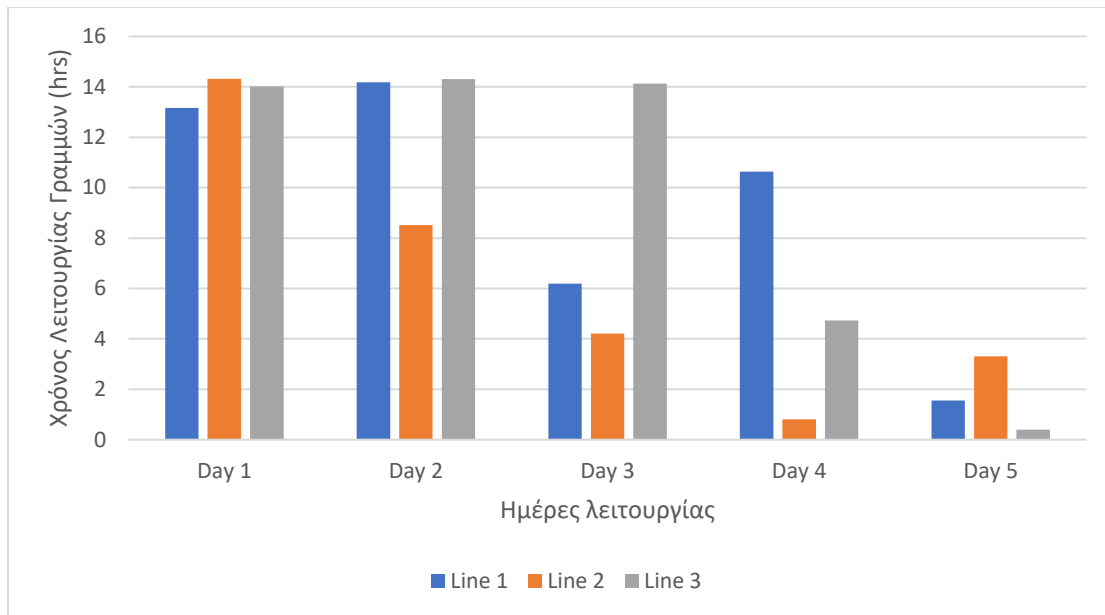
3^η εβδομαδιαία ζήτηση

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής, που προκύπτει από τη επίλυση του μαθηματικού μοντέλου με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εναλλαγών για την τρίτη εβδομαδιαία ζήτηση, η οποία παρατίθεται στον Πίνακα A4 στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 4.5: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 3ης εβδομαδιαίας ζήτησης

Σύμφωνα με το παραπάνω χρονοδιάγραμμα, παρουσιάζεται μια πτώση των ωρών λειτουργίας μετά την τρίτη μέρα. Επιπλέον η 3^η γραμμή φαίνεται να παράγει περισσότερα προϊόντα από τις άλλες γραμμές παραγωγής. Από το διάγραμμα συμπεραίνεται ότι η πρώτη γραμμή παράγει λιγότερα προϊόντα αλλά περισσότερα τεμάχια ανά προϊόν από τη 3^η γραμμή λόγω της μεγαλύτερης δυναμικότητας που έχει. Η συγκεκριμένη εβδομάδα χαρακτηρίζεται από χαμηλή ζήτηση. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 3η εβδομαδιαία ζήτηση

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.6, παρατηρείται ότι οι 1^η και 2^η γραμμή παραγωγής έχουν μειωμένες ώρες λειτουργίας και ειδικά μετά τη 3^η μέρα, ενώ στη 3^η γραμμή παραγωγής οι ώρες λειτουργίας μειώνονται απότομα από τη 4^η μέρα. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι στη συγκεκριμένη εβδομαδιαία ζήτηση θα μπορούσαν να προστεθούν περισσότερα προϊόντα σε όλες τις γραμμές παραγωγής. Αναλυτικότερα οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα παρουσιάζονται στον Πίνακα Β3 στο Παράρτημα Β.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη πρώτη εβδομαδιαία ζήτηση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.5 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.5: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής, 3η εβδομαδιαία ζήτηση

Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	2.67
LINE 2	4.43
LINE 3	4.83

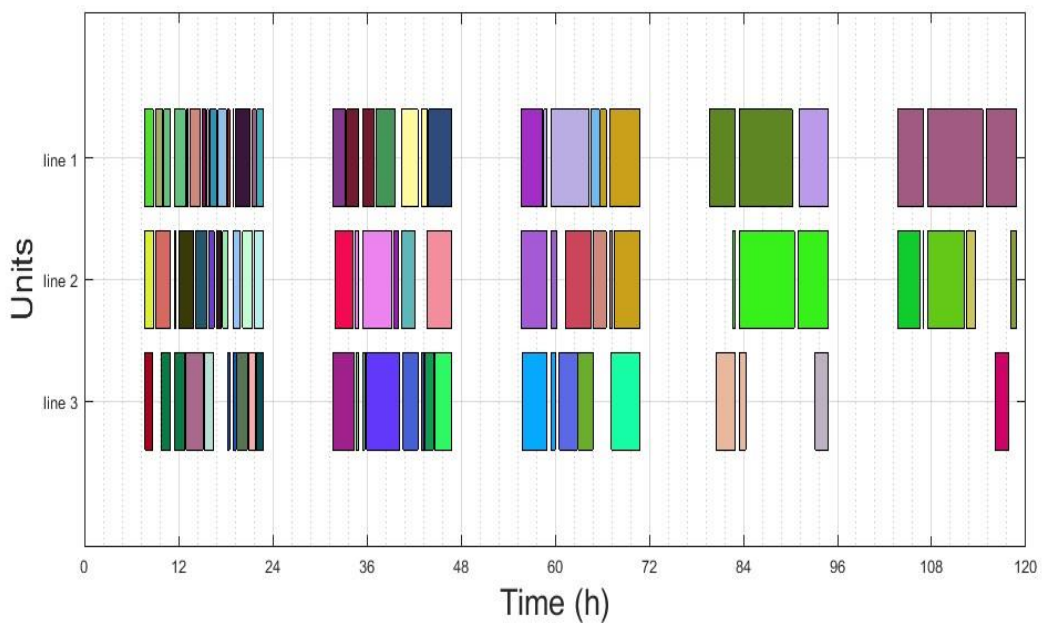
Τέλος, στον Πίνακα 4,6 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου, 3η εβδομαδιαία ζήτηση

Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	12.01

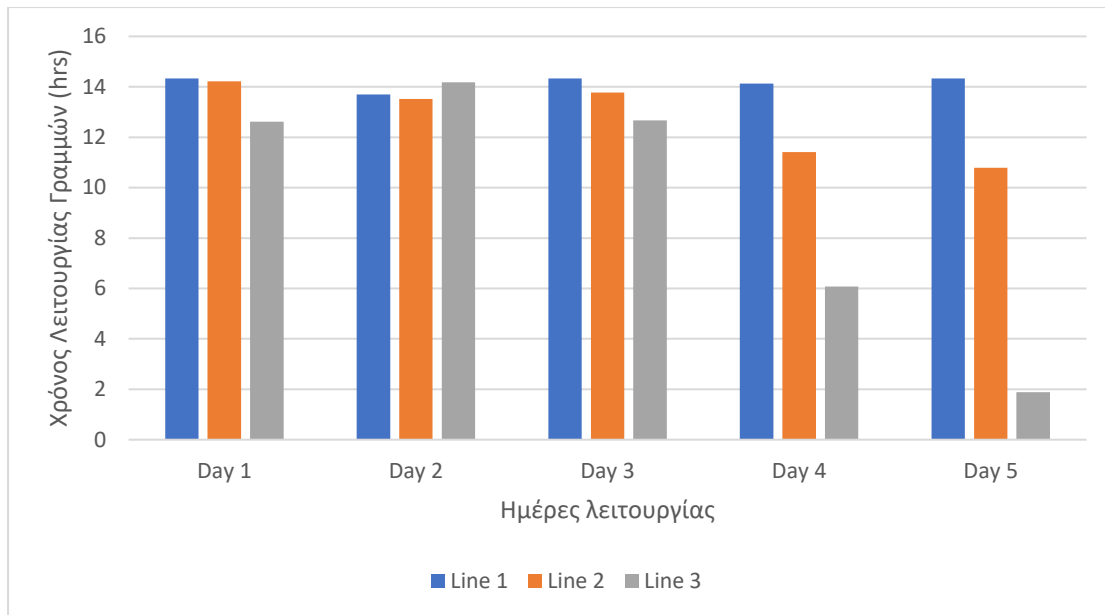
4^η εβδομαδιαία ζήτηση

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής, που προκύπτει από τη επίλυση του μαθηματικού μοντέλου με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εναλλαγών για την τέταρτη εβδομαδιαία ζήτηση, η οποία παρατίθεται στον Πίνακα Α5 στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 4.7: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4ης εβδομαδιαίας ζήτησης

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.7 η ζήτηση είναι αρκετά υψηλή, αφού χρησιμοποιούνται οι γραμμές παραγωγής όλες τις μέρες της εβδομάδας. Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα.



Σχήμα 4.8: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 4η εβδομαδιαία ζήτηση

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.8 η 1^η γραμμή παραγωγής λειτουργεί όλες τις ώρες τις εβδομάδας ενώ η 2^η γραμμή μετά τη 3^η μέρα παρουσιάζει μια μικρή πτώση στις ώρες λειτουργίας. Επιπλέον, η 3^η γραμμή λειτουργεί λίγες ώρες τη τέταρτη και πέμπτη μέρα. Αναλυτικότερα οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα παρουσιάζονται στον Πίνακα Β4 στο Παράρτημα Β.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη πρώτη εβδομαδιαία ζήτηση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.7 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.7: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής, 4η εβδομαδιαία ζήτηση

Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	4.76
LINE 2	7.08
LINE 3	4.37

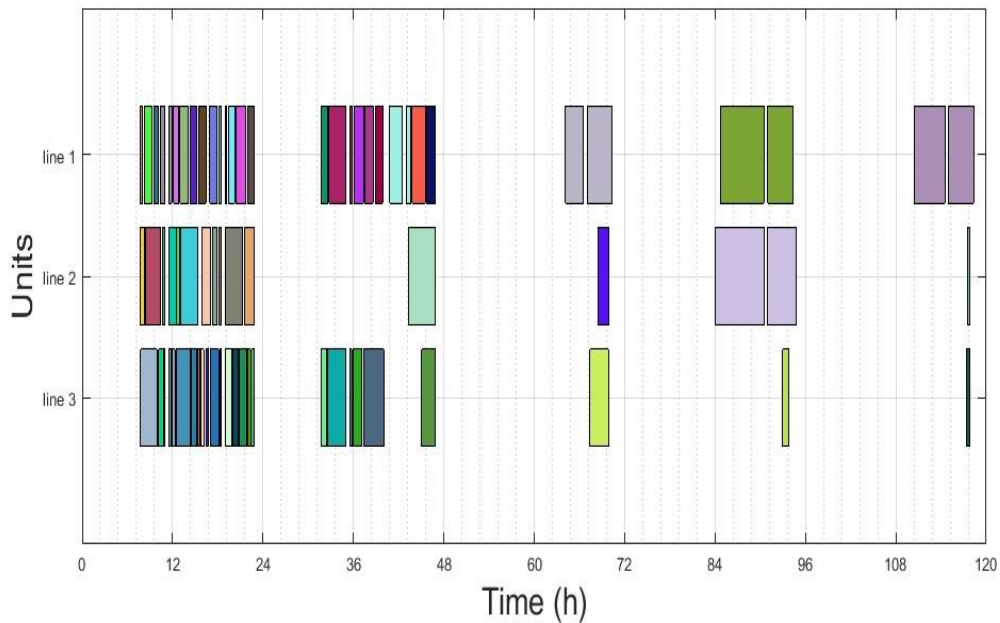
Τέλος, στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

Πίνακας 4.8: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου, 4η εβδομαδιαία ζήτηση

Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	10.77

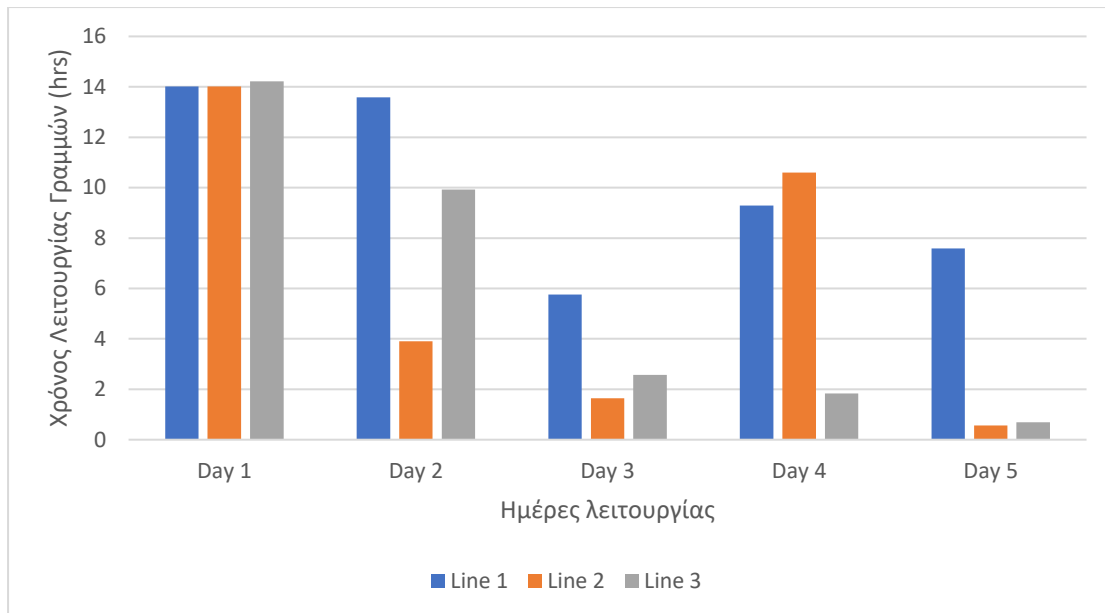
5^η εβδομαδιαία ζήτηση

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής, που προκύπτει από τη επίλυση του μαθηματικού μοντέλου με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εναλλαγών για την πέμπτη εβδομαδιαία ζήτηση, η οποία παρατίθεται στον Πίνακα Α6 στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 4.9: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 5ης εβδομαδιαίας ζήτησης

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.9 η ζήτηση είναι χαμηλή, αφού κάθε γραμμή μετά τη 2^η μέρα παρουσιάζει ραγδαία πτώση στο χρόνο λειτουργίας τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.10 αναλυτικά οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα.



Σχήμα 4.10: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 5η εβδομαδιαία ζήτηση

Από το Σχήμα 4.10 συμπεραίνεται ότι οι γραμμές λειτουργούν πλήρες μόνο τη πρώτη μέρα. Στη δεύτερη μέρα και μετά υπάρχει μείωση των ωρών λειτουργίας ενώ στη 5^η μέρα η δεύτερη και η τρίτη γραμμή παραγωγής λειτουργούν ελάχιστες ώρες. Στο Πίνακα Β5 στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη πρώτη εβδομαδιαία ζήτηση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.9 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.9: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής, 5η εβδομαδιαία ζήτηση

Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	4.60
LINE 2	3.26
LINE 3	4.08

Τέλος, στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

Πίνακας 4.10: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου, 5η εβδομαδιαία ζήτηση

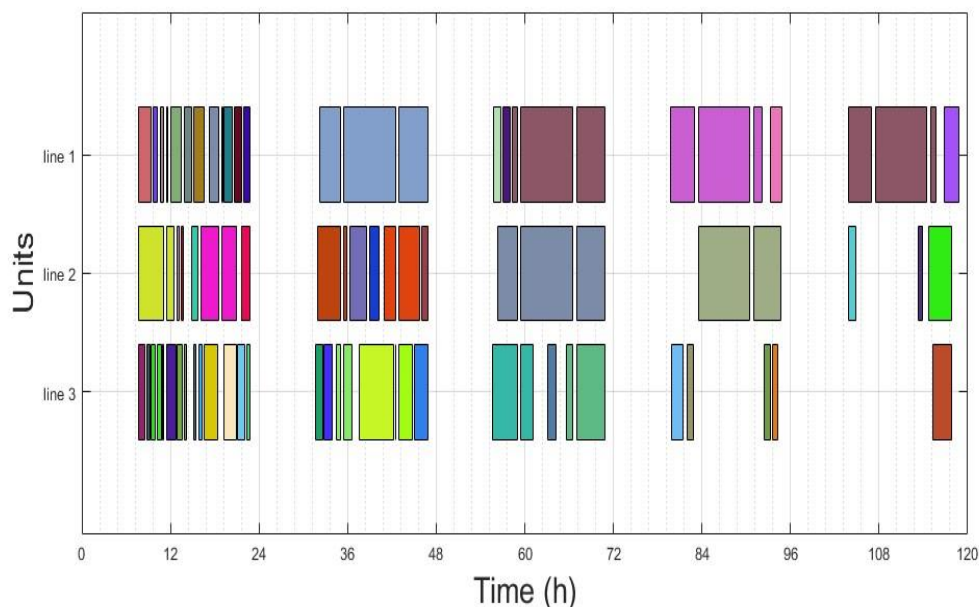
Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	1.26

4.2 Αύξηση Χρόνου Εναλλαγών

Σε αυτήν την υποενότητα εξετάζεται η περίπτωση αύξησης του χρόνου εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων. Είναι ιδιαίτερα σημαντική περίπτωση επειδή η συγκεκριμένη βιομηχανική μονάδα δεν είναι εντελώς αυτοματοποιημένη με αποτέλεσμα να απαιτείται ανθρώπινο δυναμικό για τις αλλαγές των προϊόντων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν ανθρώπινα σφάλματα κατά την εναλλαγή προϊόντων και να αυξάνεται ο χρόνος εναλλαγής. Επιπλέον, οι εναλλαγές εξαρτώνται από το επίπεδο των δεξιοτήτων των εργαζομένων. Σε περίπτωση που οι εργαζόμενοι δεν είναι κατάλληλα εκπαιδευμένοι ή ειδικευμένοι στη διαδικασία αλλαγής, μπορεί να χρειαστεί περισσότερος χρόνος για τη μετάβαση από το ένα προϊόν στο άλλο. Αυτό ενισχύεται περισσότερο με το γεγονός ότι η διαδικασία εναλλαγής προϊόντων περιλαμβάνει χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού.

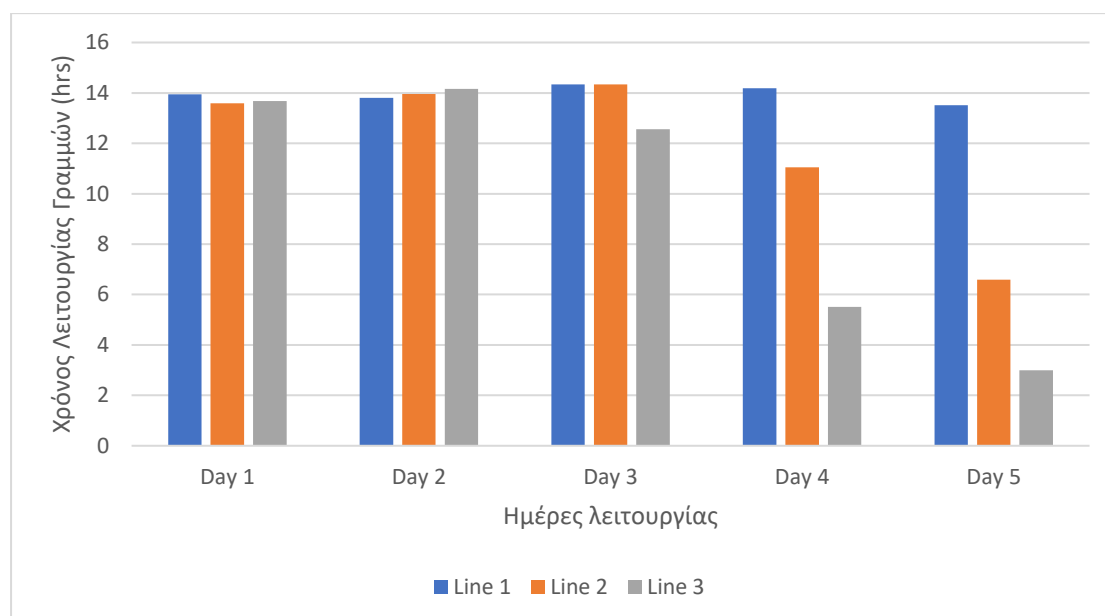
Για τη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε ο χρονοπρογραμματισμός για 2 εβδομαδιαίες ζητήσεις με αύξηση του χρόνου εναλλαγών κατά 50%. Από τα διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η βιομηχανική μονάδα, με αύξηση του χρόνου εναλλαγών, μπορεί να καλύψει τη ζήτηση των πελατών.

1^η εβδομαδιαία ζήτηση



Σχήμα 4.11: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1ης εβδομαδιαίας ζήτησης με αύξηση του χρόνου εναλλαγών

Συγκρίνοντας το Σχήμα 4.1 με το παραπάνω Σχήμα παρατηρείται ότι τα κενά είναι μεγαλύτερα λόγω του αυξημένου χρόνου εναλλαγών με αποτέλεσμα οι γραμμές παραγωγής να λειτουργούν περισσότερες ώρες. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.12 αναλυτικά οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα.



Σχήμα 4.12: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 1η εβδομαδιαία ζήτηση με αύξηση του χρόνου εναλλαγών

Από το Σχήμα 4.12 παρατηρείται σταδιακή πτώση των ωρών λειτουργίας της 3^η και 2^η γραμμής μετά την 3^η μέρα, ενώ η πρώτη που έχει τη μεγαλύτερη ζήτηση λειτουργεί πλήρως όλες τις μέρες της εβδομάδας.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη πρώτη εβδομαδιαία ζήτηση για τη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.11 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.11: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με αύξηση του χρόνου εναλλαγών, 1η εβδομαδιαία ζήτηση

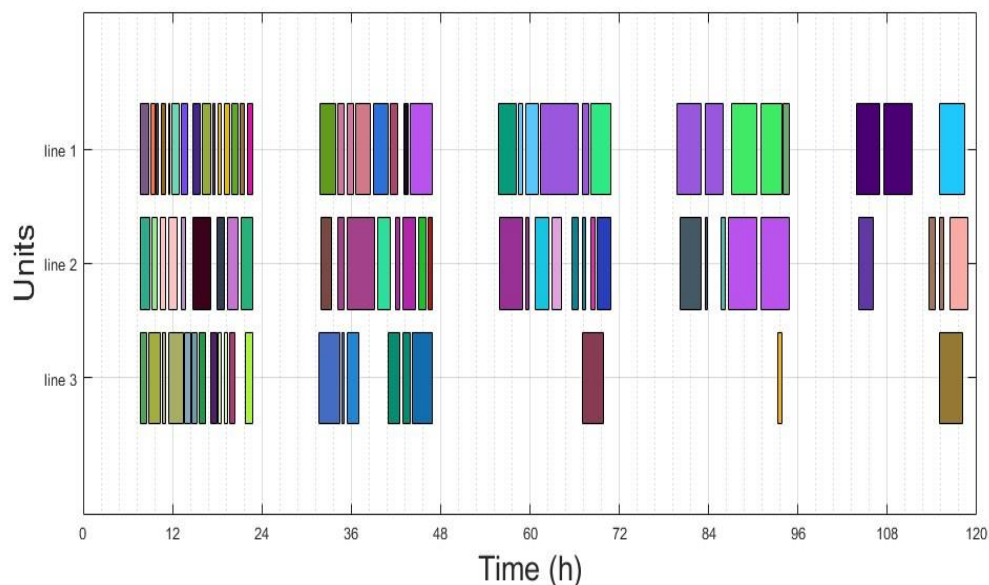
Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	5.00
LINE 2	7.22
LINE 3	8.43

Τέλος, στον Πίνακα 4.12 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

Πίνακας 4.12: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με αύξηση του χρόνου εναλλαγών, 1η εβδομαδιαία ζήτηση

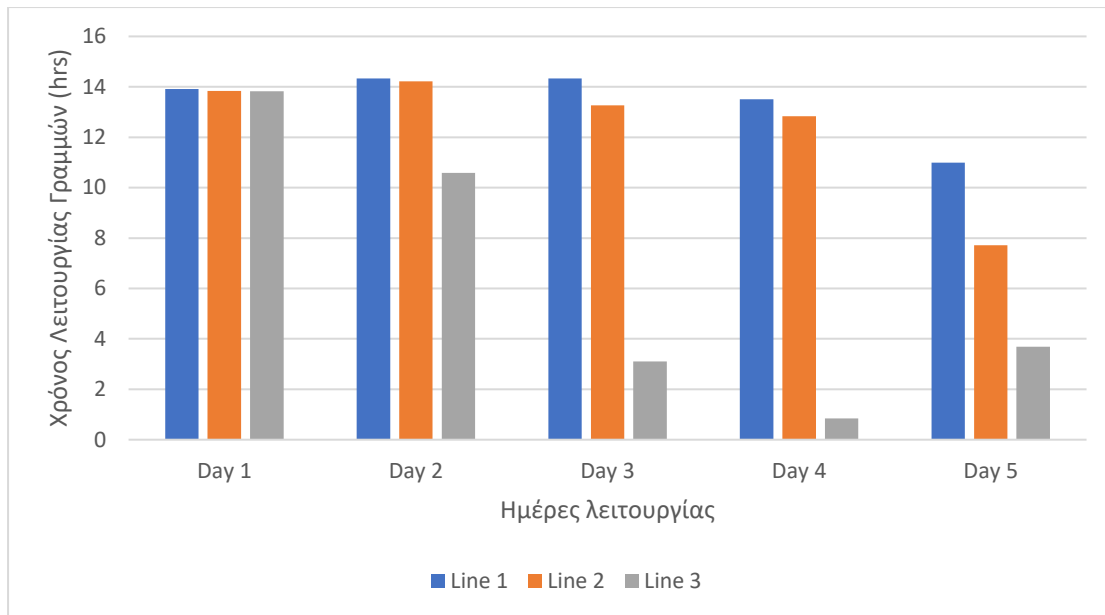
Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	10.87

2^η εβδομαδιαία ζήτηση



Σχήμα 4.13: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 2ης εβδομαδιαίας ζήτησης με αύξηση του χρόνου εναλλαγών

Συγκρίνοντας το Σχήμα 4.3 με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι υπάρχουν μεγαλύτερα κενά μεταξύ των αλλαγών, ενώ η 2^η γραμμή λειτουργεί περισσότερες ώρες για να καλυφθεί η ζήτηση. Η γραμμή 3 δεν επηρεάστηκε από την αύξηση του χρόνου εναλλαγών και λειτουργεί ίδιες ώρες. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.14 αναλυτικά οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα.



Σχήμα 4.14: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 2η εβδομαδιαία ζήτηση με αύξηση του χρόνου εναλλαγών

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται μια σταδιακή μείωση των ωρών λειτουργίας κάθε γραμμής ανά ημέρα, ειδικά στη 3^η γραμμή.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη δεύτερη εβδομαδιαία ζήτηση για τη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.13 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.13: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με αύξηση του χρόνου εναλλαγών, 2η εβδομαδιαία ζήτηση

Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	8.45
LINE 2	12.00
LINE 3	5.18

Τέλος, στον Πίνακα 4.14 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

Πίνακας 4.14: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με αύξηση του χρόνου εναλλαγών, 2η εβδομαδιαία ζήτηση

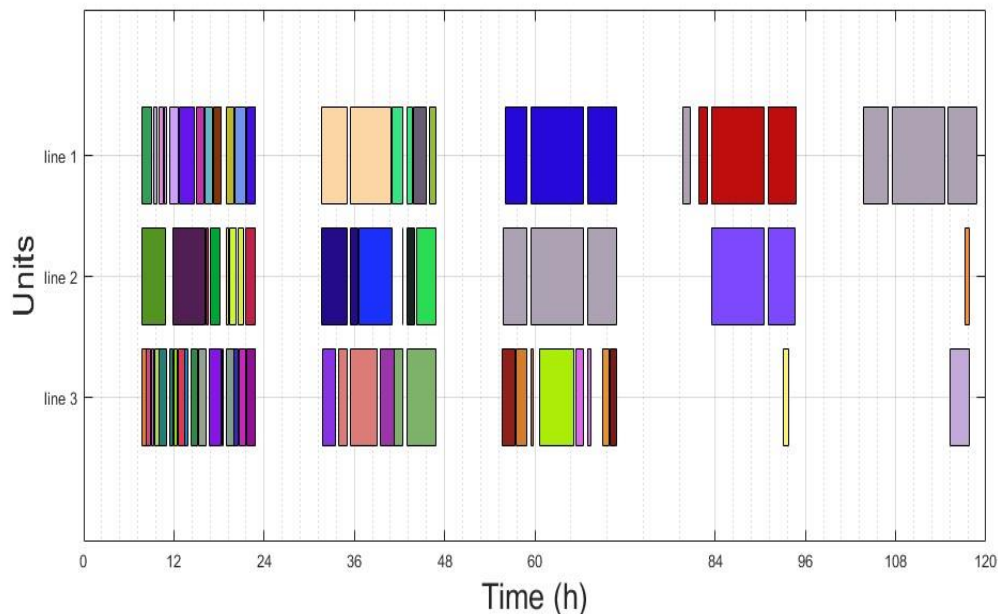
Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	15.28

4.3 Μείωση Χρόνου Εναλλαγών

Σε αυτήν την υποένοτητα μελετάται η περίπτωση μείωσης του χρόνου εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων. Η περίπτωση αυτή είναι εφικτή με την πλήρη αυτοματοποίηση της παραγωγής. Με αυτό τον τρόπο η διαδικασία εναλλαγής των προϊόντων θα είναι τυποποιημένη και πιο γρήγορη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων. Επιπλέον, η σωστή εκπαίδευση των εργαζομένων συμβάλει στην αύξηση της ευελιξίας και στη μείωση του χρόνου εναλλαγών.

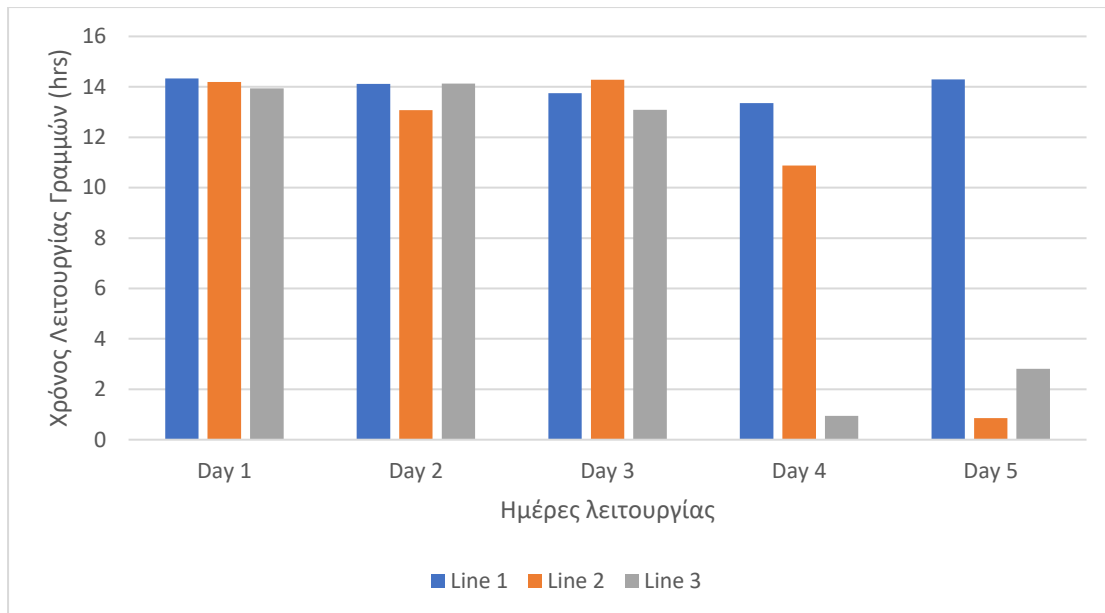
Ο χρονοπρογραμματισμός πραγματοποιήθηκε για 2 εβδομαδιαίες ζητήσεις, με μείωση του χρόνου εναλλαγών κατά 20%.

1^η εβδομαδιαία ζήτηση



Σχήμα 4.15: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1ης εβδομαδιαίας ζήτησης με μείωση του χρόνου εναλλαγών

Συγκρίνοντας το παραπάνω χρονοδιάγραμμα με το Σχήμα 4.1 παρατηρείται μείωση των ωρών λειτουργίας της δεύτερης και τρίτης γραμμής παραγωγής αφού μειώθηκαν οι χρόνοι εναλλαγής μεταξύ των προϊόντων. Η πρώτη γραμμή συνεχίζει να παράγει τις περισσότερες ποσότητες λειτουργώντας όλες τις ώρες της εβδομάδας. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.16 αναλυτικά οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα.



Σχήμα 4.16: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 1η εβδομαδιαία ζήτηση με μείωση του χρόνου εναλλαγών

Από το παραπάνω Σχήμα συμπεραίνεται ότι τη τέταρτη μέρα της εβδομάδας παρατηρείται σημαντική μείωση των ωρών λειτουργίας της τρίτης γραμμής, ενώ τη τελευταία μέρα η δεύτερη γραμμή λειτουργεί ελάχιστες ώρες. Η πρώτη γραμμή παραγωγής λειτουργεί όλες τις μέρες της εβδομάδας αφού έχει και τη μεγαλύτερη ζήτηση σε προϊόντα.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη πρώτη εβδομαδιαία ζήτηση για τη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.15 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.15: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με μείωση του χρόνου εναλλαγών, 1η εβδομαδιαία ζήτηση

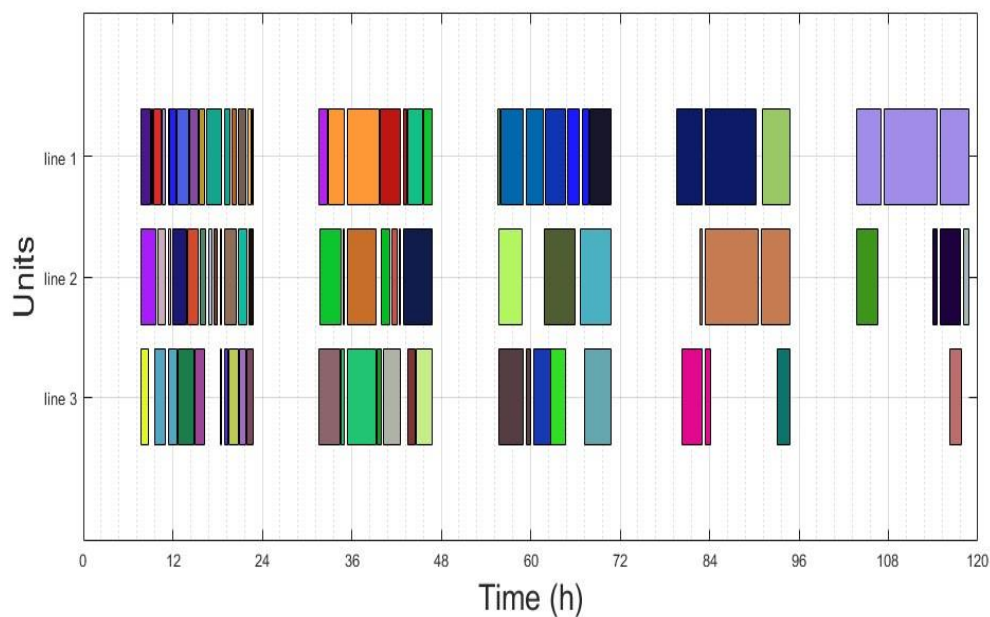
Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	2.88
LINE 2	3.65
LINE 3	4.83

Τέλος, στον Πίνακα 4.16 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

Πίνακας 4.16: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με μείωση του χρόνου εναλλαγών, 1η εβδομαδιαία ζήτηση

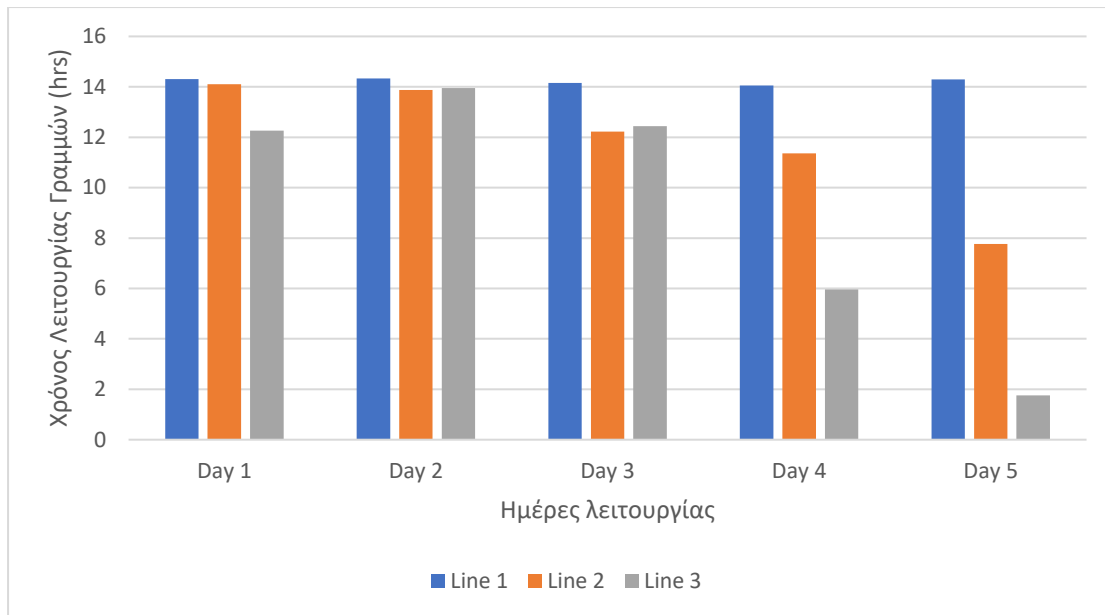
Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	9.77

4^η εβδομαδιαία ζήτηση



Σχήμα 4.17: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4ης εβδομαδιαίας ζήτησης με μείωση του χρόνου εναλλαγών

Η συγκεκριμένη εβδομαδιαία ζήτηση χαρακτηρίζεται αρκετά υψηλή ειδικά στη 1^η και 2^η γραμμή παραγωγής. Συγκρίνοντας το Σχήμα 4.7 με το παραπάνω διάγραμμα, συμπεραίνεται ότι λόγω της μείωσης των χρόνων εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων, τα κενά είναι μικρότερα ενώ μειώνεται ο χρόνος παραγωγής τις τελευταίες μέρες στη 2^η και 3^η γραμμή. Η 1^η γραμμή παραγωγής συνεχίζει να είναι φορτωμένη όλες τις ώρες της εβδομάδας λόγω της μεγάλης ζήτησης που καλύπτει. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.18 αναλυτικά οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα.



Σχήμα 4.18: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 4η εβδομαδιαία ζήτηση με μείωση του χρόνου εναλλαγών

Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο διάγραμμα, η γραμμή 1 λειτουργεί πλήρως όλες τις μέρες της εβδομάδας για να καλύψει την υψηλή ζήτηση, ενώ οι γραμμές 2 και 3 παρουσιάζουν μια σημαντική πτώση των ωρών λειτουργίας από την τέταρτη μέρα και μετά.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη τέταρτη εβδομαδιαία ζήτηση για τη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.17 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.17: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με μείωση του χρόνου εναλλαγών, 4η εβδομαδιαία ζήτηση

Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	4.00
LINE 2	5.16
LINE 3	4.30

Τέλος, στον Πίνακα 4.18 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

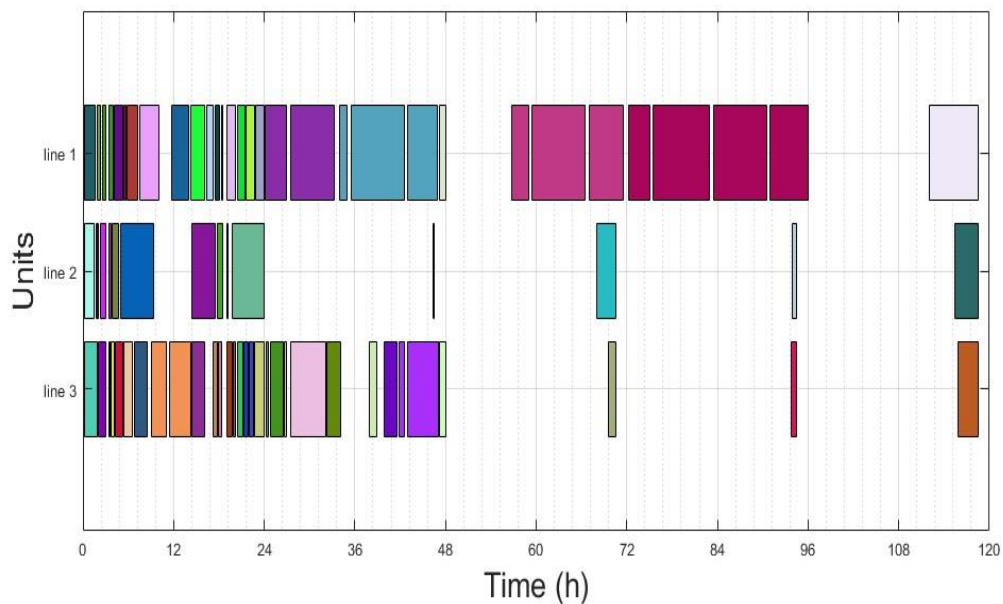
Πίνακας 4.18: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με μείωση του χρόνου εναλλαγών, 4η εβδομαδιαία ζήτηση

Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	7.86

4.4 Επέκταση Ωραρίου

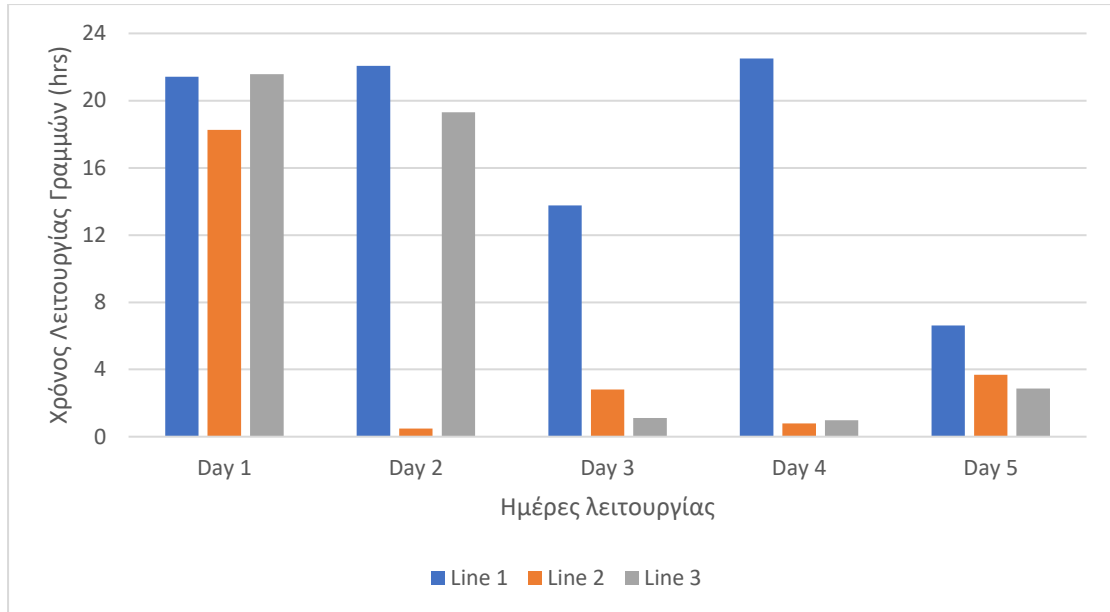
Στη συγκεκριμένη υποενότητα μελετάται η περίπτωση αύξησης του ωραρίου, προσθέτοντας μια επιπλέον 8 ώρη βάρδια. Η μονάδα παραγωγής με 24 ώρες βάρδια είναι ικανή να καλύψει υψηλές ζητήσεις πελατών, ενώ παράλληλα να είναι πιο ευέλικτη με τις αλλαγές μεταξύ των προϊόντων.

1^η εβδομαδιαία ζήτηση



Σχήμα 4.19: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1ης εβδομαδιαίας ζήτησης με επέκταση ωραρίου

Στο σχήμα 4.19 παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα για τη 1^η εβδομαδιαία ζήτηση με 24 ώρες βάρδια. Προσθέτοντας μια επιπλέον βάρδια έχει ως αποτέλεσμα η εβδομαδιαία ζήτηση να καλυφθεί πλήρως. Η πρώτη γραμμή είναι και η πιο φορτωμένη αφού παράγει τα περισσότερα προϊόντα, ενώ η 2^η και η 3^η γραμμή τελειώνουν τη παραγωγή μετά τη 2^η μέρα της εβδομάδας. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.20 αναλυτικά οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα



Σχήμα 4.20: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 1η εβδομαδιαία ζήτηση με επέκταση ωραρίου

Όπως ήταν αντιληπτό από το χρονοδιάγραμμα, η πρώτη γραμμή παραγωγής λειτουργεί σχεδόν όλες τις ώρες κατά τις πρώτες 4 μέρες. Τη Πέμπτη μέρα πέφτει ο χρόνος λειτουργίας της. Η δεύτερη γραμμή παραγωγής λειτουργεί μόνο τη πρώτη μέρα ενώ τις υπόλοιπες λειτουργεί ελάχιστες ώρες. Η τρίτη γραμμή παραγωγής τις πρώτες 2 μέρες λειτουργεί σχεδόν όλες τις ώρες, αλλά ομοίως με τη δεύτερη ο χρόνο λειτουργίας είναι ελάχιστος μετά τη 2^η μέρα.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη τέταρτη εβδομαδιαία ζήτηση για τη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.19 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.19: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με επέκταση ωραρίου, 1η εβδομαδιαία ζήτηση

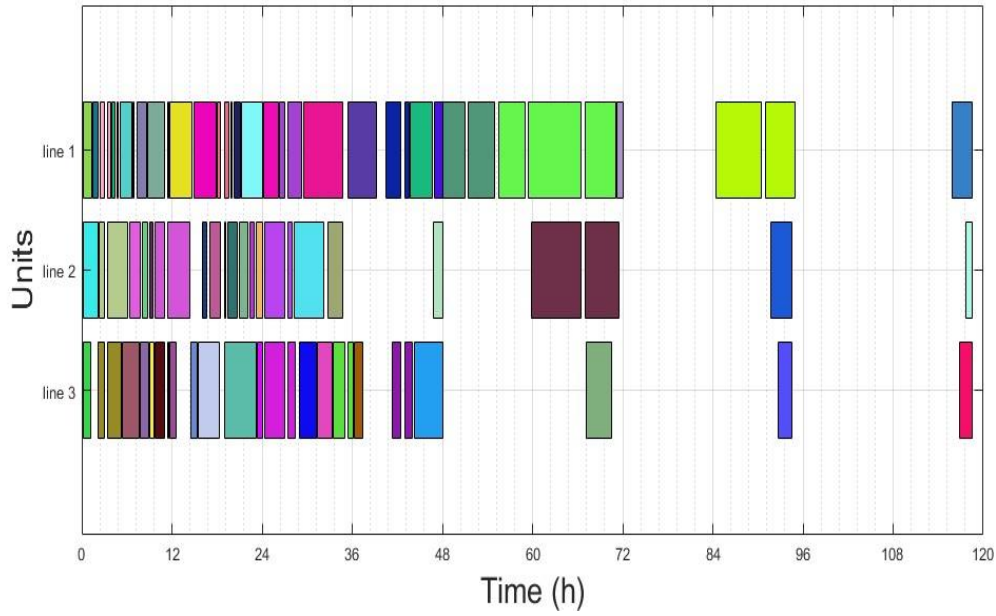
Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	3.94
LINE 2	3.55
LINE 3	5.75

Τέλος, στον Πίνακα 4.20 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

Πίνακας 4.20: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με επέκταση ωραρίου, 1η εβδομαδιαία ζήτηση

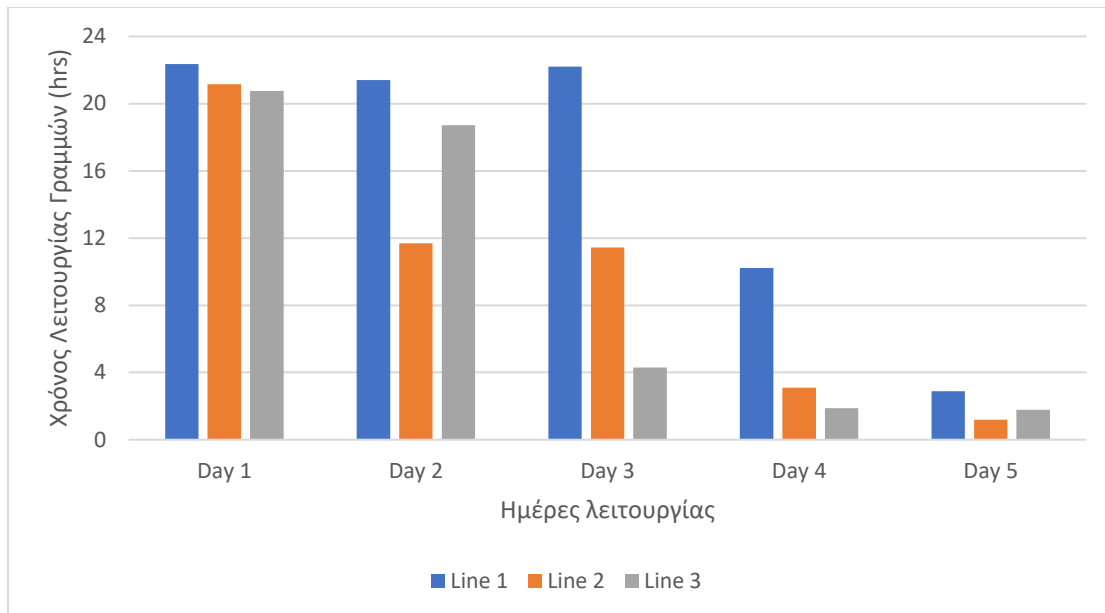
Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	8.48

4^η εβδομαδιαία ζήτηση



Σχήμα 4.21: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4ης εβδομαδιαίας ζήτησης με επέκταση ωραρίου

Από το παραπάνω χρονοδιάγραμμα φαίνεται ότι η πρώτη γραμμή είναι και η πιο φορτωμένη, καλύπτοντας ένα μεγάλο μέρος τη ζήτησης. Έπειτα, ακολουθούν οι υπόλοιπες γραμμές, οι οποίες έχουν και τις μεγαλύτερες εναλλαγές σε χρόνους, όπως φαίνεται και από τα κενά που υπάρχουν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.22 αναλυτικά οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα.



Σχήμα 4.22: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 4η εβδομαδιαία ζήτηση με επέκταση ωραρίου

Από το Σχήμα 4.22 συμπεραίνεται ότι η πρώτη γραμμή παρουσιάζει σταδιακή μείωση των ωρών λειτουργίας της μετά τη 3^η μέρα, αφού έχει ήδη παράξει ένα μεγάλο μέρος των προϊόντων. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι υπόλοιπες γραμμές παραγωγής, με τη σταδιακή μείωση να ξεκινάει από τη 1^η μέρα.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη τέταρτη εβδομαδιαία ζήτηση για τη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.21 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.21: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με επέκταση ωραρίου, 4η εβδομαδιαία ζήτηση

Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	5.14
LINE 2	5.28
LINE 3	5.37

Τέλος, στον Πίνακα 4.22 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

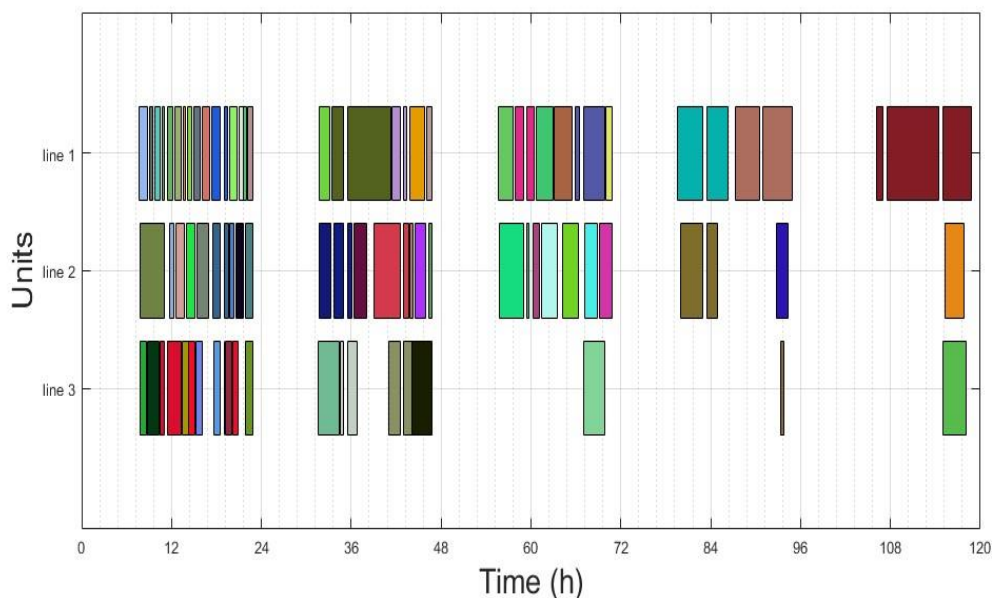
Πίνακας 4.22: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με επέκταση ωραρίου, 4η εβδομαδιαία ζήτηση

Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	15.99

4.5 Κατάργηση Προτεραιοτήτων

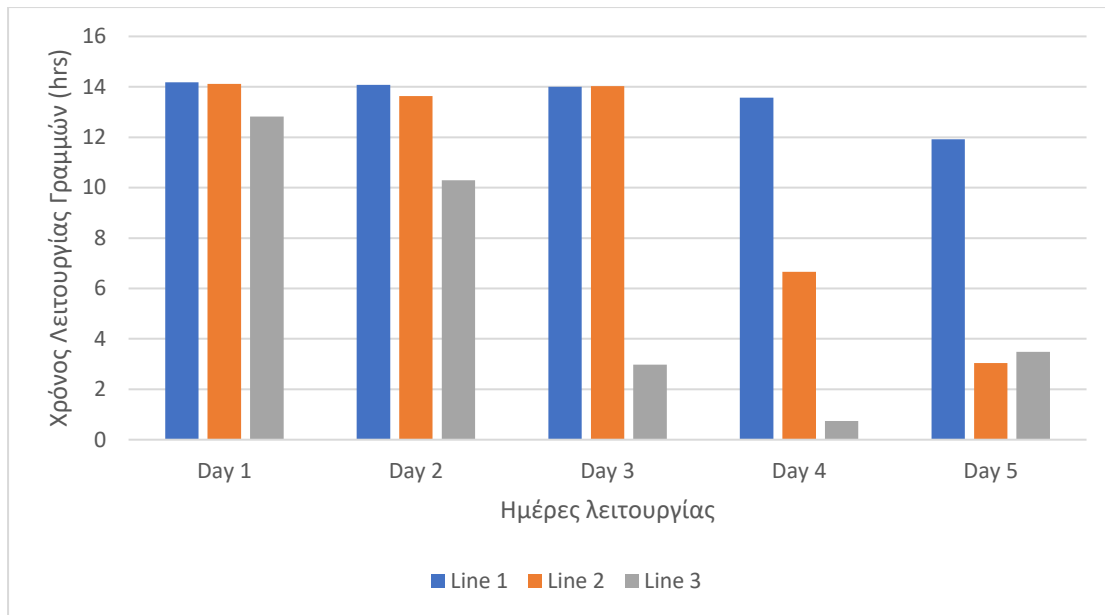
Σε αυτή την υποενότητα εξετάζεται η περίπτωση κατάργησης των προτεραιοτήτων που θέτει η βιομηχανία για τη παραγωγή των προϊόντων.

2^η εβδομαδιαία ζήτηση



Σχήμα 4.23: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 2ης εβδομαδιαίας ζήτησης με κατάργηση προτεραιοτήτων

Συγκρίνοντας το παραπάνω διάγραμμα με το Σχήμα 4.3 είναι εύκολα αντιληπτό ότι το μαθηματικό μοντέλο χωρίς το περιορισμό των προτεραιοτήτων, άλλαξε τη σειρά με την οποία παράγονται τα προϊόντα. Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών μειώθηκε ελάχιστα ενώ φαίνεται να αυξήθηκε η παραγωγή της δεύτερης γραμμής την 4^η μέρα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.24 αναλυτικά οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα.



Σχήμα 4.24: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 2η εβδομαδιαία ζήτηση με κατάργηση προτεραιοτήτων

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα και συγκρίνοντας με το σχήμα 4.4, οι ώρες λειτουργίας της πρώτης γραμμής μειώνονται τη 4^η και 5^η μέρα, ενώ αυξάνονται οι ώρες λειτουργίας της δεύτερης γραμμής κατά τη 4^η μέρα. Η τρίτη γραμμή παραγωγής λειτουργεί ακριβώς τις ίδιες ώρες κάθε μέρα.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη τέταρτη εβδομαδιαία ζήτηση για τη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.23 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.23: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με κατάργηση προτεραιοτήτων, 2η εβδομαδιαία ζήτηση

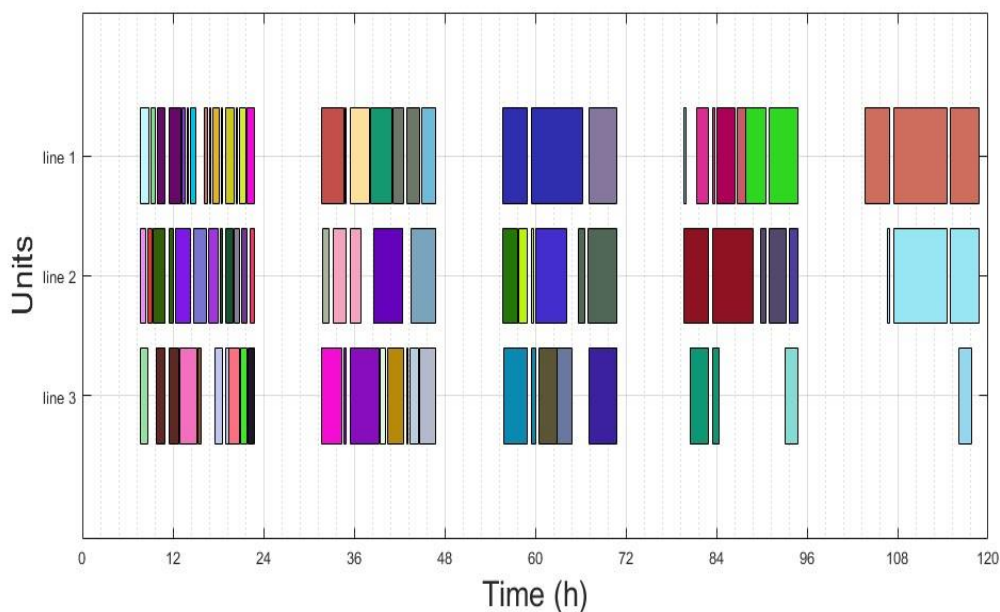
Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	5.51
LINE 2	7.68
LINE 3	3.46

Τέλος, στον Πίνακα 4.24 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

Πίνακας 4.24: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με κατάργηση προτεραιοτήτων, 2η εβδομαδιαία ζήτηση

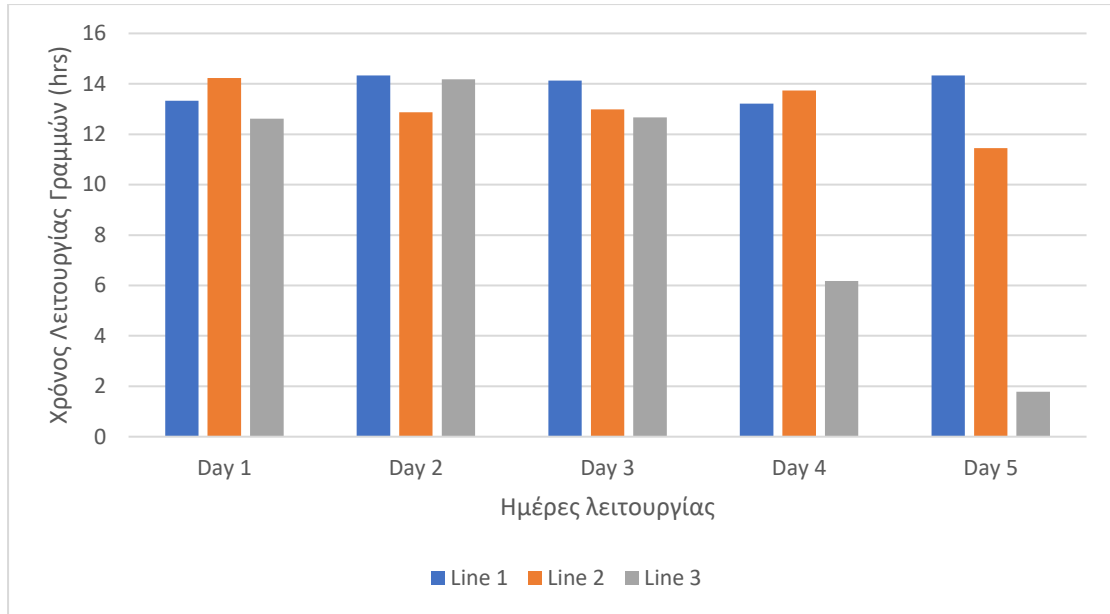
Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	9.53

4^η εβδομαδιαία ζήτηση



Σχήμα 4.25: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4ης εβδομαδιαίας ζήτησης με κατάργηση προτεραιοτήτων

Όμοια με τη προηγούμενη εβδομαδιαία ζήτηση, συγκρίνοντας το παραπάνω χρονοδιάγραμμα με τη σχήμα 4.7, η σειρά με την οποία παράγονται τα προϊόντα αλλάζει σε κάθε γραμμή. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.26 αναλυτικά οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα.



Σχήμα 4.26: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 4η εβδομαδιαία ζήτηση με κατάργηση προτεραιοτήτων

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα και σε σύγκριση με το Σχήμα 4.8, συμπεραίνεται ότι οι ώρες λειτουργίας της πρώτης γραμμής παραγωγής μειώνονται τη τέταρτη μέρα, με παράλληλη αύξηση των ωρών λειτουργίας της δεύτερης γραμμής την ίδια μέρα. Η τρίτη γραμμή λειτουργεί τις ίδιες ώρες.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη τέταρτη εβδομαδιαία ζήτηση για τη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.25 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.25: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με κατάργηση προτεραιοτήτων, 4η εβδομαδιαία ζήτηση

Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	5.00
LINE 2	6.80
LINE 3	5.37

Τέλος, στον Πίνακα 4.26 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

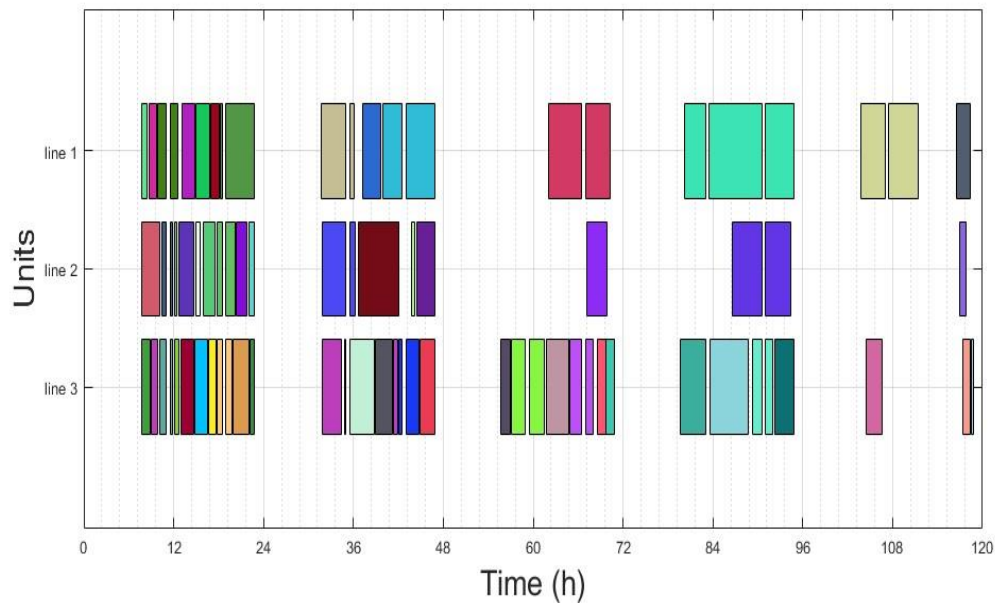
Πίνακας 4.26: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με κατάργηση προτεραιοτήτων, 4η εβδομαδιαία ζήτηση

Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	10.63

4.6 Αύξηση Ζήτησης

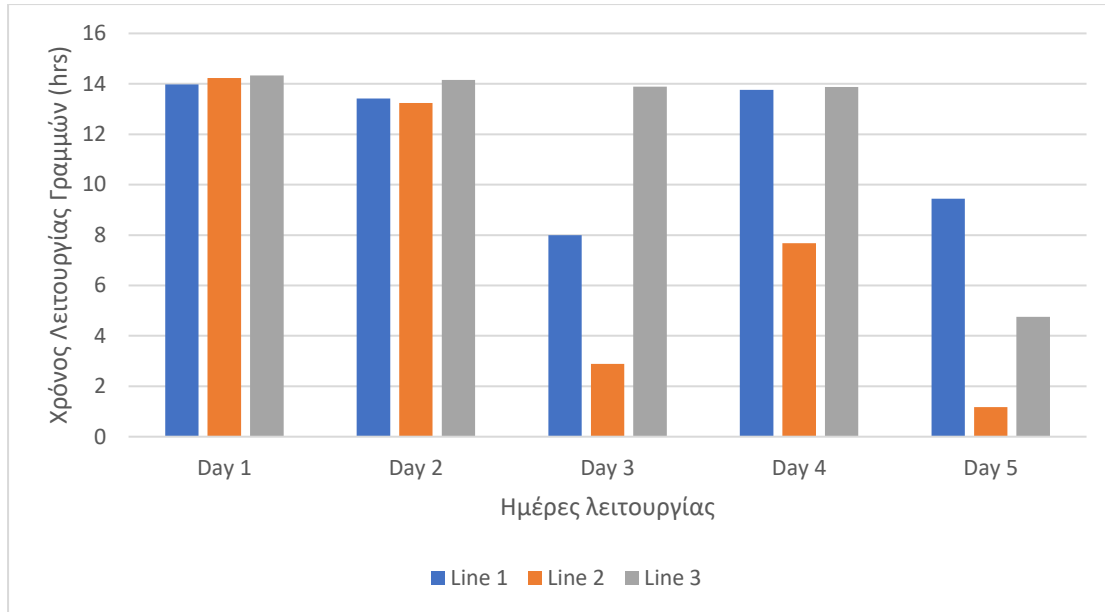
Στη συγκεκριμένη υποενότητα μελετάται η περίπτωση αύξησης της ζήτησης κατά 30% για 2 εβδομαδιαίες χαμηλές ζητήσεις.

3^η εβδομαδιαία ζήτηση



Σχήμα 4.27: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 3ης εβδομαδιαίας ζήτησης με αύξηση ζήτησης

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα και συγκρίνοντας με το Σχήμα 4.5, και οι 3 γραμμές λειτουργούν περισσότερες ώρες. Η τρίτη γραμμή παραγωγής είναι φορτωμένη μέχρι τη 4^η μέρα και έχει τις περισσότερες εναλλαγές των προϊόντων, ενώ η δεύτερη γραμμή λειτουργεί πλήρες μέχρι τη 2^η μέρα. Η πρώτη γραμμή που έχει και τη μεγαλύτερη δυναμικότητα παρουσιάζει κάποια κενά τη 3^η και 5^η μέρα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.28 αναλυτικά οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα



Σχήμα 4.28: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 3η εβδομαδιαία ζήτηση με αύξηση ζήτησης

Στο Σχήμα 4.28 παρατηρείται πτώση των ωρών λειτουργίας στη πρώτη και δεύτερη γραμμή παραγωγής τη 3^η μέρα και μετά, ενώ η τρίτη γραμμή παραγωγής λειτουργεί πλήρως εκτός τη 5^{ης} μέρας, λόγω της φορτωμένης ζήτησης.

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για τη τέταρτη εβδομαδιαία ζήτηση για τη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.27 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.27: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με αύξηση ζήτησης, 3η εβδομαδιαία ζήτηση

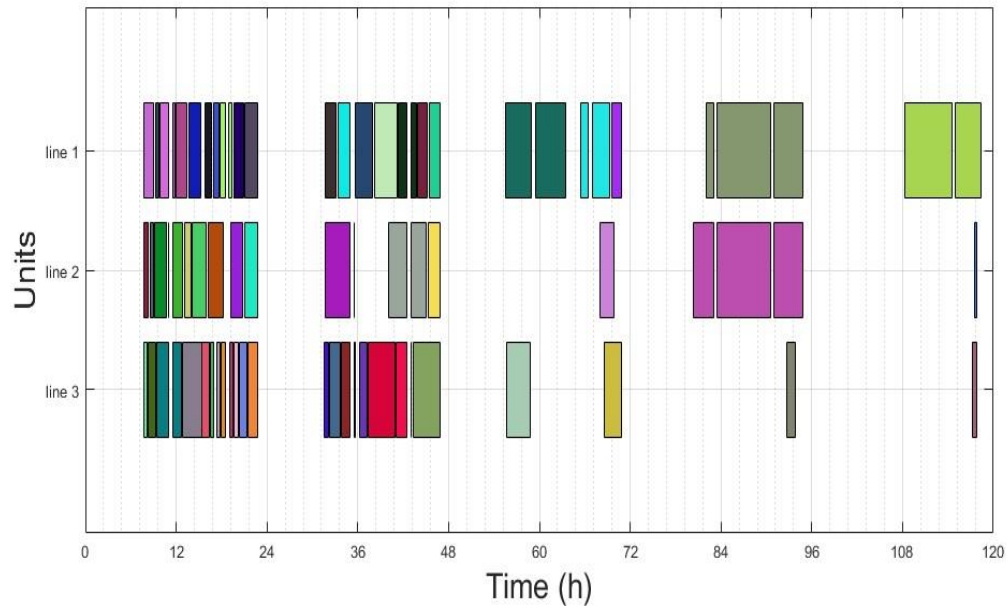
Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	2.67
LINE 2	4.55
LINE 3	5.50

Τέλος, στον Πίνακα 4.28 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

Πίνακας 4.28: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με αύξηση ζήτησης, 3η εβδομαδιαία ζήτηση

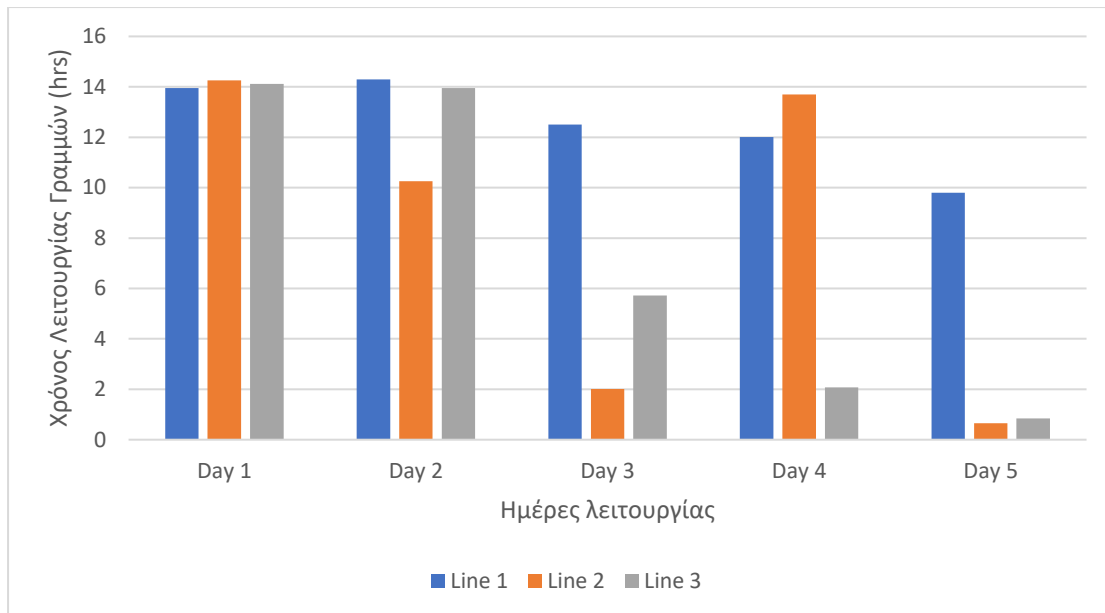
Χρόνος επίλυσης (min)	16.67
Optimality gap %	19.46

5^η εβδομαδιαία ζήτηση



Σχήμα 4.29: Gantt chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 5ης εβδομαδιαίας ζήτησης με αύξηση ζήτησης

Όμοια με τη προηγούμενη εβδομαδιαία ζήτηση, οι 3 γραμμές παραγωγής λειτουργούν περισσότερες ώρες, ενώ οι χρόνοι εναλλαγής επηρεάζονται ελάχιστα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.30 αναλυτικά οι ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα



Σχήμα 4.30: Ώρες λειτουργίας γραμμών παραγωγής για τη 5η εβδομαδιαία ζήτηση με αύξηση ζήτησης

Ο συνολικός χρόνος εναλλαγών για την τέταρτη εβδομαδιαία ζήτηση για τη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.29 και αφορά τους χρόνους εναλλαγών των προϊόντων όλων των ημερών λειτουργίας των γραμμών.

Πίνακας 4.29: Ώρες εναλλαγών κάθε γραμμής παραγωγής με αύξηση ζήτησης, 5η εβδομαδιαία ζήτηση

Γραμμή παραγωγής	Ώρες εναλλαγών
LINE 1	4,27
LINE 2	3,80
LINE 3	4,08

Τέλος, στον Πίνακα 4.30 παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου και η απόκλιση της λύσης από τη βέλτιστη (optimality gap).

Πίνακας 4.30: Χαρακτηριστικά επίλυσης μοντέλου με αύξηση ζήτησης, 5η εβδομαδιαία ζήτηση

Χρόνος επίλυσης (min)	16,67
Optimality gap %	2,91

5. Συμπεράσματα – Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην αντιμετώπιση του προβλήματος του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής της ελληνικής βιομηχανικής μονάδας παραγωγής κονιαμάτων της ISOMAT S.A. Ο χρονοπρογραμματισμός της παραγωγής είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία για κάθε βιομηχανία, αφού έχει ως αποτέλεσμα τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και την αύξηση των κερδών της εταιρείας. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο μεικτού – ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο περιλαμβάνει όλους τους περιορισμούς που έχει η παραγωγική διαδικασία, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του χρόνου εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων. Το μαθηματικό μοντέλο εισάγεται στο λογισμικό GAMS και με τη βοήθεια του επιλυτή ILOG CPLEX πραγματοποιείται η επίλυση του.

Αρχικά, πραγματοποιείται μια αναλυτική περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας και παρουσιάζονται τα δεδομένα που εισάγονται στο μαθηματικό μοντέλο. Έπειτα, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο με όλους του περιορισμούς που περιέχει και την αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση. Η βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής της παραγωγικής μονάδας κονιαμάτων επιτυγχάνεται με ένα μοντέλο άμεσης προτεραιότητας και γίνεται σε εβδομαδιαία βάση. Στη μονάδα παράγονται πάνω από 400 προϊόντα, ενώ χρησιμοποιούνται 3 γραμμές παραγωγής. Η παραγωγή των κονιαμάτων είναι μια ημί – συνεχής διεργασία, καθώς η παραγωγή γίνεται με συνεχή ρυθμό, ενώ σταματάει η παραγωγή για την αλλαγή των προϊόντων στη γραμμή παραγωγής. Τελικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου, τα οποία οπτικοποιήθηκαν μέσω διαγραμμάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής (Gantt charts).

Αναλυτικότερα, η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε για 5 διαφορετικά σενάρια ζήτησης. Οι συγκεκριμένες ζητήσεις που μελετήθηκαν προέκυψαν από πραγματικά δεδομένα της εταιρείας και αφορούν ιστορικά παραγόμενες ποσότητες από διάφορες χρονικές περιόδους του χρόνου. Στη συνέχεια, για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του μαθηματικού μοντέλου, πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής για διάφορες μελέτης περίπτωσης, σε εβδομαδιαία βάση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, το μαθηματικό μοντέλο ανταποκρίθηκε στις διαφορετικές μελέτες

περίπτωσης, δίνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, επειδή καθιστά τη παραγωγική διαδικασία ευέλικτη, με αποτέλεσμα να μπορεί να ανταποκριθεί σε αβεβαιότητες που προκύπτουν κατά την παραγωγή των προϊόντων. Γενικότερα, ο χρονοπρογραμματισμός της παραγωγής δίνει τη δυνατότητα στις βιομηχανίες να ανταποκρίνονται πιο βέλτιστα στις ανάγκες των πελατών, στη διαχείριση των πρώτων υλών και του προσωπικού.

Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η περίπτωση αύξησης του χρόνου εναλλαγών μεταξύ των προϊόντων κατά 50% και μείωση του χρόνου εναλλαγών κατά 20%. Οι συγκεκριμένες περιπτώσεις είναι πολύ σημαντικές αφού η εναλλαγή μεταξύ των προϊόντων γίνεται από το προσωπικό και όχι αυτόματα με αποτέλεσμα να υπάρχει μια αβεβαιότητα στους χρόνους ειδικά όταν το προσωπικό δεν έχει εμπειρία. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και οι γραμμές παραγωγής μπορούν να καλύψουν τις συγκεκριμένες ποσοστιαίες αλλαγές των χρόνων.

Επιπλέον, μελετήθηκε η επέκταση του ωραρίου κατά μία βάρδια ακόμα, με αποτέλεσμα η παραγωγή να λειτουργεί 24 ώρες. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μελέτη, η ζήτηση εύκολα καλύφθηκε από τη δυναμικότητα των γραμμών λειτουργίας, ενώ υπάρχει αρκετός χρόνος μέσα στο πρόγραμμα για την εισαγωγή επιπλέον προϊόντων. Γενικά η αύξηση του ωραρίου οδηγεί σε αύξηση της παραγωγής με αποτέλεσμα να υπάρχουν υψηλότερα έσοδα και μεγαλύτερα κέρδη για την εταιρεία. Επιπλέον, η δυνατότητα λειτουργίας της παραγωγής 24 ώρες μπορεί να επιτρέψει στην εταιρεία να είναι πιο ευέλικτη όσον αφορά την ικανοποίηση των απαιτήσεων των πελατών, την προσαρμογή στις αλλαγές της αγοράς και την γρήγορη ανταπόκριση σε απροσδόκητες καταστάσεις. Παρά όλα αυτά, η αύξηση της παραγωγής μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην αποθήκευση των προϊόντων με αποτέλεσμα να χρειάζεται να αυξηθεί η αποθηκευτική δυναμικότητα.

Τέλος εξετάστηκε, η περίπτωση κατάργησης των προτεραιοτήτων που θέτει η εταιρεία για να καλύψει με βεβαιότητα τη παραγωγή συγκεκριμένων προϊόντων, και η αύξηση της ζήτησης κατά 30%. Καταργώντας τις προτεραιότητες, η παραγωγή γίνεται πιο ευέλικτη και μπορεί να καλύψει πιο αποτελεσματικά τη ζήτηση των πελατών, αφού δεν περιορίζεται από τη σειρά προτεραιότητας. Η αύξηση της ζήτησης είναι σημαντική μελέτη περίπτωσης, επειδή υποδηλώνει αλλαγή στις προτιμήσεις των καταναλωτών ή μια νέα τάση της αγοράς, για τις οποίες η βιομηχανία θα πρέπει να είναι σε θέση να τη καλύψει. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η μονάδα μπορεί να καλύψει την αύξηση της ζήτησης.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στη συγκεκριμένη υποενότητα δίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω μελέτη του προβλήματος του χρονοπρογραμματισμού της μονάδας παραγωγής κονιαμάτων της εταιρείας ISOMAT S.A. Πιο συγκεκριμένα προτείνονται:

- Ο δυναμικός προγραμματισμός της παραγωγής, ο οποίος επιτρέπει τη προσαρμογή του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε πραγματικό χρόνο με βάση τις μεταβαλλόμενες συνθήκες ή τα απρόβλεπτα γεγονότα. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα είναι η ικανότητα του να ανταποκρίνεται γρήγορα σε αλλαγές που συμβαίνουν σε πραγματικό χρόνο στη βιομηχανία. Για παράδειγμα, εάν ένα μηχάνημα χαλάσει, το πρόγραμμα παραγωγής μπορεί να προσαρμοστεί σε πραγματικό χρόνο, ώστε να ληφθεί υπόψη ο χαμένος χρόνος παραγωγής και να διασφαλιστεί ότι οι στόχοι παραγωγής εξακολουθούν να επιτυγχάνονται.
- Η ενσωμάτωση πληροφοριών στο μαθηματικό μοντέλο που σχετίζονται με το κόστος, και μπορεί να οδηγήσει σε πιο προσιτά προγράμματα παραγωγής. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση δεδομένων σχετικά με διάφορους παράγοντες κόστους, όπως το κόστος των πρώτων υλών, οι τιμές πώλησης κ.α., με στόχο τη μείωση των συνολικών δαπανών ή τη μεγιστοποίηση των κερδών.
- Η ενσωμάτωση περιορισμών στο μαθηματικό μοντέλο που αφορά τις πρώτες ύλες. Με αυτόν τον τρόπο, το μαθηματικό μοντέλο θα είναι ικανό να διασφαλίζει ότι υπάρχουν οι κατάλληλες πρώτες ύλες για να χρησιμοποιηθούν για τη παραγωγή των προϊόντων. Επιπλέον, συμπεριλαμβάνοντας του περιορισμούς πρώτων υλών στο μαθηματικό μοντέλο, αυξάνεται η αποδοτικότητα των αποτελεσμάτων, αφού ο προγραμματισμός θα πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ακρίβεια και θα αποφεύγονται οι διακοπές που προκαλούνται από ελλείψεις υλικών.

Βιβλιογραφία

- Aguirre, A. M., Liu, S., & Papageorgiou, L. G. (2017). Mixed Integer Linear Programming Based Approaches for Medium-Term Planning and Scheduling in Multi-product Multistage Continuous Plants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(19), 5636–5651. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04958>
- Bongers, P. M. M., & Bakker, B. H. (2006). *Application of multi-stage scheduling*.
- C.C. Pantelides. (1994) Unified frameworks for optimal process planning and scheduling. In D.W.T. Pdppin and J. Hale, editors, Proc. Second Conf. on Foundations of Computer Aided Operations, CACHE Publications.
- Doganis, P., & Sarimveis, H. (2007). Optimal scheduling in a yogurt production line based on mixed integer linear programming. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 445–453. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.062>
- Elekidis, A. P., Coraminas, F., & Georgiadis, M. C. (2019). Optimal short-term Scheduling of Industrial Packing Facilities. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 46, pp. 1183–1188). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818634-3.50198-3>
- Entrup, M. L., Günther, H. O., van Beek, P., Grunow, M., & Seiler, T. (2005). Mixed-integer linear programming approaches to shelf-life-integrated planning and scheduling in yoghurt production. In *International Journal of Production Research* (Vol. 43, Issue 23, pp. 5071–5100). <https://doi.org/10.1080/00207540500161068>
- Floudas, C. A., & Lin, X. (2004). Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: A review. In *Computers and Chemical Engineering* (Vol. 28, Issue 11, pp. 2109–2129). <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2004.05.002>
- Georgiadis, G. P., Elekidis, A. P., & Georgiadis, M. C. (2019). Optimization-based scheduling for the process industries: From theory to real-life industrial applications. *Processes*, 7(7). <https://doi.org/10.3390/pr7070438>
- Georgiadis, G. P., Ziogou, C., Kopanos, G., Garcia, M., Cabo, D., Lopez, M., & Georgiadis, M. C. (2018). Production Scheduling of Multi-Stage, Multi-product Food Process Industries. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 43,

- pp. 1075–1080). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64235-6.50188-1>
- Giannelos, N. F., & Georgiadis, M. C. (2003). Efficient scheduling of consumer goods manufacturing processes in the continuous time domain. In *Georgiadis / Computers & Operations Research* (Vol. 30). www.sciencedirect.comwww.elsevier.com/locate/dsw
- Harjunkski, I., Maravelias, C. T., Bongers, P., Castro, P. M., Engell, S., Grossmann, I. E., Hooker, J., Méndez, C., Sand, G., & Wassick, J. (2014). Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods. In *Computers and Chemical Engineering* (Vol. 62, pp. 161–193). <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.12.001>
- Kopanos, G. M., Méndez, C. A., & Puigjaner, L. (2010). MIP-based decomposition strategies for large-scale scheduling problems in multiproduct multistage batch plants: A benchmark scheduling problem of the pharmaceutical industry. *European Journal of Operational Research*, 207(2), 644–655. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.06.002>
- Kopanos, G. M., Puigjaner, L., & Georgiadis, M. C. (2011). Resource-constrained production planning in semicontinuous food industries. *Computers and Chemical Engineering*, 35(12), 2929–2944. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.04.012>
- Kopanos, G. M., Puigjaner, L., & Georgiadis, M. C. (2012). Efficient mathematical frameworks for detailed production scheduling in food processing industries. *Computers and Chemical Engineering*, 42, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.12.015>
- Kopanos, G. M. (2010). Techniques for the Efficient Solution of Large – scale Production & Planning Problems in the Process Industries. PhD Thesis, Escola Técnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya
- Kondili, E., Pantelid@, C. C., & Sargent, R. W. H. (1993). A GENERAL ALGORITHM FOR SHORT-TERM SCHEDULING OF BATCH OPERATIONS-I. MILP FORMULATION. In *Computers and Chemical Engineering* (Vol. 17, Issue 2).

- Li, J., Xiao, X., Tang, Q., & Floudas, C. A. (2012). Production scheduling of a large-scale steelmaking continuous casting process via unit-specific event-based continuous-time models: Short-term and medium-term scheduling. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *51*(21), 7300–7319. <https://doi.org/10.1021/ie2015944>
- Lin, X., Floudas, C. A., Modi, S., & Juhasz, N. M. (2002). Continuous-time optimization approach for medium-range production scheduling of a multiproduct batch plant. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *41*(16), 3884–3906. <https://doi.org/10.1021/ie011002a>
- Méndez, C. A., & Cerdá, J. (2002). An efficient MILP continuous-time formulation for short-term scheduling of multiproduct continuous facilities. In *Computers and Chemical Engineering* (Vol. 26). www.elsevier.com/locate/compchemeng
- Moniz, S., Barbosa-Póvoa, A. P., de Sousa, J. P., & Duarte, P. (2014). Solution methodology for scheduling problems in batch plants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *53*(49), 19265–19281. <https://doi.org/10.1021/ie403129y>
- Pinedo, M. L. (2012). *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*. Fifth edition, New York: Springer
- Stefansson, H., Sigmarsdottir, S., Jensson, P., & Shah, N. (2011). Discrete and continuous time representations and mathematical models for large production scheduling problems: A case study from the pharmaceutical industry. *European Journal of Operational Research*, *215*(2), 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.06.021>
- Touil, A., Echchatbi, A., & Charkaoui, A. (2016). An MILP Model for Scheduling Multistage, Multiproducts Milk Processing. *IFAC-PapersOnLine*, *49*(12), 869–874. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.884>
- Westerlund, J., Hästbacka, M., Forssell, S., & Westerlund, T. (2007). Mixed-time mixed-integer linear programming scheduling model. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *46*(9), 2781–2796. <https://doi.org/10.1021/ie060991a>

Παράρτημα Α – Δεδομένα παραγωγικής διαδικασίας

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται τα δεδομένα της παραγωγικής διαδικασίας που εισέρχονται στο μαθηματικό μοντέλο. Αναλυτικότερα, στον Πίνακα Α.1 παρουσιάζονται τα προϊόντα που παράγονται, σε ποιες γραμμές παράγονται και με τι ρυθμό συσκευασίας. Στη συνέχεια, οι Πίνακες Α.2 μέχρι Α.6 παρουσιάζουν τις 5 εβδομαδιαίες ζητήσεις, για τις οποίες γίνεται η βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού.

Πίνακας Α 1: Γραμμή συσκευασίας, ρυθμός συσκευασίας και βάρος συσκευασίας για κάθε προϊόν

Προϊόν	Γραμμή συσκευασίας	Ρυθμός συσκευασίας (τεμάχια/ώρα)	Βάρος συσκευασίας (κιλά)
P01	J3	551	1
P02	J3	376	5
P03	J3	110	1
P04	J3	110	15
P05	J3	110	5
P06	J3	96	15
P07	J2	29	14.4
P08	J2	374	20
P09	J3	417	4
P10	J2	225	18
P11	J2	225	17
P12	J2	489	20
P13	J3	750	4
P14	J2	451	16
P15	J2	12	1000
P16	J1 / J2	900 / 534	20
P17	J1	1231	25
P18	J3	760	5
P19	J1	1035	25
P20	J3	646	5
P21	J2	10	1000
P22	J1 / J2	1127 / 695	25
P23	J1	659	25
P24	J2	4	1000
P25	J1	304	12.9
P26	J1 / J2	1280 / 900	25
P27	J1	497	25
P28	J3	365	5
P29	J1	355	13.6
P30	J1 / J2	1316 / 842	25
P31	J1 / J2	675 / 675	25
P32	J2	313	20
P33	J1	980	30
P34	J3	688	5
P35	J2	100	20
P36	J3	594	4
P37	J2	846	25
P38	J3	502	5
P39	J2	437	25
P40	J2	341	25
P41	J2	464	25
P42	J2	471	25
P43	J2	443	25
P44	J2	535	25
P45	J2	561	25
P46	J2	630	25
P47	J2	653	25
P48	J2	637	25

Πίνακας Α1: Συνέχεια

Προϊόν	Γραμμή συσκευασίας	Ρυθμός συσκευασίας (τεμάχια/ώρα)	Βάρος συσκευασίας (κιλά)
P49	J2	520	25
P50	J2	522	25
P51	J1	1176	25
P52	J2	5	1000
P53	J3	729	5
P54	J2	412	25
P55	J3	464	5
P56	J1	1113	25
P57	J3	746	5
P58	J2	183	14.5
P59	J2	103	14.5
P60	J2	462	25
P61	J2	358	25
P62	J2	5	1000
P63	J1 / J2	1440 / 782	25
P64	J3	672	5
P65	J2	147	20.53
P66	J2	125	24
P67	J2	374	20
P68	J2	123	20.4
P69	J2	335	20
P70	J1	1093	25
P71	J2	590	25
P72	J2	650	25
P73	J2	450	25
P74	J2	297	25
P75	J3	112	1
P76	J3	112	15
P77	J3	112	5
P78	J3	710	1
P79	J3	350	5
P80	J3	742	4
P81	J3	719	2
P82	J1	850	25
P83	J2	380	25
P84	J2	152	25
P85	J2	473	25
P86	J2	329	25
P87	J2	486	20
P88	J1	972	25
P89	J1	527	25
P90	J1 / J2	977 / 648	25
P91	J1 / J2	1134 / 717	25
P92	J2	5	1000
P93	J1 / J2	911 / 610	25
P94	J3	758	5
P95	J1 / J2	1269 / 798	25
P96	J1 / J2	1489 / 725	27.5

Πίνακας Α1: Συνέχεια

Προϊόν	Γραμμή συσκευασίας	Ρυθμός συσκευασίας (τεμάχια/ώρα)	Βάρος συσκευασίας (κιλά)
P97	J1 / J2	900 / 610	27.5
P98	J3	677	5
P99	J2	664	25
P100	J2	272	25
P101	J1 / J2	900 / 721	25
P102	J1 / J2	750 / 645	27.5
P103	J1 / J2	900 / 688	27.5
P104	J1 / J2	997 / 550	25
P105	J1	1236	25
P106	J1 / J2	1568 / 577	25
P107	J1 / J2	770 / 580	25
P108	J1 / J2	760 / 578	25
P109	J1 / J2	1083 / 623	25
P110	J1 / J2	1179 / 763	25
P111	J1 / J2	1167 / 674	25
P112	J1 / J2	1250 / 689	25
P113	J1 / J2	1339 / 700	25
P114	J1 / J2	1166 / 724	25
P115	J1 / J2	1189 / 723	25
P116	J1 / J2	1161 / 739	25
P117	J3	752	5
P118	J1 / J2	1278 / 712	15
P119	J1 / J2	1380 / 779	25
P120	J1	1130	25
P121	J1 / J2	1172 / 1172	27.5
P122	J3	729	5
P123	J1 / J2	1235 / 669	25
P124	J1 / J2	1228 / 689	25
P125	J1 / J2	1204 / 751	15
P126	J1 / J2	1336 / 784	25
P127	J3	680	5
P128	J1	853	25
P129	J1	822	25
P130	J1	868	25
P131	J1	1269	25
P132	J1	740	25
P133	J1	711	25
P134	J3	439	5
P135	J2	679	25
P136	J1	100	20
P137	J1 / J2	1020 / 673	20
P138	J1	100	20
P139	J2	695	25
P140	J2	767	25
P141	J2	200	25
P142	J3	644	5
P143	J1 / J2	1052 / 668	25
P144	J3	680	5

Πίνακας Α1: Συνέχεια

Προϊόν	Γραμμή συσκευασίας	Ρυθμός συσκευασίας (τεμάχια/ώρα)	Βάρος συσκευασίας (κιλά)
P145	J1	608	18
P146	J1 / J2	1537 / 722	25
P147	J2	319	25
P148	J2	375	25
P149	J2	376	25
P150	J2	591	25
P151	J2	471	25
P152	J3	720	5
P153	J2	522	25
P154	J2	621	25
P155	J2	519	25
P156	J1	1113	25
P157	J1 / J2	1245 / 755	25
P158	J1	924	25
P159	J1	1193	25
P160	J1 / J2	1394 / 724	25
P161	J2	496	20
P162	J1 / J2	1341 / 853	25
P163	J1 / J2	1381 / 830	25
P164	J1 / J2	1219 / 659	25
P165	J1	1026	25
P166	J1	1053	25
P167	J1 / J2	950 / 739	25
P168	J1 / J2	1279 / 810	25
P169	J2	178	20
P170	J1 / J2	1217 / 678	25
P171	J2	760	25
P172	J3	809	5
P173	J3	890	5
P174	J3	716	5
P175	J3	775	5
P176	J3	715	5
P177	J3	793	5
P178	J3	874	5
P179	J3	100	5
P180	J3	794	5
P181	J3	750	5
P182	J3	877	5
P183	J3	700	5
P184	J3	711	5
P185	J3	374	5
P186	J3	799	5
P187	J3	768	5
P188	J3	707	5
P189	J3	892	5
P190	J3	576	5
P191	J3	629	5
P192	J3	100	5

Πίνακας Α1: Συνέχεια

Προϊόν	Γραμμή συσκευασίας	Ρυθμός συσκευασίας (τεμάχια/ώρα)	Βάρος συσκευασίας (κιλά)
P193	J3	100	5
P194	J3	100	5
P195	J3	556	5
P196	J3	100	5
P197	J3	802	5
P198	J3	836	5
P199	J3	100	5
P200	J3	893	5
P201	J3	813	5
P202	J3	540	5
P203	J3	432	5
P204	J3	761	5
P205	J3	834	5
P206	J3	410	5
P207	J3	424	5
P208	J3	100	5
P209	J3	812	5
P210	J3	852	5
P211	J3	100	5
P212	J3	434	5
P213	J3	799	5
P214	J3	869	5
P215	J2	564	25
P216	J2	693	25
P217	J2	504	25
P218	J2	718	25
P219	J2	489	25
P220	J2	244	25
P221	J1 / J2	940 / 536	25
P222	J2	685	25
P223	J1 / J2	1165 / 732	25
P224	J2	445	25
P225	J1 / J2	1145 / 857	30
P226	J2	334	25
P227	J2	629	25
P228	J2	438	25
P229	J2	489	25
P230	J2	396	25
P231	J2	543	25
P232	J2	576	25
P233	J3	660	5
P234	J2	557	25
P235	J2	554	25
P236	J2	524	25
P237	J2	402	20
P238	J3	755	5
P239	J2	288	25
P240	J3	752	5

Πίνακας Α1: Συνέχεια

Προϊόν	Γραμμή συσκευασίας	Ρυθμός συσκευασίας (τεμάχια/ώρα)	Βάρος συσκευασίας (κιλά)
P241	J3	790	5
P242	J3	915	2
P243	J2	383	25
P244	J3	834	5
P245	J3	1194	2
P246	J3	688	5
P247	J3	468	5
P248	J3	761	5
P249	J3	902	2
P250	J3	785	5
P251	J3	431	5
P252	J3	791	5
P253	J3	977	2
P254	J2	219	25
P255	J3	791	5
P256	J3	754	5
P257	J3	745	5
P258	J3	1087	2
P259	J3	608	5
P260	J3	792	2
P261	J3	590	5
P262	J3	838	2
P263	J3	727	5
P264	J3	715	5
P265	J3	674	5
P266	J3	318	5
P267	J3	369	5
P268	J3	975	5
P269	J3	387	5
P270	J3	751	5
P271	J3	865	2
P272	J2	225	25
P273	J3	752	5
P274	J3	552	5
P275	J3	718	5
P276	J3	748	2
P277	J3	662	5
P278	J3	719	5
P279	J3	936	2
P280	J2	174	25
P281	J3	819	5
P282	J3	100	5
P283	J3	897	5
P284	J3	956	2
P285	J3	709	5
P286	J3	870	2
P287	J3	775	5
P288	J3	579	5

Πίνακας Α1: Συνέχεια

Προϊόν	Γραμμή συσκευασίας	Ρυθμός συσκευασίας (τεμάχια/ώρα)	Βάρος συσκευασίας (κιλά)
P289	J3	462	5
P290	J3	541	5
P291	J3	843	5
P292	J2	312	25
P293	J3	896	5
P294	J3	745	5
P295	J3	745	5
P296	J2	217	25
P297	J3	553	5
P298	J2	217	25
P299	J3	707	5
P300	J3	777	5
P301	J3	420	4
P302	J3	670	4
P303	J3	473	4
P304	J3	633	4
P305	J3	614	4
P306	J3	948	4
P307	J3	617	4
P308	J3	574	4
P309	J3	730	4
P310	J3	488	4
P311	J3	531	4
P312	J3	397	4
P313	J3	781	4
P314	J3	678	4
P315	J3	531	4
P316	J3	636	4
P317	J3	638	4
P318	J3	691	4
P319	J3	461	4
P320	J3	403	4
P321	J3	474	4
P322	J3	300	4
P323	J3	911	2
P324	J3	893	4
P325	J3	934	2
P326	J3	661	4
P327	J3	965	2
P328	J3	648	4
P329	J3	943	2
P330	J2	467	20
P331	J3	866	4
P332	J3	915	2
P333	J3	788	4
P334	J3	800	2
P335	J3	583	4
P336	J3	656	2

Πίνακας Α1: Συνέχεια

Προϊόν	Γραμμή συσκευασίας	Ρυθμός συσκευασίας (τεμάχια/ώρα)	Βάρος συσκευασίας (κιλά)
P337	J3	904	4
P338	J3	992	2
P339	J3	857	4
P340	J3	908	2
P341	J3	816	4
P342	J3	1030	2
P343	J3	703	4
P344	J3	917	2
P345	J2	435	20
P346	J3	821	4
P347	J3	769	2
P348	J3	870	4
P349	J3	800	2
P350	J3	817	4
P351	J3	807	2
P352	J3	755	4
P353	J3	876	2
P354	J3	843	4
P355	J3	855	2
P356	J3	735	4
P357	J3	1029	2
P358	J3	935	4
P359	J3	860	2
P360	J3	902	4
P361	J3	987	2
P362	J3	624	4
P363	J3	576	2
P364	J3	505	4
P365	J3	648	2
P366	J3	727	4
P367	J3	1234	2
P368	J3	809	4
P369	J3	892	2
P370	J2	628	20
P371	J3	796	4
P372	J3	432	2
P373	J3	555	4
P374	J3	934	2
P375	J3	654	4
P376	J3	781	2
P377	J3	708	4
P378	J3	796	2
P379	J3	749	4
P380	J3	877	2
P381	J2	260	20
P382	J3	904	4
P383	J3	737	2
P384	J3	644	4

Πίνακας Α1: Συνέχεια

Προϊόν	Γραμμή συσκευασίας	Ρυθμός συσκευασίας (τεμάχια/ώρα)	Βάρος συσκευασίας (κιλά)
P385	J3	550	4
P386	J3	834	2
P387	J2	216	20
P388	J3	876	4
P389	J3	889	2
P390	J3	788	4
P391	J3	985	2
P392	J2	181	20
P393	J3	772	4
P394	J3	880	2
P395	J3	623	4
P396	J3	766	2
P397	J3	587	4
P398	J2	550	25
P399	J3	100	5
P400	J2	602	25
P401	J3	224	5
P402	J2	224	25
P403	J3	100	5
P404	J2	434	25
P405	J3	100	5
P406	J2	324	25
P407	J3	100	5
P408	J2	557	25
P409	J3	324	5
P410	J2	364	25
P411	J3	100	5
P412	J2	661	25
P413	J2	531	25
P414	J3	100	5
P415	J2	703	25
P416	J2	677	25
P417	J1 / J2	1159 / 650	25
P418	J3	664	5
P419	J1 / J2	1485 / 678	25
P420	J1 / J2	1249 / 815	25
P421	J1 / J2	732 / 650	25
P422	J1 / J2	1080 / 767	25
P423	J3	714	5
P424	J2	383	25
P425	J3	685	5
P426	J2	630	25
P427	J1	1117	25
P428	J2	528	20
P429	J1	1157	25
P430	J2	834	25
P431	J1	877	25

Πίνακας Α1: Συνέχεια

Προϊόν	Γραμμή συσκευασίας	Ρυθμός συσκευασίας (τεμάχια/ώρα)	Βάρος συσκευασίας (κιλά)
P432	J2	100	20
P433	J2	100	10
P434	J2	100	20
P435	J3	736	4
P436	J2	383	25
P437	J1 / J2	1029 / 829	25
P438	J2	840	25
P439	J2	642	25
P440	J2	744	25
P441	J3	698	5
P442	J1 / J2	979 / 779	20
P443	J2	446	20
P444	J2	509	25
P445	J3	762	4
P446	J3	718	4
P447	J2	65	25
P448	J2	398	18

Πίνακας Α 2: 1η εβδομαδιαία ζήτηση

Προϊόν	Αριθμός τεμαχίων	Προτεραιότητα
P137	2.872	5
P25	152	5
P26	1.171	5
P22	1.573	3
P30	2.942	4
P123	2.101	4
P133	762	5
P218	385	3
P148	382	3
P413	389	4
P126	16.028	5
P104	8.711	4
P95	2.015	3
P93	794	3
P163	8.864	3
P420	1.249	3
P431	972	5
P429	972	5
P160	31.339	3
P119	18.888	4
P17	2.389	4
P92	1	3
P91	1.599	3
P62	1	3
P60	417	3
P237	501	5
P157	3.200	4
P150	2.556	5
P121	1.628	3
P72	2.037	4
P115	702	3
P114	1.253	5
P175	3862	5
P198	1474	5
P174	584	5
P181	982	5
P195	194	5
P203	216	5
P206	205	5
P207	212	5
P212	217	5
P213	583	5
P78	3306	3
P189	288	5

Πίνακας Α 2: Συνέχεια

Προϊόν	Αριθμός τεμαχίων	Προτεραιότητα
P127	1188	3
P285	1280	3
P117	788	4
P323	712	3
P279	1468	4
P327	728	4
P324	1466	5
P378	720	4
P341	732	4
P366	740	3
P343	384	4
P395	737	3
P1	1441	3
P98	3200	4
P142	1080	4

Πίνακας Α 3: 2η εβδομαδιαία ζήτηση

Προϊόν	Αριθμός τεμαχίων	Προτεραιότητα
P16	844	5
P133	1554	5
P159	1178	5
P160	16326	5
P91	3179	5
P101	800	5
P102	798	5
P45	791	5
P48	777	5
P46	464	5
P126	9926	5
P229	470	5
P235	980	5
P42	785	5
P124	1211	5
P123	2077	5
P157	2457	5
P166	393	5
P111	1616	5
P90	801	5
P95	1603	4
P146	792	5
P119	8603	4
P99	792	5
P440	2416	3
P115	2455	5
P417	782	5
P15	27	5
P107	845	5
P63	1188	4
P17	2438	5
P237	207	4
P424	579	3
P72	1618	5
P156	1180	5
P104	3328	5
P223	3041	3
P222	1205	3
P163	3221	4
P439	1188	3
P60	461	5
P154	352	5
P70	877	5

Πίνακας Α 3: Συνέχεια

Προϊόν	Αριθμός τεμαχίων	Προτεραιότητα
P171	392	5
P232	2037	3
P429	972	5
P121	1600	4
P118	801	5
P225	384	3
P234	842	3
P33	500	4
P85	768	5
P120	7975	4
P325	731	5
P329	2221	4
P338	733	5
P242	1470	4
P271	734	5
P342	734	4
P343	372	5
P340	709	5
P351	733	2
P355	730	5
P255	2104	3
P244	2111	3
P346	2240	4
P142	1976	5
P57	736	4
P28	652	5
P122	1988	4

Πίνακας Α 4: 3η εβδομαδιαία ζήτηση

Προϊόν	Αριθμός τεμαχίων	Προτεραιότητα
P93	787	5
P161	992	5
P444	141	5
P148	379	5
P104	4935	5
P215	374	5
P171	240	5
P223	3024	5
P48	1073	5
P141	582	5
P54	227	5
P424	586	5
P43	519	5
P44	780	5
P413	234	5
P119	14377	5
P137	1256	5
P123	1544	5
P157	3892	5
P111	1592	5
P126	8008	5
P146	945	5
P114	1578	5
P95	2399	5
P163	2329	5
P160	7806	5
P234	397	5
P232	3226	5
P159	918	5
P115	3510	5
P241	604	5
P240	396	5
P250	2114	5
P238	600	5
P283	1824	5
P244	2116	5
P248	1522	5
P285	1603	5
P257	895	5
P278	1208	5
P269	196	5
P275	1210	5
P251	600	5
P270	608	5

Πίνακας Α 4: Συνέχεια

Προϊόν	Αριθμός τεμαχίων	Προτεραιότητα
P256	1208	5
P246	2112	5
P263	1200	5
P288	583	5
P287	3028	5
P261	872	5
P265	296	5
P264	886	5
P445	712	5
P38	420	5
P122	2010	5
P389	704	5
P369	1452	5
P380	240	5

Πίνακας Α 5: 4η εβδομαδιαία ζήτηση

Προϊόν	Αριθμός τεμαχίων	Προτεραιότητα
P224	224	4
P54	226	5
P49	637	3
P440	2454	4
P439	1201	4
P223	3063	5
P156	3297	5
P17	2408	3
P157	6480	5
P111	3138	3
P164	1254	5
P160	13969	5
P60	543	5
P130	800	5
P126	8747	5
P400	392	4
P413	394	4
P135	947	4
P107	1189	3
P112	1605	4
P131	225	4
P431	972	5
P104	6383	4
P166	856	4
P133	1581	5
P163	5120	4
P236	2055	5
P147	224	5
P229	841	5
P106	388	3
P119	20158	5
P448	314	3
P167	2305	5
P45	1592	2
P123	3380	5
P168	3152	4
P95	3255	3
P118	792	4
P161	999	4
P91	3328	3
P422	486	4
P429	972	5
P115	3553	5

Πίνακας Α 5: Συνέχεια

Προϊόν	Αριθμός τεμαχίων	Προτεραιότητα
P370	748	4
P96	1616	3
P101	162	4
P314	1496	1
P302	370	5
P305	738	5
P308	739	5
P122	1680	4
P397	363	5
P76	111	4
P79	647	5
P233	2413	4
P425	1501	3
P117	792	3
P446	1854	4
P369	2944	4
P142	2380	3
P380	1453	3
P386	1466	3
P331	3680	4
P341	739	4
P333	2212	4
P246	1472	3
P445	640	4

Πίνακας Α 6: 5η εβδομαδιαία ζήτηση

Προϊόν	Αριθμός τεμαχίων	Προτεραιότητα
P132	740	5
P427	1241	4
P139	794	4
P24	15	5
P272	101	5
P330	132	5
P157	3220	5
P123	1694	5
P126	12134	5
P119	8058	5
P159	1170	4
P441	1920	4
P112	799	5
P412	396	5
P19	1145	5
P30	1163	4
P17	1537	4
P163	3150	5
P48	863	5
P160	10288	4
P162	1165	5
P91	1606	5
P431	972	5
P128	1153	5
P116	1168	5
P130	806	4
P104	5660	5
P96	458	5
P135	863	5
P133	1222	5
P114	1252	5
P95	1600	5
P102	782	5
P428	646	5
P63	1191	5
P110	787	5
P215	180	5
P109	594	5
P361	480	5
P393	1885	4
P389	739	5
P198	600	5
P201	296	5

Πίνακας Α 6: Συνέχεια

Προϊόν	Αριθμός τεμαγίων	Προτεραιότητα
P210	296	5
P202	1008	5
P377	1248	5
P175	596	5
P200	903	5
P182	600	5
P204	298	5
P186	297	5
P190	196	5
P188	298	5
P213	600	5
P214	294	5
P209	903	5
P172	896	5
P18	1652	4
P144	800	4
P435	1978	4

Παράρτημα Β - Αποτελέσματα

Στο παράρτημα Β παρουσιάζονται οι πίνακες με τους χρόνους λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα της εβδομάδας, για τα 5 σενάρια ζήτησης και τις μελέτες περίπτωσης.

Πίνακας Β 1: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα, 1^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	14.30	12.85	13.76	14.33	13.79
J2	12.96	14.07	14.33	11.86	3.68
J3	13.96	11.79	14.20	3.19	2.87

Πίνακας Β 2: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα, 2^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	14.33	14.33	13.46	14.16	14.33
J2	14.33	13.68	14.12	1.76	3.04
J3	12.82	10.29	2.98	0.74	3.49

Πίνακας Β 3: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα, 3^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	13.16	14.18	6.19	10.63	1.55
J2	14.31	8.52	4.21	0.80	3.31
J3	14.01	14.30	14.13	4.72	0.40

Πίνακας Β 4: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα, 4^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	14.33	13.69	14.33	14.13	14.33
J2	14.22	13.52	13.77	11.41	10.79
J3	12.62	14.18	12.69	6.08	1.88

Πίνακας Β 5: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα, 5^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	14.02	13.59	5.76	9.28	7.58
J2	14.01	3.91	1.64	10.59	0.56
J3	14.22	9.93	2.57	1.83	0.69

Πίνακας Β 6: Ωρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με αυξημένους χρόνους εναλλαγής, 1^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	13.95	13.80	14.33	14.19	13.51
J2	13.58	13.96	14.33	11.05	6.58
J3	13.68	14.16	12.56	5.51	2.99

Πίνακας Β 7: Ωρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με αυξημένους χρόνους εναλλαγής, 2^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	13.91	14.33	14.33	13.50	10.99
J2	13.83	14.21	13.26	12.83	7.71
J3	13.82	10.58	3.10	0.84	3.69

Πίνακας Β 8: Ωρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με μειωμένους χρόνους εναλλαγής, 1^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	14.32	14.12	13.75	13.36	14.29
J2	14.19	13.08	14.28	10.87	0.85
J3	13.94	14.13	13.09	0.95	2.82

Πίνακας Β 9: Ωρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με μειωμένους χρόνους εναλλαγής, 4^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	14.31	14.33	14.15	14.05	14.29
J2	14.10	13.88	12.22	11.36	7.76
J3	12.25	13.95	14.44	5.96	1.76

Πίνακας Β 10: Ωρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με επέκταση ωραρίου, 1^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	21.43	22.06	13.76	22.5	6.61
J2	18.26	0.48	2.81	0.79	3.68
J3	21.57	19.30	1.11	0.99	2.87

Πίνακας Β 11: Ωρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με επέκταση ωραρίου, 4^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	22.36	21.41	22.21	10.22	2.89
J2	21.16	11.69	11.44	3.09	1.19
J3	20.75	18.72	4.30	1.88	1.78

Πίνακας Β 12: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με κατάργηση προτεραιοτήτων, 2^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	14.18	14.08	14.01	13.57	11.91
J2	14.12	13.64	14.03	6.66	3.04
J3	12.82	10.29	2.98	0.74	3.49

Πίνακας Β 13: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με κατάργηση προτεραιοτήτων, 4^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	13.33	14.33	14.13	13.22	14.33
J2	14.23	12.87	12.98	13.73	11.44
J3	12.62	14.18	12.67	6.18	1.78

Πίνακας Β 14: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με αύξηση ζήτησης, 3^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	13.98	13.41	7.99	13.76	9.44
J2	14.24	13.24	2.88	7.68	1.18
J3	14.33	14.15	13.88	13.87	4.75

Πίνακας Β 15: Ώρες λειτουργίας κάθε γραμμής για κάθε μέρα με αύξηση ζήτησης, 5^η εβδομαδιαία ζήτηση

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
J1	13.95	14.29	12.51	12.01	9.80
J2	14.25	10.25	2.01	13.70	0.65
J3	14.12	13.95	5.72	2.08	0.84