



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΡΥΘΜΙΣΗΣ
ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

(Α.Σ.Ρ.Χ.Δ.Ε.)

Βέλτιστος Χρονοπρογραμματισμός Παραγωγής σε Βιομηχανία Παραγωγής Χυμών

Διπλωματική εργασία του
Κωνσταντίνου Αποστολίδη
(ΑΕΜ: 5242)

Επιβλέπων: Καθηγητής Μιχαήλ Γεωργιάδης

Θεσσαλονίκη
Νοέμβριος 2022

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming, MILP) για τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μιας πραγματικής βιομηχανίας επεξεργασίας φρούτων για παραγωγή χυμών. Η παραγωγική διαδικασία αποτελείται από 3 στάδια, το στάδιο προετοιμασίας, το στάδιο παρασκευής πουρέ ή χυμού και το στάδιο αποθήκευσης. Το μαθηματικό μοντέλο είναι ένα μοντέλο άμεσης προτεραιότητας για συνεχούς λειτουργίας διεργασίες, λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα στάδια της παραγωγής. Το μοντέλο αποτελείται από περιορισμούς ισοζυγίων μάζας, κατανομής προϊόντων στις συσκευές, χρονικούς, παραγωγής και σύνδεσης μεταξύ σταδίων. Στόχος του μαθηματικού μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης της παραγωγής. Η βελτιστοποίηση του προβλήματος πραγματοποιείται με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου GAMS (General Algebraic Modeling System) και του επιλυτή ILOG CPLEX. Το πρόβλημα επιλύεται για 7 διαφορετικά σενάρια ζήτησης, για να αξιολογηθεί η ανταπόκριση του μοντέλου στις διαφορετικές περιπτώσεις. Τελικά διαπιστώνεται η αποτελεσματικότητα του μοντέλου ανεξαρτήτως περίπτωσης και η χρησιμότητα του σε τέτοιας φύσης βιομηχανίες. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται μια τροποποίηση στο μαθηματικό μοντέλο, ώστε να επιλύει το πρόβλημα με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της κατανάλωσης της πρώτης ύλης ή τη μεγιστοποίηση της παραγωγής των τελικών προϊόντων. Αυτός ο τρόπος βελτιστοποίησης αυξάνει τις δυνατότητες του μοντέλου, αφού πλέον η παραγωγή μπορεί να μην εξαρτάται μόνο από τη ζήτηση των τελικών προϊόντων, αλλά και από την κατανάλωση της διαθέσιμης πρώτης ύλης. Στη συνέχεια, μελετάται η περίπτωση επέκτασης της βιομηχανικής μονάδας με την προσθήκη μιας επιπλέον γραμμής παραγωγής. Η επιλογή της γραμμής παραγωγής γίνεται με βάση τα αποτελέσματα των προηγούμενων βελτιστοποιήσεων και συμπεραίνεται, ότι ανάλογα με την περίπτωση η νέα γραμμή παραγωγής μπορεί να μειώσει τον χρόνο ολοκλήρωσης της παραγωγής από 7-30 %. Η τελευταία μελέτη που πραγματοποιείται είναι η περίπτωση αφαίρεσης μιας γραμμής παραγωγής από τις ήδη υπάρχουσες και παρατηρούνται τα αποτελέσματα στον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής σε διαφορετικές συνθήκες. Τέλος γίνονται προτάσεις για περαιτέρω μελέτη και βελτίωση του μοντέλου.

Abstract

This diploma thesis aims to develop a mixed integer linear programming model, in order to optimize the production scheduling of a fruit processing industry. The production process consists of 3 total stages, the preparation of the fruit, the production of pulp or juice and the storage stage. The model is an immediate precedence model for continuous processes, and it takes into account all the production stages of the plant. The model consists of mass balance, timing, allocation, and linking (between the stages) constraints. The objective of the model is to minimize the makespan of the production. The optimization of the scheduling problem was solved using the GAMS (General Algebraic Modeling System) and the solver ILOG CPLEX. The scheduling problem was solved for 7 different product demand scenarios, each with some unique characteristics, in order to illustrate and assess the effectiveness of the model in these different cases. It is thus possible to determine the effectiveness and the usefulness of the model in such an industry. In addition, a modification was made to the model in order to solve the scheduling problem with the goal of maximizing the production of products or maximizing the raw material consumption. This method provides more advantages since the production scheduling is also dependent of the availability of raw materials and not only to the customer demand. Furthermore, in order to improve the production scheduling, a capacity expansion of the plant was also considered by adding another production line. The type of the production line was selected based of the results of the previous scenarios and the results showed that the addition of a new line can reduce the makespan from 7-30 % depending on the scenario. Additionally, the scenario of a non-operational production line was examined, with the purpose of observing the effect on production scheduling. Finally, several suggestions were made for further research and improvement of the existing model.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Μιχαήλ Γεωργιάδη, τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα μελέτη στο συγκεκριμένο γνωστικό αντικείμενο και για την πολύπλευρη καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης.

Επίσης, οφείλω ένα ευχαριστώ στην υποψήφια διδάκτωρ Μαρία Ελένη Σαμουηλίδου για την πολύτιμη βοήθεια της και τις παρατηρήσεις της για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπλέον, πρέπει να ευχαριστήσω τη διεύθυνση της εταιρείας BITOM ABEE για αυτή την απίστευτη ευκαιρία που μου έδωσε να βασιστεί η διπλωματική μου εργασία στη βιομηχανική μονάδα τους και ιδιαίτερα τον κ. Μιχάλη Μπακαλιό, χημικό μηχανικό παραγωγής, που χωρίς τη βοήθεια του και τον χρόνο που μου αφιέρωσε η μελέτη δε θα είχε έρθει εις πέρας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με στήριξαν σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου και με έκαναν καλύτερο άνθρωπο ξεκινώντας από τους γονείς μου, τα αδέρφια μου και τους φίλους μου.

Κωνσταντίνος Αποστολίδης

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή.....	1
2. Παραγωγική Διαδικασία	9
2.1 Συνταγολόγιο – Διάγραμμα ροής	9
2.1.1 Πρώτο Στάδιο: Στάδιο προετοιμασίας.....	9
2.1.2 Δεύτερο Στάδιο: Στάδιο Παραγωγής Πουρέ – Χυμού	10
2.1.3 Τρίτο Στάδιο: Στάδιο αποθήκευσης.....	11
2.2 Δεδομένα Παραγωγής	12
3. Μαθηματικό Μοντέλο.....	15
3.1 Σύνολα στοιχείων (sets), Παράμετροι και Μεταβλητές.....	15
3.2 Περιορισμοί και Αντικειμενική συνάρτηση.....	17
3.2.1 Περιορισμοί Ισοζυγίων Μάζας.....	18
3.2.2 Περιορισμοί κατανομής και αλληλουχίας προϊόντων	18
3.2.3 Χρονικοί περιορισμοί	19
3.2.4 Περιορισμοί μεγέθους παρτίδων προϊόντων - παραγωγής	20
3.2.5 Περιορισμοί συνοχής μεταξύ των σταδίων	21
3.2.6 Αντικειμενική συνάρτηση.....	23
3.3 Τροποποιημένο μοντέλο μεγιστοποίηση ζήτησης.....	23
4. Αποτελέσματα – Μελέτες Περίπτωσης.....	26
4.1 Εισαγωγή.....	26
4.2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής	26
4.3 Αποτελέσματα διάφορων σεναρίων ζήτησης.....	29
4.4 Μεγιστοποίηση παραγωγής.....	35
4.5 Προσθήκη καινούργιας γραμμής παραγωγής.....	37
4.6 Αφαίρεση υπάρχουσας γραμμής παραγωγής	40
5. Συμπεράσματα – Προτάσεις	45
5.1 Συμπεράσματα.....	45

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	47
6. Βιβλιογραφία.....	48
Παράρτημα Α – Σενάρια Ζήτησης.....	51
Παράρτημα Β – Αποτελέσματα μελετών.....	55

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Προϊόντα και πρώτες ύλες σε κάθε στάδιο της παραγωγής	12
Πίνακας 2.2: Ελάχιστος ρυθμός επεξεργασίας προϊόντος ή πρώτης ύλης στις γραμμές παραγωγής.....	13
Πίνακας 2.3: Μέγιστος ρυθμός επεξεργασίας προϊόντος και πρώτης ύλης στις γραμμές παραγωγής.....	13
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης πρώτου σεναρίου ζήτησης.....	28
Πίνακας 4.2: Ποσότητες πρώτων υλών και τελικών προϊόντων και χρόνος ολοκλήρωσης της παραγωγής κάθε σεναρίου	34
Πίνακας 4.3: Χρόνος ολοκλήρωσης παραγωγής κάθε σεναρίου της ζήτησης με και χωρίς την πρόσθετη γραμμή παραγωγής όμοια με την Line-7.....	39
Πίνακας 4.4: Χρόνος ολοκλήρωσης παραγωγής κάθε σεναρίου της ζήτησης με και χωρίς την πρόσθετη γραμμή παραγωγής όμοια με την Line-8.....	40
Πίνακας 4.5: Χρόνος ολοκλήρωσης παραγωγής κάθε σεναρίου ζήτησης χωρίς και με την αφαίρεση της γραμμή παραγωγής Line-1	44
Πίνακας A1: Σενάριο ζήτησης 1	51
Πίνακας A2: Σενάριο ζήτησης 2.....	51
Πίνακας A3: Σενάριο ζήτησης 3	52
Πίνακας A4: Σενάριο ζήτησης 4	52
Πίνακας A5: Σενάριο ζήτησης 5	53
Πίνακας A6: Σενάριο ζήτησης 6.....	53
Πίνακας A7: Σενάριο ζήτησης 7	54

Πίνακας B1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1 ^{ου} σεναρίου	55
Πίνακας B2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 2 ^{ου} σεναρίου	56
Πίνακας B3: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 3 ^{ου} σεναρίου	57
Πίνακας B4: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4 ^{ου} σεναρίου	58
Πίνακας B5: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 5 ^{ου} σεναρίου	59
Πίνακας B6: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 6 ^{ου} σεναρίου	60
Πίνακας B7: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 7 ^{ου} σεναρίου	61
Πίνακας B8: Αποτελέσματα μεγιστοποίησης της κατανάλωσης πρώτης ύλης	62
Πίνακας B9: Αποτελέσματα μεγιστοποίησης της παραγωγής προϊόντων	62
Πίνακας B10: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1 ^{ου} σεναρίου με την προσθήκη μιας καινούργιας γραμμής παραγωγής όμοια με την Line-7	63
Πίνακας B11: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1 ^{ου} σεναρίου με την αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας Line-1	64
Πίνακας B12: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 2 ^{ου} σεναρίου με την αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας Line-1	65
Πίνακας B13: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4 ^{ου} σεναρίου με την αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας Line-1	66
Πίνακας B14: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 6 ^{ου} σεναρίου με την αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας Line-1	67

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Αναπαράσταση State-Task Network (STN).....	2
Σχήμα 1.2: Αναπαράσταση Resource-Task Network (RTN).....	3
Σχήμα 2.1: Στάδια παραγωγής	9
Σχήμα 2.2: Διάγραμμα ροής του πρώτου σταδίου της παραγωγής.....	10
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής δεύτερου σταδίου για την παραγωγή προϊόντων πουρέ.....	10
Σχήμα 2.4: Διάγραμμα ροής δεύτερου σταδίου για την παραγωγή προϊόντων χυμών.....	11
Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας των μεταβλητών άμεσης προτεραιότητας <i>Xi'js</i>	19
Σχήμα 4.1: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 1.....	27
Σχήμα 4.2: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 2.....	29
Σχήμα 4.3: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 3.....	30
Σχήμα 4.4: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 4.....	31
Σχήμα 4.5: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 5.....	32
Σχήμα 4.6: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 6.....	33
Σχήμα 4.7: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 7.....	34
Σχήμα 4.8: Gantt Chart περίπτωση μεγιστοποίησης κατανάλωσης πρώτης ύλης.....	36
Σχήμα 4.9: Gantt Chart περίπτωση μεγιστοποίησης παραγωγής προϊόντων.....	36
Σχήμα 4.10: Gantt Chart χρονοπρογραμματισμού παραγωγής πρώτου σεναρίου με καινούργια γραμμή όμοια με τη Line-7	38
Σχήμα 4.11: Gantt Chart χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1 ^{ου} σεναρίου με αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας (Line-1)	41
Σχήμα 4.12: Gantt Chart χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 2 ^{ου} σεναρίου με αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας (Line-1)	42
Σχήμα 4.13: Gantt Chart χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4 ^{ου} σεναρίου με αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας (Line-1)	42

Σχήμα 4.14: Gantt Chart χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 6 ^{ου} σεναρίου με αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας (Line-1)	43
--	----

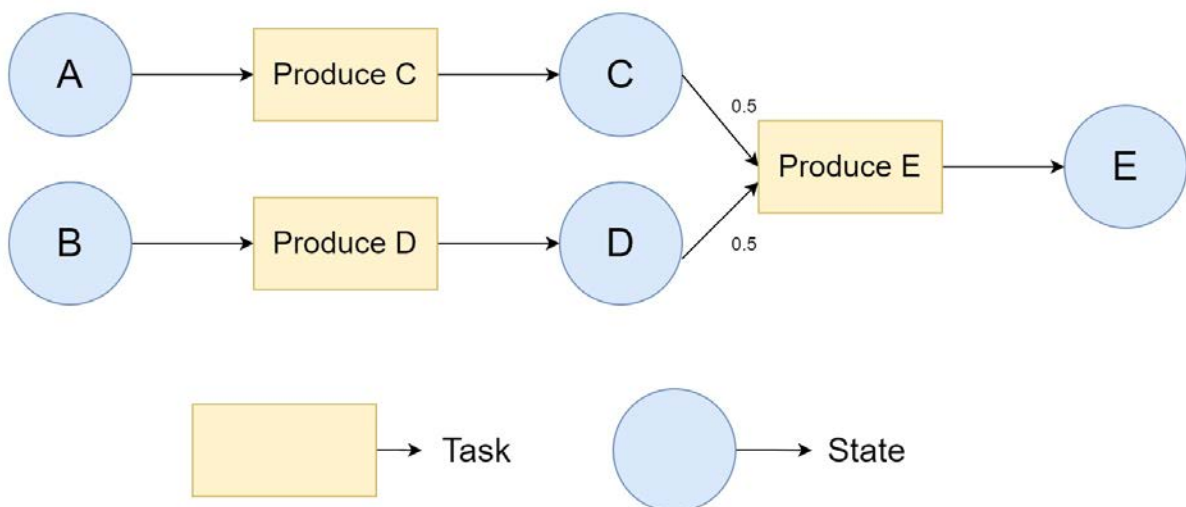
1. Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες η ανταγωνιστικότητα μεταξύ των βιομηχανιών όλο και αυξάνεται για καλύτερη ποιότητα προϊόντων, ταχύτερη διανομή και γενικότερα καλύτερη εξυπηρέτηση πελατών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον είναι πολύ ασταθές και επηρεάζεται σημαντικά από οικονομικές και πολιτικές συνθήκες και αποφάσεις της παγκόσμιας κλίμακας. Επομένως, οι επιχειρήσεις για να καλύψουν τη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση των πελατών και να εξασφαλίσουν την εξυπηρέτηση τους πρέπει η παραγωγή να χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευελιξία και αποτελεσματικότητα. Για αυτό τον λόγο, γίνονται προσπάθειες για αυτοματοποίηση ή τη βελτίωση των διαδικασιών λήψης αποφάσεων με την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων βελτιστοποίησης. Ένα σημαντικό επίπεδο αποφάσεων, που βοηθά στη βιωσιμότητα μιας επιχείρησης, είναι ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής, με τον οποίο εξασφαλίζεται η κατανομή του εξοπλισμού, των πρώτων υλών και του ανθρώπινου δυναμικού σε ανταγωνιστικές διεργασίες.

Ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής είναι ένα βασικό κομμάτι για την αποδοτική λειτουργία των βιομηχανιών επεξεργασίας και μεταποίησης, ειδικά τώρα στη ανταγωνιστική παγκοσμιοποιημένη αγορά, που τα περιθώρια κέρδους είναι ελάχιστα. Με τον όρο «χρονοπρογραμματισμός» ορίζεται η κατανομή δεδομένων πόρων στη διάρκεια του υπό μελέτη χρονικού ορίζοντα με σκοπό την ολοκλήρωση ενός συνόλου εργασιών (Baker, 1974). Στο σύνολο των διαθέσιμων πόρων περιλαμβάνεται ο εξοπλισμός του εργοστασίου για την ολοκλήρωση των διεργασιών, την αποθήκευση και τη μεταφορά αντικειμένων (π.χ. πρώτες ύλες και προϊόντα), το ανθρώπινο δυναμικό, οι βοηθητικές παροχές κτλ. Ένας βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός έχει την ικανότητα να αυξήσει την παραγωγικότητα και να μειώσει το κόστος λειτουργίας της παραγωγικής μονάδας. Κάθε βιομηχανική μονάδα έχει διαφορετικούς στόχους, οπότε μπορεί να μελετηθεί μια πληθώρα αντικειμενικών συναρτήσεων. Κάποιες από τις πιο διαδεδομένες και συχνά χρησιμοποιούμενες είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, η ελαχιστοποίηση της απόκλισης από τους χρόνους παράδοσης των προϊόντων (earliness and tardiness), η ελαχιστοποίηση του χρόνου εναλλαγών μεταξύ παραγόμενων προϊόντων στον διαθέσιμο εξοπλισμό (changeover times) και η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης της παραγωγής (makespan) (Γεωργιάδης, et al., 2022). Οι κύριες αποφάσεις που λαμβάνονται από ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής είναι ο προσδιορισμός των παρτίδων, η κατανομή παρτίδων στον διαθέσιμο εξοπλισμό και η αλληλουχία εκτέλεσης τους.

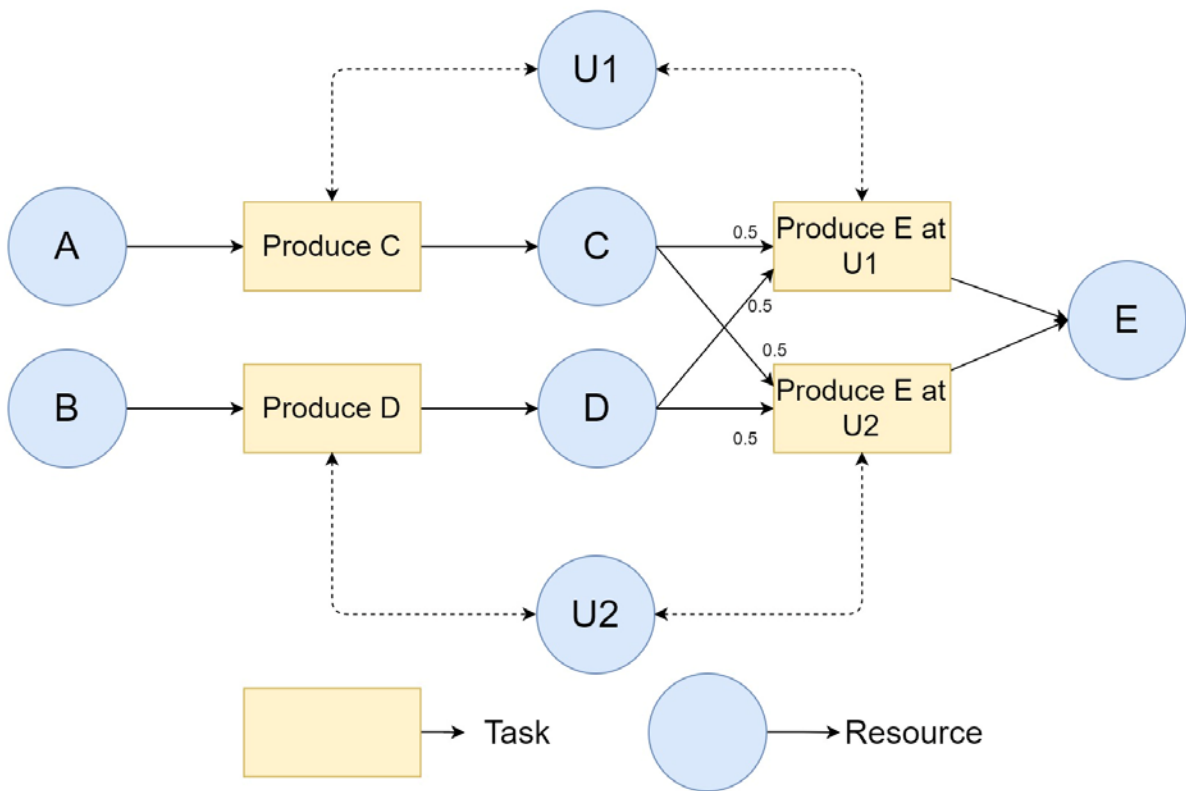
Η πλειοψηφία των μαθηματικών μοντέλων, που έχουν αναπτυχθεί είναι μοντέλα μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming, MILP), καθώς μπορούν να βρουν την βέλτιστη λύση ή να την προσεγγίσουν σε μεγάλο βαθμό, και ταυτόχρονα επιλύουν το πρόβλημα σε μικρούς υπολογιστικούς χρόνους. Ανεξάρτητα το μαθηματικό μοντέλο, ζωτικής σημασίας για μια ορθή βελτιστοποίηση είναι η σωστή αναπαράσταση του προβλήματος. Επομένως κάθε μοντέλο βασίζεται στην καλή μετάφραση της βιομηχανικής μονάδας σε μαθηματικές οντότητες (μεταβλητές, περιορισμοί κτλ.). Παρακάτω αναλύονται κάποιες προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση των προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής.

Αρχικά, ένα είδος μοντελοποίησης βασίζεται στην αναπαράσταση δικτύου καταστάσεων διεργασιών (State-Task-Network, STN), που αναπτύχθηκε από τους Kondili, et al. (1993). Ειδικότερα, στην αναπαράσταση STN γίνεται η απεικόνιση των διεργασιών (tasks), οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν από ένα σύνολο συσκευών και καταναλώνουν ή παράγουν διάφορες καταστάσεις της ύλης (states), όπως πρώτες ύλες, ενδιάμεσα και τελικά προϊόντα. Τα states αναπαρίστανται με κύκλους και τα tasks με ορθογώνια παραλληλόγραμμα. Με βάση το διάγραμμα STN κατασκευάζεται ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού (MILP) με διακριτή αναπαράσταση του χρόνου για την επίλυση βραχυπρόθεσμων προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής διαλείπουσας λειτουργίας (batch). Στο μοντέλο αυτό έχουν αναπτυχθεί και παραλλαγές, για παράδειγμα, οι Giannelos & Georgiadis (2002), παρουσίασαν μία νέα μαθηματική διατύπωση που περιλαμβάνει και διεργασίες συνεχούς λειτουργίας βασιζόμενοι στο STN. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται μια απλή αναπαράσταση του STN.



Σχήμα 1.1: Αναπαράσταση State-Task Network (STN)

Ένας δεύτερος τρόπος αναπαράστασης του προβλήματος και την κατασκευή μαθηματικού μοντέλου είναι μέσω της αναπαράστασης Δικτύου Πόρων Διεργασιών (Resource-Task-Network, RTN) (Pantelides, 1994). Η αναπαράσταση RTN είναι η γενικευμένη μορφή του STN, στο οποίο και οι συσκευές μοντελοποιούνται ως πόροι (resources) και καταναλώνονται με την εκκίνηση ενός task και παράγονται με τον τερματισμό του. Τα μοντέλα που βασίζονται στα διαγράμματα RTN παρέχουν πιο ακριβή και ασφαλή αποτελέσματα, καθώς συμπεριλαμβάνουν επιπρόσθετα στοιχεία σε σύγκριση με το STN. Τα μοντέλα, που βασίζονται στις αναπαραστάσεις STN και RTN είναι πολύ χρήσιμα για βιομηχανικές μονάδες, όπου είναι δυνατός ο διαχωρισμός και η ανάμιξη επιμέρους παρτίδων προϊόντων. Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται η αντίστοιχη αναπαράσταση RTN του σχήματος 1.1.



Σχήμα 1.2: Αναπαράσταση Resource-Task Network (RTN)

Μια άλλη σημαντική κατηγορία μοντέλων είναι τα μοντέλα προτεραιότητας (precedence based – model), τα οποία βασίζονται στη μοντελοποίηση της σειράς αλληλουχίας των προϊόντων. Τα μοντέλα προτεραιότητας χωρίζονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με το είδος των δυαδικών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται, στα μοντέλα άμεσης προτεραιότητας και στα μοντέλα γενικής προτεραιότητας. Στα μοντέλα γενικής προτεραιότητας, οι δυαδικές μεταβλητές εκφράζουν τη γενική σειρά ακολουθίας ως προς όλα

τα ζεύγη παρτίδων. Αντίθετα, τα μοντέλα άμεσης προτεραιότητας χρησιμοποιούν δυαδικές μεταβλητές ακολουθίας, οι οποίες παίρνουν τιμή μόνο μεταξύ διαδοχικών παρτίδων προϊόντων. Η χρήση των μοντέλων προτεραιότητας οδηγεί σε λύσεις υψηλής ποιότητας με πολύ χαμηλό υπολογιστικό κόστος, πράγμα που τα κάνει μια ελκυστική λύση για βιομηχανικά προβλήματα μεγάλης κλίμακας. Η βασική διαφοροποίηση των μοντέλων αυτών είναι η αναπαράσταση του χρόνου, αφού μπορεί να εφαρμοστεί και διακριτός αλλά και συνεχής χρονικός ορίζοντας.

Ο χρονοπρογραμματισμός μέσω μαθηματικών μοντέλων παρ' όλ' αυτά δεν αποτελεί «πανάκεια», καθώς η παραγωγική διαδικασία χαρακτηρίζεται από πηγές αβεβαιότητας, όπως για παράδειγμα η ύπαρξη κάποιας βλάβης σε μια μονάδα μηχανολογικού εξοπλισμού, ή μείωση ανθρώπινου δυναμικού λόγω προβλημάτων υγείας κ.α.. Για την αντιμετώπιση αυτών των πηγών αβεβαιότητας πρέπει να γίνεται επαναπρογραμματισμός της παραγωγής σε τακτά χρονικά διαστήματα του χρονικού ορίζοντα (Harjunkoski, et al., 2014). Παρακάτω περιγράφονται σύντομα κάποιες βιβλιογραφικές μελέτες, που αφορούν πραγματικά προβλήματα, ώστε να αναδειχθεί η αξία χρήσης μαθηματικών μοντέλων για την βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής.

Οι Baldo, et al. (2014), μελέτησαν τη βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας μιας βιομηχανίας ζύθου. Η παραγωγή αποτελούταν από δύο στάδια, την παρασκευή του ζύθου με όλες τις απαραίτητες διεργασίες και την εμφιάλωση των υγρών με τη χρήση γραμμών εμφιάλωσης για την παραγωγή προϊόντων διαφορετικών υγρών και διαφορετικού μεγέθους. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού με κύρια δυσκολία τον συγχρονισμό των δύο αυτών σταδίων χρησιμοποιώντας διακριτό χρονικό ορίζοντα.

Οι Georgiadis, et al. (2021) παρουσίασαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης άμεσης προτεραιότητας με ταυτόχρονη χρήση και διακριτού και συνεχή ορίζοντα. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη και τα δύο στάδια της παραγωγής, τα οποία αποτελούνται από συνεχείς αλλά και από ασυνεχείς διαδικασίες.

Οι Berruto, et al. (2006) ανέπτυξαν ένα μοντέλο δύο βημάτων για την βελτιστοποίηση της εμφιάλωσης προϊόντων κρασιού. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού με διακριτό ορίζοντα για την εύρεση της βέλτιστης αλληλουχίας των παραγγελιών βάσει δεδομένων, όπως το ανθρώπινο δυναμικό, οι ρυθμοί παραγωγής, οι ημερομηνίες παράδοσης κ.α. Στο δεύτερο βήμα, με βάση τα δεδομένα του πρώτου βήματος, επιλέγεται περιορισμένος αριθμός παραγγελιών και αναθέτονται σε μια εβδομαδιαία

παραγωγή. Ο χρονικός ορίζοντας έχει διάρκεια ενός μήνα και γίνεται τακτικός επαναπρογραμματισμός κάθε βδομάδα.

Οι Pagliarussi, et al. (2017) παρουσίασαν ένα μαθηματικό μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού σε ένα χρονικό ορίζοντα πολλαπλών περιόδων μιας βιομηχανίας παραγωγής χυμών στη Βραζιλία. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι, ότι αντί να παίρνουν υπόψιν παράλληλες συσκευές, το μοντέλο διερευνά άλλες πιθανές διαμορφώσεις των συσκευών για την αναπαράσταση των διεργασιών παραγωγής χυμού.

Οι Koranos, et al. (2011) ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο για τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 8 προϊόντων με 3 στάδια στην παραγωγική διαδικασία. Ο στόχος του μαθηματικού μοντέλου ήταν η ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης της παραγωγής (makespan). Παράλληλα με τη βελτιστοποίηση, μειώθηκε και το κόστος παραγωγής και αυξήθηκε η δυναμικότητα. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε με δεδομένα μιας βιομηχανίας παρασκευής παγωτών, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί για διάφορες βιομηχανίες τροφίμων.

Οι Tirkes, et al. (2021) παρουσίασαν ένα μοντέλο για τη βιομηχανία τροφίμων και ροφημάτων σε μία multi-product μονάδα, όπου ένα προϊόν παρασκευάζεται ανά πάσα στιγμή. Ο κύριος περιορισμός είναι, ότι οι πολλαπλές γραμμές διαφορετικών προϊόντων μοιράζονται την ίδια μονάδα περιορισμένης χωρητικότητας. Το μοντέλο MILP είχε ως αντικειμενική συνάρτηση τη μεγιστοποίηση του κέρδους λαμβάνοντας υπόψιν τα έσοδα και τα έξοδα της μονάδας και τελικά υπήρχε αύξηση της παραγωγής κατά 15% και αύξηση του κέρδους κατά 25%.

Οι Georgiadis, et al. (2020) ανέπτυξαν ένα μοντέλο MILP για μια βιομηχανία παραγωγής κονσερβοποιημένων ψαριών με πολλαπλά στάδια. Η παραγωγή αποτελείται από μια μίξη ασυνεχών και συνεχών διεργασιών. Για τη μείωση της πολυπλοκότητας και του υπολογιστικού κόστους του προβλήματος εισήχθησαν περιορισμοί για τις ασυνεχείς διεργασίες. Ως αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε η ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης της παραγωγής (makespan), αλλά και η ελαχιστοποίηση του χρόνου εναλλαγής μεταξύ προϊόντων στις συσκευές. Το αποτέλεσμα ήταν ένα μοντέλο, που μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικά προβλήματα με πολύ χαμηλούς χρόνους για την ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης και την επίλυση του προβλήματος.

Οι Wari & Weihang (2016) παρουσίασαν ένα μοντέλο MILP με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης της παραγωγής (makespan) για μια βιομηχανία παραγωγής παγωτού. Το μοντέλο αυτό δοκιμάστηκε σε διάφορα σενάρια και

συγκρίθηκε με υβριδικές μεθόδους MILP-heuristics της βιβλιογραφίας. Το μοντέλο αποδείχθηκε, ότι ήταν ικανό να λύσει προβλήματα όπου ήταν αναγκαστική η χρήση των υβριδικών μεθόδων.

Οι Koranos, et al. (2010) ανέπτυξαν ένα μοντέλο MILP για τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής και του μεγέθους των παρτίδων (lot-sizing) της εγκατάστασης. Η συγκεκριμένη βιομηχανία παράγει πολλαπλά προϊόντα γιαουρτιού. Το μοντέλο χρησιμοποιεί μια μίξη διακριτού και συνεχή ορίζοντα με τη διακριτή αναπαράσταση να είναι οι ημέρες της εβδομάδας και η συνεχής αναπαράσταση να είναι η κάθε μέρα ξεχωριστά. Επιπρόσθετα τα προϊόντα ομαδοποιούνται σε οικογένειες, ώστε να βελτιωθεί η ταχύτητα επίλυσης του μοντέλου. Η αντικειμενική συνάρτηση αφορά την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, που περιλαμβάνει το κόστος αποθήκευσης, επεξεργασίας, ζύμωσης, εναλλαγή προϊόντων και χρήσης μηχανολογικού εξοπλισμού.

Οι Xie & Li (2012) μελέτησαν τον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής σε μία βιομηχανία κρεάτων και ειδικότερα σε μια γραμμή επεξεργασίας και συσκευασίας αναπτύσσοντας ένα μαθηματικό μοντέλο με βάση τα δεδομένα της εταιρείας. Το μοντέλο αυτό συμφωνεί με απόκλιση 2% από τα πραγματικά σενάρια.

Οι Aguirre, et al. (2017) ανέπτυξαν ένα μοντέλο MILP, το οποίο χρησιμοποιήθηκε μαζί με ένα αλγόριθμο διάσπασης (decomposition algorithm), ώστε να βρεθεί βέλτιστη λύση με χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος. Η βιομηχανία ήταν μεγάλης κλίμακας, πολλών προϊόντων και σταδίων.

Οι Polon, et al. (2017) μελέτησαν τον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής μιας βιομηχανικής μονάδας παραγωγής λουκάνικων, καθώς τα περισσότερα προϊόντα δεν έχουν κάποια εξειδικευμένη γραμμή παραγωγής. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε επιλύει το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγωγής, ικανοποιώντας την αντίστοιχη ζήτηση κάθε προϊόντος. Οι παραγγελίες ολοκληρωνόντουσαν σε μία ενιαία παραγωγή μέχρι την κάλυψη της ζήτησης. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αυξάνουν την συνολική παραγωγή κατά 20%.

Οι Toledo, et al. (2009) πρότειναν ένα μαθηματικό μοντέλο ακαίρου γραμμικού προγραμματισμού, MILP για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής και του μεγέθους των παρτίδων της παραγωγής (Synchronized and Integrated Two-Level Lot Sizing and Scheduling Problem, SITLSP). Το μοντέλο αυτό βρίσκει εφαρμογή σε βιομηχανίες παραγωγής αναψυκτικών, όπου υπάρχουν δύο αλληλεξαρτώμενα επίπεδα λήψης αποφάσεων που αφορούν την αποθήκευση των πρώτων υλών και την εμφιάλωση των αναψυκτικών. Η κύρια δυσκολία του προβλήματος βρίσκεται στο γεγονός, ότι το κόστος και

ο χρόνος προετοιμασίας καθορίζεται άμεσα από το προηγούμενο αντικείμενο που αποθηκεύτηκε.

Οι Ferreira, et al. (2009) παρουσίασαν ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού βασισμένο στο general lot sizing and scheduling problem (GLSP), για μία βιομηχανία παραγωγής αναψυκτικών με πολλές γραμμές εμφιάλωσης και με αρκετές δεξαμενές προετοιμασίας των διάφορων σιροπιών που προσδίδουν γεύση στο αναψυκτικό. Η παραγωγή αποτελείται από δύο στάδια, την παρασκευή του σιροπιού και την εμφιάλωση. Το μοντέλο έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας, συγχρονίζοντας τα δύο στάδια. Τελικά, το μοντέλο αποδείχθηκε ότι είναι ικανό να παράγει αποδοτικότερες λύσεις από αυτές που πρότεινε η βιομηχανία.

Οι Liu, et al. (2010) ανέπτυξαν δύο μοντέλα μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μιας βιομηχανίας παραγωγής λαδιού ενός σταδίου με ασυνεχείς διεργασίες. Τα δύο μοντέλα διαφέρουν στο ότι το ένα μοντέλο παίρνει υπόψη το αν δεν έχουν ολοκληρωθεί οι διεργασίες σε συγκεκριμένο χρόνο (backlog) επιβαρύνοντας το κέρδος, ενώ το άλλο όχι. Τα προτεινόμενα μοντέλα βελτιστοποίησαν τον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής με αντικειμενική συνάρτηση τη μεγιστοποίηση του κέρδους για 70 διαφορετικά τελικά προϊόντα. Η αξιοπιστία του μοντέλου συγκρίθηκε με το μοντέλο διακριτού ορίζοντα των Kelly & Zyngier (2007), οι οποίοι αντιμετώπισαν παρόμοιο πρόβλημα.

Οι Leiva & Albornoz (2016) παρουσίασαν ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μιας βιομηχανίας παραγωγής αναψυκτικών. Όπως και σε προηγούμενες βιβλιογραφικές αναφορές η παραγωγική διαδικασία αποτελείται από δύο στάδια, την προετοιμασία του σιροπιού γεύσης του αναψυκτικού και την εμφιάλωση του αναψυκτικού. Η διαφοροποίηση του μοντέλου αυτού με τα προηγούμενα παρόμοια είναι ότι υπάρχει δυνατότητα για διαχωρισμού μιας παρτίδας σε πολλές δεξαμενές προετοιμασίας του πρώτου σταδίου, μειώνοντας έτσι τον χρόνο αδράνειας των γραμμών εμφιάλωσης. Στόχος της βελτιστοποίησης ήταν η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραγωγής και τελικά το μοντέλο ήταν ικανό για βελτίωση της λύσης της βιομηχανίας κατά 15.67%.

Οι Méndez & Cerdá (2002) ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού για συνεχούς λειτουργίας διεργασίες. Το μοντέλο περιλαμβάνει περιορισμούς ως προς τους διαθέσιμους πόρους και έχει ως στόχο την βελτιστοποίηση του κέρδους χρησιμοποιώντας μεταβλητές προτεραιότητας. Στη βιομηχανία υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης των ενδιάμεσων προϊόντων, για να αποφευχθεί αδράνεια στις γραμμές

παραγωγής. Υπάρχουν 7 ενδιάμεσα προϊόντα και 15 τελικά προϊόντα. Τελικά, για μεσσαίας κλίμακας βιομηχανίες βελτιώνει την απόδοση της παραγωγής σε μικρότερους υπολογιστικούς χρόνους σε σχέση με τις μεθόδους που χρησιμοποιούντουσαν από τη βιομηχανία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μιας βιομηχανίας επεξεργασίας φρούτων για την παραγωγή προϊόντων πουρέ και χυμού. Η βελτιστοποίηση έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης της παραγωγής (makespan) καλύπτοντας πλήρως τη ζήτηση. Το μαθηματικό μοντέλο, που χρησιμοποιείται είναι ένα μοντέλο άμεσης προτεραιότητας για συνεχούς λειτουργίας διεργασίες. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι, ότι λαμβάνει υπόψη κάθε στάδιο της παραγωγής, αλλά ταυτόχρονα υπάρχει δυνατότητα για ανάμιξη και διαχωρισμό ενδιάμεσων προϊόντων σε τελικά προϊόντα από στάδιο σε στάδιο. Στην επόμενη ενότητα περιγράφεται με λεπτομέρεια η παραγωγική διαδικασία της βιομηχανίας και αναλύονται τα απαραίτητα δεδομένα για την επίλυση του προβλήματος. Στην τρίτη ενότητα, αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο αναλύοντας όλα τα απαραίτητα στοιχεία και τους περιορισμούς που περιλαμβάνει. Στην τέταρτη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου GAMS (General Algebraic Modeling System), σε διάφορες μελέτες περίπτωσης. Στην τελευταία ενότητα παρατίθενται τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και βελτίωση του μοντέλου.

2. Παραγωγική Διαδικασία

Η συγκεκριμένη μελέτη βασίζεται σε δεδομένα της βιομηχανίας επεξεργασίας φρούτων της εταιρείας BITOM ABEE για την παραγωγή και διάθεση κομπόστας, πουρέ, κύβων φρούτων και συμπυκνωμένων χυμών. Ειδικότερα βασίζεται σε δεδομένα, που αφορούν αποκλειστικά την παραγωγή πουρέ και συμπυκνωμένων χυμών. Τα τελικά προϊόντα πουρέ είναι είτε συμπυκνωμένος πουρές είτε πουρές NFC (όχι συμπυκνωμένος) από κάποιο φρούτο και τα τελικά προϊόντα ενός χυμού είναι συμπυκνωμένος θολός χυμός (cloudy) ή συμπυκνωμένος διαυγής χυμός (clear). Παρακάτω αναλύεται το συνταγολόγιο παραγωγής, καθώς και τα σημαντικότερα δεδομένα, που απαιτήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού της βιομηχανίας BITOM ABEE.

2.1 Συνταγολόγιο – Διάγραμμα ροής

Η διαδικασία παραγωγής μπορεί να διακριθεί σε 3 επιμέρους γενικά στάδια, το στάδιο προετοιμασίας στο οποίο ανεξάρτητα από το τελικό προϊόν και την πρώτη ύλη η διαδικασία είναι η ίδια, το στάδιο παραγωγής πουρέ-χυμού και τέλος το στάδιο της αποθήκευσης. Κάθε στάδιο παραγωγής έχει τις δικές του γραμμές παραγωγής.

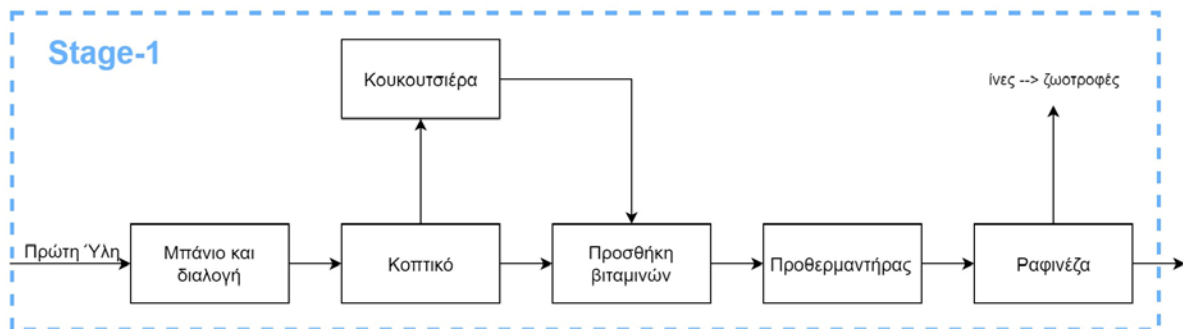


Σχήμα 2.1: Στάδια παραγωγής

2.1.1 Πρώτο Στάδιο: Στάδιο προετοιμασίας

Αρχικά, η πρώτη ύλη τροφοδοτείται σε ένα μάνιο για καθαρισμό και διαλογή για την απομάκρυνση ανόργανων χημικών ουσιών και φύλλων. Στη συνέχεια, το φρούτο εισάγεται στο κοπτικό για την αφαίρεση της φλούδας και του πυρήνα. Ο πυρήνας του φρούτου (αν υπάρχει) κατευθύνεται σε μία κουκουτσιέρα για περαιτέρω ανάκτηση μέρος του φρούτου, το οποίο επανέρχεται στην κύρια ροή της παραγωγής. Επιπρόσθετα, γίνεται προσθήκη διαλύματος ασκορβικού οξέος για την προστασία του φρούτου από οξείδωση και άρα για την προστασία του χρώματός του. Έπειτα, η ροή θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία με τη χρήση ατμού σε έναν προθερμαντήρα και εισάγονται διάφορα πρόσθετα (π.χ. βιταμίνες). Το ζεστό, πλέον, ρεύμα κατευθύνεται σε διάτρητα περιστρεφόμενα τύμπανα (ραφινέζα), όπου απομακρύνονται

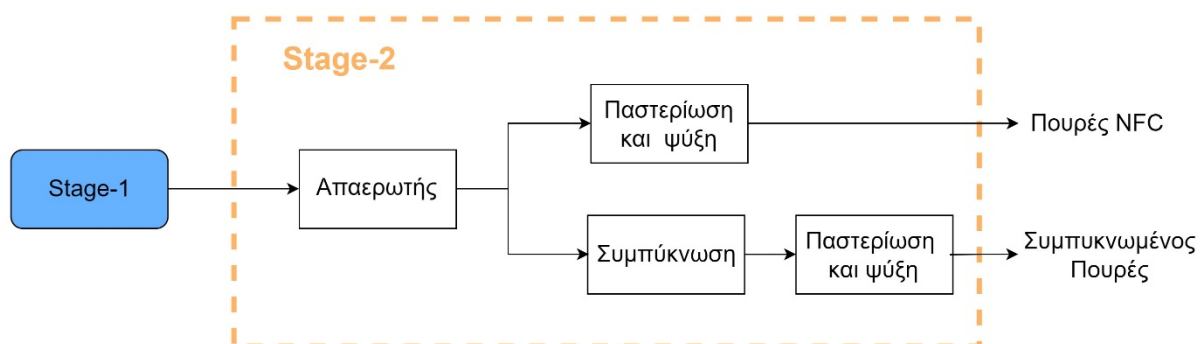
ίνες, οι οποίες αποτελούν πρώτη ύλη για την παραγωγή ζωοτροφών. Το ενδιάμεσο προϊόν, που εξέρχεται από την ραφινέζα, μπορεί να κατευθυνθεί προς τον απαερωτή για παραγωγή πουρέ ή προς ενζυμική κατεργασία για την παραγωγή χυμού. Το διάγραμμα ροής του 1^{ου} σταδίου φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Μετά τη ραφινέζα υπάρχει δυνατότητα ανάμιξης των ροών κάθε γραμμής και επιπρόσθετα δυνατότητα διαχωρισμού στις επιθυμητές αναλογίες.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα ροής του πρώτου σταδίου της παραγωγής

2.1.2 Δεύτερο Στάδιο: Στάδιο Παραγωγής Πουρέ – Χυμού

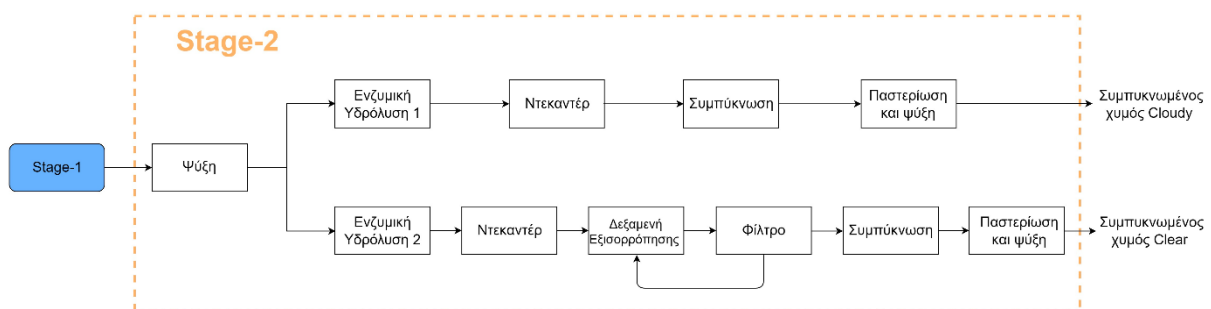
Αν το επιθυμητό προϊόν είναι ο πουρές, τότε μετά το στάδιο προετοιμασίας το ρεύμα εισάγεται σε έναν απαερωτή. Η αφαίρεση του αέρα είναι αναγκαία για να αποτραπεί η οξείδωση του φρούτου. Για την παραγωγή συμπυκνωμένου πουρέ το ρεύμα κατευθύνεται πρώτα για συμπύκνωση και έπειτα για παστερίωση σε θερμοκρασία 102 °C με χρόνο παραμονής 3 min. Για την παραγωγή πουρέ NFC το ρεύμα εισέρχεται απευθείας για παστερίωση. Το τελικό βήμα πριν την αποθήκευση είναι η ψύξη του ρεύματος με νερό.



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα ροής δεύτερου σταδίου για την παραγωγή προϊόντων πουρέ

Η παραγωγή χυμού γίνεται σε μία ανεξάρτητη σειρά διεργασιών και συσκευών. Αρχικά, πραγματοποιείται ψύξη του ρεύματος εξόδου από τη ραφινέζα, ώστε να μην καταστραφούν τα ένζυμα και να πραγματοποιηθεί η διεργασία της ενζυμικής υδρόλυσης. Η

ενζυμική υδρόλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικούς χρόνους παραμονής. Αν ο χρόνος παραμονής είναι 2 ώρες, τότε ο χυμός είναι τύπου cloudy, ενώ αν είναι 3 ώρες τότε είναι τύπου clear. Να σημειωθεί, ότι για την ενζυμική υδρόλυση χρησιμοποιούνται δύο (για παραγωγή cloudy) ή τρεις (για παραγωγή clear) αντιδραστήρες batch, αλλά δουλεύουν παράλληλα με τέτοιο τρόπο, ώστε η εκροή να παραμένει σταθερή και να μιμείται μια διεργασία συνεχούς λειτουργίας. Αν ο χυμός είναι τύπου cloudy, τότε μετά την ενζυμική υδρόλυση το μίγμα κατευθύνεται προς το decanter για τον διαχωρισμό του ιζήματος. Έπειτα, γίνεται συμπύκνωση (40 brix για ροδάκινο) και τέλος πραγματοποιείται παστερίωση και ψύξη, ώστε τελικά να παραχθεί χυμός cloudy. Αν ο χυμός είναι τύπου clear, τότε μετά την ενζυμική υδρόλυση διάρκειας 3 ωρών το ρεύμα πηγαίνει προς το decanter, αλλά στη συνέχεια περνάει από μια συστοιχία φίλτρων υπέρ-διήθησης για επιπλέον διαύγαση. Για την εξασφάλιση σταθερής ροής χρησιμοποιείται μια δεξαμενή εξισορρόπησης (balance tank). Στο σημείο αυτό υπάρχει τοπική ανακύκλωση, ώστε να ενισχυθεί παραπάνω ο διαχωρισμός. Τέλος, στο διήθημα πραγματοποιείται συμπύκνωση, παστερίωση και ψύξη ώστε τελικά να πάρουμε τους διαυγείς χυμούς. Η γραμμή χυμού μπορεί να λειτουργεί ή για χυμούς cloudy ή για χυμούς clear.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα ροής δεύτερου σταδίου για την παραγωγή προϊόντων χυμών

2.1.3 Τρίτο Στάδιο: Στάδιο αποθήκευσης

Το τελευταίο στάδιο της παραγωγής είναι το στάδιο της αποθήκευσης. Συγκεκριμένα ο πουρές NFC μπορεί να αποθηκευτεί σε ασηπτικά βαρέλια ή σε ασηπτικές δεξαμενές, ο συμπυκνωμένος πουρές και ο χυμός cloudy αποθηκεύονται μόνο σε ασηπτικά βαρέλια και ο χυμός clear σε απλές δεξαμενές ή βαρέλια. Τα προϊόντα τροφοδοτούνται σε ασηπτικά βαρέλια με μία συσκευή με διπλή κεφαλή, ενώ οι ασηπτικές και απλές δεξαμενές τροφοδοτούνται με σωλήνα.

2.2 Δεδομένα Παραγωγής

Για την επίλυση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού λαμβάνεται υπόψιν τόσο η πρώτη ύλη όσο και τα τελικά προϊόντα. Τα τελικά προϊόντα, που παράγονται σε περίοδο μίας εβδομάδας είναι συνολικά 7. Τα προϊόντα προέρχονται από 3 διαφορετικές πρώτες ύλες. Οι πρώτες ύλες αναφέρονται μόνο στο πρώτο στάδιο της παραγωγής, ενώ τα τελικά προϊόντα στα υπόλοιπα δύο. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι, για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ανάμιξης στο πρώτο στάδιο. Εξαιρέση αποτελούν τα προϊόντα του χυμού, καθώς ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής των γραμμών παρασκευής χυμού μπορεί να καλυφθεί πλήρως από μία γραμμή παραγωγής, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για ανάμιξη από άλλες γραμμές παραγωγής του πρώτου σταδίου. Τα προϊόντα και οι πρώτες ύλες, καθώς και τα στάδια στα οποία ανήκουν παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Προϊόντα και πρώτες ύλες σε κάθε στάδιο της παραγωγής

Προϊόντα	Κωδικός	Στάδιο
Πουρές Ροδάκινο NFC	P-1	2 ^ο Στάδιο, 3 ^ο Στάδιο
Πουρές Ροδάκινο 30-32 brix	P-2	2 ^ο Στάδιο, 3 ^ο Στάδιο
Πουρές Βερίκοκο NFC	P-3	2 ^ο Στάδιο, 3 ^ο Στάδιο
Πουρές Μήλο NFC	P-4	2 ^ο Στάδιο, 3 ^ο Στάδιο
Πουρές Μήλο 30-32 brix	P-5	2 ^ο Στάδιο, 3 ^ο Στάδιο
Χυμός Ροδάκινο Cloudy 40 brix	P-6	1 ^ο Στάδιο, 2 ^ο Στάδιο, 3 ^ο Στάδιο
Χυμός Μήλο Clear 70 brix	P-7	1 ^ο Στάδιο, 2 ^ο Στάδιο, 3 ^ο Στάδιο
Πρώτη Ύλη Πουρές Ροδάκινο	R-1	1 ^ο Στάδιο
Πρώτη Ύλη Πουρές Βερίκοκο	R-2	1 ^ο Στάδιο
Πρώτη Ύλη Πουρές Μήλο	R-3	1 ^ο Στάδιο

Η παραγωγή αποτελείται από πολλές διεργασίες με διαφορετικές συσκευές, για αυτό το λόγο εάν υπάρχει μια σταθερή ακολουθία κάποιων συσκευών σε κάθε στάδιο, τότε αυτές ομαδοποιούνται. Ειδικότερα, το στάδιο προετοιμασίας έχει 3 γραμμές παραγωγής όμοιες μεταξύ τους μέχρι και τη ραφινέζα. Το στάδιο της παρασκευής πουρέ έχει δύο γραμμές παραγωγής, όπου μόνο στη μία μπορεί να παραχθεί συμπυκνωμένος πουρές, ενώ το στάδιο παραγωγής του χυμού έχει μία αποκλειστική γραμμή για κάθε είδους χυμού. Τέλος, στο στάδιο αποθήκευσης υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι αποθήκευσης, τα ασηπτικά βαρέλια, οι ασηπτικές δεξαμενές και οι απλές δεξαμενές. Όλες οι διεργασίες είναι συνεχούς λειτουργίας και σταθερής ροής. Ο ρυθμός παραγωγής κάθε συσκευής σε κάθε στάδιο προσαρμόζεται στο αντίστοιχο αντικείμενο που επεξεργάζεται. Αν ένα αντικείμενο ανήκει σε δύο ή παραπάνω

στάδια τότε ο ρυθμός παραγωγής του καθορίζεται από τον ρυθμό παραγωγής του πιο αργού σταδίου. Στον Πίνακα 2.2 και στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι ελάχιστοι και μέγιστοι ρυθμοί παραγωγής κάθε συσκευής για κάθε προϊόν ή πρώτη ύλη.

Πίνακας 2.2: Ελάχιστος ρυθμός επεξεργασίας προϊόντος ή πρώτης ύλης στις γραμμές παραγωγής

t/h	Stage-1			Stage-2			Stage-3		
	Line-1	Line-2	Line-3	Line-4	Line-5	Line-6	Line-7	Line-8	Line-9
P-1	-	-	-	6	6	-	6	6	-
P-2	-	-	-	6	-	-	6	-	-
P-3	-	-	-	6	6	-	6	6	-
P-4	-	-	-	6	6	-	6	6	-
P-5	-	-	-	6	-	-	6	-	-
P-6	-	-	8	-	-	8	8	-	-
P-7	-	-	8	-	-	8	8	-	8
R-1	15	15	-	-	-	-	-	-	-
R-2	15	15	-	-	-	-	-	-	-
R-3	15	15	-	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 2.3: Μέγιστος ρυθμός επεξεργασίας προϊόντος και πρώτης ύλης στις γραμμές παραγωγής

t/h	Stage-1			Stage-2			Stage-3		
	Line-1	Line-2	Line-3	Line-4	Line-5	Line-6	Line-7	Line-8	Line-9
P-1	-	-	-	2	2	-	2	2	-
P-2	-	-	-	2	-	-	2	-	-
P-3	-	-	-	2	2	-	2	2	-
P-4	-	-	-	2	2	-	2	2	-
P-5	-	-	-	2	-	-	2	-	-
P-6	-	-	8	-	-	8	8	-	-
P-7	-	-	8	-	-	8	8	-	8
R-1	6	6	-	-	-	-	-	-	-
R-2	6	6	-	-	-	-	-	-	-
R-3	6	6	-	-	-	-	-	-	-

Η μάζα της πρώτης ύλης για την παραγωγή του πουρέ δεν αντιστοιχεί σε ένα προς ένα αναλογία, καθώς αφαιρείται μάζα, όπως η φλούδα, ο πυρήνας και νερό. Αναλυτικότερα, ο πουρές NFC παράγεται με περίπου 90% απόδοση και ο συμπυκνωμένος πουρές παράγεται με 30% απόδοση σε σχέση με τη μάζα της πρώτης ύλης. Η απόδοση του συμπυκνωμένου πουρέ είναι τόσο χαμηλή καθώς από τα 10 brix συμπυκνώνεται στα 30 brix χάνοντας υγρασία. Τα

ισοζύγια μάζας πραγματοποιούνται προηγουμένως και εφαρμόζονται στην τιμή της ζήτησης απευθείας.

Ο χρόνος που απαιτείται για αλλαγή μεταξύ των προϊόντων είναι 15 λεπτά για τα προϊόντα πουρέ διαφορετικής πρώτης ύλης για όλη την παραγωγική διαδικασία, 2 ώρες για αλλαγή από χυμό cloudy σε χυμό clear και 3 ώρες για την αντίστροφη περίπτωση. Ο λόγος που η αλλαγή στη γραμμή χυμού διαρκεί τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα είναι, γιατί πρέπει να «αδειάσει» τελείως η γραμμή και να ξαναγεμίσει από την αρχή, το οποίο είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, αφού πρέπει να επιτευχθεί συνεχή λειτουργία στους batch αντιδραστήρες της ενζυμικής υδρόλυσης.

Στα πλαίσια μια βδομάδας (Δευτέρα – Σάββατο) η παραγωγή και των 7 προϊόντων είναι ασυνήθιστο φαινόμενο με βάση τα ιστορικά δεδομένα της εταιρείας, αλλά επιλέχθηκε αυτός ο αριθμός για να αναδειχθεί καλύτερα η αποτελεσματικότητα της βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής. Λόγω της φύσης της βιομηχανίας, η παραγωγή των προϊόντων μπορεί να αλλάζει δραστικά από βδομάδα σε βδομάδα, αφού πρέπει να ικανοποιηθεί διαφορετική κάθε φορά ζήτηση, αλλά και να καταναλωθεί όλη η διαθέσιμη πρώτη ύλη, η οποία μπορεί να είναι διαφορετική και ως προς την ποσότητα αλλά και ως προς το είδος ανάλογα την εποχή. Για αυτό το λόγο θεωρούνται διάφορα εικονικά σενάρια, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στο *Παράρτημα Α*. Τέλος, το εργοστάσιο δε σταματάει καθόλου την λειτουργία του, δηλαδή λειτουργεί καθημερινά σε 24ωρη βάση, και ταυτόχρονα θεωρείται ότι ο μηχανολογικός εξοπλισμός δεν απαιτεί συντήρηση ή δεν παρουσιάζει καμία βλάβη στην περίοδο μελέτης της παραγωγής.

3. Μαθηματικό Μοντέλο

Το μαθηματικό μοντέλο, που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση και τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού, είναι ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού (MILP) άμεσης προτεραιότητας (immediate precedence) για συνεχούς λειτουργίας διεργασίες πολλαπλών σταδίων. Το μοντέλο βασίζεται στο μοντέλο άμεσης προτεραιότητας για συνεχούς λειτουργίας διεργασίες ενός σταδίου των Γεωργιάδης, et al. (2022). Το μοντέλο αυτό τροποποιήθηκε για να περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια, ανάμιξη μεταξύ σταδίων, καθώς και συνοχή μεταξύ των σταδίων. Στόχος του μαθηματικού μοντέλου αποτελεί η ελαχιστοποίηση του χρόνου παραγωγής. Τα μοντέλα άμεσης προτεραιότητας δανείζονται την ονομασία τους από τις αντίστοιχες δυαδικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται, ώστε να επιτευχθεί η άμεση ακολουθία παραγωγής μεταξύ των προϊόντων σε έναν ενιαίο συνεχή χρονικό ορίζοντα. Στην υποενότητα 3.1 ορίζονται όλα τα σύνολα, οι μεταβλητές, οι παράμετροι, ενώ στην υποενότητα 3.2 παρατίθενται και αναλύονται όλοι οι αναγκαίοι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου. Στην υποενότητα 3.3 παρουσιάζεται μια παραλλαγή του μοντέλου.

3.1 Σύνολα στοιχείων (sets), Παράμετροι και Μεταβλητές

Σύνολα στοιχείων

Για την κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου χρησιμοποιούνται διάφοροι δείκτες οι οποίοι αναπαριστούν ορισμένα στοιχεία του προβλήματος. Συγκεκριμένα, τα sets φαίνονται παρακάτω:

$i \in I$	Το σύνολο των αντικειμένων που επεξεργάζονται στη βιομηχανία (Πρώτη ύλη και προϊόντα)
$j \in J$	Το σύνολο των γραμμών παραγωγής της βιομηχανίας
$s \in S$	Το σύνολο των σταδίων της παραγωγής
$f \in F$	Το σύνολο των οικογενειών προϊόντων και πρώτων υλών

Υποσύνολα στοιχείων

Επιπρόσθετα, εισάγεται μια σειρά υποσυνόλων για περαιτέρω εξειδίκευση.

$i \in I_j$	Το σύνολο των αντικειμένων i που μπορούν να επεξεργασθούν στη γραμμή παραγωγής j
$j \in J_i$	Το σύνολο των γραμμών παραγωγής j που μπορούν να επεξεργαστούν τα αντικείμενα i
$i \in I_s$	Το σύνολο των προϊόντων ή πρώτων υλών i που ανήκουν στο στάδιο s
$s \in S_i$	Το σύνολο των σταδίων s στα οποία ανήκουν τα προϊόντα ή πρώτες ύλες i
$j \in J_s$	Το σύνολο των γραμμών παραγωγής j που ανήκουν στα στάδιο s
$s \in S_j$	Το σύνολο των σταδίων s που διαθέτουν τις γραμμές παραγωγής j
$i \in I_f$	Το σύνολο των προϊόντων και πρώτων υλών i που ανήκουν στην οικογένεια f

Παράμετροι

Οι παράμετροι είναι τα όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την λειτουργία του μοντέλου.

$ch_{ii'j}$	Χρόνος εναλλαγής από το αντικείμενο i στο αντικείμενο i' στη γραμμή παραγωγής j (h)
D_i	Ζήτηση των προϊόντων i σε (t)
$pm_{ax_{ij}}$	Μέγιστος ρυθμός παραγωγής της γραμμής παραγωγής j για το προϊόν ή πρώτη ύλη i (t/h)
$pm_{in_{ij}}$	Ελάχιστος ρυθμός παραγωγής της γραμμής παραγωγής j για το προϊόν ή πρώτη ύλη i (t/h)
ω_j	Διαθέσιμος χρόνος λειτουργίας της γραμμής παραγωγής j (h)
A_i	Βοηθητική παράμετρος ολοκλήρωσης των ισοζυγίων μάζας του προϊόντος i . Παίρνει τιμές μόνο 0 ή 1
H	Χρονικός ορίζοντας = 144 h

Συνεχείς Μεταβλητές

Το μοντέλο περιλαμβάνει μια σειρά από συνεχείς και δυαδικές μεταβλητές οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

C_{ijs}	Χρόνος ολοκλήρωσης παραγωγής του i στη γραμμή παραγωγής j στο στάδιο s (h)
P_i	Συνολική παραγωγή του προϊόντος i (t)
Q_{ijs}	Παραγωγή του προϊόντος i στη γραμμή παραγωγής j στο στάδιο s (t)
T_{ijs}	Χρόνος παραγωγικής διαδικασίας του i στη γραμμή παραγωγής j στο στάδιο s (h)
C_{max}	Συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης (makespan) (h)

Δυαδικές Μεταβλητές

$X_{i'j}$	Λαμβάνει την τιμή 1 εάν το προϊόν i υφίσταται επεξεργασία ακριβώς πριν το προϊόν i' στη γραμμή παραγωγής j
Y_{ijs}	Λαμβάνει την τιμή 1 όταν ενεργοποιείται ο χρόνος ολοκλήρωσης
Z_{ijs}	Λαμβάνει την τιμή 1 όταν ενεργοποιείται ο χρόνος παραγωγής T_{ijs}

Η μεταβλητή Z_{ijs} δεν υπάρχει στο αρχικό πρότυπο μοντέλο και εισάγεται για τη σωστή χρονική ένωση των σταδίων μεταξύ τους.

3.2 Περιορισμοί και Αντικειμενική συνάρτηση

Το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού απαρτίζεται από ένα σύνολο περιορισμών που αναπαρίστανται με διάφορες εξισώσεις και ανισώσεις. Ειδικότερα οι κατηγορίες περιορισμών είναι:

- Περιορισμοί ισοζυγίων μάζας (Material Balance Constraints)
- Περιορισμοί κατανομής και αλληλουχίας προϊόντων (Allocation Constraints)
- Χρονικοί περιορισμοί (Time Constraints)
- Περιορισμοί παραγωγής (Production Constraints)
- Περιορισμοί συνοχής σταδίων παραγωγής (Connection Constraints)
- Αντικειμενική συνάρτηση (Objective Function)

3.2.1 Περιορισμοί Ισοζυγίων Μάζας

Με τον παρακάτω περιορισμό εξασφαλίζεται, ότι η συνολική παραγόμενη ποσότητα του προϊόντος ή επεξεργασία της πρώτης ύλης i είναι ίση με το άθροισμα των ποσοτήτων i , που παράχθηκαν από κάθε γραμμή παραγωγής j . Ο περιορισμός αυτός πραγματοποιείται για κάθε στάδιο της παραγωγής s .

$$P_i = \sum_{j \in J_i, J_s} Q_{ijs} \quad \forall s \in S, i \in I_s \quad (3.1)$$

Ο περιορισμός 3.2 είναι μέρος του μαθηματικού μοντέλου, ώστε η παραγόμενη ποσότητα κάθε προϊόντος ή επεξεργαζόμενης πρώτης ύλης i να καλύψει την απαιτούμενη ζήτηση του ίδιου προϊόντος. Η χρήση ανίσωσης βελτιώνει την απόδοση του μαθηματικού μοντέλου.

$$P_i \geq D_i \quad \forall i \in I \quad (3.2)$$

Τα ισοζύγια μάζας μεταξύ πρώτης ύλης και αντίστοιχων προϊόντων έχουν πραγματοποιηθεί προγενέστερα και εισάγονται σαν δεδομένα στην παράμετρο της ζήτησης D_i

3.2.2 Περιορισμοί κατανομής και αλληλουχίας προϊόντων

Με τη χρήση των περιορισμών 3.3 και 3.4 εξασφαλίζεται, ότι εάν ένα αντικείμενο i (προϊόν ή πρώτη ύλη) επεξεργάζεται στη γραμμή παραγωγής j , τότε μπορεί να παραχθεί το πολύ ένα ακόμη διαφορετικό προϊόν πριν και μετά το αντικείμενο i αντίστοιχα σε κάθε στάδιο s . Εάν το i δεν επεξεργάζεται στη γραμμή παραγωγής j ή δεν υπάρχει στο στάδιο s , τότε δεν υπάρχει κάποια αλληλουχία μεταξύ των προϊόντων σε αυτή τη γραμμή παραγωγής j . Ο περιορισμός ενεργοποιείται μόνο για γραμμές j που μπορούν να επεξεργασθούν το αντικείμενο i στο στάδιο s .

$$\sum_{i' \in I_j, i' \neq i} X_{i'ij_s} \leq Y_{ijs} \quad \forall i \in I_j \cap I_s, j \in J_i \cap J_s, s \in S \quad (3.3)$$

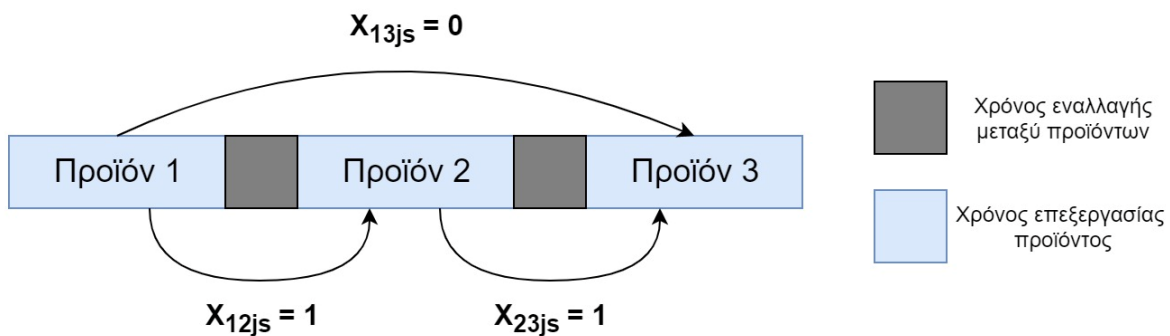
$$\sum_{i' \in I_j, i' \neq i} X_{ii'j_s} \leq Y_{ijs} \quad \forall i \in I_j \cap I_s, j \in J_i \cap J_s, s \in S \quad (3.4)$$

Οι δύο παραπάνω περιορισμοί δεν περιορίζουν κάπως την δυαδική μεταβλητή $X_{ii'j_s}$ από το να παίρνει ανεξέλεγκτα διάφορες τιμές, οπότε στο μαθηματικό μοντέλο εισάγεται ο περιορισμός 3.5, ο οποίος δείχνει ότι εάν επεξεργάζεται ένας αριθμός προϊόντων σε μία γραμμή παραγωγής,

τότε ο αριθμός των εναλλαγών από προϊόν σε προϊόν πρέπει να είναι κατά ένα μικρότερος από τα προϊόντα, έτσι ώστε να περιορίζονται οι τιμές των $X_{ii'js}$.

$$\sum_{i \in I_j, i' \in I_s} \sum_{i'' \in I_j, i'' \neq i'} X_{ii'js} + 1 = \sum_{i \in I_j} Y_{ijs} \quad \forall j \in J_s, s \in S \quad (3.5)$$

Για καλύτερη κατανόηση των δυαδικών μεταβλητών άμεσης προτεραιότητας, παρουσιάζεται το Σχήμα 3.1. Η μεταβλητή $X_{ii'js}$ παίρνει τιμή ίση με τη μονάδα όταν το αντικείμενο i επεξεργάζεται ακριβώς μετά το i' στη γραμμή παραγωγής j . Εάν το i επεξεργάζεται μετά το i' , αλλά ενδιάμεσα υπάρχει και η παραγωγή κάποιου άλλου αντικειμένου i'' , τότε η μεταβλητή $X_{ii'js}$ παίρνει τιμή ίση με το μηδέν.



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας των μεταβλητών άμεσης προτεραιότητας $X_{ii'js}$

3.2.3 Χρονικοί περιορισμοί

Οι σχέσεις 3.6 και 3.7 αποτελούν τον χρονικό περιορισμό του μοντέλου, ο οποίος είναι ένας περιορισμός μεγάλου αριθμού (big-M constraint) και αποτελεί την καρδιά του μαθηματικού μοντέλου, καθώς είναι υπεύθυνος για την ύπαρξη ενός εφικτού χρονοδιαγράμματος παραγωγής. Αναλυτικότερα, ο περιορισμός αυτός διασφαλίζει ότι εάν ένα προϊόν ή πρώτη ύλη i , παράγεται ακριβώς πριν ένα άλλο i' ($X_{ii'js} = 1$), τότε ο χρόνος ολοκλήρωσης της παραγωγής του i' (αυτό που παράγεται δεύτερο) είναι αναγκαστικά μεγαλύτερος από το χρόνο που χρειάστηκε για να παραχθεί το προηγούμενο προϊόν i , τον χρόνο παραγωγής του προϊόντος i' , τον χρόνο εναλλαγής από το προϊόν i στο i' . Το τέταρτο μέρος του περιορισμού απενεργοποιείται. Εάν δεν υπάρχει ο άμεσος συνδυασμός σε σειρά των δύο προϊόντων ($X_{ii'js} = 0$), τότε ενεργοποιείται ο τέταρτος όρος του περιορισμού, ο οποίος παίρνει μια πολύ μεγάλη τιμή και κάνει τους υπόλοιπους όρους ασήμαντους. Οπότε, από την ανίσωση 3.6 ο χρόνος ολοκλήρωσης του προϊόντος i' έχει την δυνατότητα να πάρει

οποιαδήποτε τιμή. Αντίστοιχα με τον περιορισμό 3.7, επιτυγχάνεται το ίδιο πράγμα απλά αντίστροφα. Ο μεγάλος αριθμός M που χρησιμοποιείται είναι ο διαθέσιμος χρόνος λειτουργίας κάθε συσκευής .

$$C_{i'js} \geq C_{ijs} + T_{i'js} + ch_{ij'i'} \cdot X_{ii'js} - \omega_j \cdot (1 - X_{ii'js}) \quad (3.6)$$

$$\forall i \in I_s, i' \neq i \in I_s, j \in J_i \cap J_{i'} \cap J_s, s \in S$$

$$C_{ijs} \leq C_{i'js} - T_{i'js} - ch_{ij'i'} \cdot X_{ii'js} + \omega_j \cdot (1 - X_{ii'js}) \quad (3.7)$$

$$\forall i \in I_s, i' \neq i \in I_s, j \in J_i \cap J_{i'} \cap J_s, s \in S$$

Επιπλέον, εισάγονται οι περιορισμοί 3.8 και 3.9, οι οποίοι εξασφαλίζουν, ότι ο χρόνος ολοκλήρωσης επεξεργασίας ενός αντικειμένου i σε μια γραμμή παραγωγής j είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο επεξεργασίας του i στην ίδια j και ότι πρέπει να είναι μικρότερος από τον διαθέσιμο χρόνο λειτουργίας της γραμμής παραγωγής εάν επιλεχθεί αυτός ο συνδυασμός.

$$C_{ijs} \geq T_{ijs} \quad \forall i \in I_j \cap I_s, j \in J_s, s \in S \quad (3.8)$$

$$C_{ijs} \leq \omega_j \cdot Y_{ijs} \quad \forall i \in I_j \cap I_s, j \in J_s, s \in S \quad (3.9)$$

3.2.4 Περιορισμοί μεγέθους παρτίδων προϊόντων - παραγωγής

Η παραγωγή κάθε προϊόντος πρέπει να συμφωνεί με τις δυνατότητες της βιομηχανικής μονάδας, διατηρώντας έναν εφικτό ρυθμό παραγωγής για κάθε προϊόν ή πρώτη ύλη που επεξεργάζεται. Για αυτό το λόγο, εισάγονται οι παρακάτω δύο περιορισμοί (3.10, 3.11), ώστε η παραγόμενη ποσότητα να ισούται με το ρυθμό παραγωγής επί τον χρόνο παραγωγής και να τεθεί ένα ανώτατο όριο στον χρόνο παραγωγής. Επιπλέον ο περιορισμός 3.12 εξασφαλίζει ότι ο μέγιστος χρόνος παραγωγής ενός προϊόντος i ισούται με τη ζήτηση προς τον ελάχιστο ρυθμό παραγωγής που μπορεί να διατηρηθεί σε μία γραμμή παραγωγής j .

$$Q_{ijs} \leq pmax_{ij} \cdot T_{ijs} \quad \forall i \in I_j \cap I_s, j \in J_s, s \in S \quad (3.10)$$

$$Q_{ijs} \geq pmin_{ij} \cdot T_{ijs} \quad \forall i \in I_j \cap I_s, j \in J_s, s \in S \quad (3.11)$$

$$T_{ijs} \leq \frac{D_i}{pmin_{ij}} \cdot Z_{ijs} \quad \forall i \in I_j \cap I_s, j \in J_s, s \in S \quad (3.12)$$

3.2.5 Περιορισμοί συνοχής μεταξύ των σταδίων

Στην υπο-ενότητα αυτήν αναλύεται η κύρια παραλλαγή του μοντέλου, η οποία είναι η χρονική και μαζική συνοχή μεταξύ των σταδίων. Οι περιορισμοί αυτής της κατηγορίας μπορούν να χωρισθούν στους περιορισμούς σύνδεσης σταδίων μεταξύ ίδιων προϊόντων i , στους περιορισμούς σύνδεσης μεταξύ πρώτης ύλης και των αντίστοιχων προϊόντων και τέλος, στους περιορισμούς για τη λειτουργία και των δύο ειδών συνδέσεων. Αρχικά, οι περιορισμοί σύνδεσης σταδίων ίδιων προϊόντων i φαίνονται στις σχέσεις 3.13-3.16. Αναλυτικότερα, από την εξίσωση 3.13 η επεξεργασία του προϊόντος i πρέπει να ολοκληρώνεται την ίδια χρονική στιγμή στα δύο στάδια που επεξεργάζεται (stage-2 και stage-3) σε όλες τις ικανές γραμμές παραγωγής j , αφού είναι μια συνεχής διεργασία. Επίσης, σύμφωνα με την εξίσωση 3.14, το προϊόν i πρέπει να επεξεργάζεται την ίδια χρονική περίοδο και στα δύο στάδια μεταξύ όλων των συσκευών. Η εξίσωση 3.15 διασφαλίζει, ότι κάθε προϊόν θα χρησιμοποιεί ίδιο αριθμό συσκευών στο στάδιο 2 και στο στάδιο 3. Αυτό γίνεται επειδή αφού πραγματοποιηθεί το δεύτερο στάδιο δεν υπάρχει δυνατότητα διαχωρισμού σε γραμμές παραγωγής του επόμενου σταδίου. Η ανίσωση 3.16 μαζί με την ανίσωση 3.12 καθορίζουν αν θα έχει ή όχι τιμή η μεταβλητή Z_{ijs} .

$$\sum_{j \in J_i \cap J_s} C_{ijs} = \sum_{j \in J_i \cap J_{s+1}} C_{ijs+1} \quad \forall i \in I_s, s = stage - 2 \quad (3.13)$$

$$\sum_{j \in J_i \cap J_s} T_{ijs} = \sum_{j \in J_i \cap J_{s+1}} T_{ijs+1} \quad \forall i \in I_s, s = stage - 2 \quad (3.14)$$

$$\sum_{j \in J_i \cap J_s} Z_{ijs} = \sum_{j \in J_i \cap J_{s+1}} Z_{ijs+1} \quad \forall i \in I_s, s = stage - 2 \quad (3.15)$$

$$T_{ijs} \geq Z_{ijs} \quad \forall i \in I_j \cap I_s, j \in J_s, s \in S \quad (3.16)$$

Οι σχέσεις 3.17-3.20 εισάγονται στο μοντέλο για την ένωση του πρώτου σταδίου της παραγωγής, που περιλαμβάνει την προετοιμασία της πρώτης ύλης με τα υπόλοιπα στάδια για την παραγωγή προϊόντων, έτσι ώστε να υπάρχει χρονική και μαζική συνοχή, αλλά και σημαντικότερα ανάμιξη και διαίρεση της παροχής κάποιας πρώτης ύλης προς τα αντίστοιχα προϊόντα. Από την εξίσωση 3.17 ο χρόνος προετοιμασίας της πρώτης ύλης i σε όλες τις γραμμές παραγωγής j (stage-1) πρέπει να ισούται με το χρόνο παραγωγής των προϊόντων i της ίδιας οικογένειας f σε όλες τις γραμμές παραγωγής j (stage-2). Από την εξίσωση 3.18 οι

γραμμές προετοιμασίας που χρησιμοποιούνται για κάποια πρώτη ύλη (stage-1) πρέπει να είναι μεγαλύτερες ή ίσες σε αριθμό από τις γραμμές προετοιμασίας του επόμενου σταδίου (stage-2). Η παράμετρος A_i έχει τιμή μόνο στα προϊόντα των συμπυκνωμένων πουρέδων, έτσι ώστε να τηρούνται τα ισοζύγια μάζας, αφού πρέπει να δεχθεί παροχή πρώτης ύλης μεγαλύτερη από τον μέγιστο ρυθμό παραγωγής μίας από τις γραμμές προετοιμασίας ($j \in J_s, s = stage1$).

$$\sum_{i \in I_s \cap I_f} \sum_{j \in J_i \cap J_s} T_{ijs} = \sum_{i \in I_{s+1} \cap I_f} \sum_{j \in J_i \cap J_{s+1}} T_{ijs+1} \quad \forall f \in F, s = stage - 1 \quad (3.17)$$

$$\sum_{i \in I_s \cap I_f} \sum_{j \in J_i \cap J_s} Z_{ijs} \geq \sum_{j \in J_{i'} \cap J_{s+1}} Z_{i'js+1} + A_{i'} \quad \forall i' \in I_f \cap I_{s+1}, s = stage - 1 \quad (3.18)$$

Τέλος, η σχέση 3.19 εκφράζει ότι ο χρόνος εκκίνησης μιας πρώτης ύλης i του πρώτου σταδίου (stage-1) πρέπει να είναι μικρότερος από τον χρόνο εκκίνησης των προϊόντων i' της ίδιας οικογένειας f αν πραγματοποιείται παραγωγή αυτού του προϊόντος στη γραμμή παραγωγή j' . Επιπλέον, η σχέση 3.20 εκφράζει ότι ο χρόνος ολοκλήρωσης της πρώτης ύλης i είναι μεγαλύτερος ή ίσος των αντίστοιχων προϊόντων i' της ίδιας οικογένειας f , εάν υπάρχει παραγωγή στην συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής j , μέσω της μεταβλητής Z_{ijs} . Έτσι, εάν δε χρησιμοποιείται κάποια γραμμή j για την πρώτη ύλη i , τότε η μεταβλητή Z_{ijs} μηδενίζεται και ο χρόνος ολοκλήρωσης των προϊόντων δεν περιορίζεται.

$$C_{ijs} - T_{ijs} \leq C_{i'j's'} - T_{i'j's'} + 144 \cdot (1 - Z_{i'j's'}) \quad (3.19)$$

$$\forall i \in I_s \cap I_f, j \in J_i \cap J_s, \forall i' \in I_{s'} \cap I_f, j' \in J_{i'} \cap J_{s'}, s = stage - 1, s \neq s' \in S, f \in F$$

$$C_{ijs} + 144 \cdot (1 - Z_{ijs}) \geq C_{i'j's'} \quad (3.20)$$

$$\forall i \in I_s \cap I_f, j \in J_i \cap J_s, \forall i' \in I_{s'} \cap I_f, j' \in J_{i'} \cap J_{s'}, s = stage - 1, s \neq s' \in S, f \in F$$

Ο τελευταίος περιορισμός που εισάγεται εξασφαλίζει, ότι το ίδιο προϊόν ή πρώτη ύλη i , στο ίδιο στάδιο, εάν επεξεργάζεται σε πολλές συσκευές j και j' θα έχει την ίδια τιμή του χρόνου ολοκλήρωσης για κάθε συσκευή. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια ανίσωση, αλλά επειδή ένα συγκεκριμένο j θα είναι μια φορά στο αριστερό σκέλος και μια φορά από το δεξί μετατρέπεται σε ισότητα εφόσον υπάρχει αυτός ο συνδυασμός προϊόντος και γραμμή παραγωγής. Αν δεν υπάρχει τότε το $Z_{ijs} = 0$ και απαλείφεται αυτός ο περιορισμός.

$$C_{ijs} \leq C_{i'j's'} + 144 \cdot (1 - Z_{i'j's'}) \quad (3.21)$$

$$\forall i \in I_s \cap I_f, j \in J_i \cap J_s, j' \in J_{i'} \cap J_{s'}, s \in S, f \in F$$

3.2.6 Αντικειμενική συνάρτηση

Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης παραγωγής (makespan) για πλήρη κάλυψη της ζήτησης κάθε προϊόντος. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρακάτω σχέση:

$$\min\{C_{max} \geq C_{ijs}\} \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S \quad (3.22)$$

3.3 Τροποποιημένο μοντέλο μεγιστοποίηση ζήτησης

Παρακάτω περιγράφεται ένα τροποποιημένο μοντέλο με βάση τα παραπάνω, αλλά με στόχο την μεγιστοποίηση της ζήτησης. Αρχικά, όσον αφορά τις παραμέτρους του μοντέλου, η παράμετρος της ζήτησης D_i παραλείπεται, η βοηθητική παράμετρος A_i μετατρέπεται σε μεταβλητή και εισάγεται μια καινούργια παράμετρος, η apo_i , η οποία συμβολίζει την απόδοση των προϊόντων ως προς την πρώτη ύλη. Τέλος, αντί για τη μεταβλητή C_{max} χρησιμοποιείται η μεταβλητή Q_{max} , η οποία δηλώνει τη μέγιστη ποσότητα των προϊόντων που παράχθηκε ή την ποσότητα επεξεργαζόμενης πρώτης ύλης. Αναλυτικότερα, οι παράμετροι και οι μεταβλητές του νέου μοντέλου είναι οι εξής:

Παράμετροι

Οι παράμετροι είναι τα όλα τα απαραίτητα δεδομένα για τη λειτουργία του μοντέλου.

$ch_{ii'j}$	Χρόνος εναλλαγής από το αντικείμενο i στο αντικείμενο i' στη γραμμή παραγωγής j (h)
$pmax_{ij}$	Μέγιστος ρυθμός παραγωγής της γραμμής παραγωγής j για το προϊόν ή πρώτη ύλη i (t/h)
$pmin_{ij}$	Ελάχιστος ρυθμός παραγωγής της γραμμής παραγωγής j για το προϊόν ή πρώτη ύλη i (t/h)
ω_j	Διαθέσιμος χρόνος λειτουργίας της γραμμής παραγωγής j (h)
apo_i	Απόδοση προϊόντων ως προς την αντίστοιχη πρώτη ύλη
H	Χρονικός ορίζοντας = 144 h

Συνεχείς Μεταβλητές

Το μοντέλο περιλαμβάνει μια σειρά από συνεχείς και δυαδικές μεταβλητές οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

C_{ijs}	Χρόνος ολοκλήρωσης παραγωγής του i στη γραμμή παραγωγής j στο στάδιο s (h)
P_i	Συνολική παραγωγή του προϊόντος i (t)
Q_{ijs}	Παραγωγή του προϊόντος i στη γραμμή παραγωγής j στο στάδιο s (t)
T_{ijs}	Χρόνος παραγωγικής διαδικασίας του i στη γραμμή παραγωγής j στο στάδιο s (h)
Q_{max}	Συνολική παραγόμενη ποσότητα προϊόντων ή επεξεργαζόμενης πρώτης ύλης (t)

Δυαδικές Μεταβλητές

$X_{ii'j}$	Λαμβάνει την τιμή 1 εάν το προϊόν i υφίσταται επεξεργασία ακριβώς πριν το προϊόν i' στη γραμμή παραγωγής j
Y_{ijs}	Λαμβάνει την τιμή 1 όταν ενεργοποιείται ο χρόνος ολοκλήρωσης
Z_{ijs}	Λαμβάνει την τιμή 1 όταν ενεργοποιείται ο χρόνος παραγωγής T_{ijs}
A_i	Βοηθητική μεταβλητή για την σωστή εφαρμογή των ισοζυγίων μάζας

Στο τροποποιημένο μοντέλο εισάγονται κάποιες επιπλέον εξισώσεις, κάποιες αφαιρούνται και η αντικειμενική συνάρτηση μετατρέπεται. Η ανίσωση 3.2 πλέον δεν έχει κάποιο ουσιαστικό ρόλο στο μοντέλο, για αυτό το λόγο αφαιρείται. Επιπλέον, από τη σχέση 3.12 αφαιρείται ο όρος της ζήτησης D_i , αφού πλέον δεν υπάρχει και τη θέση του την παίρνει ένας μεγάλος αριθμός (π.χ. 20000). Το τροποποιημένο μοντέλο εκτός από διαφορετική αντικειμενική συνάρτηση περιέχει 3 επιπλέον εξισώσεις που εξασφαλίζουν την ορθότητα του ισοζυγίου μάζας. Αυτές οι εξισώσεις είναι:

$$P_i \leq 20000 \cdot A_i \quad i = P2 \text{ or } i = P5 \quad (3.23)$$

$$\sum_{j \in J_i \cap J_s} Q_{ijs} = \sum_{j \in J_i \cap J_{s+1}} Q_{ijs+1} \quad \forall i \in I_s, s = \text{stage} - 2 \quad (3.24)$$

$$\sum_{i \in I_s \cap I_f} \sum_{j \in J_i \cap J_s} Q_{ijs} = \sum_{i \in I_{s+1} \cap I_f} \sum_{j \in J_i \cap J_{s+1}} \frac{Q_{ijs+1}}{a_{po_i}} \quad \forall f \in F, s = stage - 1 \quad (3.25)$$

Με την ανίσωση 3.23 η μεταβλητή A_i παίρνει τιμή ίση με τη μονάδα μόνο για συγκεκριμένα i , όταν υπάρχει η παραγωγή τους, αλλιώς παίρνει την τιμή 0. Για τα υπόλοιπα i , η τιμή του A_i είναι αυτόματα ίση με το μηδέν. Με τις εξισώσεις 3.24 και 3.25 εκφράζονται τα ισοζύγια μάζας μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου σταδίου και του πρώτου με του δεύτερου αντίστοιχα. Μεταξύ του πρώτου και δεύτερου σταδίου πρέπει να ληφθεί υπόψη και η απόδοση, επειδή στο πρώτο στάδιο επεξεργάζονται οι πρώτες ύλες. Τέλος, η αντικειμενική συνάρτηση μεταβάλλεται σε μία από τις δύο παρακάτω, ανάλογα αν στόχος είναι η μέγιστη κατανάλωση της πρώτης ύλης ή η μέγιστη παραγωγή τελικών προϊόντων.

$$Q_{max} = \sum_{i \in I_s} \sum_{j \in J_i \cap J_s} Q_{ijs} \quad s = stage - 1 \quad (3.26a)$$

$$Q_{max} = \sum_{i \in I_s} \sum_{j \in J_i \cap J_s} Q_{ijs} \quad s = stage - 3 \quad (3.26b)$$

4. Αποτελέσματα – Μελέτες Περίπτωσης

4.1 Εισαγωγή

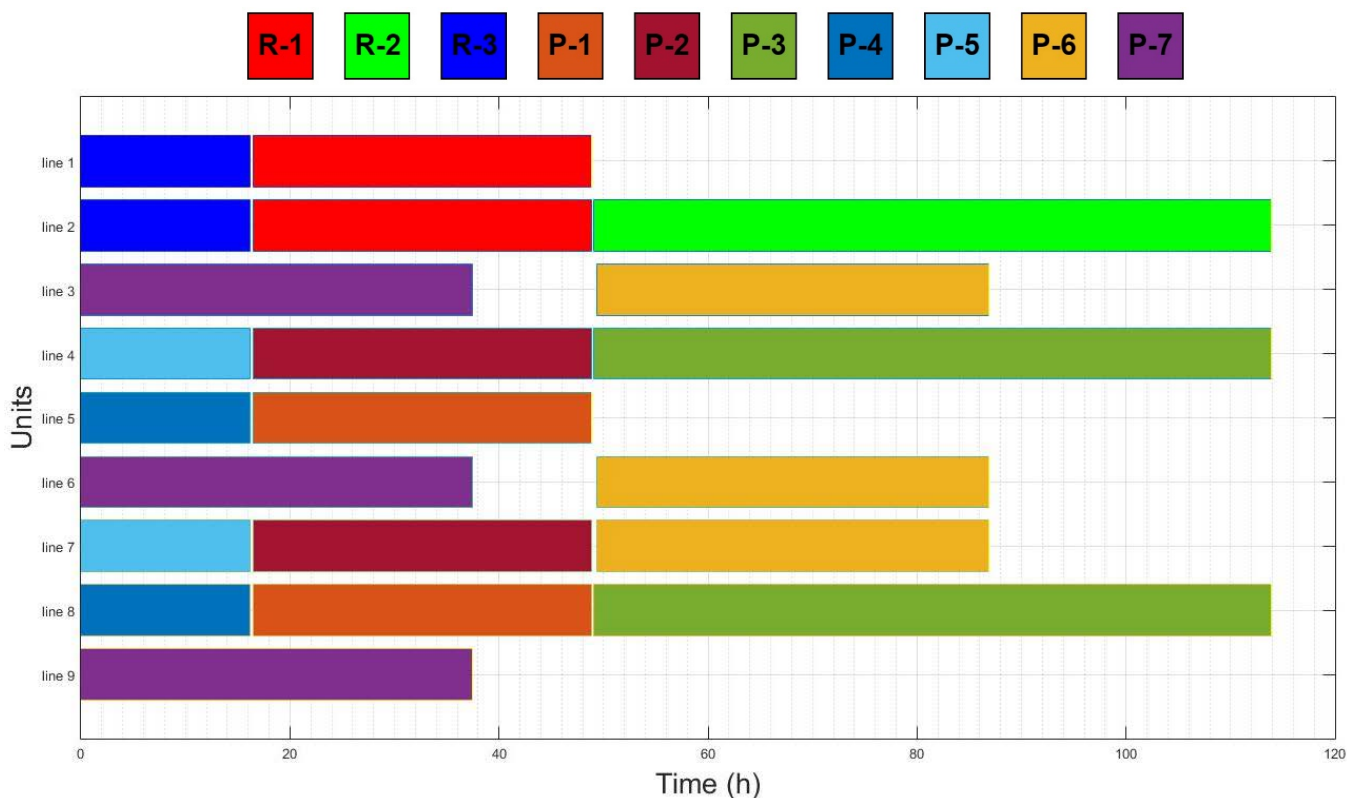
Το πρόβλημα αφορά τη βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματισμού παραγωγής στη βιομηχανία επεξεργασίας καρπών για την παραγωγή προϊόντων πουρέ και χυμών, με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης της παραγωγής, makespan, για την κάλυψη της εβδομαδιαίας ζήτησης προϊόντων. Η βελτιστοποίηση λαμβάνει υπόψη όλα τα στάδια της παραγωγής. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 3, το οποίο είναι ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού (MILP). Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού General Algebraic Modeling System (GAMS, 2013). Ο επιλυτής που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο ILOG CPLEX, ο οποίος ενδείκνυται για αυτήν την κατηγορία προβλημάτων. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, που λήφθηκαν κατά την επίλυση του προβλήματος γίνεται με την μορφή διαγραμμάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, Gantt Chart. Αυτού του είδους διαγράμματα κατασκευάστηκαν με τη χρήση του λογισμικού MATLAB. Στα διαγράμματα αυτά απεικονίζεται η αλληλουχία των προϊόντων στις γραμμές παραγωγής. Ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά τον χρονικό ορίζοντα ο οποίος έχει διάρκεια μέχρι και 144 ώρες (6 μέρες). Ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει τις γραμμές παραγωγής όλων των σταδίων. Κάθε διαφορετικό αντικείμενο (πρώτη ύλη ή τελικό προϊόν) αναπαρίσταται με διαφορετικό χρώμα. Οι χρόνοι εναλλαγής ή μη λειτουργίας αναπαρίστανται με τη μορφή κενών διαστημάτων.

Στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου αναλύονται τα αποτελέσματα του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής. Ειδικότερα, αναλύονται και συγκρίνονται διαφορετικά σενάρια παραγωγής, έπειτα διερευνάται το σενάριο μεγιστοποίησης της παραγωγής, στη συνέχεια, μελετάται η περίπτωση προσθήκης μιας νέας γραμμής παραγωγής και οι συνέπειες που επιφέρει και τέλος η επίδραση αφαίρεσης κάποιας γραμμής παραγωγής.

4.2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής

Τα ακόλουθα αποτελέσματα προέκυψαν από τη λύση του προβλήματος στο περιβάλλον βελτιστοποίησης GAMS με ζήτηση προϊόντων αυτή που περιγράφεται από το σενάριο 1 του Πίνακα Α.1 και τα υπόλοιπα δεδομένα όπως περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2. Το σενάριο αυτό είναι καθαρά «εικονικό» και δεν αντιπροσωπεύει ιστορικά δεδομένα της εταιρείας. Ο

βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για τα τρία στάδια της παραγωγής φαίνεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 1

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, για την επεξεργασία 1728 τόνων πρώτης ύλης για παραγωγή προϊόντων πουρέ, την παραγωγή 972 τόνων πουρέ (συμπυκνωμένος ή NFC) και 600 τόνων συμπυκνωμένου χυμού, η μονάδα απαιτεί 114 ώρες για την ολοκλήρωση όλων των διεργασιών. Οι πρώτες τρεις γραμμές παραγωγής ανήκουν στο πρώτο στάδιο, οι επόμενες τρεις στο δεύτερο στάδιο και οι τρεις τελευταίες στο τρίτο στάδιο. Όπως φαίνεται από το παραπάνω Gantt chart, τα προϊόντα ίδιας πρώτης ύλης αρχίζουν και τελειώνουν την παραγωγή τους την ίδια χρονική στιγμή σε κάθε στάδιο. Αυτό πρέπει να συμβαίνει, καθώς όλες οι διεργασίες είναι συνεχείς. Επίσης, γίνεται η παρατήρηση, ότι υπάρχει δυνατότητα αύξησης της παραγωγής, καθώς πρώτων, ο χρόνος ολοκλήρωσης της παραγωγής απέχει από το χρονικό όριο των 144 ωρών και δεύτερων, μπορεί να παραχθεί πολύ μεγαλύτερη ποσότητα χυμού (P-6, P-7). Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι οι γραμμές που είναι συνέχεια σε λειτουργία είναι η γραμμή 4 και γραμμή 8, αλλά αυτό το φαινόμενο είναι κατά περίπτωση, καθώς επηρεάζεται από τη συγκεκριμένη ζήτηση, γιατί η ποσότητα των προϊόντων και η αναλογία διαχωρισμού με την πρώτη ύλη είναι κρίσιμης σημασίας. Παρακάτω στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι

χρόνοι παραγωγής και ολοκλήρωσης κάθε προϊόντος σε κάθε στάδιο και ο ρυθμός παραγωγής τους.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης πρώτου σεναρίου ζήτησης

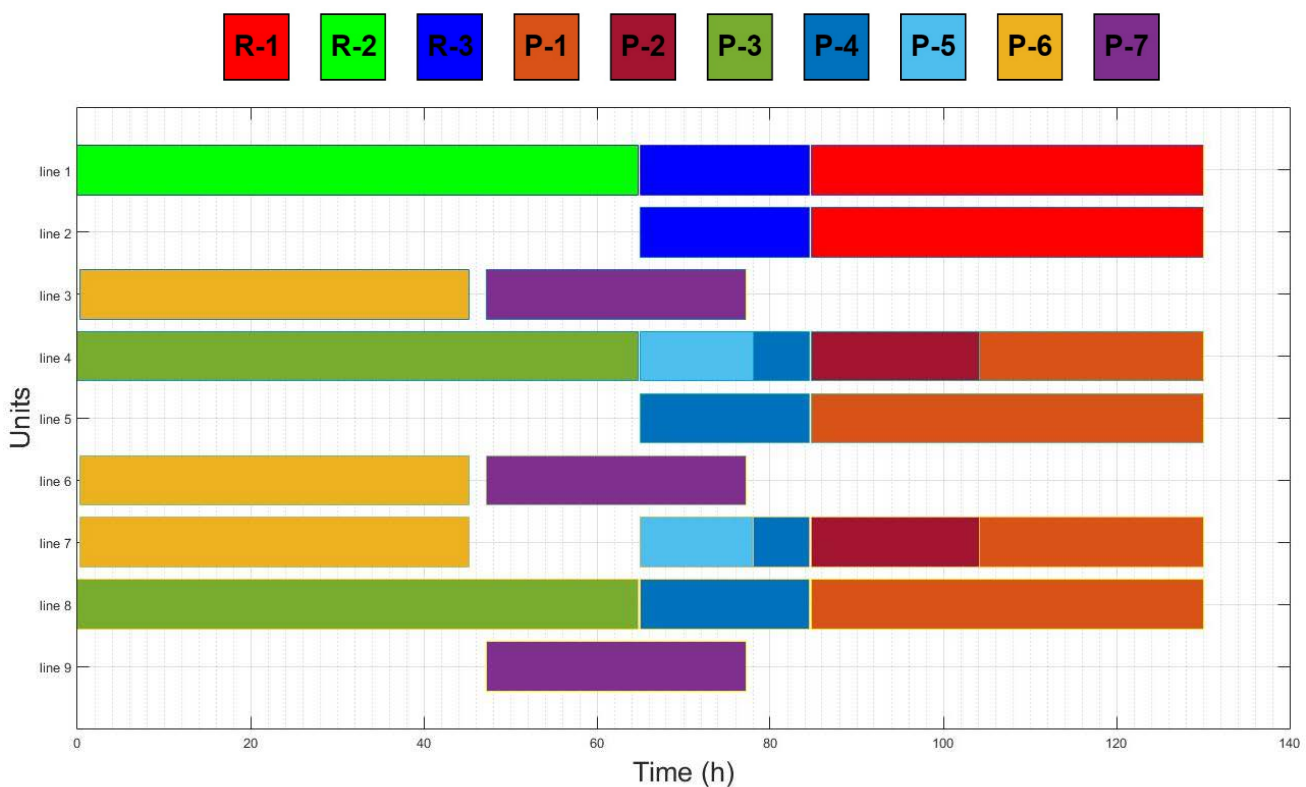
Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-5	2	48.85	32.4	194.4	6
P-1	Line-8	3	48.85	32.4	194.4	6
P-2	Line-4	2	48.85	32.4	194.4	6
P-2	Line-7	3	48.85	32.4	194.4	6
P-3	Line-4	2	113.9	64.8	388.8	6
P-3	Line-8	3	113.9	64.8	388.8	6
P-4	Line-5	2	16.2	16.2	97.2	6
P-4	Line-8	3	16.2	16.2	97.2	6
P-5	Line-4	2	16.2	16.2	97.2	6
P-5	Line-7	3	16.2	16.2	97.2	6
P-6	Line-3	1	86.85	37.5	300	8
P-6	Line-6	2	86.85	37.5	300	8
P-6	Line-7	3	86.85	37.5	300	8
P-7	Line-3	1	37.5	37.5	300	8
P-7	Line-6	2	37.5	37.5	300	8
P-7	Line-9	3	37.5	37.5	300	8
R-1	Line-1	1	48.85	32.4	864	26.66
R-1	Line-2	1	48.85	32.4		
R-2	Line-2	1	113.9	64.8	432	6.7
R-3	Line-1	1	16.2	16.2	432	26.66
R-3	Line-2	1	16.2	16.2		

Όπως φαίνεται από τα αναλυτικά αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του σεναρίου 1, οι γραμμές παραγωγής των σταδίων 2 και 3 λειτουργούν σε μέγιστη δυναμικότητα, ενώ οι γραμμές προετοιμασίας των πρώτων υλών όχι. Τα δεδομένα του σεναρίου 1 έχουν ισόποση ζήτηση για τα προϊόντα των δύο διαφορετικών ειδών πουρέ από την ίδια πρώτη ύλη. Επομένως,

για την ταυτόχρονη παραγωγή ίδιας ποσότητας και από τα δύο είδη πουρέ πρέπει οι γραμμές παραγωγής του πρώτου σταδίου να έχουν συνολικό ρυθμό παραγωγής ίσο με 26.66 t/h για να ισχύουν τα ισοζύγια μάζας. Μια αδυναμία του μοντέλου είναι ότι αυτός ο ρυθμός 26.66 t/h δεν καθορίζεται από κάποιο περιορισμό.

4.3 Αποτελέσματα διάφορων σεναρίων ζήτησης

Στην ενότητα αυτή, μελετώνται τα αποτελέσματα από διάφορα σενάρια ζήτησης της παραγωγής, γιατί ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής επηρεάζεται σε αρκετό βαθμό, λόγω των διαφορετικών ισοζυγίων μάζας μεταξύ προϊόντων και πρώτης ύλης. Τα σενάρια παρουσιάζονται στον Πίνακα A.1 του Παραρτήματος A. Τα αποτελέσματα κάθε σεναρίου παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα B. Παρακάτω φαίνεται το Gantt chart του δεύτερου σεναρίου.

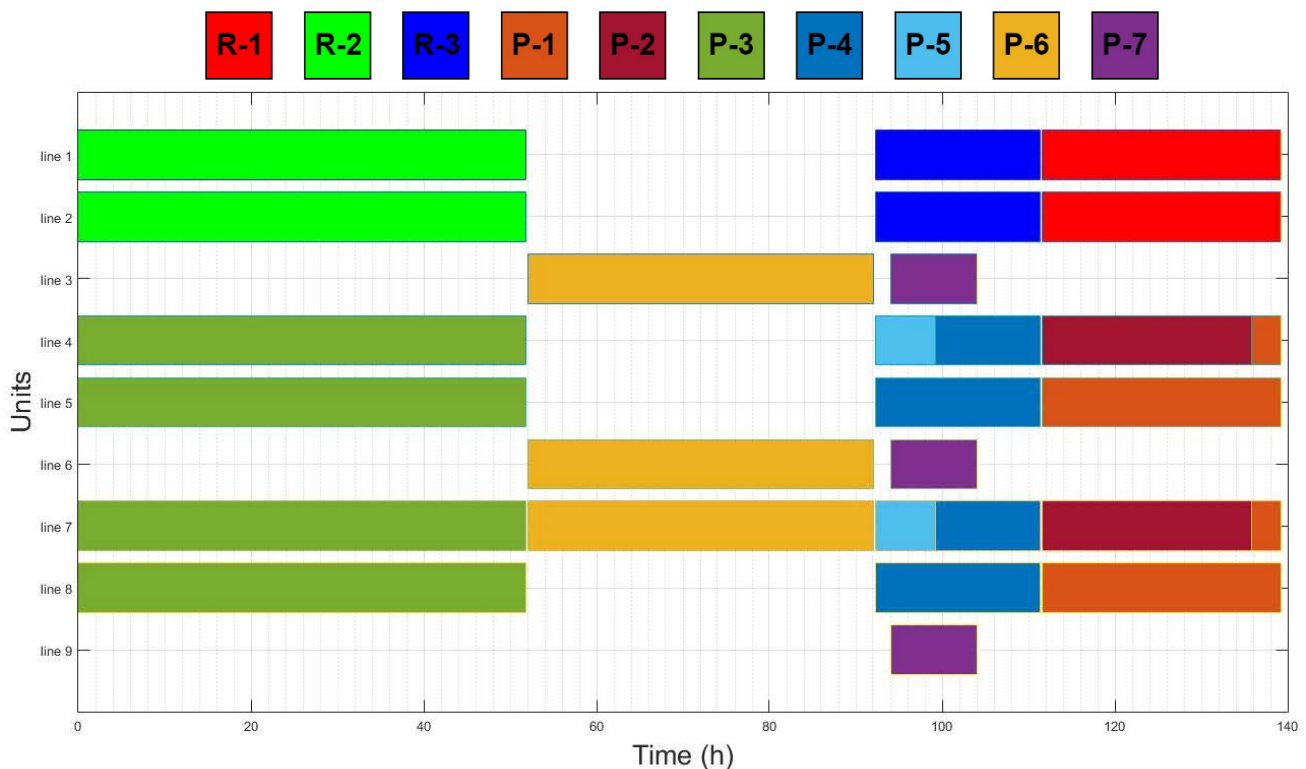


Σχήμα 4.2: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 2

Αρχικά, γίνεται αντιληπτό ότι οι ποσότητες των χυμών μπορούν να αυξηθούν και να παραχθεί περισσότερο προϊόν P-6 ώστε να είναι συνέχεια σε η λειτουργία η γραμμή 7 και να αυξηθεί η ποσότητα του P-7, αφού υπάρχει περιθώριο χρόνου. Επιπρόσθετα, από το σχήμα 4.2 γίνεται η παρατήρηση ότι εάν οι ποσότητες διαφορετικού είδους πουρέ από ίδια πρώτη ύλη δεν

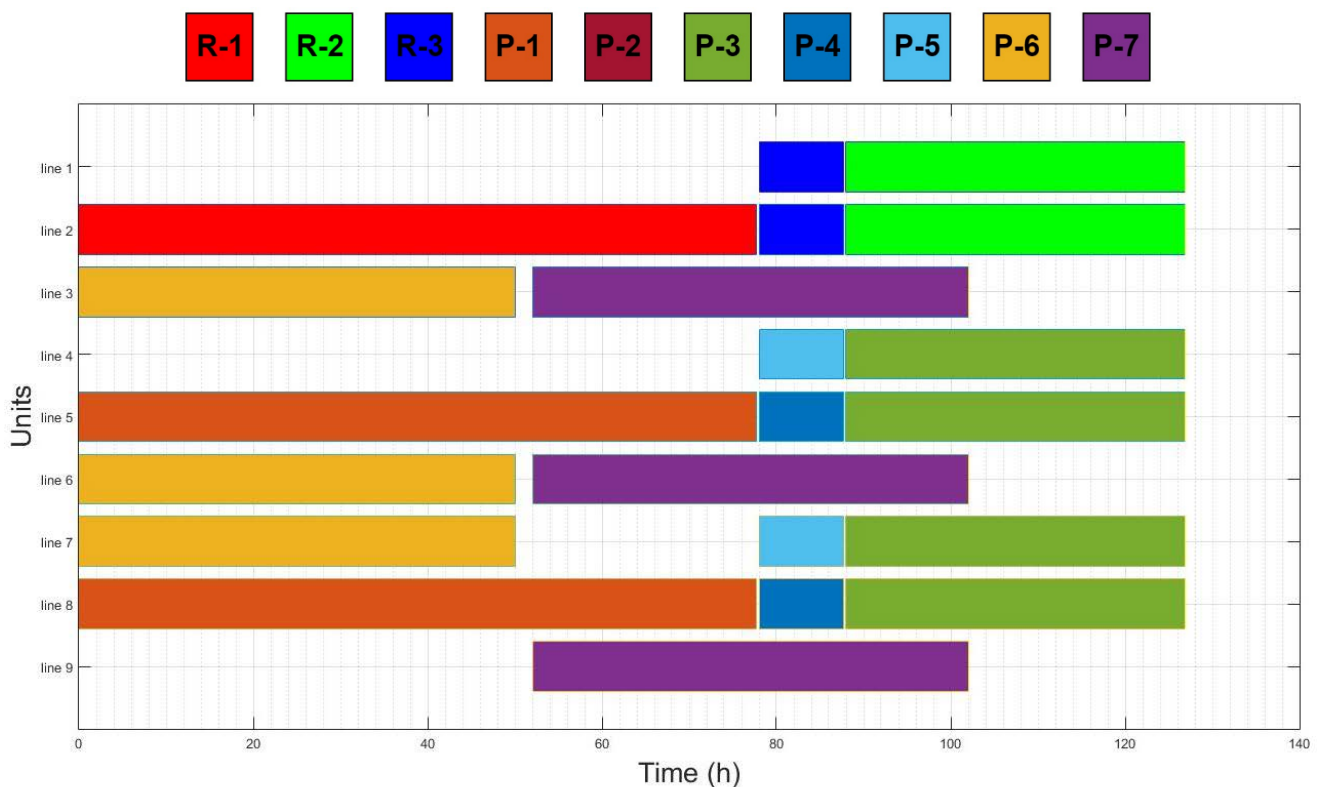
είναι ίσες, δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα και το μοντέλο αρχικά παράγει και τα δύο ταυτόχρονα και στη συνέχεια παράγει μόνο το ένα. Παρ' όλ' αυτά πρέπει να σημειωθεί, ότι στο χρονικό διάστημα, όπου παράγονται τα δύο είδη πουρέ (π.χ. P-1, P-2) και στο χρονικό διάστημα που παράγεται μόνο το ένα από τα δύο (π.χ. P-1), ο ρυθμός παραγωγής των γραμμών προετοιμασίας του πρώτου σταδίου (Line-1, Line-2, Line-3) πρακτικά μεταβάλλεται. Αυτή η μεταβολή στον ρυθμό παραγωγής δε φαίνεται στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Ειδικότερα, στη χρονική περίοδο που παράγει και τα δύο είδη πουρέ έχει ρυθμό παραγωγής 26.66 t/h και όταν παράγει μόνο το ένα έχει 13.3 t/h στις δύο γραμμές προετοιμασίας που χρησιμοποιούνται. Επιπλέον, όταν παράγει και τα δύο είδη πουρέ η αναλογία χωρισμού της επεξεργασμένης πρώτης ύλης είναι 75 % στον συμπυκνωμένο πουρέ και 25 % στον NFC, όπως ακριβώς και στο σενάριο 1. Τέλος, το σενάριο 2 και το σενάριο 1 επεξεργάζονται ίση ποσότητα πρώτης ύλης, αλλά στο σενάριο 2 παράγονται 1166.4 t προϊόντων πουρέ και 600 t προϊόντα χυμού. Προφανώς, απαιτείται περισσότερη ώρα (130 ώρες) για την ολοκλήρωση της παραγωγής, αλλά φαίνεται πλέον η μείζονος σημασία του διαχωρισμού της πρώτης ύλης και προϊόντων και πως οι αναλογίες μεταξύ τους μπορούν να επηρεάσουν κατά πολύ την παραγωγή και τον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής της βιομηχανίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται το Gantt chart του τρίτου σεναρίου.



Σχήμα 4.3: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 3

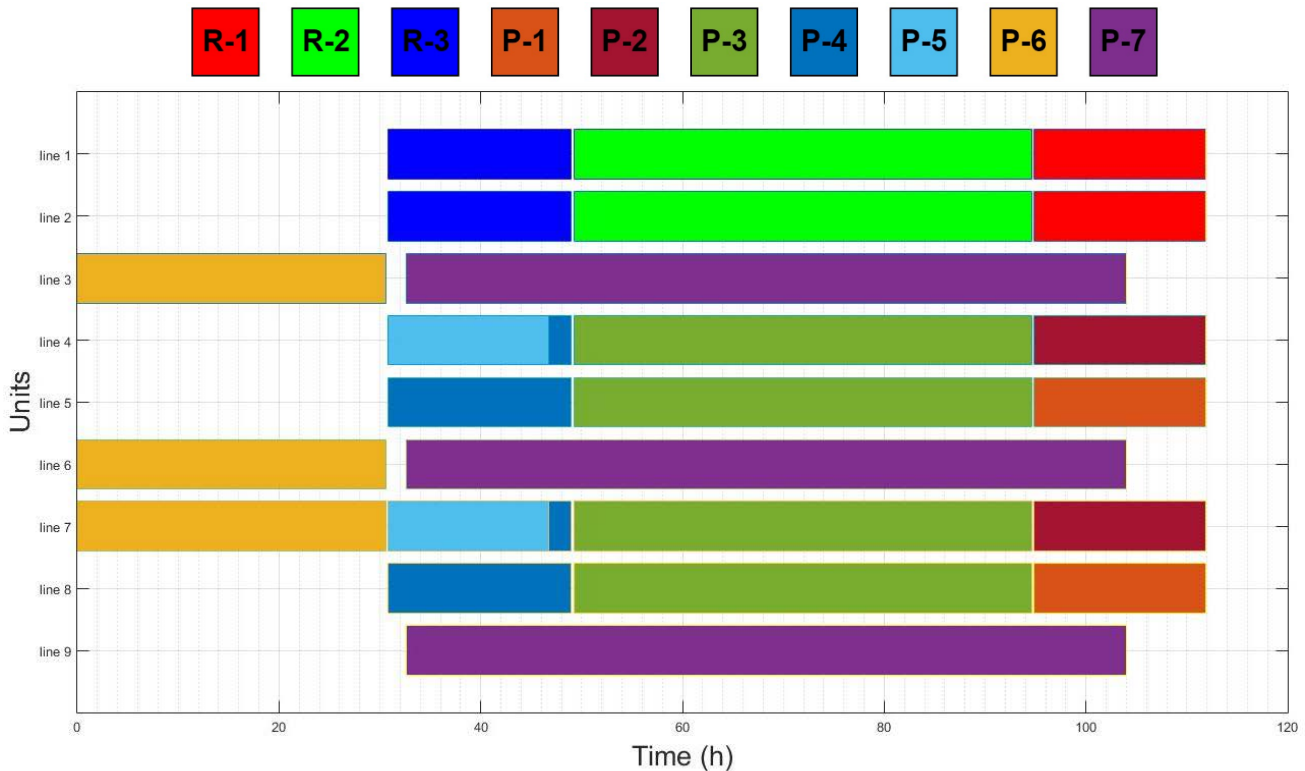
Σε αντίθεση με τα προηγούμενα δύο σενάρια, σε αυτήν την περίπτωση η προετοιμασία της πρώτης ύλης R-2 (βερικόκο) πραγματοποιείται σε δύο γραμμές προετοιμασίας αντί σε μία και παράλληλα η γραμμή 7 λειτουργεί συνεχώς. Στο σενάριο 3 η επεξεργασμένη πρώτη ύλη είναι ίση με τα σενάρια 1 και 2, αλλά παράγεται λιγότερη ποσότητα του προϊόντος P-6. Επίσης, οι γραμμές 4 και 8 έχουν μια μεγάλη χρονική περίοδο αδράνειας. Τέλος, η παραγωγή ολοκληρώνεται σε 139 ώρες και θα μπορούσε να παραχθεί πολύ μεγαλύτερη ποσότητα του P-7. Το Gantt chart του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής του σεναρίου 4 φαίνεται στο *Σχήμα 4.4*.



Σχήμα 4.4: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 4

Στο σενάριο 4, οι ποσότητες των χυμών είναι υψηλότερες και επιπλέον δεν παράγονται όλα τα διαθέσιμα προϊόντα. Επίσης, είναι διακριτό από το *Σχήμα 4.4*, ότι οι γραμμές 1 και 4 παραμένουν αδρανείς για περίπου 78 ώρες. Με βάση αυτήν τη λογική θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι τα αποτελέσματα αυτά δεν είναι τα βέλτιστα. Αλλά αν χρησιμοποιηθούν αυτές δύο αδρανείς γραμμές εκείνη την χρονική περίοδο θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και η γραμμή 7, ώστε να αποθηκευτεί το προϊόν. Έτσι η γραμμή 7 θα έχει ολοκληρώσει την επεξεργασία όλων των προϊόντων (Πίνακας Β.4) σε περίπου 137 ώρες, ενώ τώρα γίνεται σε 126 ώρες. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι επειδή ήταν αυξημένη η παραγωγή του προϊόντος P-6 (χυμός

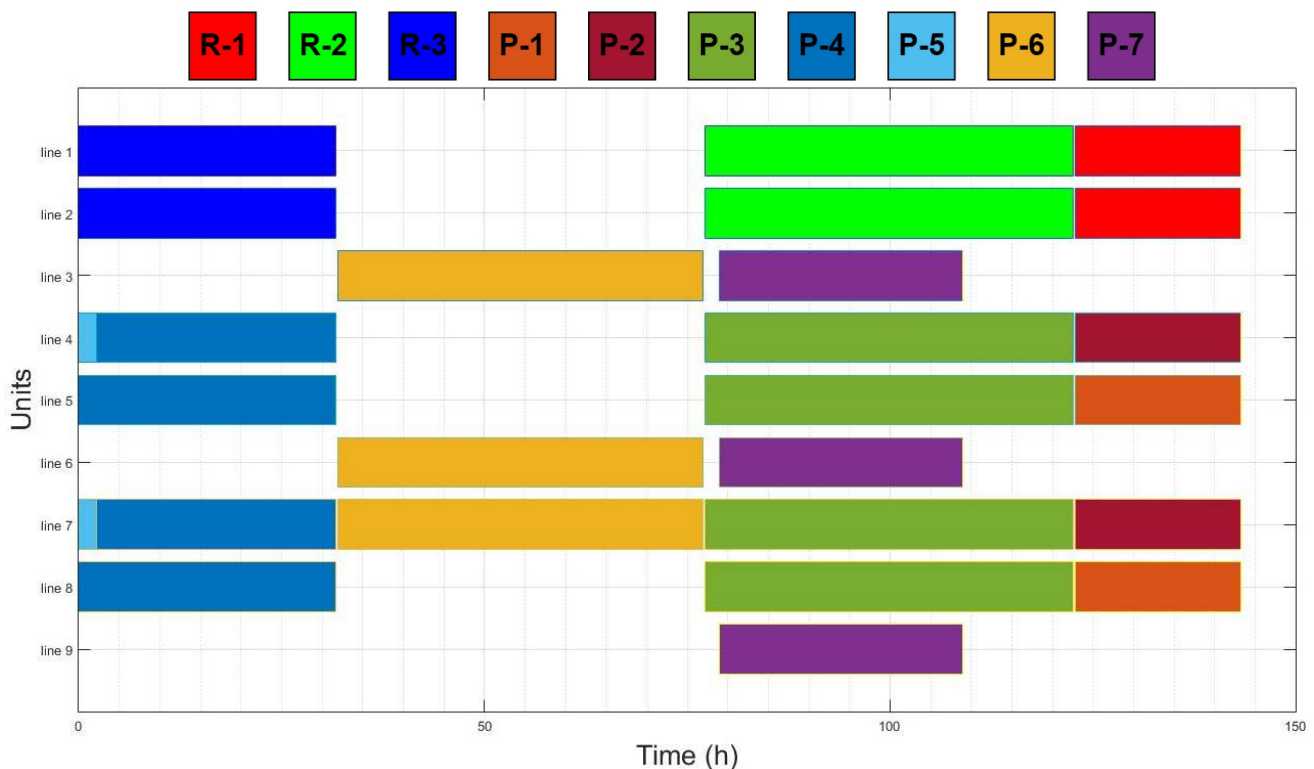
ροδάκινο). Στη συνέχεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5 τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης του πέμπτου σεναρίου.



Σχήμα 4.5: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 5

Από το σενάριο 5 γίνεται ξεκάθαρα αντιληπτό ότι κάποιος κακός συνδυασμός αναλογιών διαχωρισμού της πρώτης ύλης προς τα αντίστοιχα προϊόντα θα έχει σαν αποτέλεσμα να παράγεται μόνο ένα προϊόν και να λειτουργεί μόνο ένας συνδυασμός γραμμών παραγωγής για μια περίοδο μεγαλύτερη μιας μέρας. Συγχρόνως όμως, στο σενάριο αυτό λειτουργούν ταυτόχρονα όλες οι γραμμές παραγωγής για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, λόγω της αυξημένης ζήτησης του προϊόντος P-7. Αυτή η ταυτόχρονη λειτουργία των συσκευών για πολύ ώρα μπορεί να επιφέρει καταστροφικά αποτελέσματα αν παρουσιαστεί κάποια βλάβη ή μείωση του ανθρώπινου δυναμικού, για αυτό το λόγο ίσως απαιτείται καθημερινός επαναπρογραμματισμός της παραγωγής.

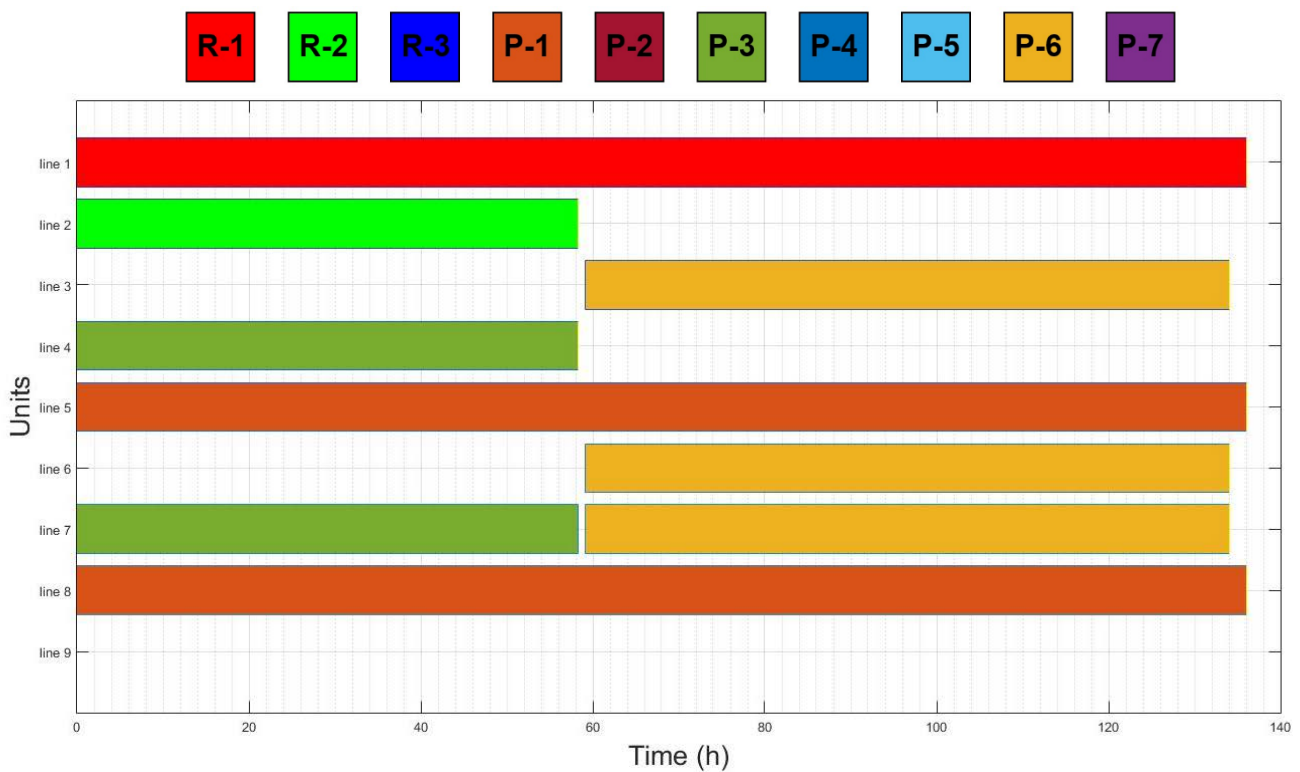
Τα αποτελέσματα του έκτου σεναρίου φαίνονται στο Σχήμα 4.6



Σχήμα 4.6: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 6

Το ενδιαφέρον συμβάν που λαμβάνει χώρα στο σενάριο 6 είναι, ότι στα προϊόντα πουρέ ροδάκινο για πρώτη φορά, η ποσότητα (όχι η αναλογία χωρισμού πρώτης ύλης) του συμπυκνωμένου πουρέ (P-2) είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα του NFC (P-1) που παράγεται. Αυτό φέρνει ενδιαφέρον αποτελέσματα στην παραγωγή, καθώς ο συμπυκνωμένος πουρές παρασκευάζεται μόνο στη γραμμή 4, σε αντίθεση με τον NFC που γίνεται και στην γραμμή 5. Η βελτιστοποίηση προσπαθεί να παράγει ταυτόχρονα και τα δύο είδη πουρέ για να εξοικονομήσει χρόνο, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα ο ρυθμός παραγωγής του πουρέ NFC να μειωθεί (Πίνακας Β6). Αν υπήρχαν οικονομικά κριτήρια στην βελτιστοποίηση το φαινόμενο αυτό μπορεί να μην συνέβαινε.

Τέλος παρατίθεται και το Gantt chart για την 7^η περίπτωση στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7: Gantt Chart βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σενάριο 7

Η τελευταία περίπτωση είναι το σενάριο 7, όπου φαίνεται η παραγωγή λίγων προϊόντων με την ταυτόχρονη λειτουργία των γραμμών προετοιμασίας του πρώτου σταδίου με διαφορετική πρώτη ύλη. Η ποσότητα πρώτης ύλης που επεξεργάζεται είναι πολύ μικρή, καθώς όλα τα προϊόντα πουρέ είναι τύπου NFC, σε σύγκριση με τα άλλα σενάρια. Συνολικά, για να γίνει άμεση σύγκριση όλων των σεναρίων μεταξύ τους τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

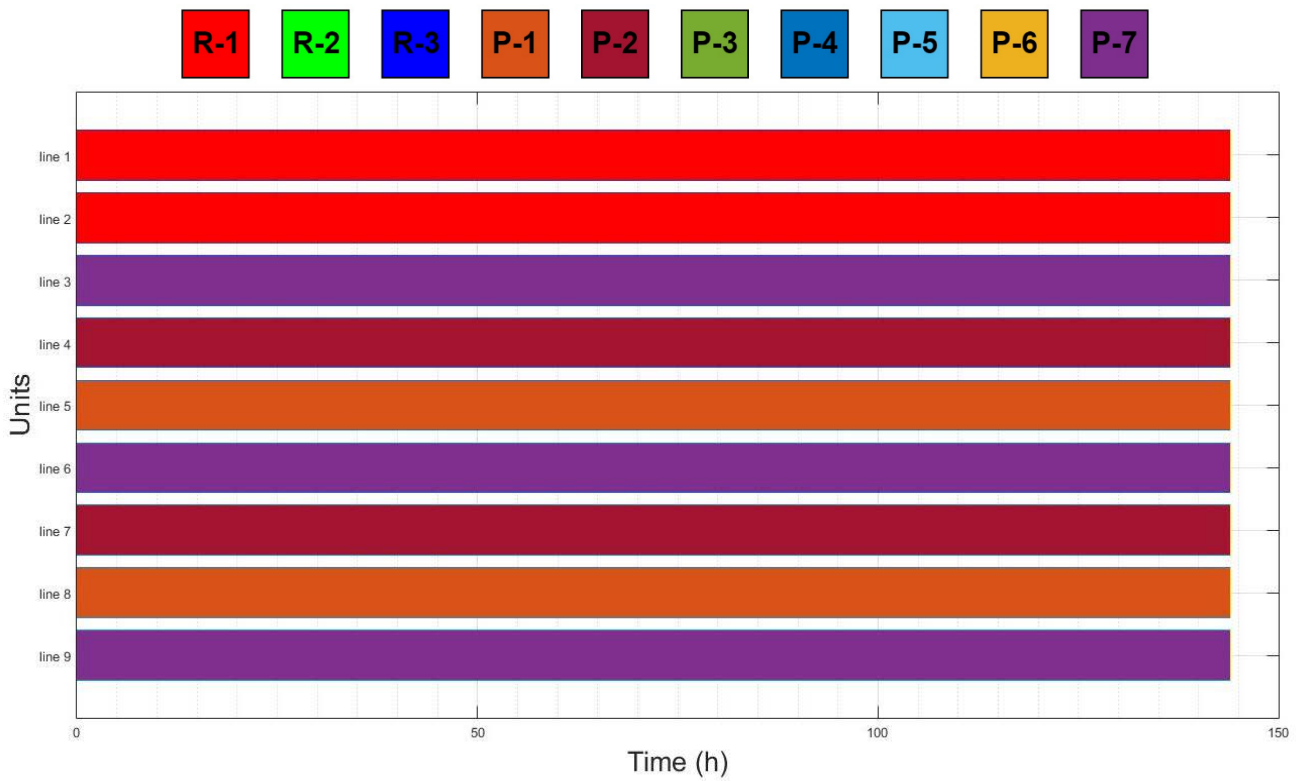
Πίνακας 4.2: Ποσότητες πρώτων υλών και τελικών προϊόντων και χρόνος ολοκλήρωσης της παραγωγής κάθε σεναρίου

Σενάριο	Ποσότητα πρώτης ύλης πουρέ (t)	Ποσότητα προϊόντων πουρέ (t)	Ποσότητα προϊόντων χυμού (t)	Ποσότητα προϊόντων (t)	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)
1	1728	972	600	1572	113.9
2	1728	1166	600	1766	130.1
3	1728	1181.95	400	2128	139.25
4	1296	1049.76	800	1849.76	126.86
5	1512	966.17	816	1782.17	111.864
6	1512	1088.64	600	1688.64	143.274
7	1296	1166.4	600	1766.4	136.08

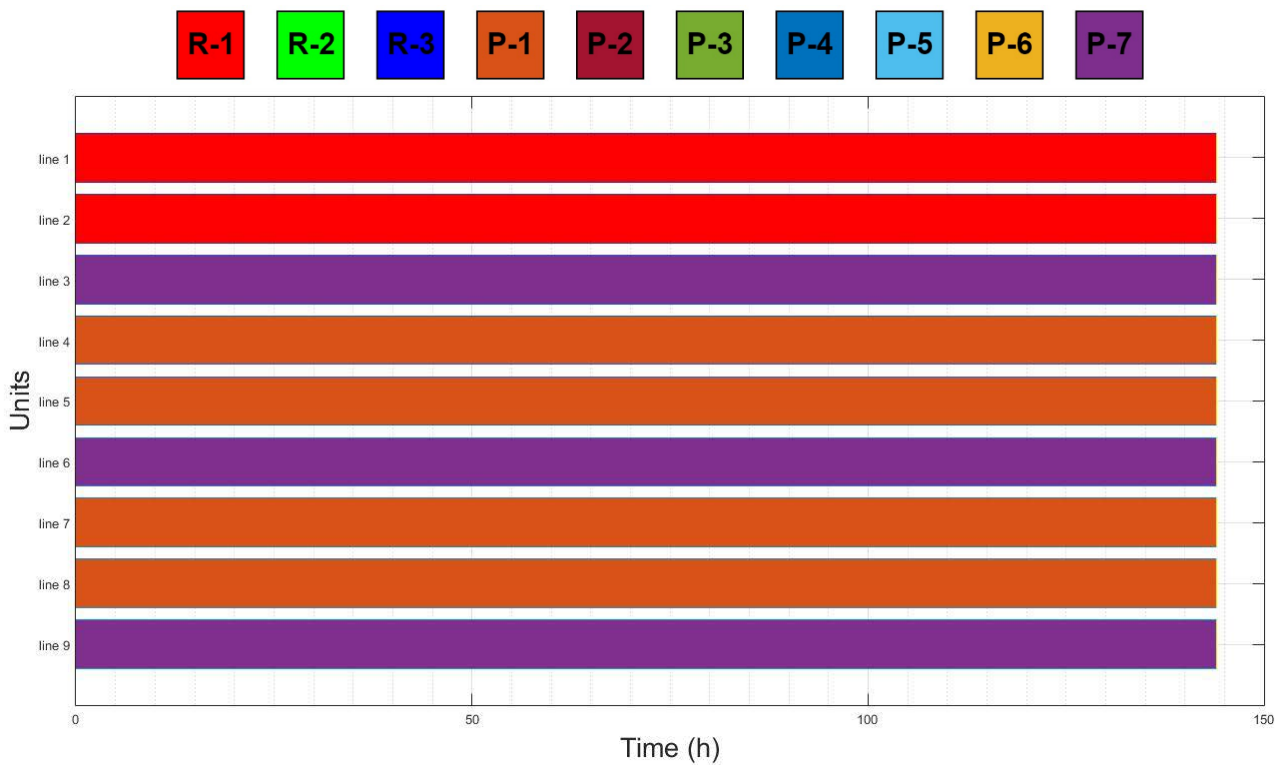
Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.2 και τα προηγούμενα Gantt charts, η παραγωγή κάθε βδομάδας μπορεί να πάρει πολλαπλές μορφές. Μερικές φορές με λιγότερη πρώτη ύλη παράγεται περισσότερη ποσότητα τελικών προϊόντων, ή με ίδια πρώτη ύλη η παραγωγή μπορεί να αλλάξει σημαντικά. Από όλα τα παραπάνω φαίνεται πρώτων, η αποτελεσματικότητα του τροποποιημένου μαθηματικού μοντέλου παρουσιάζοντας και τα τρία στάδια και όχι μόνο το πιο βραδύ, όπως στη βιβλιογραφία, και η χρησιμότητα του, αφού κάποιες μικρές αλλαγές στην παραγωγή, έχουν τελικά σημαντικές επιδράσεις.

4.4 Μεγιστοποίηση παραγωγής

Στην ενότητα αυτή μελετάται η μεγιστοποίηση της παραγωγής. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα δεδομένα ζήτησης είναι εικονικά και δεν παρέχονται από ιστορικά δεδομένα της εταιρείας, οπότε η μεγιστοποίηση των σεναρίων που αναπτύχθηκαν προηγουμένως δεν έχει κάποιο μελετητικό ενδιαφέρον. Αντιθέτως, η προσέγγιση που θα ακολουθηθεί είναι η μεγιστοποίηση της ποσότητας επεξεργαζόμενης πρώτης ύλης και η μεγιστοποίηση της ποσότητας των προϊόντων. Για την επίτευξη αυτού, χρησιμοποιείται το τροποποιημένο μοντέλο μεγιστοποίηση ζήτησης που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3. Η μεγιστοποίηση της κατανάλωσης της πρώτης ύλης χρησιμοποιεί ως αντικειμενική συνάρτηση την εξίσωση 3.26α. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.8. Η μεγιστοποίηση της ποσότητας προϊόντων χρησιμοποιεί ως αντικειμενική συνάρτηση την εξίσωση 3.26β. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9. Τα αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα Β.



Σχήμα 4.8: Gantt Chart περίπτωση μεγιστοποίησης κατανάλωσης πρώτης ύλης



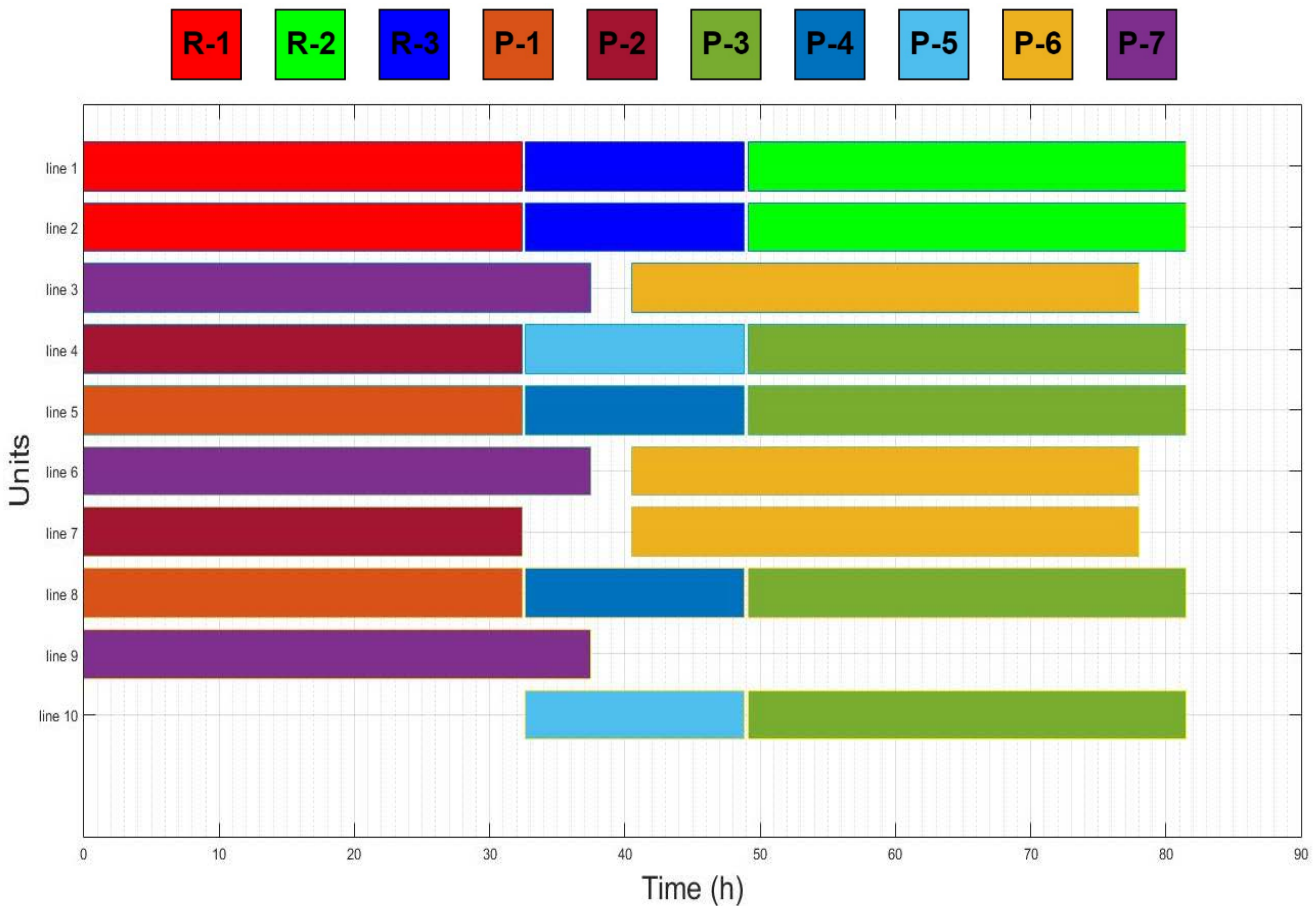
Σχήμα 4.9: Gantt Chart περίπτωση μεγιστοποίησης παραγωγής προϊόντων

Για την μεγιστοποίηση της κατανάλωσης της πρώτης ύλης (Σχήμα 4.8) πρέπει να παράγεται σίγουρα συμπυκνωμένος πουρές. Συμπυκνωμένος πουρές μπορεί να παραχθεί μόνο σε μία γραμμή παραγωγής του δεύτερου σταδίου, οπότε η υπόλοιπη μάζα θα κατευθυνθεί για παραγωγή πουρέ NFC. Ο χυμός που παράγεται δεν επιβραδύνει ή επιβραδύνεται από τη γραμμή πουρέ. Τελικά καταναλώνονται 3840 τόνοι πρώτης ύλης για την παραγωγή πουρέ και παράγονται 1680 τόνοι χυμού και 1728 τόνοι πουρέ (συμπυκνωμένο και NFC). Η μεγιστοποίηση των προϊόντων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9 παράγει μόνο πουρέ NFC. Η λύση του μαθηματικού μοντέλου προτείνει μόνο το προϊόν P-2, αλλά μπορεί να είναι οποιοσδήποτε συνδυασμός με πουρέ NFC. Πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο, που οι τόνοι προϊόντων είναι 1680 t για χυμό και 1728 t για πουρέ, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, οι τόνοι πρώτης ύλης που καταναλώνονται είναι οι μισοί της προηγούμενης περίπτωσης, δηλαδή 1920 t. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να είχαν βρεθεί και με την απλή κατανόηση του προβλήματος, αλλά με την ίδια λογική μπορούν να τοποθετηθούν περιορισμοί ως προς την διαθέσιμη πρώτη ύλη, όπως κάποιο ανώτατο όριο. Έτσι, το εργοστάσιο θα πρέπει να καταναλώσει τη διαθέσιμη πρώτη ύλη και να παράγει οποιοδήποτε προϊόν για να ικανοποιηθούν τα ισοζύγια μάζας. Αντίστοιχα μπορούν να τεθούν περιορισμοί στα προϊόντα, όπως ελάχιστες ποσότητες που πρέπει να παραχθούν και στη συνέχεια θα προβλέπεται παραγωγή όσο το δυνατόν περισσότερων προϊόντων ή εκείνων που επιφέρουν το μεγαλύτερο κέρδος μέσω των αντικειμενικών συναρτήσεων.

4.5 Προσθήκη καινούργιας γραμμής παραγωγής

Μια περίπτωση με ιδιαίτερο μελετητικό ενδιαφέρον είναι η επέκταση της δυναμικότητας της παραγωγής με την προσθήκη μιας καινούργιας γραμμής παραγωγής. Το στάδιο και το είδος της καινούργιας παραγωγής δεν επιλέγεται τυχαία, αλλά με βάση τις περιπτώσεις, που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Σύμφωνα με τα προηγούμενα Gantt chart, η νέα γραμμή παραγωγής πρέπει να ανήκει στο 3^ο στάδιο της παραγωγής, καθώς εκεί παρατηρείται η μεγαλύτερη συμφόρηση. Παρ' όλ' αυτά, η επιλογή του είδους της γραμμής παραγωγής δεν είναι τόσο εμφανής. Με βάση τα δεδομένα του προβλήματος και ειδικότερα το πλήθος των προϊόντων που μπορεί να επεξεργαστεί κάθε γραμμή παραγωγής του τρίτου σταδίου, εξάγεται το συμπέρασμα, ότι καλύτερη επιλογή είναι μια γραμμή παραγωγής όμοια με τη γραμμή παραγωγής ασηπτικών βαρελιών (Line-7), καθώς μπορεί να επεξεργαστεί 6 προϊόντα, ενώ η γραμμή ασηπτικών δεξαμενών (Line-8) μπορεί να επεξεργαστεί 3 προϊόντα. Επιπλέον στις προηγούμενες περιπτώσεις ποικίλλει ο χρόνος λειτουργίας μεταξύ των δύο

γραμμών, όπου σε μερικές δουλεύει συνεχώς η γραμμή 7 και σε άλλες δουλεύει συνεχώς η γραμμή 8. Για τους παραπάνω λόγους η νέα γραμμή παραγωγής που επιλέγεται ανήκει στο 3^ο στάδιο και είναι όμοια με τη γραμμή 7. Ο χρονοπρογραμματισμός της παραγωγής επαναλαμβάνεται για όλα τα σενάρια του Παραρτήματος Α, έπειτα από την προσθήκη της νέας γραμμής συσκευασίας/αποθήκευσης. Τα αναλυτικά αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου παρατίθενται στο Παράρτημα Β και το Gantt chart παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Gantt Chart χρονοπρογραμματισμού παραγωγής πρώτου σεναρίου με καινούργια γραμμή όμοια με τη Line-7

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.10, η προσθήκη της νέας γραμμής παραγωγής επηρεάζει σημαντικά τον χρονοπρογραμματισμό ως προς τον χρόνο ολοκλήρωσης και τη κατανομή των προϊόντων στις γραμμές παραγωγής. Η επίδραση της νέας γραμμής για κάθε σενάριο, φαίνεται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Χρόνος ολοκλήρωσης παραγωγής κάθε σεναρίου της ζήτησης με και χωρίς την πρόσθετη γραμμή παραγωγής όμοια με την Line-7

Σενάριο	Χρόνος ολοκλήρωσης – 9 γραμμές (h)	Χρόνος ολοκλήρωσης – επιπλέον γραμμή (h)	Διαφορά (h)	Ποσοστό μεταβολής
1	113.9	81.5	32.4	28.45%
2	130.1	97.7	32.4	24.90%
3	139.246	98.996	40.25	28.91%
4	126.86	102	24.86	19.60%
5	111.864	104	7.864	7.03%
6	143.274	98.024	45.25	31.58%
7	136.08	97.45	38.63	28.39%

Συμπερασματικά, η νέα γραμμή μειώνει σημαντικά τον χρόνο ολοκλήρωσης της παραγωγής. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί, ότι αυτή η μείωση καθορίζεται άμεσα από τις ποσότητες κάθε προϊόντος που παράγονται, όπως για παράδειγμα η μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης στο σενάριο 5 είναι πολύ μικρότερη και ως απόλυτη διαφορά και ως ποσοστό. Η χαμηλή μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης της παραγωγής για το σενάριο 5, οφείλεται στο γεγονός ότι παράγονται πολλοί τόνοι από το προϊόν (P-7), το οποίο δεν χρησιμοποιεί γραμμή όμοια με την γραμμή 7 για να αποθηκευτεί. Όποτε, αν η βιομηχανία έχει τις περισσότερες φορές ζήτηση όμοια με του σεναρίου 5, τότε αυτή η μείωση στον χρόνο ολοκλήρωσης ίσως να μην είναι αρκετή για να ληφθεί η απόφαση αγοράς και εγκατάστασης της.

Όπως φάνηκε παραπάνω, η επιλογή μιας νέας γραμμής παραγωγής όμοιας με τη γραμμή 7 βοηθάει κατά πολύ την παραγωγή και θα ήταν ιδανική σε περίπτωση επέκτασης της δυναμικότητας της βιομηχανικής μονάδας. Ωστόσο, αυτή δε θα είναι μια ολοκληρωμένη απόφαση, αν δεν γίνει έλεγχος της επίδρασης, που θα έχει η προσθήκη μιας καινούργιας γραμμής παραγωγής, η οποία θα είναι όμοια αυτή τη φορά με τη γραμμή 8. Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Πίνακας 4.4: Χρόνος ολοκλήρωσης παραγωγής κάθε σεναρίου της ζήτησης με και χωρίς την πρόσθετη γραμμή παραγωγής όμοια με την Line-8

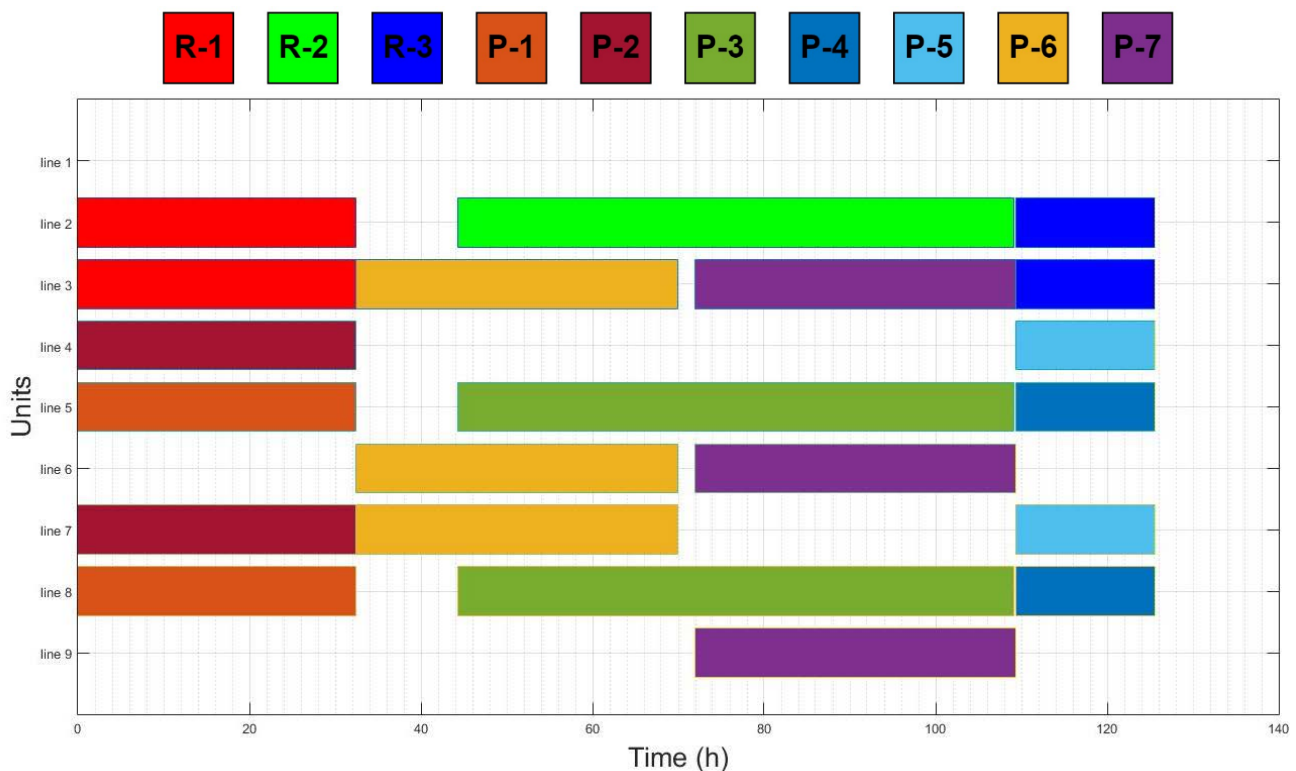
Σενάριο	Χρόνος ολοκλήρωσης – 9 γραμμές (h)	Χρόνος ολοκλήρωσης – επιπλέον γραμμή (h)	Διαφορά (h)	Ποσοστό μεταβολής
1	113.9	86.6	27.3	23.97%
2	130.1	97.7	32.4	24.90%
3	139.246	98.996	40.25	28.91%
4	126.86	102	24.86	19.60%
5	111.864	104	7.864	7.03%
6	143.274	98.024	45.25	31.58%
7	136.08	97.45	38.63	28.39%

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.4, αν επιλεγθεί μια καινούργια γραμμή όμοια με τη γραμμή 8 η μονάδα παρουσιάζει την ίδια αποτελεσματικότητα, με εξαίρεση το πρώτο σενάριο. Επομένως, και η αυτή η επιλογή είναι συμφέρουσα. Ωστόσο, η επιλογή μιας νέας γραμμής παραγωγής δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά και μόνο στην παραπάνω διαδικασία και λογική, όμως αυτή η διαδικασία μπορεί να δώσει μια κατεύθυνση για την βέλτιστη επιλογή. Τέλος, αν επιλεγθεί ως καινούργια γραμμή παραγωγής κάποια παρόμοια με τις υπόλοιπες γραμμές που δεν αναλύθηκαν παραπάνω, δεν θα υπάρχει βελτίωση στον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής, παρά μόνο αν προστεθούν δύο νέες γραμμές σε δύο διαφορετικά στάδια.

4.6 Αφαίρεση υπάρχουσας γραμμής παραγωγής

Η τελευταία μελέτη που μελετάται είναι η αφαίρεση υπάρχουσας γραμμής παραγωγής. Πολλές φορές σε μία βιομηχανική μονάδα οι γραμμές παραγωγής έχουν ανάγκη για συντήρηση ή έχουν πάθει κάποια μηχανολογική βλάβη ή ακόμα πρέπει να γίνει μεταβολή κάποιων συνθηκών και σύνδεση με άλλο μηχανολογικό εξοπλισμό για τη βελτίωση της απόδοσης ή την εξασφάλιση ομαλής λειτουργίας της μονάδας. Οπότε, υπάρχουν περιπτώσεις, όπου κάποια γραμμή παραγωγής παύει τη λειτουργία της, το οποίο επηρεάζει σημαντικά το χρονοπρογραμματισμό παραγωγής. Με τη χρήση του μοντέλου, που αναπτύχθηκε και το υπολογιστικό εργαλείο, GAMS, η παραγωγή νέων αποτελεσμάτων για αυτή την περίπτωση είναι πολύ γρήγορη και αξιόπιστη. Ειδικότερα, στο συγκεκριμένο πρόβλημα θα γίνει η υπόθεση, ότι η γραμμή παραγωγής, που σταματάει τη λειτουργία της είναι η γραμμή προετοιμασίας, Line-1, του πρώτου σταδίου. Αυτό σημαίνει ότι σημαίνει ότι οι γραμμές

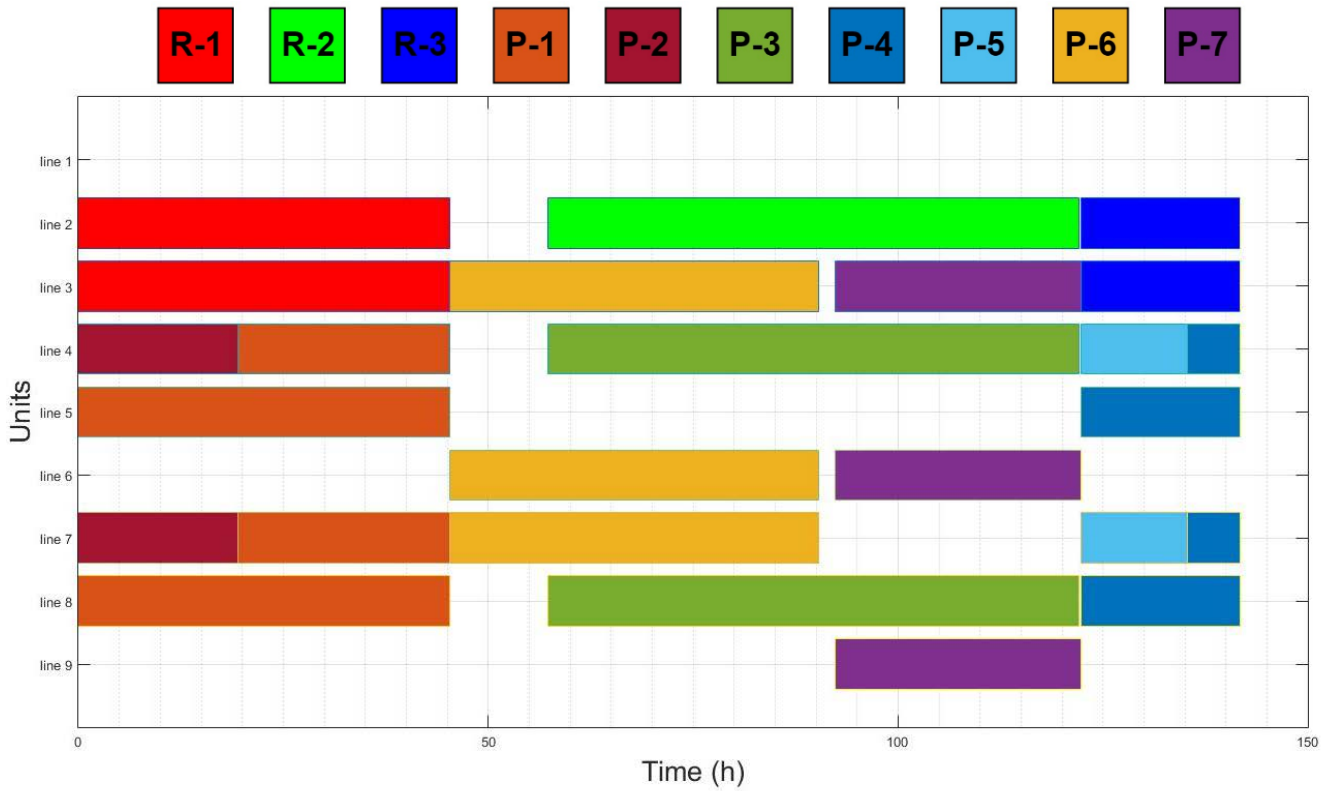
παραγωγής Line-2 και Line-3 είναι υπεύθυνες για την προετοιμασία της πρώτης ύλης. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η γραμμή Line-3 στις προηγούμενες περιπτώσεις ήταν υπεύθυνη μόνο για την προετοιμασία πρώτης ύλης προς χυμούς και ο ρυθμός παραγωγής της ήταν σύμφωνος με το τελικό προϊόν. Αυτή τη φορά η Line-3 έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με τις αντίστοιχες γραμμές παραγωγής όσο αφορά την πρώτη ύλη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα Gantt charts για τα σενάρια 1, 2, 4 και 6.. Τα αναλυτικά αποτελέσματα κάθε σεναρίου με την αφαίρεση της Line-1 παρατίθενται στο *Παράρτημα Β*.



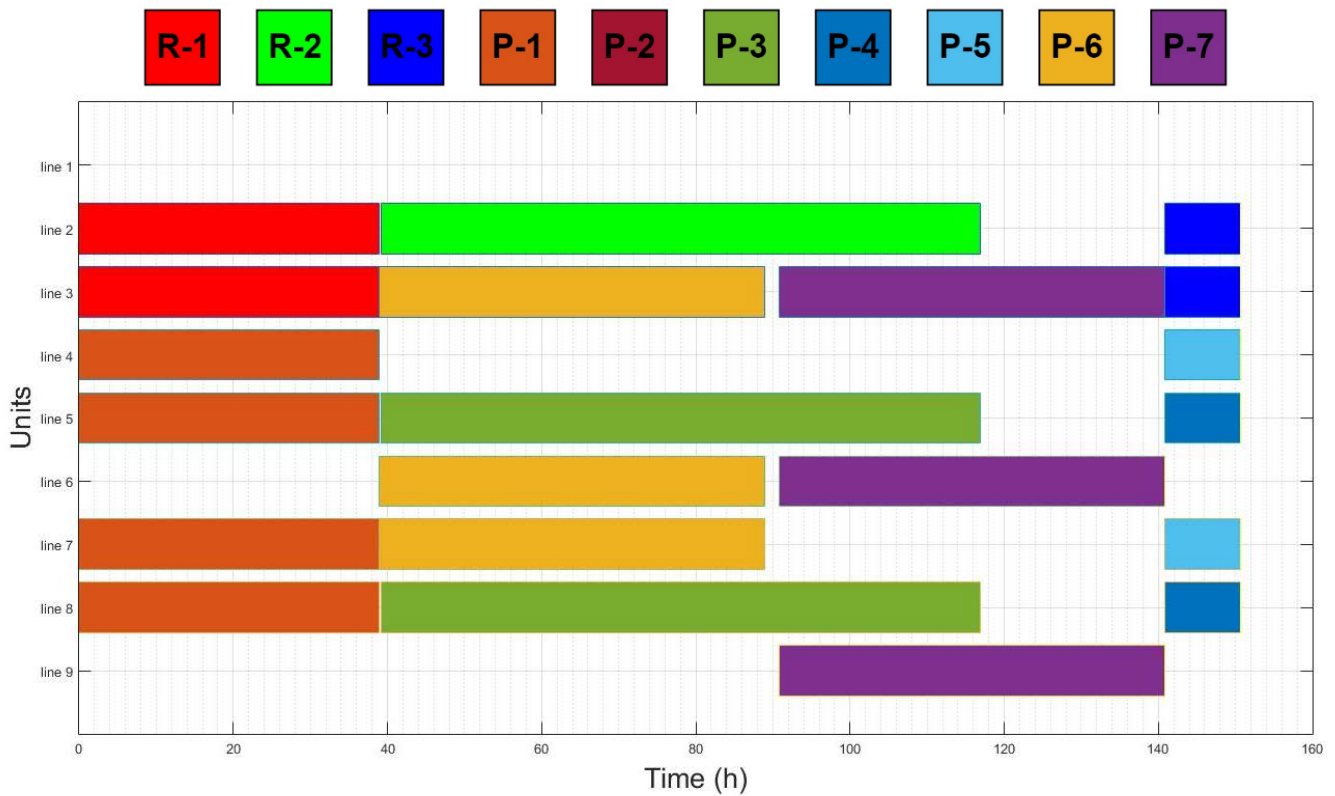
Σχήμα 4.11: Gantt Chart χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1^{ου} σεναρίου με αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας (Line-1)

Όπως γίνεται αντιληπτό από το Gantt chart του σχήματος 4.11, για την πλήρη κάλυψη της ζήτησης του 1^{ου} σεναρίου, η μονάδα απαιτεί 11 ώρες περισσότερο σε σύγκριση με την κανονική περίπτωση λειτουργίας όλων των γραμμών παραγωγής. Επιπλέον οι γραμμές προετοιμασίας του πρώτου σταδίου (Line-2, Line-3) λειτουργούν παράλληλα σχεδόν σε όλο το μήκος του χρονικού ορίζοντα, ένα φαινόμενο που στην απλή περίπτωση δεν πραγματοποιείται (Σχήμα 4.1).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το Gantt chart του 2^{ου} σεναρίου, του 4^{ου} σεναρίου της αντίστοιχης περίπτωσης στο Σχήμα 4.12 και Σχήμα 4.13.



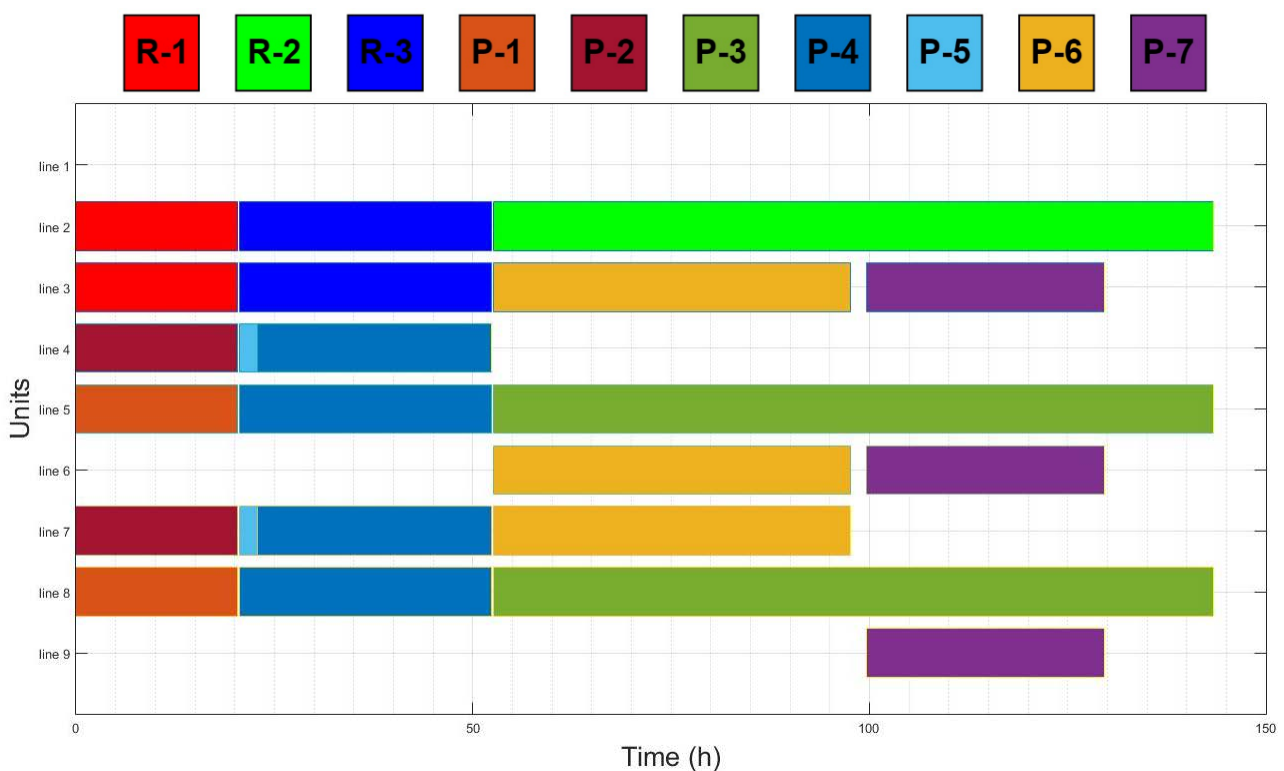
Σχήμα 4.12: Gantt Chart χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 2^{ου} σεναρίου με αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας (Line-1)



Σχήμα 4.13: Gantt Chart χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4^{ου} σεναρίου με αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας (Line-1)

Όπως και προηγουμένως απαιτείται περισσότερος χρόνος για την ολοκλήρωση της παραγωγής και την κάλυψη της ζήτησης. Επιπλέον, το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας των γραμμών παραγωγής μεταξύ του 1^{ου} σεναρίου (Σχήμα 4.11) και των σεναρίων 2 και 4 (Σχήμα 4.12, Σχήμα 4.13) έχουν την ίδια διάταξη, δηλαδή όταν παράγεται το προϊόν P-3, τότε παράγονται παράλληλα και τα προϊόντα χυμού (P-6, P-7). Αυτό είναι εφικτό, γιατί τα τρία αυτά διαφορετικά προϊόντα αποθηκεύονται με διαφορετικό τρόπο. Άρα, βγαίνει το συμπέρασμα, ότι η μείωση της ποσότητας του προϊόντος P-3 και η αύξηση κάποιου άλλου θα έχει αρνητικές συνέπειες και θα επιβαρύνει περισσότερο την παραγωγή. Αυτό είναι ιδιαίτερα αντιληπτό στο Σχήμα 4.13, επειδή η ποσότητα του προϊόντος P-3 είναι πιο μικρή από αυτή των χυμών και ο χρόνος αδράνειας που δημιουργείται στις γραμμές αποθήκευσης του 3^{ου} σταδίου είναι ουσιαστικά ο επιπλέον χρόνος που παράγεται λόγω της αφαίρεσης της γραμμής Line-1.

Τέλος παρουσιάζεται και το Gantt chart του 6^{ου} σεναρίου παρακάτω:



Σχήμα 4.14: Gantt Chart χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 6^{ου} σεναρίου με αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας (Line-1)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης και του Gantt chart του 6^{ου} σεναρίου, παρόλο που έχει αφαιρεθεί μια γραμμή παραγωγής, ο χρόνος ολοκλήρωσης αυξήθηκε μόνο κατά μερικά λεπτά. Αυτό δείχνει, ότι οι ποσότητες των προϊόντων και οι αναλογίες μεταξύ πρώτης ύλης και τελικών προϊόντων ήταν τόσο κακές, όπου και η αφαίρεση μιας γραμμής

προετοιμασίας δεν επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα στην παραγωγή. Συνολικά, τα αποτελέσματα και η επίδραση της αφαίρεσης της γραμμής Line-1, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.5: Χρόνος ολοκλήρωσης παραγωγής κάθε σεναρίου ζήτησης χωρίς και με την αφαίρεση της γραμμής παραγωγής Line-1

Σενάριο	Χρόνος ολοκλήρωσης – 9 γραμμές (h)	Χρόνος ολοκλήρωσης – αφαίρεση γραμμής (h)	Διαφορά (h)	Ποσοστό αύξησης
1	113.90	125.60	11.70	10.27%
2	130.10	141.80	11.70	8.99%
3	139.25	149.25	10.00	7.18%
4	126.86	150.60	23.74	18.71%
5	111.86	139.15	27.29	24.40%
6	143.27	143.38	0.11	0.08%
7	136.08	136.08	0.00	0.00%

Από τον Πίνακα 4.5 μόνο οι περιπτώσεις των σεναρίων 3 και 4 ξεπερνάν το όριο των 144 ωρών, το σενάριο 5 έχει την μεγαλύτερη αύξηση και το σενάριο 7 έχει την μικρότερη. Η επίδραση στο σενάριο 7 είναι μηδαμινή, διότι η ζήτηση αφορά πολύ λίγα προϊόντα και ο χρόνος ολοκλήρωσης καθορίζεται αποκλειστικά το τρίτο στάδιο ανεξάρτητα με την ύπαρξη ή μη της τρίτης γραμμής προετοιμασίας, σε αντίθεση με την περίπτωση του σεναρίου 6, που αναλύθηκε προηγουμένως. Επιπρόσθετα, τη μεγαλύτερη αύξηση στον χρόνο ολοκλήρωσης την έχει το σενάριο 5, μια περίπτωση, που δουλεύουν ταυτόχρονα για μεγάλο διάστημα όλες οι γραμμές προετοιμασίας συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις. Συμπερασματικά, η βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής με τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου, που αναπτύχθηκε φέρνει γρήγορα αποτελέσματα σε κρίσιμες καταστάσεις, που μπορεί να αντιμετωπίσει η βιομηχανία και φαίνεται επίσης και η μέγιστη σημασία παρουσίασης όλων των σταδίων παραγωγής.

5. Συμπεράσματα – Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη έχει ως στόχο την ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση και τη βελτιστοποίηση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μιας βιομηχανίας επεξεργασίας φρούτων. Η βελτιστοποίηση αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης της παραγωγής. Με τη χρήση του μοντέλου πρέπει να παράγονται γρήγορα και έμπιστα αποτελέσματα, τα οποία βοηθούν στη λήψη σημαντικών αποφάσεων, όπως η σειρά των πρώτων υλών που καταναλώνονται ή των τελικών προϊόντων που παράγονται στις συσκευές, σε ποιες συσκευές θα παραχθεί κάθε προϊόν και η ώρα παραγωγής κάθε προϊόντος. Το μοντέλο αυτό εισάγεται στο περιβάλλον GAMS, και επιλύεται με όλα τα απαραίτητα δεδομένα της μονάδας με τη χρήση ενός επιλυτή και ειδικότερα του ILOG CPLEX.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε βασίζεται σε ένα μοντέλο άμεσης προτεραιότητας για συνεχούς λειτουργίας διεργασίες. Η τροποποίηση, που πραγματοποιήθηκε στο μοντέλο, είναι αρκετά σημαντική, καθώς έχει ως ρόλο τη σύνδεση όλων των σταδίων της παραγωγής και ταυτόχρονα την ανάμιξη αντικειμένων μεταξύ των σταδίων. Κάθε στάδιο έχει τις δικές του γραμμές παραγωγής. Επιπλέον, αυτή η σύνδεση μεταξύ των σταδίων γίνεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι μεταξύ σταδίων παραγωγής που επεξεργάζονται διαφορετικά αντικείμενα. Αυτό σημαίνει, ότι μπορεί να υπάρχει ένας συντελεστής απόδοσης για την μετατροπή του αντικειμένου στο πρώτο στάδιο προς αντίστοιχο αντικείμενο στο δεύτερο στάδιο. Ο δεύτερος τρόπος είναι μεταξύ σταδίων παραγωγής που επεξεργάζονται ίδια αντικείμενα. Η χρήση και των δύο τρόπων σύνδεσης των σταδίων είναι προαιρετική και η επιλογή κάθε τρόπου καθορίζεται αποκλειστικά από την φύση της μονάδας. Το μοντέλο αυτό έχει το πλεονέκτημα, ότι μπορεί να αναπαραστήσει ταυτόχρονα όλα τα στάδια της παραγωγής δίνοντας μια πολύπλευρη εικόνα της μονάδας.

Για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του μοντέλου για την συγκεκριμένη βιομηχανική μονάδα, πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής για διάφορες μελέτες περίπτωσης σε περίοδο μίας εβδομάδας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, που προέκυψαν, το μοντέλο μπορεί να ανταποκριθεί στα διάφορα σενάρια και δεν υπόκειται σε χαρακτηριστικά μοτίβα. Επιπλέον, γίνεται αντιληπτή η χρησιμότητα εφαρμογής του μοντέλου για τον καθορισμό του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, καθώς σε τέτοιου του είδους βιομηχανίες πρέπει να υπάρχει ευέλικτη παραγωγή, ώστε να

ανταποκριθούν στις ανάγκες των καταναλωτών, αλλά και να διαχειριστούν μία πρώτη ύλη, η οποία ανάλογα την εποχή αλλάζει σημαντικά. Έτσι τα ισοζύγια μάζας μεταξύ πρώτης ύλης και τελικού προϊόντος επηρεάζουν πολύ τον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η περίπτωση μεγιστοποίησης της παραγωγής τελικών προϊόντων και κατανάλωσης πρώτων υλών. Για την υλοποίηση της, το μαθηματικό μοντέλο τροποποιήθηκε για να πραγματοποιεί και τα ισοζύγια μάζας μεταξύ των διαφορετικών σταδίων. Παρόλο που τα αποτελέσματα μεγιστοποίησης δεν απαιτούν την χρήση του μοντέλου για να παραχθούν, το νέο αυτό μοντέλο μπορεί να αλλάξει τον τρόπο εισαγωγής των δεδομένων ζήτησης. Έτσι, η παραγωγή μπορεί να καθορίζεται και από την πρώτη ύλη και όχι αποκλειστικά από την ζήτηση. Αυτό είναι αναγκαίο σε τέτοιους είδους βιομηχανίες, καθώς πρέπει να αξιοποιήσουν όλη και όσο το δυνατό πιο γρήγορα τη διαθέσιμη πρώτη ύλη.

Επίσης, έγινε χρήση του μοντέλου για την πιθανή επέκταση της δυναμικότητας της μονάδας. Η επιλογή της γραμμής παραγωγής έγινε με βάση τα δεδομένα της εγκατάστασης και τα αποτελέσματα από τα διάφορα σενάρια. Οπότε, επειδή ανεξάρτητα την περίπτωση, το στάδιο, που καθορίζει την ταχύτητα παραγωγής είναι το 3^ο στάδιο για αυτό το λόγο επιλέχθηκε η νέα γραμμή να είναι όμοια με την Line-7 ή Line-8. Και οι δύο περιπτώσεις έχουν θετικά αποτελέσματα για τη βιομηχανία καθώς μειώνουν από 7 % μέχρι και 30% σε κάποια σενάρια τον χρόνο ολοκλήρωσης της παραγωγής. Παρ' όλ' αυτά για να παρθεί η απόφαση επέκτασης της δυναμικότητας της μονάδας απαιτεί περισσότερη ανάλυση και μελέτη και δεν αρκεί μόνο η παραπάνω μεθοδολογία, αλλά παραμένει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για να βοηθήσει στην λήψη ή μη της απόφασης.

Τέλος, μελετήθηκε και η περίπτωση αφαίρεση μιας γραμμής παραγωγής. Η παύση λειτουργίας μιας συσκευής δεν είναι ένα απίθανο σενάριο, οπότε η καλή προετοιμασία σε μια τέτοια περίπτωση βοηθάει στην ελαχιστοποίηση της πτώση της απόδοσης της βιομηχανικής μονάδας. Για την προσομοίωση αυτής της κατάστασης θεωρήθηκε ότι παύει η λειτουργίας της γραμμής παραγωγής, Line-1, και επιλύεται το μαθηματικό μοντέλο. Αποτελεσματικά, η εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου δίνει γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα, τα οποία μπορούν να βοηθήσουν τον μηχανικό παραγωγής να πάρει γρήγορες αποφάσεις

Συνολικά, αποδείχθηκε ότι το μαθηματικό μοντέλο είναι ικανό να βρει τη βέλτιστη λύση με χαμηλό υπολογιστικό κόστος σε διάφορες περιπτώσεις, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον γρήγορο χρονοπρογραμματισμό παραγωγής. Επιπρόσθετα, το μοντέλο μπορεί να μορφοποιηθεί για να λαμβάνει υπόψη και τη διαθέσιμη πρώτη ύλη. Ακολούθως, το μοντέλο είναι ένα χρήσιμο εργαλείο απόκτησης δεδομένων για την απόφαση επέκτασης ή μη της βιομηχανικής μονάδας, και τέλος με μια μικρή διαφοροποίηση στα

δεδομένα μπορεί να προσομοιώσει και την παύση κάποιας γραμμής παραγωγής βοηθώντας παράλληλα τον μηχανικό παραγωγής να πάρει γρηγορότερες και βέλτιστες αποφάσεις.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε έχει ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης. Για μια πιο σφαιρική εικόνα της μονάδας και τη βελτίωση των αποτελεσμάτων μπορεί να εξεταστεί η χρήση και άλλων διαφορετικών αντικειμενικών συναρτήσεων ή καλύτερα η χρήση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων ταυτόχρονα. Επιπλέον, μπορούν να προστεθούν και περιορισμοί παραγγελιών, οι οποίες έχουν καθορισμένο χρόνο που πρέπει να προετοιμαστούν. Επίσης, η βελτιστοποίηση της βιομηχανίας θα γίνει ακόμα αναλυτικότερη, αν ληφθούν υπόψη και άλλοι διαθέσιμοι πόροι, όπως οι βοηθητικές παροχές, το εργατικό δυναμικό κ.ά. Επιπρόσθετα η χρήση οικονομικών δεδομένων για κάθε ενέργεια, που πραγματοποιείται λόγω του χρονοπρογραμματισμού θα μπορεί να συμβάλλει στην ανάπτυξη του μοντέλου με οικονομικά κριτήρια, όπως η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας ή η μεγιστοποίηση του κέρδους. Εκτός από μια πιο αναλυτική βελτιστοποίηση προτείνεται επίσης η προσπάθεια για περισσότερη γενίκευση του μοντέλου, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ελάχιστες τροποποιήσεις και σε διαφορετικές βιομηχανικές μονάδες και ειδικότερα να βρεθεί μια καλύτερη λύση για την εξασφάλιση σωστών ρυθμών παραγωγής.

Τέλος, μελλοντική μελέτη μπορεί να αποτελέσει το κομμάτι του επαναπρογραμματισμού παραγωγής. Ένα εργαλείο επαναπρογραμματισμού είναι η μέθοδος του κυλιόμενου ορίζοντα. Όλες οι βιομηχανίες γενικά είναι ευαίσθητες στις διαταραχές της αγοράς, αλλά και σε άλλους αβέβαιους παράγοντες, οπότε σε πολλά σενάρια ο επαναπρογραμματισμός είναι αναγκαίος. Πολύ περισσότερο, όμως, είναι αναγκαίος στις βιομηχανίες τροφίμων. Τέτοιου είδους αβέβαιοι παράγοντες μπορεί να είναι μία βλάβη σε κάποιο μηχανολογικό εξοπλισμό ή έλλειψη ανθρωπίνου δυναμικού ή ακόμα και η κακοκαιρία. Η χρήση του συστηματικού επαναπρογραμματισμού μπορεί να περιορίσει αυτές τις πηγές αβεβαιότητας.

6. Βιβλιογραφία

Aguirre, A. M., Liu, S. & Papageorgiou, L. G., 2017. Mixed Integer Linear Programming Based Approaches for Medium-Term Planning and Scheduling in Multiproduct Multistage Continuous Plants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 19 April, Volume 56, pp. 5636-5651.

Baker, K. R., 1974. *Introduction to sequencing and scheduling*. s.l.:Wiley.

Baldo, T. A., Santos, M. O., Almada-Lobo, B. & Morabito, R., 2014. An optimization approach for the lot sizing and scheduling problem in the brewery industry. *Computers & Industrial Engineering*, June, Volume 72, pp. 58-71.

Berruto, R., Tortia, C. & Gay, P., 2006. WINE BOTTLING SCHEDULING OPTIMIZATION. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, January, pp. 291-295.

Ferreira, D., Morabito, R. & Rangel, S., 2009. Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 16 July, 196(2), pp. 697-706.

GAMS, Development Corporation., 2013. *General Algebraic Modeling System (GAMS) Release 24.1.3*. [Online]
Available at: <https://www.gams.com/download/>

Georgiadis, G. P., Elekidis, A. P. & Georgiadis, M. C., 2021. Optimal production planning and scheduling in breweries. *Food and Bioproducts Processing*, January, Volume 125, pp. 204-221.

Georgiadis, G. P., Pampin, B. M., Cabo, D. A. & Georgiadis, M. C., 2020. Optimal production scheduling of food process industries. *Computers & Chemical Engineering*, 4 March, Volume 134.

- Giannelos, N. F. & Georgiadis, M. C., 2002. A Novel Event-Driven Formulation for Short-Term Scheduling of Multipurpose Continuous Processes. *Processes. Industrial & Engineering*, 23 April, pp. 2431-2439.
- Harjunkski, I. et al., 2014. Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods. *Computers & Chemical Engineering*, 5 March, Volume 62, pp. 161-193.
- Kelly, J. D. & Zyngier, D., 2007. An Improved MILP Modeling of Sequence-Dependent Switchovers for Discrete-Time Scheduling Problems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, pp. 4964-4973.
- Kondili, E., Pantelides, C. & Sargent, R., 1993. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations—I. MILP formulation. *Computers & Chemical Engineering*, February, 17(2), pp. 211-227.
- Kopanos, G. M., Puigjaner, L. & Georgiadis, M. C., 2010. Optimal Production Scheduling and Lot-Sizing in Dairy Plants: The Yogurt Production Line. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(2), pp. 701-718.
- Kopanos, G. M., Puigjaner, L. & Georgiadis, M. C., 2011. Production Scheduling in Multiproduct Multistage Semicontinuous Food Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 10 April, pp. 6316-6324.
- Leiva, J. & Albornoz, V., 2016. Short-term Production Scheduling in the Soft Drink Industry. *In Proceedings of 5th the International Conference on Operations Research and Enterprise Systems - ICORES*, pp. 416-423.
- Liu, S., Pinto, J. M. & Papageorgiou, L. G., 2010. Single-Stage Scheduling of Multiproduct Batch Plants: An Edible-Oil Deodorizer Case Study. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 9 August, pp. 8657-8669.
- MATLAB, 2015. Version R2015a, Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc..

- Méndez, C. & Cerdá, J., 2002. An efficient MILP continuous-time formulation for short-term scheduling of multiproduct continuous facilities. *Computers & Chemical Engineering*, 15 May, 26(4-5), pp. 687-695.
- Pagliarussi, M. S., Morabito, R. & Santos, M. O., 2017. Optimizing the production scheduling of fruit juice beverages using mixed integer programming models. *Gest. Prod*, pp. 64-77.
- Pantelides, C. C., 1994. Unified Frameworks for Optimal Process Planning and Scheduling. *Proceedings Second Conference on Foundations of Computer Aided Operations (FOCAPO)*, p. 253–274.
- Polon, P. E. et al., 2017. Production optimization in sausage industry based on the demand of the products. *Food Process Engineering*, 6 November.
- Tirkeş, G., Çelebi, N. & Güray, C., 2021. Developing a Multi-Stage Production Planning and Scheduling Model for a Small-Size Food and Beverage Company. *Européen des Systèmes Automatisés*, 27 April, pp. 273-281.
- Toledo, C., França, P., Morabito, R. & Kimms, A., 2009. Multi-population genetic algorithm to solve the synchronized and integrated two-level lot sizing and scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 9 April, pp. 3097-3119.
- Wari, E. & Weihang, Z., 2016. Multi-week MILP scheduling for an ice cream processing facility. *Computers and Chemical Engineering*, 2 November, Volume 94, pp. 141-156.
- Xie, X. & Li, J., 2012. Modeling, analysis and continuous improvement of food production systems: A case study at a meat shaving and packaging line. *Journal of Food Engineering*, November, 113(2), pp. 344-350.
- Γεωργιάδης, Μ., Ελεκίδης, Α. & Γεωργιάδης, Γ., 2022. *ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ*. 1η Έκδοση επιμ. σ.λ.: Εκδόσεις Τζιόλα.

Παράρτημα Α – Σενάρια Ζήτησης

Πίνακας Α1: Σενάριο Ζήτησης 1

Σενάριο 1	
Προϊόν	Ζήτηση (t)
P-1	194.40
P-2	194.40
P-3	388.80
P-4	97.20
P-5	97.20
P-6	300.00
P-7	300.00
R-1	864.00
R-2	432.00
R-3	432.00

Πίνακας Α2: Σενάριο Ζήτησης 2

Σενάριο 2	
Προϊόν	Ζήτηση (t)
P-1	427.68
P-2	116.64
P-3	388.80
P-4	155.52
P-5	77.76
P-6	360.00
P-7	240.00
R-1	864.00
R-2	432.00
R-3	432.00

Πίνακας Α3: Σενάριο Ζήτησης 3

Σενάριο 3	
Προϊόν	Ζήτηση (t)
P-1	186.62
P-2	145.15
P-3	622.08
P-4	186.62
P-5	41.47
P-6	320.00
P-7	80.00
R-1	691.20
R-2	691.20
R-3	345.60

Πίνακας Α4: Σενάριο Ζήτησης 4

Σενάριο 4	
Προϊόν	Ζήτηση (t)
P-1	466.56
P-2	0.00
P-3	466.56
P-4	58.32
P-5	58.32
P-6	400.00
P-7	400.00
R-1	518.40
R-2	518.40
R-3	259.20

Πίνακας Α5: Σενάριο Ζήτησης 5

Σενάριο 5	
Προϊόν	Ζήτηση (t)
P-1	102.06
P-2	102.06
P-3	544.32
P-4	122.47
P-5	95.26
P-6	244.80
P-7	571.20
R-1	453.60
R-2	604.80
R-3	453.60

Πίνακας Α6: Σενάριο Ζήτησης 6

Σενάριο 6	
Προϊόν	Ζήτηση (t)
P-1	40.82
P-2	122.47
P-3	544.32
P-4	367.42
P-5	13.61
P-6	360.00
P-7	240.00
R-1	453.60
R-2	604.80
R-3	453.60

Πίνακας Α7: Σενάριο ζήτησης 7

Σενάριο 7	
Προϊόν	Ζήτηση (t)
P-1	816.48
P-2	0.00
P-3	349.92
P-4	0.00
P-5	0.00
P-6	600.00
P-7	0.00
R-1	907.20
R-2	388.80
R-3	0.00

Παράρτημα Β – Αποτελέσματα μελετών

Πίνακας Β1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1^ο σεναρίου

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-5	2	48.85	32.40	194.4	6.00
P-1	Line-8	3	48.85	32.40	194.4	6.00
P-2	Line-4	2	48.85	32.40	194.4	6.00
P-2	Line-7	3	48.85	32.40	194.4	6.00
P-3	Line-4	2	113.90	64.80	388.8	6.00
P-3	Line-8	3	113.90	64.80	388.8	6.00
P-4	Line-5	2	16.20	16.20	97.2	6.00
P-4	Line-8	3	16.20	16.20	97.2	6.00
P-5	Line-4	2	16.20	16.20	97.2	6.00
P-5	Line-7	3	16.20	16.20	97.2	6.00
P-6	Line-3	1	86.85	37.50	300	8.00
P-6	Line-6	2	86.85	37.50	300	8.00
P-6	Line-7	3	86.85	37.50	300	8.00
P-7	Line-3	1	37.50	37.50	300	8.00
P-7	Line-6	2	37.50	37.50	300	8.00
P-7	Line-9	3	37.50	37.50	300	8.00
R-1	Line-1	1	48.85	32.40	864	26.67
R-1	Line-2	1	48.85	32.40		
R-2	Line-2	1	113.90	64.80	432	6.67
R-3	Line-1	1	16.20	16.20	432	26.67
R-3	Line-2	1	16.20	16.20		

Πίνακας Β2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 2^{ov} σεναρίου

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-4	2	130.10	25.92	155.52	6.00
P-1	Line-5	2	130.10	45.36	272.16	6.00
P-1	Line-7	3	130.10	25.92	155.52	6.00
P-1	Line-8	3	130.10	45.36	272.16	6.00
P-2	Line-4	2	104.18	19.44	116.64	6.00
P-2	Line-7	3	104.18	19.44	116.64	6.00
P-3	Line-4	2	64.80	64.80	388.80	6.00
P-3	Line-8	3	64.80	64.80	388.80	6.00
P-4	Line-4	2	84.49	6.48	38.88	6.00
P-4	Line-5	2	84.49	19.44	116.64	6.00
P-4	Line-7	3	84.49	6.48	38.88	6.00
P-4	Line-8	3	84.49	19.44	116.64	6.00
P-5	Line-4	2	78.01	12.96	77.76	6.00
P-5	Line-7	3	78.01	12.96	77.76	6.00
P-6	Line-3	1	45.25	45.00	360	8.00
P-6	Line-6	2	45.25	45.00	360	8.00
P-6	Line-7	3	45.25	45.00	360	8.00
P-7	Line-3	1	77.25	30.00	240	8.00
P-7	Line-6	2	77.25	30.00	240	8.00
P-7	Line-9	3	77.25	30.00	240	8.00
R-1	Line-1	1	130.10	45.36	864	19.05
R-1	Line-2	1	130.10	45.36		
R-2	Line-1	1	64.80	64.80	432	6.67
R-3	Line-1	1	84.49	19.44	432	22.22
R-3	Line-2	1	84.49	19.44		

Πίνακας Β3: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 3^{ov} σεναρίου

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-4	2	139.25	3.46	20.74	6.00
P-1	Line-5	2	139.25	27.65	165.89	6.00
P-1	Line-7	3	139.25	3.46	20.74	6.00
P-1	Line-8	3	139.25	27.65	165.89	6.00
P-2	Line-4	2	135.79	24.19	145.15	6.00
P-2	Line-7	3	135.79	24.19	145.15	6.00
P-3	Line-4	2	51.84	51.84	311.04	6.00
P-3	Line-5	2	51.84	51.84	311.04	6.00
P-3	Line-7	3	51.84	51.84	311.04	6.00
P-3	Line-8	3	51.84	51.84	311.04	6.00
P-4	Line-4	2	111.35	12.10	72.58	6.00
P-4	Line-5	2	111.35	19.01	114.05	6.00
P-4	Line-7	3	111.35	12.10	72.58	6.00
P-4	Line-8	3	111.35	19.01	114.05	6.00
P-5	Line-4	2	99.25	6.91	41.47	6.00
P-5	Line-7	3	99.25	6.91	41.47	6.00
P-6	Line-3	1	92.09	40.00	320	8.00
P-6	Line-6	2	92.09	40.00	320	8.00
P-6	Line-7	3	92.09	40.00	320	8.00
P-7	Line-3	1	104.09	10.00	80	8.00
P-7	Line-6	2	104.09	10.00	80	8.00
P-7	Line-9	3	104.09	10.00	80	8.00
R-1	Line-1	1	139.25	27.65	691.20	25.00
R-1	Line-2	1	139.25	27.65		
R-2	Line-1	1	51.84	51.84	691.20	13.33
R-2	Line-2	1	51.84	51.84		
R-3	Line-1	1	111.35	19.01	345.80	18.18
R-3	Line-2	1	111.35	19.01		

Πίνακας Β4: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4^{ov} σεναρίου

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-5	2	77.76	77.76	466.56	6.00
P-1	Line-8	3	77.76	77.76	466.56	6.00
P-3	Line-4	2	126.86	38.88	233.28	6.00
P-3	Line-5	2	126.86	38.88	233.28	6.00
P-3	Line-7	3	126.86	38.88	233.28	6.00
P-3	Line-8	3	126.86	38.88	233.28	6.00
P-4	Line-5	2	87.73	9.72	58.32	6.00
P-4	Line-8	3	87.73	9.72	58.32	6.00
P-5	Line-4	2	87.73	9.72	58.32	6.00
P-5	Line-7	3	87.73	9.72	58.32	6.00
P-6	Line-3	1	50	50	400	8.00
P-6	Line-6	2	50	50	400	8.00
P-6	Line-7	3	50	50	400	8.00
P-7	Line-3	1	102	50	400	8.00
P-7	Line-6	2	102	50	400	8.00
P-7	Line-9	3	102	50	400	8.00
R-1	Line-2	1	77.76	77.76	518.4	6.70
R-2	Line-1	1	126.86	38.88	518.4	13.33
R-2	Line-2	1	126.86	38.88		
R-3	Line-1	1	87.73	9.72	259.2	26.67
R-3	Line-2	1	87.73	9.72		

Πίνακας Β5: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 5^{ov} σεναρίου

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-5	2	111.86	17.01	102.06	6.00
P-1	Line-8	3	111.86	17.01	102.06	6.00
P-2	Line-4	2	111.86	17.01	102.06	6.00
P-2	Line-7	3	111.86	17.01	102.06	6.00
P-3	Line-4	2	94.60	45.36	272.16	6.00
P-3	Line-5	2	94.60	45.36	272.16	6.00
P-3	Line-7	3	94.60	45.36	272.16	6.00
P-3	Line-8	3	94.60	45.36	272.16	6.00
P-4	Line-4	2	48.99	2.27	13.61	6.00
P-4	Line-5	2	48.99	18.14	108.86	6.00
P-4	Line-7	3	48.99	2.27	13.61	6.00
P-4	Line-8	3	48.99	18.14	108.86	6.00
P-5	Line-4	2	46.73	15.88	95.26	6.00
P-5	Line-7	3	46.73	15.88	95.26	6.00
P-6	Line-3	1	30.60	30.60	244.80	8.00
P-6	Line-6	2	30.60	30.60	244.80	8.00
P-6	Line-7	3	30.60	30.60	244.80	8.00
P-7	Line-3	1	104.00	71.40	571.20	8.00
P-7	Line-6	2	104.00	71.40	571.20	8.00
P-7	Line-9	3	104.00	71.40	571.20	8.00
R-1	Line-1	1	111.86	17.01	453.6	26.67
R-1	Line-2	1	111.86	17.01		
R-2	Line-1	1	94.60	45.36	604.8	13.33
R-2	Line-2	1	94.60	45.36		
R-3	Line-1	1	48.99	18.14	453.6	25.00
R-3	Line-2	1	48.99	18.14		

Πίνακας Β6: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 6^{ov} σεναρίου

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-5	2	143.27	20.41	40.82	2.00
P-1	Line-8	3	143.27	20.41	40.82	2.00
P-2	Line-4	2	143.27	20.41	122.47	6.00
P-2	Line-7	3	143.27	20.41	122.47	6.00
P-3	Line-4	2	122.61	45.36	272.16	6.00
P-3	Line-5	2	122.61	45.36	272.16	6.00
P-3	Line-7	3	122.61	45.36	272.16	6.00
P-3	Line-8	3	122.61	45.36	272.16	6.00
P-4	Line-4	2	31.75	29.48	176.90	6.00
P-4	Line-5	2	31.75	31.75	190.51	6.00
P-4	Line-7	3	31.75	29.48	176.90	6.00
P-4	Line-8	3	31.75	31.75	190.51	6.00
P-5	Line-4	2	2.27	2.27	13.61	6.00
P-5	Line-7	3	2.27	2.27	13.61	6.00
P-6	Line-3	1	77.00	45.00	360	8.00
P-6	Line-6	2	77.00	45.00	360	8.00
P-6	Line-7	3	77.00	45.00	360	8.00
P-7	Line-3	1	109.00	30.00	240	8.00
P-7	Line-6	2	109.00	30.00	240	8.00
P-7	Line-9	3	109.00	30.00	240	8.00
R-1	Line-1	1	143.27	20.41	453.6	22.22
R-1	Line-2	1	143.27	20.41		
R-2	Line-1	1	122.61	45.36	604.8	13.33
R-2	Line-2	1	122.61	45.36		
R-3	Line-1	1	31.75	31.75	453.6	14.29
R-3	Line-2	1	31.75	31.75		

Πίνακας Β7: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 7^ο σεναρίου

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-5	2	136.08	136.08	816.48	6.00
P-1	Line-8	3	136.08	136.08	816.48	6.00
P-3	Line-4	2	58.32	58.32	349.92	6.00
P-3	Line-7	3	58.32	58.32	349.92	6.00
P-6	Line-3	1	134.07	75	600	8.00
P-6	Line-6	2	134.07	75	600	8.00
P-6	Line-7	3	134.07	75	600	8.00
R-1	Line-1	1	136.08	136.08	907.2	6.67
R-2	Line-2	1	58.32	58.32	388.8	6.67

Πίνακας Β8: Αποτελέσματα μεγιστοποίησης της κατανάλωσης πρώτης ύλης

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-5	2	144	144	864	6
P-1	Line-8	3	144	144	864	6
P-2	Line-4	2	144	144	864	6
P-2	Line-7	3	144	144	864	6
P-7	Line-3	1	144	144	1152	8
P-7	Line-6	2	144	144	1152	8
P-7	Line-9	3	144	144	1152	8
R-1	Line-1	1	144	144	1680	11.67
R-1	Line-2	1	144	144	2160	15

Πίνακας Β9: Αποτελέσματα μεγιστοποίησης της παραγωγής προϊόντων

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-4	2	144	144	864	6
P-1	Line-5	3	144	144	864	6
P-1	Line-7	2	144	144	864	6
P-1	Line-8	3	144	144	864	6
P-7	Line-3	1	144	144	1152	8
P-7	Line-6	2	144	144	1152	8
P-7	Line-9	3	144	144	1152	8
R-1	Line-1	1	144	144	1056	7.33
R-1	Line-2	1	144	144	864	6

Πίνακας Β10: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1^{ου} σεναρίου με την προσθήκη μιας καινούργιας γραμμής παραγωγής όμοια με την Line-7

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-5	2	32.40	32.40	194.4	6
P-1	Line-8	3	32.40	32.40	194.4	6
P-2	Line-4	2	32.40	32.40	194.4	6
P-2	Line-7	3	32.40	32.40	194.4	6
P-3	Line-4	2	81.50	32.40	194.4	6
P-3	Line-5	2	81.50	32.40	194.4	6
P-3	Line-8	3	81.50	32.40	194.4	6
P-3	Line-10	3	81.50	32.40	194.4	6
P-4	Line-5	2	48.85	16.20	97.2	6
P-4	Line-8	3	48.85	16.20	97.2	6
P-5	Line-4	2	48.85	16.20	97.2	6
P-5	Line-10	3	48.85	16.20	97.2	6
P-6	Line-3	1	78	37.50	300	8
P-6	Line-6	2	78	37.50	300	8
P-6	Line-7	3	78	37.50	300	8
P-7	Line-3	1	37.50	37.50	300	8
P-7	Line-6	2	37.50	37.50	300	8
P-7	Line-9	3	37.50	37.50	300	8
R-1	Line-1	1	32.40	32.40	864	26.67
R-1	Line-2	1	32.40	32.40		
R-2	Line-1	1	81.50	32.40	432	13.33
R-2	Line-2	1	81.50	32.40		
R-3	Line-1	1	48.85	16.20	432	26.67
R-3	Line-2	1	48.85	16.20		

Πίνακας Β11: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 1^{ου} σεναρίου με την αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας Line-1

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-5	2	32.40	32.40	194.40	6.00
P-1	Line-8	3	32.40	32.40	194.40	6.00
P-2	Line-4	2	32.40	32.40	194.40	6.00
P-2	Line-7	3	32.40	32.40	194.40	6.00
P-3	Line-5	2	109.15	64.80	388.80	6.00
P-3	Line-8	3	109.15	64.80	388.80	6.00
P-4	Line-5	2	125.60	16.20	97.20	6.00
P-4	Line-8	3	125.60	16.20	97.20	6.00
P-5	Line-4	2	125.60	16.20	97.20	6.00
P-5	Line-7	3	125.60	16.20	97.20	6.00
P-6	Line-3	1	69.90	37.50	300	8.00
P-6	Line-6	2	69.90	37.50	300	8.00
P-6	Line-7	3	69.90	37.50	300	8.00
P-7	Line-3	1	109.40	37.50	300	8.00
P-7	Line-6	2	109.40	37.50	300	8.00
P-7	Line-9	3	109.40	37.50	300	8.00
R-1	Line-2	1	32.40	32.40	86	26.67
R-1	Line-3	1	32.40	32.40		
R-2	Line-2	1	109.15	64.80	432	6.67
R-3	Line-2	1	125.60	16.20	432	26.67
R-3	Line-3	1	125.60	16.20		

Πίνακας Β12: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 2^{ου} σεναρίου με την αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας Line-1

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-4	2	45.36	25.92	155.52	6.00
P-1	Line-5	2	45.36	45.36	272.16	6.00
P-1	Line-7	3	45.36	25.92	155.52	6.00
P-1	Line-8	3	45.36	45.36	272.16	6.00
P-2	Line-4	2	19.44	19.44	116.64	6.00
P-2	Line-7	3	19.44	19.44	116.64	6.00
P-3	Line-4	2	122.11	64.8	388.80	6.00
P-3	Line-8	3	122.11	64.8	388.80	6.00
P-4	Line-4	2	141.8	6.48	38.88	6.00
P-4	Line-5	2	141.8	19.44	116.64	6.00
P-4	Line-7	3	141.8	6.48	38.88	6.00
P-4	Line-8	3	141.8	19.44	116.64	6.00
P-5	Line-4	2	135.32	12.96	77.76	6.00
P-5	Line-7	3	135.32	12.96	77.76	6.00
P-6	Line-3	1	90.36	45	360	8.00
P-6	Line-6	2	90.36	45	360	8.00
P-6	Line-7	3	90.36	45	360	8.00
P-7	Line-3	1	122.36	30	240	8.00
P-7	Line-6	2	122.36	30	240	8.00
P-7	Line-9	3	122.36	30	240	8.00
R-1	Line-2	1	45.36	45.36	864	19.05
R-1	Line-3	1	45.36	45.36		
R-2	Line-2	1	122.11	64.8	432	6.67
R-3	Line-2	1	141.8	19.44	432	22.22
R-3	Line-3	1	141.8	19.44		

Πίνακας Β13: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 4^ο σεναρίου με την αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας Line-1

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-4	2	38.88	38.88	466.56	6.00
P-1	Line-5	2	38.88	38.88	466.56	6.00
P-1	Line-7	3	38.88	38.88	233.28	6.00
P-1	Line-8	3	38.88	38.88	233.28	6.00
P-3	Line-5	2	116.89	77.76	233.28	6.00
P-3	Line-8	3	116.89	77.76	233.28	6.00
P-4	Line-5	2	150.60	9.72	58.32	6.00
P-4	Line-8	3	150.60	9.72	58.32	6.00
P-5	Line-4	2	150.60	9.72	58.32	6.00
P-5	Line-7	3	150.60	9.72	58.32	6.00
P-6	Line-3	1	88.88	50	400	8.00
P-6	Line-6	2	88.88	50	400	8.00
P-6	Line-7	3	88.88	50	400	8.00
P-7	Line-3	1	140.88	50	400	8.00
P-7	Line-6	2	140.88	50	400	8.00
P-7	Line-9	3	140.88	50	400	8.00
R-1	Line-2	1	38.88	38.88	518.40	13.33
R-1	Line-3	1	38.88	38.88		
R-2	Line-2	1	116.89	77.76	518.40	6.67
R-3	Line-2	1	150.60	9.72	259.20	26.67
R-3	Line-3	1	150.60	9.72		

Πίνακας Β14: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής 6^ο σεναρίου με την αφαίρεση της γραμμής προετοιμασίας Line-1

Προϊόν/ Πρώτη ύλη	Γραμμή Παραγωγής	Στάδιο	Χρόνος ολοκλήρωσης (h)	Χρόνος επεξεργασίας (h)	Επεξεργαζόμενη ποσότητα (t)	Ρυθμός παραγωγής (t/h)
P-1	Line-5	2	20.41	20.41	40.82	2.00
P-1	Line-8	3	20.41	20.41	40.82	2.00
P-2	Line-4	2	20.41	20.41	122.47	6.00
P-2	Line-7	3	20.41	20.41	122.47	6.00
P-3	Line-5	2	143.38	90.72	544.32	6.00
P-3	Line-8	3	143.38	90.72	544.32	6.00
P-4	Line-4	2	52.41	29.48	176.90	6.00
P-4	Line-5	2	52.41	31.75	190.51	6.00
P-4	Line-7	3	52.41	29.48	176.90	6.00
P-4	Line-8	3	52.41	31.75	190.51	6.00
P-5	Line-4	2	22.93	2.27	13.61	6.00
P-5	Line-7	3	22.93	2.27	13.61	6.00
P-6	Line-3	1	97.66	45.00	360	8.00
P-6	Line-6	2	97.66	45.00	360	8.00
P-6	Line-7	3	97.66	45.00	360	8.00
P-7	Line-3	1	129.66	30.00	240	8.00
P-7	Line-6	2	129.66	30.00	240	8.00
P-7	Line-9	3	129.66	30.00	240	8.00
R-1	Line-2	1	20.41	20.41	453.60	22.22
R-1	Line-3	1	20.41	20.41		
R-2	Line-2	1	143.38	90.72	604.80	6.67
R-3	Line-2	1	52.41	31.75	453.60	14.29
R-3	Line-3	1	52.41	31.75		