



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

**ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΡΥΘΜΙΣΗΣ
ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ
(Α.Σ.Ρ.Χ.Δ.Ε.)**

**Βελτιστοποίηση του Σχεδιασμού και Χρονοπρογραμματισμού
Παραγωγής σε Ζυθοποιία**

Διπλωματική Εργασία του

Παπαντωνίου Λιβέριου

(ΑΕΜ: 4687)

Επιβλέπων: Καθηγητής Μιχαήλ Γεωργιάδης

Συνεπιβλέπων: Γεώργιος Γεωργιάδης, Υποψήφιος Διδάκτορας

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Μάρτιος 2019

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την ανάπτυξη και εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε μια ζυθοποιία. Η διαδικασία παραγωγής της μπίρας αποτελείται από πολλά στάδια μεγάλης διάρκειας, ωστόσο δύο από αυτά, το στάδιο της ζύμωσης και το στάδιο της εμφιάλωσης, αποτελούν σημεία συμφόρησης της παραγωγής. Ο σχεδιασμός παραγωγής επικεντρώνεται και στα δύο στάδια συμφόρησης ενώ ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής μόνο σε αυτό της εμφιάλωσης. Το μοντέλο αποτελείται από περιορισμούς ισοζυγίων μάζας, δυναμικότητας των συσκευών, χρόνων αλλαγής της παραγωγής αλλά και διαχείρισης αποθέματος. Στην περίπτωση του σχεδιασμού της παραγωγής ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της ανικανοποίητης μηνιαίας ζήτησης σε βάθος ενός έτους, ενώ στην περίπτωση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, η ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των βαρδιών κάθε μήνα. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό βελτιστοποίησης GAMS με τη χρήση του επιλυτή ILOG CPLEX. Στη συνέχεια, το προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για το πρόβλημα σχεδιασμού και χρονοπρογραμματισμού της Ζυθοποιίας Μακεδονίας Θράκης, ενώ μελετήθηκαν διάφορες ρεαλιστικές περιπτώσεις της βιομηχανίας υπό εξέταση. Για την επίλυση του προβλήματος αξιοποιήθηκαν και συνδυάστηκαν δύο ευρετικές μέθοδοι, αυτή του κυλιόμενου ορίζοντα και η μέθοδος χαλάρωσης και ορισμού. Στην πρώτη περίπτωση, μελετήθηκε ο σχεδιασμός παραγωγής χρησιμοποιώντας την μέθοδο του κυλιόμενου ορίζοντα σε συνδυασμό με περιορισμούς ελαχίστου αποθέματος. Βρέθηκε ότι με τη χρήση αυτής της τεχνικής η προβλεπόμενη ζήτηση ικανοποιείται πλήρως. Στη δεύτερη μελέτη, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του κυλιόμενου ορίζοντα σε συνδυασμό με την μέθοδο της χαλάρωσης και ορισμού. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν την ανωτερότητα αυτής της μεθόδου, αφού κατέληξε σε εφάμιλλη λύση σε σημαντικά λιγότερο χρόνο. Έπειτα, εξετάστηκε η περίπτωση μεταβολής της προβλεπόμενης ζήτησης. Σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται ο επανασχεδιασμός της παραγωγής, ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη λειτουργία της ζυθοποιίας. Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της δεύτερης μελέτης και αποδείχτηκε ότι με τη χρήση της είναι δυνατή η επιτυχής αντιμετώπιση της μεταβολής της ζήτησης, ωστόσο με αυξημένο υπολογιστικό κόστος. Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα του σχεδιασμού παραγωγής, μελετήθηκε το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού για την ελαχιστοποίηση των απαραίτητων βαρδιών για την εμφιάλωση των προϊόντων. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική μείωση στις συνολικές βάρδιες και κατ'επέκταση στο συνολικό κόστος παραγωγής της ζυθοποιίας.

Abstract

This diploma thesis aims at the development of a mixed-integer linear programming model for the optimization of production planning and scheduling of a brewery plant. The production of beer consists of different stages typically characterized by long processing times. Two of them are the main production bottlenecks, the stage of fermentation/maturation and bottling. Production planning focuses on the bottleneck stages, while production scheduling considers the bottling stage. The model includes constraints such as mass balances, equipment capacities, changeover times and inventory levels. The main goal of production planning is to minimize the backlog over a time horizon of one year. On the other hand, production scheduling aims to minimize the total number of shifts in each month. The model was implemented and solved using the GAMS (General Algebraic Modeling System) optimization software and the ILOG CPLEX solver. The proposed model was then used for the production planning and scheduling of a real-world plant, the Macedonian Thrace Brewery. Two solution techniques were investigated to reduce the computation cost of the model, the rolling horizon and the relax and fix heuristics. In the first case a rolling horizon heuristic was employed and a minimum inventory level constraint was imposed, resulting in the full satisfaction of the forecasted demand. In the second case studied, a combination of the rolling horizon and a relax and fix heuristics was used. Results indicate the efficiency of the proposed method and its reduced computational effort. Then, a new case study was considered in which the forecasted demand was changed, thus the replanning of the production was required to ensure an economically attractive operation of the plant. The combination of the rolling horizon and relax and fix heuristic was proved to be the most efficient method, resulting in full demand satisfaction, despite the computation cost increase. Finally, based on the results of the production planning, a production scheduling problem was solved to minimize the total number of shifts required to satisfy the product demand. The results demonstrated a significant reduction in the total number of shifts, as well as a reduction in the total operating costs.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω βαθιά ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κύριο Μιχαήλ Γεωργιάδη ο οποίος με ενέπνευσε να ασχοληθώ με τον συγκεκριμένο επιστημονικό τομέα, όπως και για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την διπλωματική μου εργασία υπό την εποπτεία του. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις συμβουλές, την καθοδήγηση και τη σπουδαία συνεργασία κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου στο τμήμα.

Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας θα ήταν σχεδόν αδύνατη χωρίς τη συμβολή του υποψήφιου διδάκτορα Γεώργιου Γεωργιάδη ο οποίος με βοήθησε στην εύρεση βιβλιογραφικού υλικού, στην κατανόηση των προβλημάτων που προέκυψαν και στην επίλυσή τους καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά τους υπεύθυνους της Ζυθοποιίας Μακεδονίας Θράκης για την προμήθεια των απαραίτητων δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ως μελέτη περιπτώσεων κατά την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου, καθώς και για το χρόνο που διέθεσαν τους προηγούμενους μήνες.

Πολλές ευχαριστίες οφείλω στους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Νίκη, για την ανατροφή και την αμέτρητη αρωγή που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια, τη γιαγιά μου, Μαγδαληνή, για την οικονομική συμβολή χωρίς την οποία ίσως δεν είχα τη δυνατότητα να σπουδάσω και τα αδέρφια μου, Τρύφωνα και Ελένη, για την αμέριστη συμπαράστασή τους σε όλες τις φάσεις της ζωής μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, για όλες τις όμορφες στιγμές που περάσαμε μαζί, τους συμφοιτητές χωρίς τη βοήθεια των οποίων θα παρέμενα φοιτητής για καιρό ακόμα, και τη Βασιλική που κάνει το χρόνο να κυλά πιο γλυκά.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	1
2	Διαδικασία Παραγωγής.....	9
2.1	Βυνοποίηση	10
2.2	Ζυθοποίηση	11
2.3	Ζύμωση.....	15
2.4	Φιλτράρισμα	16
2.5	Εμφιαλωτήριο.....	16
2.6	Εμβαρέλωση.....	20
3	Ανάπτυξη Μαθηματικού Μοντέλου	21
3.1	Βιβλιογραφικό Μοντέλο.....	21
3.2	Μοντέλο Σχεδιασμού Παραγωγής.....	27
3.3	Μοντέλο Χρονοπρογραμματισμού Παραγωγής.....	30
3.4	Ευρετικοί Αλγόριθμοι.....	31
4	Αποτελέσματα-Μελέτη Περιπτώσεων	34
4.1	Εισαγωγή	34
4.2	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Σχεδιασμού Παραγωγής.....	35
4.3	Αποτελέσματα Χρονοπρογραμματισμού Παραγωγής	58
5	Συμπεράσματα – Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα.....	61
5.1	Συμπεράσματα.....	61
5.2	Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	63
	Βιβλιογραφία.....	65
	Παράρτημα.....	68

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Πυραμίδα διοίκησης επιχειρήσεων (SANDSTRÖM, 2015).	1
Σχήμα 2.1: Γενική παραγωγική διαδικασία της μπύρας.	10
Σχήμα 3.1: Απεικόνιση της μεθόδου με κυλιόμενο ορίζοντα (Lu, et al., 2016).	32
Σχήμα 3.2: Απεικόνιση της μεθόδου χαλάρωσης και ορισμού (Deeratanasrikul & Mizuno, 2017).	33
Σχήμα 4.1: Επίπεδα αποθέματος με βάση τον τύπο του υγρού μέσα στο έτος.	37
Σχήμα 4.2: Επίπεδα αποθέματος των προϊόντων μέσα στο έτος.	38
Σχήμα 4.3: Παραγόμενη ποσότητα υγρού κατά τη διάρκεια ενός έτους.	39
Σχήμα 4.4: Παραγόμενη ποσότητα υγρού τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο.	39
Σχήμα 4.5: Έτοιμο για εμφιάλωση, αποθηκευμένο υγρό ζύθου.	40
Σχήμα 4.6: Το ετήσιο πρόγραμμα της συνολικής παραγωγής, όπως προκύπτει κατά το σχεδιασμό παραγωγής.	41
Σχήμα 4.7: Αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής δύο μηνών με χαμηλή ζήτηση.	41
Σχήμα 4.8: Αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής δύο μηνών με υψηλή ζήτηση.	42
Σχήμα 4.9: Ημερήσια λειτουργία της γραμμής εμφιάλωσης σε βάθος ενός έτους.	42
Σχήμα 4.10: Ημερήσια λειτουργία της γραμμής εμβάρωσης σε βάθος ενός έτους.	43
Σχήμα 4.11: Επίπεδα αποθέματος με βάση τον τύπο του υγρού μέσα στο έτος.	45
Σχήμα 4.12: Επίπεδα αποθέματος των προϊόντων μέσα στο έτος.	45
Σχήμα 4.13: Παραγόμενη ποσότητα υγρού κατά τη διάρκεια ενός έτους.	46
Σχήμα 4.14: Παραγόμενη ποσότητα υγρού τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο.	47
Σχήμα 4.15: Έτοιμο για εμφιάλωση, αποθηκευμένο υγρό ζύθου.	47
Σχήμα 4.16: Το ετήσιο πρόγραμμα της συνολικής παραγωγής, όπως προκύπτει κατά το σχεδιασμό παραγωγής.	48
Σχήμα 4.17: Αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής δύο μηνών με χαμηλή ζήτηση.	49
Σχήμα 4.18: Αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής δύο μηνών με υψηλή ζήτηση.	49
Σχήμα 4.19: Ημερήσια λειτουργία της γραμμής εμφιάλωσης σε βάθος ενός έτους.	50

Σχήμα 4.20: Ημερήσια λειτουργία της γραμμής εμβαρέλωσης σε βάθος ενός έτους.	50
Σχήμα 4.21: Επίπεδα αποθέματος με βάση τον τύπο του υγρού μέσα στο έτος.....	52
Σχήμα 4.22: Επίπεδα αποθέματος των προϊόντων μέσα στο έτος.	53
Σχήμα 4.23: Παραγόμενη ποσότητα υγρού κατά τη διάρκεια ενός έτους.	53
Σχήμα 4.24: Παραγόμενη ποσότητα υγρού τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο.	54
Σχήμα 4.25: Έτοιμο για εμφιάλωση, αποθηκευμένο υγρό ζύθου.	54
Σχήμα 4.26: Το ετήσιο πρόγραμμα της συνολικής παραγωγής, όπως προκύπτει κατά το σχεδιασμό παραγωγής.	55
Σχήμα 4.27: Αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής δύο μηνών με χαμηλή ζήτηση.....	56
Σχήμα 4.28: Αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής δύο μηνών με υψηλή ζήτηση.	56
Σχήμα 4.29: Ημερήσια λειτουργία της γραμμής εμφιάλωσης σε βάθος ενός έτους.....	57
Σχήμα 4.30: Ημερήσια λειτουργία της γραμμής εμβαρέλωσης σε βάθος ενός έτους.	57
Σχήμα 4.31: Συγκριτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης της παραγωγής τον Ιανουάριο.	59
Σχήμα 4.32: Συγκριτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης της παραγωγής τον Απρίλιο.	59
Σχήμα 4.33: Συγκριτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης της παραγωγής τον Ιούνιο.	60
Σχήμα 4.34: Συγκριτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης της παραγωγής τον Ιούλιο.	60

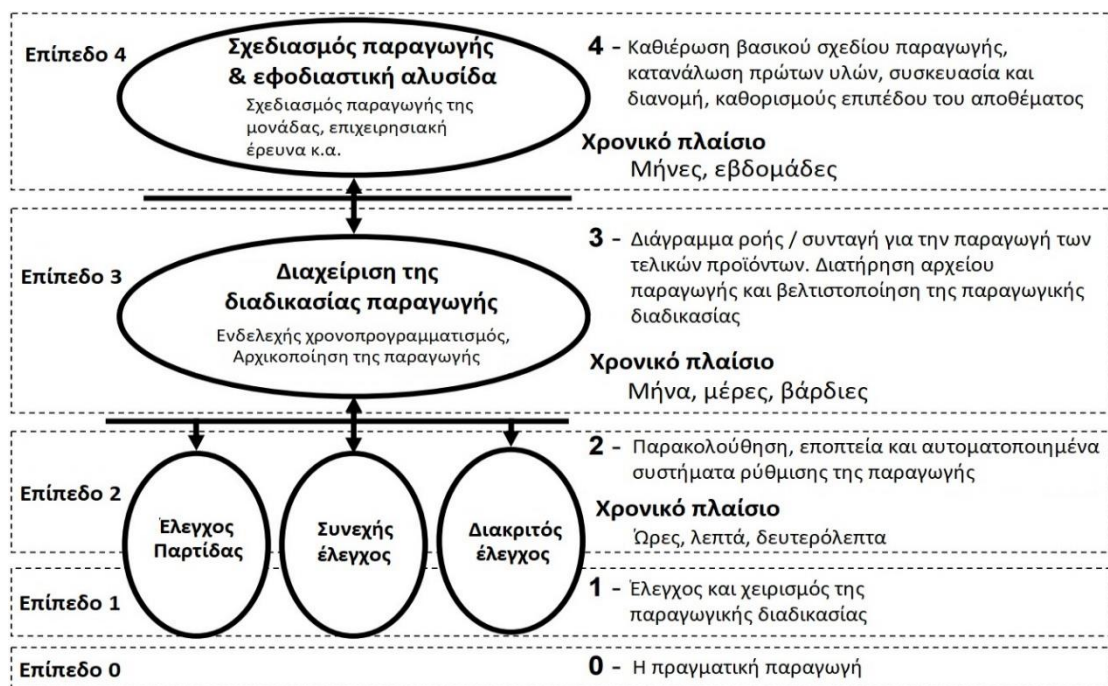
Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Πίνακας προϊόντων.....	9
Πίνακας 2: Πίνακας τελικών προϊόντων της Ζυθοποιίας Μακεδονίας Θράκης.....	35
Πίνακας 3: Ελάχιστη ποσότητα αποθέματος στο τέλος κάθε τετραμήνου.....	36
Πίνακας 4: Χρόνος επίλυσης κάθε τετραμήνου.....	37
Πίνακας 5: Χρόνος επίλυσης κάθε μήνα.....	44
Πίνακας 6: Χρόνος επίλυσης κάθε μήνα.....	51

1 Εισαγωγή

Το σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από έντονο ανταγωνισμό σε μία παγκόσμια αγορά. Είναι σημαντικό, λοιπόν, για μια βιομηχανία να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των πελατών, παράγοντας μεγάλη ποικιλία τελικών προϊόντων στο μικρότερο δυνατό χρονικό διάστημα και στο ελάχιστο κόστος. Έτσι, τα περιθώρια κέρδους ελαττώνονται, ενώ η ανάγκη για τη βέλτιστη λειτουργία της γραμμής παραγωγής αυξάνεται και είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της βιωσιμότητάς μιας μονάδας. Η πολυπλοκότητα των συστημάτων παραγωγής σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ανάγκη για βελτιστοποίηση της παραγωγής απαιτεί την αξιοποίηση υπολογιστικών εργαλείων και μαθηματικής μοντέλοποίησης για τη λήψη αποφάσεων.

Η λήψη αποφάσεων σε μία παραγωγική διαδικασία είναι μία πολυεπίπεδη διαδικασία που εμπλέκει τη μεταφορά και αξιοποίηση πληροφοριών από το στάδιο της παραγωγής σε πραγματικό χρόνο μέχρι το στάδιο του σχεδιασμού παραγωγής, όπως αυτή παριστάνεται στο σχήμα 1.1. Ο σχεδιασμός και ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής ανήκουν στο 4^ο και 3^ο επίπεδο λήψης αποφάσεων αντίστοιχα και είναι μείζονος σημασίας για την εύρυθμη λειτουργία μιας παραγωγικής διαδικασίας. Προβλήματα σχεδιασμού και χρονοπρογραμματισμού παραγωγής εμφανίζονται σε όλων των ειδών βιομηχανίες (βιομηχανία χαρτιού, μεταλλουργία, επεξεργασίας



Σχήμα 1.1: Πυραμίδα διοίκησης επιχειρήσεων (SANDSTRÖM, 2015).

πετρελαίου, χημικών, τροφίμων, φαρμακευτικών σκευασμάτων, κ.α.) (Harjunkoski I., et al. 2014).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια συστηματική προσπάθεια για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και χρονοπρογραμματισμού παραγωγής βιομηχανιών με χρήση μαθηματικών μοντέλων. Ο σχεδιασμός παραγωγής (production planning) είναι η διαδικασία καθορισμού του γενικού πλάνου παραγωγής για την κάλυψη της ζήτησης και την ικανοποίηση οποιουδήποτε άλλου στόχου της βιομηχανίας (π.χ. προσδιορισμός του επιπέδου του ελάχιστου αποθέματος), σε ένα μακροχρόνιο ορίζοντα (εβδομάδες, μήνες, χρόνο) (Fargher & Smith, 1992). Ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής (production scheduling) είναι η κατανομή περιορισμένων πόρων για την παραγωγή ενός ή περισσότερων προϊόντων, ακολουθώντας μια συγκεκριμένη συνταγή, σε ένα βραχυπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα (ώρες, μέρες, εβδομάδες) (Mendez, C., et al. 2006). Η βελτιστοποίηση σχεδιασμού και χρονοπρογραμματισμού παραγωγής πραγματοποιείται με βάση μία αντικειμενική συνάρτηση, ενώ η λύση πρέπει να ικανοποιεί λειτουργικούς και σχεδιαστικούς περιορισμούς όπως ισοζύγια μάζας, κάλυψη της ζήτησης, δυναμικότητες εξοπλισμού, απαιτήσεις αποθέματος κ.α. Ο στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να είναι η ελαχιστοποίηση του αποθέματος, η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραγωγής (makespan), η ελαχιστοποίηση των αλλαγών από την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος σε ένα άλλο (changeover), η ελαχιστοποίηση της χαμένης πρώτης ύλης ή ανακύκλωσης, η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, η μεγιστοποίηση του κέρδους ή άλλοι.

Ο Kallrath (2002) αναφέρει πως ο σχεδιασμός και ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής, μολονότι αποτελούν διαφορετικά προβλήματα με ξεχωριστούς στόχους, παρουσιάζουν σημαντικές αλληλεπιδράσεις όσον αφορά τη μοντελοποίηση τους. Στη συνέχεια, υποδεικνύει πως ο σχεδιασμός παραγωγής χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πλάνων παραγωγής, διανομής, πωλήσεων και αποθέματος, βάσει προβλέψεων και ενδείξεων της αγοράς. Με βάση το πρόγραμμα που προκύπτει από το σχεδιασμό παραγωγής εκτελείται ο λεπτομερής χρονοπρογραμματισμός παραγωγής, προσδιορίζοντας ακριβείς ημερομηνίες και χρόνους παραγωγής, όπως και τη σειρά παραγωγής προϊόντων και την κατανομή τους στον εξοπλισμό.

Για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό και χρονοπρογραμματισμό παραγωγής έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί προηγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης και μαθηματικής μοντελοποίησης.

Οι Kondili, et al. (1993), πρώτοι ανέπτυξαν ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού χρονοπρογραμματισμού χρησιμοποιώντας την απεικόνιση STN (State-Task Network), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση γενικευμένων προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής με διεργασίες διαλείπουσας λειτουργίας. Η απεικόνιση του χρόνου γίνεται με τη χρήση διακριτοποιημένου χρονικού ορίζοντα. Για τη δημιουργία του STN η πρώτη ύλη, τα ενδιάμεσα και τελικά προϊόντα απεικονίζονται ως “καταστάσεις” (States) με σχήμα κύκλου, ενώ οι διεργασίες μετατροπής απεικονίζονται ως “διεργασίες” (Tasks) σε σχήμα ορθογωνίου. Την επόμενη χρονιά ο Pantelides (1994) πρότεινε την απεικόνιση RTN (Resource Task Network), όπου ως “πόρος” (Resource) αναφέρονται όλες οι πρώτες ύλες, τα ενδιάμεσα και τελικά προϊόντα, οι βοηθητικές παροχές, οι συσκευές (αντιδραστήρες, δεξαμενές κτλ.) και οι καταστάσεις των συσκευών (έτοιμη για χρήση, χρησιμοποιημένη κτλ.) και ως “διεργασία” (Task) η διαδικασία κατά την οποία ένα σετ πόρων μετατρέπεται σε ένα άλλο σετ πόρων.

Οι Giannelos & Georgiadis (2002) πρότειναν ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού με χρήση της απεικόνισης STN, το οποίο περιλαμβάνει διεργασίες συνεχούς λειτουργίας και επιτρέπει την πεπερασμένη αποθήκευση των ενδιάμεσων προϊόντων. Το μοντέλο που διαμορφώθηκε είχε ως αντικειμενική συνάρτηση τη μεγιστοποίηση του κέρδους της μονάδας. Στη συνέχεια οι Maravelias και Grossmann (2003) διαμόρφωσαν ένα μοντέλο βασισμένο στην απεικόνιση STN προσθέτοντας περιορισμούς για τη διαθεσιμότητα των πόρων.

Ο Meyr (2000) παρουσίασε ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού. Το μοντέλο αφορά μονάδες παραγωγής με μία μόνο γραμμή παραγωγής όπου οι αλλαγές από την παραγωγή ενός προϊόντος σε ένα άλλο παρουσιάζουν εξάρτηση από τη σειρά εκτέλεσης. Το μοντέλο αυτό έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους αποθέματος και το κόστος των μεταβάσεων της παραγωγής, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιεί την απαραίτητη ζήτηση υπολογίζοντας τα βέλτιστα μεγέθη παρτίδας (lot-sizing). Ο χρονικός ορίζοντας που χρησιμοποιήθηκε χωρίστηκε σε μικροπεριόδους και

μακροπερίόδους. Για την επίλυση του μοντέλου είναι αναγκαίο να οριστεί από πριν το ποσό των μικροπεριόδων που αποτελούν μία μακροπερίοδο. Στη συνέχεια, ο Meyr (2002) επέκτεινε το μοντέλο προσθέτοντας τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων με πολλές παράλληλες, ανόμοιες γραμμές παραγωγής.

Οι Clark A. & Clark S. (2000) ανέπτυξαν ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού σε μία μονάδα με παράλληλες γραμμές παραγωγής, με στόχο το βέλτιστο μέγεθος παρτίδας (optimal lot-sizing problem). Στο μοντέλο συμπεριλαμβάνονται περιορισμοί για τις μεταβάσεις από την παραγωγή ενός προϊόντος σε ένα άλλο, καθώς η σειρά με την οποία πραγματοποιούνται επηρεάζουν την αποδοτικότητα της παραγωγής. Το μοντέλο που προέκυψε αν και αποδοτικό είναι ιδιαίτερα μεγάλο και συνεπώς επίλυση του είναι αδύνατο σε αποδεκτό υπολογιστικό χρόνο. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε η ευρετική μέθοδος του Κυλιόμενου Ορίζοντα (Rolling Horizon Heuristic). Κατά τη μέθοδο αυτή, ο χρονικός ορίζοντας χωρίζεται σε δύο κομμάτια, το πρώτο που λύνεται περιγράφοντας αναλυτικά την παραγωγή και το δεύτερο, στο οποίο υπολογίζονται κυρίως τα ισοζύγια μάζας και το επίπεδο του αποθέματος.

Οι Méndez & Cerdá (2002) κατασκεύασαν ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού για μονάδες πολλαπλών τελικών προϊόντων όπου πραγματοποιούνται, εξαρτώμενες από την αλληλουχία, συνεχείς διεργασίες παραγωγής ενδιάμεσων ή τελικών προϊόντων. Ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους ικανοποιώντας περιορισμούς ελάχιστου αποθέματος και χρησιμοποιώντας δεξαμενές αποθήκευσης των ενδιάμεσων προϊόντων. Ο χρονικός ορίζοντας που χρησιμοποιείται είναι συνεχής, ενώ η μοντελοποίηση έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε οι δυαδικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται να είναι ελάχιστες, καθώς αυτές αυξάνουν πολύ το υπολογιστικό κόστος επίλυσης.

Ο Clark (2005) παρουσίασε ένα μοντέλο για ταυτόχρονο σχεδιασμό και χρονοπρογραμματισμό παραγωγής. Το μοντέλο έχει ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του κόστους του αποθέματος και του κόστους της αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης σε διακριτοποιημένο χρονικό ορίζοντα μήκους T περιόδων. Σχεδιασμός παραγωγής πραγματοποιείται για όλες τις περιόδους ενώ χρονοπρογραμματισμός παραγωγής μόνο για την πρώτη. Για την επίλυση του μοντέλου χρησιμοποίησε τον επιλυτή

CPLEX, ωστόσο, λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους, για την επίλυση χρησιμοποιήθηκαν και 2 ευρετικές μέθοδοι:

1. Οπίσθια-Εμπρόσθια μέθοδο (Backward-Forward method)
2. Εμπρόσθια με Γραμμικές Προσεγγίσεις Εγκατάστασης (Forward Pass with Linear Set-up Approximations)

Κατά την Οπίσθια-Εμπρόσθια μέθοδο το πρόβλημα λύνεται ξεχωριστά σε κάθε χρονική περίοδο, πρώτα χρονικά προς τα πίσω, ώστε να βρεθεί το ελάχιστο δυνατό επίπεδο αποθέματος που καλύπτει την απαραίτητη ζήτηση. Στη συνέχεια με προς τα εμπρός επίλυση στο χρόνο ελαχιστοποιούνται οι απώλειες κάλυψης της ζήτησης. Κατά τη δεύτερη μέθοδο, η επίλυση πραγματοποιείται με εμπρόσθια μέθοδο, δηλαδή χρονικά προς τα εμπρός, υπολογίζοντας πρώτα τις αλλαγές της παραγωγής (changeovers) και στη συνέχεια ελαχιστοποιώντας τις απώλειες κάλυψης της ζήτησης και το επίπεδο του αποθέματος. Όλες οι μέθοδοι στη συνέχεια επανεξετάστηκαν με τη χρήση κυλιόμενου ορίζοντα με διαφορετική ακρίβεια προβλεπόμενης ζήτησης, δυναμικότητα και αριθμό χρονικών περιόδων.

Οι Shim et al. (2011) εξέτασαν ένα πρόβλημα προγραμματισμού παραγωγής και μεγέθους παρτίδας μίας γραμμής παραγωγής. Το πρόβλημα αποτελούνταν από τον προσδιορισμό του κατάλληλου μεγέθους παρτίδας και της σειράς παραγωγής των τελικών προϊόντων. Ο χρονικός ορίζοντας σε αυτή την περίπτωση είναι χωρισμένος σε περιόδους. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήσαν αποτελούνταν από το κόστος αποθήκευσης και το κόστος μετάβασης παραγωγής από ένα τελικό προϊόν σε ένα άλλο, ενώ λήφθηκαν υπόψη οι λειτουργικοί και σχεδιαστικοί περιορισμοί της μονάδας υπό εξέταση και η πλήρης ικανοποίηση της ζήτησης. Η επίλυση έγινε ευρετικά σε δύο στάδια, όπου αρχικά βρίσκεται μία εφικτή λύση και στη συνέχεια βελτιώνεται με Οπίσθια-Εμπρόσθια μέθοδο, όμοια με αυτή που χρησιμοποίησε ο Clark (2005).

Οι Koranos et al. (2010), εξέτασαν την παραγωγή γαλακτοκομικών προϊόντων και συγκεκριμένα, ανέπτυξαν ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού (MILP), συνεχούς-διακριτού χρονικού ορίζοντα, για την βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε μια βιομηχανία παραγωγής προϊόντων γιαούρτης. Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου αποσκοπούσε στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής, το οποίο αποτελείται από πολλαπλούς παράγοντες όπως το κόστος αποθέματος, το κόστος

λειτουργίας της γραμμής συσκευασίας, το κόστος προετοιμασίας της συνταγής, το κόστος λειτουργίας της μονάδας και το κόστος μετάβασης παραγωγής (change-over cost) από ένα προϊόν σε ένα άλλο. Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος και του πλήθους των προϊόντων, αυτά κατηγοριοποιήθηκαν σε οικογένειες τελικών προϊόντων για την ευκολότερη επίλυση του προκύπτοντος μοντέλου. Το μοντέλο αυτό εξετάζει κυρίως το στάδιο της συσκευασίας, το οποίο αποτελεί το πιο κρίσιμο τμήμα της παραγωγής. Ωστόσο, περιλαμβάνονται περιορισμοί για το χρόνο (timing constraints) και τη χωρητικότητα (capacity constraints) που αφορούν τα υπόλοιπα στάδια παραγωγής (παστερίωση, ζύμωση), ώστε να εξασφαλισθεί ότι το εξαγόμενο πρόγραμμα παραγωγής είναι εφαρμόσιμο στην πράξη. Τέλος, σημαντικά λειτουργικά στοιχεία της παραγωγής, όπως οι χρόνοι έναρξης (set up time) και τερματισμού (shut down time) της λειτουργίας του εργοστασίου, λαμβάνονται υπόψη.

Οι Koranos, et al. (2011) στη συνέχεια ανέπτυξαν ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού που ως στόχο είχε τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε μια βιομηχανία παραγωγής παγωτού. Το μοντέλο αυτό με ορισμένες τροποποιήσεις μπορεί να εφαρμοστεί και σε πολλές άλλες βιομηχανίες τροφίμων. Σε αυτή την περίπτωση, η αντικειμενική συνάρτηση αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του ολικού χρόνου παραγωγής της μονάδας (makespan minimization). Έπειτα, οι Koranos, et al. (2011) δημιούργησαν ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού, για χρονοπρογραμματισμό παραγωγής σε προβλήματα με παράλληλες γραμμές, το οποίο επικεντρώνεται στο στάδιο της συσκευασίας, που αποτελεί και το κύριο σημείο συμφόρησης. Τα προϊόντα ομαδοποιούνται σε οικογένειες για την ταχύτερη επίλυση του προβλήματος.

Οι Toledo et al. (2007) ανέπτυξαν ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής και του μεγέθους παρτίδας, παράλληλων γραμμών παραγωγής πολλαπλών σταδίων. Αυτή η μαθηματική μοντελοποίηση απευθύνεται σε βιομηχανίες με δύο στάδια παραγωγής, όπου το τελικό προϊόν του πρώτου σταδίου αποτελεί την πρώτη ύλη του δεύτερου σταδίου, οπότε το κάθε ένα περιέχει τα δικά του ενδιάμεσα και τελικά προϊόντα. Στόχος σε αυτή την περίπτωση είναι ο ταυτόχρονος προσδιορισμός του προγράμματος παραγωγής και του μεγέθους παρτίδας για τα δύο στάδια, ενώ οι χρόνοι έναρξης και μετάβασης προϊόντος εξαρτώνται από την προηγούμενη παραγωγή. Οι Ferreira et al. (2009) χρησιμοποίησαν το

μοντέλο για την επίλυση ενός προβλήματος χρονοπρογραμματισμού σε βιομηχανία παραγωγής ανθρακούχων ποτών, που αποτελούνται από δύο στάδια, την προετοιμασία του υγρού και την εμφιάλωσή του σε δοχεία. Επίσης έλαβαν υπόψιν την εναλλαγή του σημείου συμφόρησης (bottle-neck) μεταξύ του πρώτου και δεύτερου σταδίου, ενώ χρησιμοποίησαν μεθόδους χαλάρωσης και ορισμού (relax-and-fix heuristic).

Οι Baldo et al. (2014) χρησιμοποίησαν το μαθηματικό μοντέλο των Toledo et al. (2007) και το προσάρμοσαν σε μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού που μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα στη βιομηχανία ζύθου. Συγκεκριμένα, ασχολήθηκαν με τον προσδιορισμό προγράμματος παραγωγής και μεγέθους παρτίδας σε συσκευές που μπορούν να λειτουργούν παράλληλα. Το πρόβλημα της ζυθοποιίας μπορεί να χωριστεί σε 2 βασικά στάδια, την παραγωγή του υγρού, συμπεριλαμβάνοντας τη ζύμωση και την ωρίμανση, και την συσκευασία των διαφόρων υγρών στο τελικό δοχείο. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε είχε ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους αποθήκευσης, της μη κάλυψης της ζήτησης και του κόστους των μεταβάσεων της παραγωγής (changeovers). Στο μοντέλο περιλαμβάνονται περιορισμοί για τη χωρητικότητα των δεξαμενών ζύμωσης, για τη δυναμικότητα των γραμμών εμφιάλωσης, το χρόνο μετάβασης παραγωγής και την αποθηκευτική δυναμικότητα των ενδιάμεσων προϊόντων. Ο χρονικός ορίζοντας χωρίζεται σε δύο τμήματα, το τμήμα του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, με πιο λεπτή διακριτοποίηση, και το τμήμα του σχεδιασμού παραγωγής, που αποτελείται από μεγάλες χρονικές περιόδους. Πρακτικά, το πρώτο κομμάτι του ορίζονται εξετάζεται διεξοδικά λόγω εγγύτητας, ενώ στον υπόλοιπο ορίζοντα πραγματοποιείται μόνο σχεδιασμός της παραγωγής και λαμβάνονται αποφάσεις για το επίπεδο του αποθέματος. Στη συνέχεια, οι Baldo et al. (2017) εξέτασαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις στη βιομηχανία ζύθου, όσον αφορά τη λειτουργία των δεξαμενών ζύμωσης. Συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν το μοντέλο που ανέπτυξαν οι Baldo et al. (2014) για τον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής σε ζυθοποιία προσθέτοντας κάποιους περιορισμούς για τον υπολογισμό του χρόνου μετάβασης από την κένωση μιας δεξαμενής σε μια άλλη (περίπτωση A) ή την αποτελεσματικότερη λύση του μοντέλου χωρίς τον υπολογισμό αυτού του χρόνου (περίπτωση B), πράγμα που συμβαίνει στις πιο σύγχρονες και αυτοματοποιημένες ζυθοποιίες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε ζυθοποιία, και συγκεκριμένα στη Ζυθοποιία Μακεδονίας Θράκης (ZMΘ), χρησιμοποιώντας μοντέλα μεικτού ακεραίου γραμμικού

προγραμματισμού. Η διαδικασία παραγωγής μπύρας είναι πολύπλοκη, όχι μόνο λόγω του πλήθους των φυσικοχημικών διεργασιών που απαιτούνται για την προετοιμασία του υγρού, αλλά και λόγω του χρόνου που απαιτείται για τη λήψη του τελικού προϊόντος από τη στιγμή εκκίνησης της διαδικασίας παραγωγής (lead time). Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να ακολουθείται ένα, όσο είναι δυνατό, βέλτιστο πλάνο παραγωγής. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ως στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών των παραγγελιών, την ελαχιστοποίηση του αποθέματος και την ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των βαρδιών, ενώ ικανοποιούνται οι περιορισμοί ζήτησης, χωρητικότητας και δυναμικότητας των συσκευών. Στην επόμενη ενότητα γίνεται περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας. Στη συνέχεια πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή των μαθηματικών μοντέλων και τεχνικών επίλυσης που προτείνονται για την επίλυση του προβλήματος. Στην τέταρτη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, όπως αυτά προέκυψαν από την επίλυση των μοντέλων με τη βοήθεια του εργαλείου βελτιστοποίησης GAMS (General Algebraic Modeling System) και του επιλυτή ILOG CPLEX, και γίνεται μελέτη διάφορων ρεαλιστικών περιπτώσεων της ζυθοποιίας υπό εξέταση. Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα της έρευνας και γίνονται προτάσεις για την περαιτέρω βελτίωση των μοντέλων που προτάθηκαν.

2 Διαδικασία Παραγωγής

Πολλοί παράγοντες είναι αυτοί που επηρεάζουν την ποιότητα της τελικά παραγόμενης μύρας, σημαντικότεροι των οποίων είναι η ποιότητα της βύνης, η ποιότητα του νερού ζυθοποίησης, η ποιότητα της χρησιμοποιούμενης μαγιάς (π.χ. στέλεχος, ποσότητα) και η συνταγή ζυθοποίησης που ακολουθείται από την ζυθοποιία. Μερικοί από τους παράγοντες αυτούς μπορούν να ελεγχθούν από την ποιότητα της εγκατάστασης (π.χ. αυτοπαραγωγή μαγιάς, παραγωγή βύνης από το εργοστάσιο) αλλά άλλοι, όπως η αρχική ποιότητα του νερού, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα, εξαρτώνται από την τοποθεσία κατασκευής του εργοστασίου. Για τους λόγους αυτούς, από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε για την κατασκευή της μονάδας παραγωγής της Ζυθοποιίας Μακεδονίας Θράκης (ΖΜΘ), αποφασίστηκε ότι η καταλληλότερη περιοχή κατασκευής είναι αυτή της Βιομηχανικής Περιοχής (Βι.Πε.) Κομοτηνής, λόγω της καλύτερης ποιότητας νερού για ζυθοποίηση.

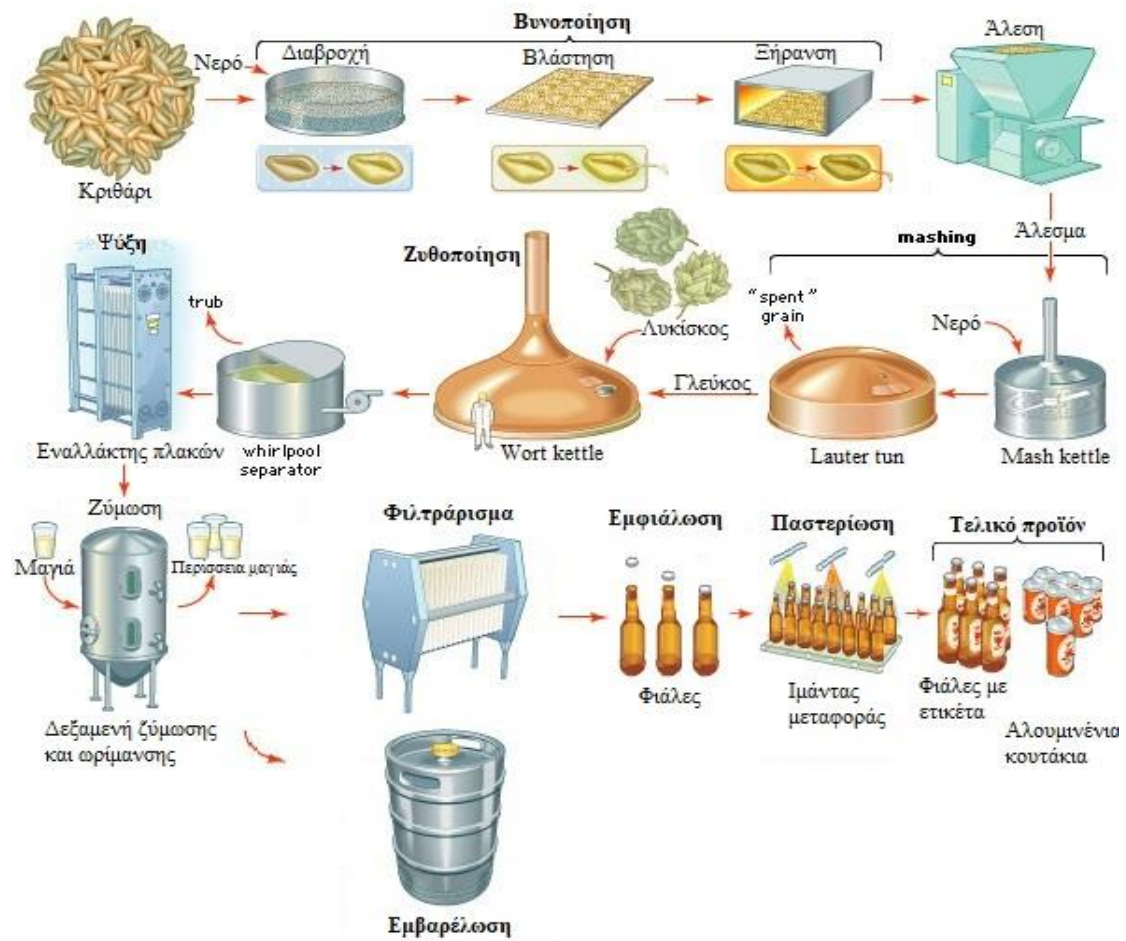
Στη Ζυθοποιία Μακεδονίας Θράκης παράγονται τα αλκοολούχα προϊόντα όπως φαίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1: Πίνακας προϊόντων.

Μύρα	Συσκευασία	Μέγεθος (L)
Lager	Κουτί / Φιάλη / Βαρέλι	0.33 / 0.5 / 30
Red	Φιάλη	0.33 / 0.5
Black	Φιάλη	0.33
Weiss	Φιάλη / Βαρέλι	0.5 / 30
Πορφύρα	Φιάλη	0.33
Edelsteiner	Κουτί	0.33 / 0.5

Στη Ζυθοποιία Μακεδονίας Θράκης, όπως και σε οποιαδήποτε ζυθοποιία, υπάρχουν 4 βασικά στάδια παραγωγής και 1 προαιρετικό. Τα στάδια αυτά είναι η ζυθοποίηση, η ζύμωση/ωρίμανση, το φιλτράρισμα και η εμφιάλωση, ενώ το προαιρετικό στάδιο είναι η βυνοποίηση που δε πραγματοποιείται σε όλες τις

ζυθοποιείες. Η διαδικασία παραγωγής ζύθου που χρησιμοποιείται συνοψίζεται στο σχήμα 2.1 (BetaEQ, 2016).



Σχήμα 2.1: Γενική παραγωγική διαδικασία της μπίρας.

2.1 Βυνοποίηση

Η βυνοποίηση είναι το πρώτο και ένα από τα σημαντικότερα στάδια της παραγωγής μπίρας. Πολλά εξαρτώνται από τον τύπο της βύνης όπως η περιεχόμενη ποσότητα των πρωτεϊνών, των σακχάρων και της υγρασίας της βύνης καθώς και το τελικό χρώμα, η γεύση και η θολερότητα της μπίρας. Ο τύπος της τελικά παραγόμενης βύνης εξαρτάται από την ποιότητα του κριθαριού αλλά και από τις συνθήκες στις οποίες υποβλήθηκε κατά την παραγωγής της. Η διαδικασία της βυνοποίησης χωρίζεται σε 3 στάδια:

- Διαβροχή (Steeping)
- Βλάστηση (Germination)
- Ξήρανση (Drying in Kiln)

Διαβροχή (Steeping)

Η διαβροχή είναι μια διαδικασία κατά την οποία επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η αύξηση της υγρασίας του σπόρου και η έναρξη της προβλάστησης. Οι σπόροι αρχικά έχουν υγρασία σε επίπεδα περίπου 10%, ενώ ο επιθυμητός βαθμός μετά τη διαβροχή είναι πάνω από 30%.

Βλάστηση (Germination)

Σε αυτή τη διεργασία είναι επιθυμητή η εκκίνηση της διαδικασίας της βλάστησης του σπόρου, πράγμα που επιτυγχάνεται με την αύξηση της υγρασίας του τοπικού περιβάλλοντος. Κατά την βλάστηση του σπόρου αναπτύσσονται ρίζα και φύλλο, ενώ οι συνθήκες θερμοκρασίας και αέρα διατηρούνται έτσι ώστε η ανάπτυξη του φύλλου να είναι η μικρότερη δυνατή. Στόχος είναι η ενεργοποίηση των ενζύμων α-αμυλάση, β-αμυλάση, β-γλυκανάση και κάποιων πρωτεϊνών (π.χ. εξωπεπτιδάση, ενδοπεπτιδάση, καρβοξυπεπτιδάση), τα οποία αποτελούν χρήσιμα ένζυμα κατά τη ζυθοποίηση. Επίσης, στόχο αποτελεί η αύξηση του ποσοστού της περιεχόμενης υγρασίας στον σπόρο σε περίπου 45%.

Ξήρανση (Drying in Kiln)

Η διαδικασία ξήρανσης χρησιμεύει στην απομάκρυνση της υγρασίας από τους σπόρους και την παραλαβή του τελικού προϊόντος βυνοποίησης, της βύνης. Κατά την ξήρανση απομακρύνεται το μεγαλύτερο ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας από τους σπόρους, αφήνοντάς τους με περίπου 4% υγρασία, και έτσι η ρίζα και το φύλλο αποδεσμεύονται από την κύρια μάζα του σπόρου.

2.2 Ζυθοποίηση

Η ζυθοποίηση αποτελεί το δεύτερο στάδιο παραγωγής μύρας ή το πρώτο για ζυθοποιίες που δεν περιλαμβάνουν εγκαταστάσεις βυνοποιείου. Αν και είναι αληθές πως το στάδιο της ζυθοποίησης αποτελεί ορόσημο της παραγωγής της μύρας, η αντίληψη ότι ο έλεγχος αυτού μόνο του σταδίου είναι αρκετός για την παραγωγή της μύρας είναι εσφαλμένη. Όλα τα στάδια παραγωγής είναι εξίσου σημαντικά και πρέπει να ελέγχονται για τη διασφάλιση ποιότητας του τελικού προϊόντος. Ο τύπος της παραγόμενης μύρας εξαρτάται από τον τύπο της βύνης που χρησιμοποιείται, ενώ κάποια οργανοληπτικά χαρακτηριστικά της οφείλονται στην συνταγή που ακολουθείται κατά τη ζυθοποίηση.

Στη ζυθοποίηση η βύνη ξανακαθαρίζεται από ρύπους που μπορεί να προέκυψαν κατά τη μεταφορά της και στη συνέχεια αλέθεται για να ξεκινήσει η ζυθοποίηση. Η ζυθοποίηση χωρίζεται σε 4 στάδια:

- Άλεση
- Εκχύλιση (Mash Kettle)
- Σούρωμα (Lauter Tun)
- Βρασμός (Wort Kettle)

Το τελικό προϊόν του ζυθοποιείου, δηλαδή πριν τη ζύμωση, λέγεται ζυθογλεύκος.

Άλεση

Η βύνη διέρχεται από μια διάταξη απομάκρυνσης συσσωματωμάτων, που δημιουργήθηκαν κατά τη μεταφορά της από το βυνοποιείο στο ζυθοποιείο ή κατά την διαμονή της στο σιλό, και μια διάταξη απομάκρυνσης σπόρων διαφορετικού ειδικού βάρους του επιθυμητού. Αυτό επιτυγχάνεται αφήνοντας τη βύνη να πέσει από ψηλά σε κόσκινο υπό κλίση και στη συνέχεια σε εγκάρσια ροή αέρα, ρυθμισμένη έτσι ώστε να εκτοπίζει μόνο την επιθυμητή βύνη, ενώ τα βαρύτερα σωματίδια συνεχίζουν καθοδική πορεία. Η καθαρή, πλέον, βύνη διαβρέχεται ελαφρώς, για να μαλακώσει ο φλοιός, και αλέθεται από μύλο άλεσης ρυθμισμένο με συγκεκριμένο άνοιγμα, ώστε να μη καταστραφεί τελείως ο φλοιός της, αλλά να ελευθερωθεί το εσωτερικό της. Στη συνέχεια το παραγόμενο “αλεύρι”, ταυτόχρονα με νερό, τοποθετείται στη δεξαμενή εκχύλισης, mash kettle, που είναι το πρώτο στάδιο παραγωγής ζυθογλεύκου.

Mash Kettle

Στο mash kettle το μείγμα νερού με αλεύρι θερμαίνεται σταδιακά, ενώ ανά διαστήματα η θερμοκρασία παραμένει σταθερή για την εκπλήρωση τριών πολύ βασικών στόχων:

- Ενζυμική κατάλυση μεγάλων πρωτεϊνών και πολυπεπτιδίων σε αμινοξέα και ολιγοπεπτίδια, χρήσιμη τροφή για τους ζυμομύκητες κατά τη ζύμωση. Οι εξωπεπτιδάσες διασπών τα αμινοξέα σε ολιγοπεπτίδια από το εξωτερικό της αλυσίδας προς το εσωτερικό ενώ οι ενδοπεπτιδάσες αντίστροφα. Οι καρβοξυπεπτιδάσες προσβάλλουν τα πεπτίδια στην καρβοξυλική άκρη της αλυσίδας και τα διασπών σε αμινοξέα.

- Ενζυμική κατάλυση αμύλου και των πολυσακχαρητών. Πιο συγκεκριμένα η β-αμυλάση υδρολύει το άμυλο από τις άκρες προς το κέντρο δημιουργώντας μόρια δεξτρίνης, ενώ η α-αμυλάση υδρολύει τα μόρια της δεξτρίνης και των ολιγοσακχαριτών σε μόρια μαλτόζης και μαλτοτριόζης.
- Σε αυτό το στάδιο επίσης δρα η β-γλυκανάση, αποδομώντας τα μόρια της β-γλυκάνης, (πολυσακχαρίτης που βρίσκεται στο φλοιό της βύνης και προκαλεί θόλωμα και αύξηση του ιξώδους του γλεύκους), σε ολιγοσακχαρίτες που αποδομούνται από την α-αμυλάση.

Οι τρεις αυτές διαδικασίες διαδραματίζονται μέσα στο υγρό σε διαφορετικές θερμοκρασίες η καθεμία. Έτσι, ένα μεγάλο μέρος της συνταγής είναι ο χρόνος παραμονής σε κάθε θερμοκρασία για τη ρύθμιση του βαθμού διάσπασης. Η συνταγή που χρησιμοποιείται έχει να κάνει με το επιθυμητό ποσοστό διάσπασης των πρωτεϊνών και του αμύλου σε μικρότερες μονάδες διότι:

- Ποσότητα αδιάσπαστων πρωτεϊνών είναι επιθυμητή στο τελικό προϊόν της μύρας επειδή αυτές επηρεάζουν ιδιότητες της μύρας, όπως την ποσότητα του αφρού που εξαρτάται από το πρωτεϊνικό περιεχόμενο της μύρας. Ωστόσο, μεγάλη περιεκτικότητα πρωτεϊνών οδηγεί στην αύξηση της θολερότητας και πιθανότητας κροκίδωσης που οδηγούν στη δυσλειτουργία της lauter tun και της διαδικασίας φίλτρανσης.
- Διασπώντας το άμυλο σε μικρότερες μονάδες αποφεύγεται η πιθανότητα κροκίδωσης, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει στη δυσλειτουργία της lauter tun, αύξηση της θολερότητας και επιπλοκές κατά το φιλτράρισμα, όπως και διευκολύνεται η διαδικασία της αλκοολικής ζύμωσης, καθώς οι ζυμομύκητες μεταβολίζουν ευκολότερα τους δισακχαρίτες από μεγαλύτερου μεγέθους σακχαρίτες. Επίσης, επιθυμητή είναι η διάσπαση των β-γλυκανών, παρουσία των οποίων επιφέρει αύξηση της θολερότητας και του ιξώδους του γλεύκους.

Μετά τον τερματισμό της διαδικασίας, το μείγμα μεταφέρεται στη lauter tun και το δοχείο του mash kettle ξεπλένεται με καυτό νερό.

Lauter Tun

Στη δεξαμενή lauter tun πραγματοποιείται ο διαχωρισμός της στερεάς ύλης από το υγρό που προκύπτουν από το mash kettle. Η δεξαμενή έχει διάτρητο πάτο από τον

οποίο μπορεί να διέρχεται το υγρό αλλά η στερεά ύλη συσσωρεύεται. Σε αυτό το σημείο πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ποιότητα της άλεσης η οποία πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε ο φλοιός των σπόρων να διαρρέει αλλά όχι να σπάει σε μικρά κομμάτια, έτσι ώστε στο διάτρητο πάτο να διαμορφώνεται ένα φυσικό φίλτρο που παγιδεύει τα διαλυμένα στερεά αλλά διέρχεται το υγρό. Το υγρό που αποσπάται αποθηκεύεται σε μία ενδιάμεση δεξαμενή και τα στερεά που παγιδεύονται ξεπλένονται μέχρι να αποσπαστεί η μέγιστη δυνατή ποσότητα γλεύκους.

Το στερεό υπόλειμμα απομακρύνεται με τη βοήθεια διάταξης πιρουνιών, αποθηκεύεται και διατίθεται ως ζωοτροφή. Η lauter tun ξεπλένεται ελαφρώς και είναι έτοιμη για την επόμενη παρτίδα.

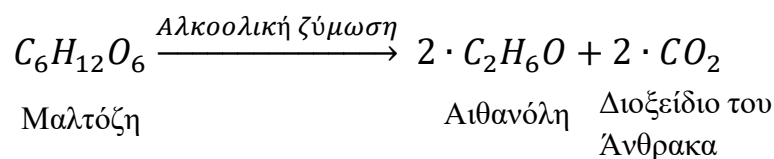
Wort Kettle

Όταν τα υπολείμματα της lauter tun έχουν ξεπλυθεί καλά, το υγρό της ενδιάμεσης δεξαμενής μεταφέρεται στη δεξαμενή βρασμού, wort kettle. Στο wort kettle η θερμοκρασία του γλεύκους ανεβαίνει σταθερά με ταυτόχρονη ανάδευση μέχρι να αρχίσει να βράζει. Ο βρασμός αυτός είναι χρήσιμος για την αποστείρωση του γλεύκους, αλλά και για τη συνεκτικότητα του μείγματος. Σε αυτό το στάδιο προστίθεται και ο λυκίσκος, σημαντικό συστατικό που επηρεάζει έντονα τη γεύση και το άρωμα της παραγόμενης μπίρας, ο οποίος διαλύεται ευκολότερα σε μεγάλες θερμοκρασίες. Ο βρασμός πραγματοποιείται με εσωτερικό βραστήρα ατμού (decanter), όπου ποσότητα γλεύκους αναρροφάται από το κάτω μέρος της δεξαμενής, θερμαίνεται από το βραστήρα και εκτοξεύεται πάνω από την επιφάνεια του υγρού και με τη βοήθεια ανακλαστήρων διαχέεται ομοιόμορφα στη δεξαμενή. Έτσι, διασφαλίζεται ο ομοιόμορφος βρασμός και η διάλυση του λυκίσκου που επιπλέει στην επιφάνεια του υγρού. Παλαιότερα, κατά τη διαδικασία αυτή, σκοπός ήταν να αφαιρεθούν και πτητικές ενώσεις που προσδίδουν στη μύρα δυσάρεστη οσμή χορταριού. Έτσι η αύξηση της επιφάνειας επαφής με τον περιβάλλοντα αέρα έχει ως στόχο και την ενίσχυση μεταφοράς μάζας των πτητικών αυτών ενώσεων. Πλέον η απόσπαση των πτητικών ενώσεων πραγματοποιείται από μια άλλη διάταξη για την ελάττωση των λειτουργικών εξόδων. Αφού τελειώσει ο βρασμός, που πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες και χρόνους σύμφωνα με τη συνταγή, το γλεύκος μεταφέρεται σε ένα κυλινδρικό δοχείο διαχωρισμού των μαζών κροκίδωσης (whirlpool). Στο δοχείο αυτό, το γλεύκος εισέρχεται εφαιπτομενικά με το τοίχωμα και έτσι δημιουργείται μια δίνη στο κέντρο

του όπου συσσωρεύονται συσσωματώματα που δημιουργούνται από την αντίδραση ελεύθερων πρωτεϊνών του γλεύκους με διαλυτές πολυφαινόλες του λυκίσκου. Στο δοχείο δεν πραγματοποιείται ανάδευση με κάποιο μέσο, οπότε το υγρό σταδιακά ηρεμεί και η στερεά ύλη συσσωρεύεται στο κέντρο και καθιζάνει. Το γλεύκος απομακρύνεται από το δοχείο και διέρχεται από μια διάταξη υποπίεσης (schoko), ρυθμισμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να απομακρύνονται τα πτητικά συστατικά που προσδίδουν δυσάρεστη οσμή στη μύρα. Τέλος, διέρχεται από έναν εναλλάκτη πλακών, όπου η θερμοκρασία του γλεύκους μειώνεται δραματικά, και αποστέλλεται στη δεξαμενή ζύμωσης για να ξεκινήσει η διαδικασία ζύμωσης.

2.3 Ζύμωση

Η διαδικασία της ζύμωσης αν και απλή σαν λογική, παρουσιάζει πολλές δυσκολίες στην εφαρμογή της. Η ζύμωση που χρησιμοποιείται στην περίπτωση της μύρας, αλλά και άλλων αλκοολούχων ποτών, ακολουθεί το μηχανισμό της αλκοολικής ζύμωσης που περιγράφεται από τον τύπο:



Ένας από τους βασικούς προβληματισμούς αυτής της διαδικασίας σε όλες τις ζυθοποιίες είναι η επιλογή του στελέχους ζυμομύκητα που θα χρησιμοποιηθεί κατά αυτό το στάδιο. Πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργότητα του ζυμομύκητα είναι:

- Το pH του γλεύκους
- Η θερμοκρασία ζύμωσης
- Η αφθονία θρεπτικών συστατικών
- Η ποιότητα του νερού ζύμωσης (περιεκτικότητα σε μέταλλα που βοηθούν το ζυμομύκητα στη διαδικασία ζύμωσης)

Οι παράγοντες αυτοί βρίσκονται σε διαφορετικά όρια ανάλογα με το στέλεχος του ζυμομύκητα που χρησιμοποιείται, και για αυτό η επιλογή και διατήρηση καθαρότητάς του είναι πολύ σημαντική και δύσκολη. Σημαντικό ρόλο στη ζύμωση επίσης διαδραματίζει η καθαρότητα του ζυμομύκητα, καθώς η ανάπτυξη πολλών στελεχών καταλήγει σε ανταγωνιστική καλλιέργεια που ελαττώνει την απόδοση της εκθετικής ανάπτυξης και συνεπώς της ζύμωσης.

Η θερμοκρασία των δεξαμενών ζύμωσης ρυθμίζεται με εξωτερικό μανδύα σπειρώματος ψύξης και μόνωση πολυουρεθάνης για καλύτερο έλεγχο. Κατά τη διάρκεια της ζύμωσης παράγεται διοξείδιο του άνθρακα το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί, μετά από καθαρισμό, για χρήση εντός του εργοστασίου.

Ο χρόνος ζύμωσης/ωρίμανσης των προϊόντων ζύθου κυμαίνεται από 3 έως 40 μέρες, για μη αλκοολούχα προϊόντα και προϊόντα πολλών αλκοολικών βαθμών αντίστοιχα. Στην Ζυθοποιία Μακεδονίας Θράκης ο μέσος όρος χρόνου ζύμωσης των προϊόντων είναι 24 μέρες για όλα τα είδη σε δεξαμενές ζύμωσης που χωρίζονται σε 3 κατηγορίες:

- Μικρές, χωρητικότητας 74 hl
- Μεσαίες, χωρητικότητας 264 hl
- Μεγάλες, χωρητικότητας 400 hl

2.4 Φιλτράρισμα

Η διαδικασία του φιλτραρίσματος είναι πολύ σημαντική για την τελική ποιότητα του προϊόντος, αφού μετά το φιλτράρισμα της μύρας δεν υπάρχει τρόπος επέμβασης στο περιεχόμενό της. Ωστόσο, μερικά είδη μύρας, όπως η Weiss, η Πορφύρα και η μαύρη, δεν υπόκεινται σε διαδικασία φίλτρανσης.

Η γενική διαδικασία της φίλτρανσης περιλαμβάνει τη εξαγωγή της μύρας από την δεξαμενή ζύμωσης, την φίλτρανσή της με ταυτόχρονη προσθήκη σταθεροποιητικών και ίσως νερού, ανάλογα με τη συνταγή. Έπειτα, γίνεται αποθήκευση του τελικού προϊόντος σε Δεξαμενές Διαυγούς Μύρας (Bright Beer Tanks – BBT). Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης πραγματοποιείται προσθήκη ανθρακικού μέχρι μία επιθυμητή τιμή. Λόγω των προσθηκών αυτών, ο όγκος του τελικού προϊόντος είναι μεγαλύτερος από τον όγκο του υγρού που εξέρχεται από τη δεξαμενή ζύμωσης.

2.5 Εμφιαλωτήριο

Το εμφιαλωτήριο είναι το τελικό στάδιο της παραγωγής. Η εμφιάλωση είναι μια δύσκολη διαδικασία, ωστόσο, το μεγαλύτερο κομμάτι της εργασίας επιτελείται από μηχανήματα και αυτοματισμούς, ενώ το προσωπικό κυρίως ελέγχει τις ρυθμίσεις των μηχανημάτων και προσέχει τυχόν αστοχίες. Οι διαδικασίες της εμφιάλωσης των

δοχείων πλήρωσης είναι παρόμοιες, ωστόσο διαφέρουν σε κάποια χαρακτηριστικά τους ανάλογα με το δοχείο. Η γενική ιδέα είναι:

- Έλεγχος ποιότητας δοχείου πλήρωσης
- Πλήρωση δοχείου, απομάκρυνση περίσσειας αέρα και σφράγιση
- Παστερίωση
- Έλεγχος ποιότητας σφραγισμένου δοχείου
- Συσκευασία δοχείων και παλετοποίηση
- Φόρτωση σε μεταφορικό ή αποθήκευση

Στη ΖΜΘ, χρησιμοποιούνται 3 είδη δοχείων πλήρωσης, τα αλουμινένια κουτάκια, οι γυάλινες φιάλες και τα βαρέλια. Οι γυάλινες φιάλες που χρησιμοποιούνται έχουν μέγεθος 500 ή 330 ml, τα αλουμινένια κουτάκια 500 ή 330 ml ενώ το βαρέλι 30 L. Λόγω των διαφορετικών μεγεθών και ειδών των δοχείων, ο χρόνος αλλαγής της παραγωγής από ένα τελικό προϊόν σε ένα άλλο εξαρτάται από τη σειρά παραγωγής. Οι ταχύτητες λειτουργίας των γραμμών εμφιάλωσης για κάθε προϊόν αλλά και οι χρόνοι μετάβασης της παραγωγής παρατίθενται στο παράρτημα.

Έλεγχος Ποιότητας Δοχείου Πλήρωσης

Οι γυάλινες φιάλες μπορούν να ανακυκλωθούν, οπότε το πρώτο στάδιο είναι ο μαζικός καθαρισμός τους σε ένα πλυντήριο τριών βασικών διεργασιών. Οι γυάλινες φιάλες είναι ευαίσθητες σε απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας, οπότε το πρώτο βήμα είναι η σταδιακή ανύψωση της θερμοκρασίας των φιαλών πριν τον καθαρισμό. Μετά τη θέρμανση των φιαλών ακολουθεί μούλιασμα σε διάλυμα πυκνού υδροξειδίου του νατρίου για την αφαίρεση σκληρών λεκέδων. Κατά τη διάρκεια του μουλιάσματος, λόγω τριβής μεταξύ των φιαλών αποκολλούνται οι ετικέτες. Στη συνέχεια, οι φιάλες πλένονται με νερό με πίεση για την απομάκρυνση ισχυρών λεκέδων και το ξέπλυμα του υδροξειδίου του νατρίου.

Τα αλουμινένια κουτάκια έρχονται έτοιμα στη βιομηχανία σε παλέτες πολλών “ορόφων”. Για την αποπαλετοποίηση των κουτιών, χρησιμοποιείται ειδικό μηχάνημα το οποίο έχει τη δυνατότητα να αφαιρεί ένα επίπεδο κουτιών τη φορά σπρώχνοντάς τα πάνω σε ιμάντα μεταφοράς. Τα κουτάκια στη συνέχεια πλένονται εσωτερικά και είναι έτοιμα για πλήρωση.

Πλήρωση Δοχείου

Η πλήρωση του δοχείου είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία. Λάθη που πραγματοποιούνται κατά την πλήρωση του δοχείου μπορεί να επιφέρουν μόλυνση στο προϊόν με την εισαγωγή μικροοργανισμών ή οξυγόνου, πράγμα που οδηγεί στην υποτίμηση του προϊόντος και, αναπόφευκτα, την καταστροφή του. Για αυτό το λόγο μεγάλη προσοχή δίνεται στον τρόπο που πραγματοποιείται αυτή η διαδικασία. Η βασική διαδικασία εμπεριέχει:

- Μεταφορά του προϊόντος από τις BBT στο μηχάνημα εμφιάλωσης
- Απομάκρυνση του περιβάλλοντος αέρα
- Σφράγισμα του δοχείου

Στη ΖΜΘ, όταν το δοχείο πλήρωσης εισέρχεται στο μηχάνημα εμφιάλωσης προσαρμόζεται στις θέσεις πλήρωσης, γεμίζοντας το δοχείο. Είναι σημαντικό να μη δημιουργούνται φυσαλίδες κατά την πλήρωση, για αυτό είναι αναγκαία η χρήση ενδιάμεσης δεξαμενής πλήρωσης. Στη συνέχεια το δοχείο, αφού έχει πληρωθεί μέχρι προκαθορισμένο ύψος στάθμης, διέρχεται από μία διάταξη αφαίρεσης του σχηματιζόμενου αφρού και της ποσότητας αέρα που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του υγρού μέσα στο δοχείο. Η διεργασία αυτή είναι διαφορετική για τις γυάλινες φιάλες και τα αλουμινένια κουτάκια.

- Στις γυάλινες φιάλες χρησιμοποιείται μία πολύ λεπτή δέσμη νερού υψηλής ταχύτητας
- Στα αλουμινένια κουτάκια χρησιμοποιείται μια σταγόνα υγρού διοξειδίου του άνθρακα

Από τη δέσμη νερού, δημιουργείται μια ροή διοξειδίου του άνθρακα, μέσα από το υγρό, η οποία σπρώχνει τον αέρα έξω από το δοχείο πλήρωσης χρησιμοποιώντας το υπάρχον διοξείδιο του άνθρακα χωρίς ιδιαίτερη αραίωση του προϊόντος. Στην περίπτωση του αλουμινένιου κουτιού σκοπός της προσθήκης της σταγόνας του διοξειδίου του άνθρακα είναι η δημιουργία αδρανούς περιβάλλοντος διοξειδίου του άνθρακα. Η διεργασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι ύπαρξη οξυγόνου στην ατμόσφαιρα της μύρας μπορεί να οδηγήσει στην οξειδωσή της. Έπειτα, το δοχείο σφραγίζεται προς την γνωστή τελική μορφή, δηλαδή η γυάλινη φιάλη με σκληρό αλουμινένιο καπάκι με πλαστική επένδυση για την απορρόφηση κραδασμών και την αποφυγή διαφυγής διοξειδίου του άνθρακα και με λεπτό αλουμινένιο καπάκι στην περίπτωση του κουτιού. Το αλουμινένιο κουτάκι είναι ευαίσθητο σε κραδασμούς και παραμορφώσεις, ακόμα

και μετά το σφράγισμά του. Οπότε, ένας ακόμα λόγος που χρησιμοποιείται υγρή σταγόνα διοξειδίου του άνθρακα στην περίπτωση του κουτιού είναι η αύξηση της εσωτερικής του πίεσης μετά το σφράγισμα, καθώς το υγρό διοξείδιο όταν έρχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μετατρέπεται σε αέριο.

Παστερίωση

Κατά τη διάρκεια της παραγωγής της μύρας είναι δυνατόν το προϊόν να μολυνθεί από μικροοργανισμούς από μολυσμένη μαγιά ή από επιμολυσμένη επιφάνεια κατά τη μεταφορά των προϊόντων εντός των σωληνώσεων. Επίσης, μετά το φιλτράρισμα της μύρας μπορεί να υπάρχουν μερικά ζωντανά κύτταρα μαγιάς στο προϊόν που μπορούν να αναπτυχθούν και να το καταστρέψουν. Για αυτούς τους λόγους, πραγματοποιείται παστερίωση της μύρας. Η παστερίωση που πραγματοποιείται έχει διαφορετική θερμοκρασία και ταχύτητα για τις γυάλινες φιάλες και τα αλουμινένια κουτιά, λόγω της διαφορετικής θερμικής αγωγιμότητας και του σχήματος των δοχείων.

Στη ΖΜΘ η παστερίωση που πραγματοποιείται είναι τύπου λουτρού του σφραγισμένου προϊόντος με καυτό νερό. Ο παστεριωτής περιέχει έναν ιμάντα αλυσίδων διάδετων κρίκων που μεταφέρει το προϊόν σε 7 ζώνες θερμοκρασιών:

- Δύο ζώνες προθέρμανσης
- Μία ζώνη θέρμανσης
- Τη ζώνη παστερίωσης
- Τρεις ζώνες ψύξης

Ο παστεριωτής διαθέτει 5 εξωτερικές δεξαμενές νερού από τις οποίες αντλείται το νερό που χρησιμοποιείται για την παστερίωση. Από την πρώτη δεξαμενή αντλείται νερό στην πρώτη ζώνη προθέρμανσης(1) και στη δεύτερη ζώνη ψύξης(6). Έτσι επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς το μεγαλύτερο ποσό θερμότητας που χάνεται για την προθέρμανση στην πρώτη ζώνη ανακτάται από τη δεύτερη ζώνη ψύξης. Αντίστοιχα, από τη δεύτερη δεξαμενή αντλείται νερό για τη δεύτερη ζώνη προθέρμανσης(2) και την πρώτη ζώνη ψύξης(5). Από την τρίτη δεξαμενή αντλείται νερό για τη ζώνη θέρμανσης(3) και από την τέταρτη δεξαμενή αντλείται νερό για τη ζώνη παστερίωσης(4) και για την θέρμανση του νερού της τρίτης δεξαμενής. Τέλος, από την πέμπτη δεξαμενή αντλείται νερό ψύξης, σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, για την ψύξη του προϊόντος σε χαμηλή θερμοκρασία.

Έλεγχος Ποιότητας Σφραγισμένου Δοχείου

Μετά το πέρας της παστερίωσης τα δοχεία ελέγχονται αν έχουν πληρωθεί μέχρι την επιθυμητή στάθμη καθώς και αν περιέχουν ξένες ύλες. Στα αλουμινένια κουτάκια η στάθμη ελέγχεται από ένα όργανο που ελέγχει τη στάθμη με τη βοήθεια ρυθμιζόμενης δέσμης υπεριώδους ακτινοβολίας ενώ οι γυάλινες φιάλες από εργαζόμενο προσωπικό. Τα δοχεία που δε πληρούν τα κατάλληλα κριτήρια αφαιρούνται από τη γραμμή παραγωγής και στη συνέχεια καταστρέφονται.

Συσκευασία Δοχείων και Παλετοποίηση

Η τελευταία διεργασία του εμφιαλωτηρίου είναι η συσκευασία και παλετοποίηση. Στη ΖΜΘ οι γυάλινες φιάλες που παράγονται μπαίνουν σε καφάσια ενώ για τα αλουμινένια κουτάκια υπάρχουν 2 ειδών συσκευασίες, η συσκευασία 20 κουτιών σε χαρτόκουτα και η συσκευασία 6 κουτιών για κουτιά όγκου 0.5 L ενώ για κουτιά 0.33 L είναι 24 και 8 κουτιά στις συσκευασίες αντίστοιχα. Η προσθήκη των δοχείων στις συσκευασίες πραγματοποιείται από μηχανήματα, ωστόσο ο έλεγχος από εργαζόμενο κρίνεται επιτακτική ανάγκη, διότι είναι το τελευταίο σημείο ελέγχου των προϊόντων. Αφού τα προϊόντα τοποθετηθούν στις συσκευασίες, μεταφέρονται σε παλέτες και τυλίγονται με φιλμ συσκευασίας για σταθεροποίηση.

Φόρτωση σε Μεταφορικό ή Αποθήκευση

Αφού πραγματοποιηθεί ο κύκλος παραγωγής των προϊόντων το τελευταίο στάδιο είναι η φόρτωση σε μεταφορικό όχημα για τη μεταφορά του προϊόντος σε κέντρα διανομής, σε κέντρα κατανάλωσης ή η αποθήκευσή του στις αποθήκες της Ζυθοποιίας για αποστολή σε μελλοντική παραγγελία.

2.6 Εμβарέλωση

Πέρα από τα παρασκευαζόμενα ατομικά προϊόντα, δηλαδή την μπίρα σε κουτάκι και γυάλινη φιάλη, στις ζυθοποιίες, συνήθως, υπάρχουν και προϊόντα βαρελιού, δηλαδή μεγάλων ατσάλινων δοχείων. Η διαδικασία πλήρωσης είναι πιο απλή σε αυτή την περίπτωση. Το βαρέλι για γέμισμα πλένεται εσωτερικά με καυτό νερό, στη συνέχεια με πυκνό διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου και έπειτα πυκνό διάλυμα φωσφορικού οξέος. Τέλος ξεπλένεται με νερό και πληρώνεται με μπίρα και σφραγίζεται στο στόμιό του.

3 Ανάπτυξη Μαθηματικού Μοντέλου

3.1 Βιβλιογραφικό Μοντέλο

Όπως αναφέρθηκε, η βελτιστοποίηση σχεδιασμού και χρονοπρογραμματισμού παραγωγής αποτελεί σημαντικό κομμάτι της βιομηχανίας. Ωστόσο, στην περίπτωση της ζυθοποιίας υπάρχουν κάποιες δυσκολίες που προκύπτουν από τον μεγάλο χρόνο ζύμωσης. Οι Baldo et al (2014) προσάρμοσαν ένα μοντέλο μεικτού ακεραίου γραμμικού χρονοπρογραμματισμού που μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα ανθρακούχων ποτών σε αυτό της παραγωγής μπύρας, το οποίο αναλύεται στη συνέχεια.

Ορισμός του Προβλήματος

Το μοντέλο που παρουσιάζεται είναι μια προσπάθεια μοντελοποίησης της γραμμής παραγωγής ζυθοποιίας, λαμβάνοντας υπόψιν περιορισμούς ζήτησης, περιορισμούς χωρητικότητας και δυναμικότητας συσκευών, περιορισμούς αποθέματος κ.α. Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους του αποθέματος, του κόστους της αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης και του κόστους μετάβασης της παραγωγής από την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος σε ένα άλλο, άρα τον συνολικό αριθμό των μεταβάσεων. Με τη λύση του μοντέλου συμπεραίνονται οι ποσότητες, οι χρόνοι παραγωγής και η σειρά με την οποία παράγονται τα προϊόντα για να καλυφθεί η ζήτηση.

Η διαδικασία παραγωγής της μπύρας είναι μεγάλη και θα ήταν υπολογιστικά κοστοβόρο να μοντελοποιηθεί ολόκληρη. Για αυτό μοντελοποιήθηκαν οι διεργασίες που αποτελούν τα σημεία συμφόρησης της παραγωγής, συγκεκριμένα η ζύμωση/ωρίμανση (πρώτο στάδιο) και η εμφιάλωση (δεύτερο στάδιο).

Ο χρονικός ορίζοντας έχει μέγεθος μερικές εβδομάδες και χωρίζεται σε χρονικά διαστήματα t . Επίσης ο χρονικός ορίζοντας χωρίζεται σε δύο τμήματα $T1$ και $T2$. Στο δεύτερο κομμάτι κάθε χρονικό διάστημα αποτελεί μία μέρα, ενώ στο πρώτο κομμάτι η κάθε χρονική περίοδος (μέρα) χωρίζεται περαιτέρω σε υποπεριόδους p μεταβλητού μεγέθους. Η διακριτοποίηση αυτή γίνεται για να ελέγχεται καλύτερα το στάδιο της εμφιάλωσης. (Baldo, et al., 2014).

Ονοματολογία

Σύνολα

$i, j \in N$	Το σύνολο των τελικών προϊόντων που παράγονται στη Ζυθοποιία
$l \in L$	Το σύνολο των υγρών που παρασκευάζονται από τις δεξαμενές ζύμωσης
$m \in M$	Το σύνολο των γραμμών εμφιάλωσης (ή εμβαρέλωσης) της Ζυθοποιίας
$o \in O$	Το σύνολο των δεξαμενών ζύμωσης της Ζυθοποιίας
$t \in T$	Το σύνολο των χρονικών διαστημάτων του χρονικού ορίζοντα

Υποσύνολα

T_1	Το σύνολο των χρονικών διαστημάτων του πρώτου κομματιού του χρονικού ορίζοντα ($T_1 \cup T_2 = T$)
T_2	Το σύνολο των χρονικών διαστημάτων του δεύτερου κομματιού του χρονικού ορίζοντα ($T_1 \cup T_2 = T$)
$\lambda_t (t \in T)$	Το σύνολο των υποπεριόδων p σε κάθε χρονικό διάστημα t
γ_l	Το σύνολο τελικών προϊόντων που μπορούν παραχθούν από το υγρό l
μ_m	Το σύνολο των τελικών προϊόντων που μπορούν να παραχθούν στην γραμμή εμφιάλωσης m

Παράμετροι

Δ_l	Το σύνολο των χρονικών διαστημάτων που απαιτούνται για την παραγωγή (ζύμωση/ωρίμανση) του υγρού l
------------	---

d_{it}	Η ζήτηση του προϊόντος i στο χρονικό διάστημα t
h_i	Το κόστος αποθήκευσης μίας μονάδας προϊόντος i
h_i^-	Το κόστος της αποτυχίας κάλυψης της ζήτησης μίας μονάδας προϊόντος i
a_{mi}	Ο απαιτούμενος χρόνος για την παραγωγή μιας μονάδας προϊόντος i στην γραμμή εμφιάλωσης m
C_{mt}	Το σύνολο του διαθέσιμου χρόνου λειτουργίας της γραμμής εμφιάλωσης m στο χρονικό διάστημα t
\hat{C}_{mt}	Το χρονικό μέγεθος μίας βάρδιας
r_{li}	Η απαιτούμενη ποσότητα υγρού l για την παραγωγή μιας μονάδας τελικού προϊόντος i
\bar{V}_i	Ο όγκος του προϊόντος i
b_{mji}	Ο απαιτούμενος χρόνος για μετάβαση της παραγωγής από το προϊόν i στο προϊόν j
Cap_{min}^o	Το ελάχιστο ποσό πλήρωσης της δεξαμενής O με υγρό
Cap_{max}^o	Το μέγιστο ποσό πλήρωσης της δεξαμενής O με υγρό
$Icap_{max}$	Η μέγιστη δυναμικότητα όγκου συνολικού αποθέματος
\bar{X}_{omit}	Η παραγόμενη ποσότητα του προϊόντος i στην γραμμή εμφιάλωσης m στο χρονικό διάστημα t με υγρό που τροφοδοτείται από την δεξαμενή o , όπως προκύπτει από το σχεδιασμό παραγωγής

Ω	Το σύνολο των μεταβάσεων παραγωγής που μπορούν να πραγματοποιηθούν σε κάθε χρονικό διάστημα του δεύτερου κομματιού του χρονικού ορίζοντα
α	Το κόστος μετάβασης της γραμμής παραγωγής από ένα τελικό προϊόν σε ένα άλλο
B	Ένας αρκετά μεγάλος αριθμός

Μεταβλητές

Στάδιο I (Ζύμωση-Ωρίμανση)

K_{olt}	Η ποσότητα του έτοιμου υγρού l στη δεξαμενή o την χρονική περίοδο t
Q_{olt}	Η ποσότητα του υγρού l που ετοιμάζεται τη χρονική περίοδο στη δεξαμενή o t
Y_{olt}^l	Λαμβάνει την τιμή 1 όταν ετοιμάζεται στη δεξαμενή o υγρό l τη χρονική περίοδο t

Στάδιο II (Εμφιάλωση)

I_{it}	Το απόθεμα του τελικού προϊόντος στο χρονικό διάστημα t
I_{it}^-	Το ποσό των ζητούμενων τελικών προϊόντων i που δε μπορούν να καλυφθούν στο χρονικό διάστημα t
Z_{mjip}	Λαμβάνει την τιμή 1 όταν πραγματοποιείται αλλαγή στη γραμμή εμφιάλωσης m από παραγωγή του προϊόντος j στο προϊόν i στην υποπερίοδο p
Y_{omip}^{II}	Λαμβάνει την τιμή 1 όταν τροφοδοτείται υγρό από τη δεξαμενή o στην γραμμή εμφιάλωσης m για την παραγωγή του προϊόντος i την υποπερίοδο p

Κοινό στα δύο στάδια

X_{omip}	Η ποσότητα των προϊόντων i που παράγονται στην γραμμή εμφιάλωσης m στην υποπερίοδο p με υγρό που τροφοδοτείται από τη δεξαμενή o
S_{mt}	Η ποσότητα των βαρδιών που πρέπει να πραγματοποιηθούν για να τηρηθεί η κάλυψη της ζήτηση
W_{tm}	Η ποσότητα του χρόνου λειτουργίας της γραμμής εμφιάλωσης m στο χρονικό διάστημα t
\bar{Y}_{ot}	Λαμβάνει την τιμή 1 όταν η δεξαμενή o τροφοδοτεί υγρό το χρονικό διάστημα t

Μαθηματική Διατύπωση

Αντικειμενική συνάρτηση

$$\text{cost} = \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} h_i I_{it} + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} h_i^- I_{it}^- + \sum_{m \in M} \sum_{j, i \in \mu_m} \sum_{p \in \lambda_t, t \in T_1} a Z_{mjip} \quad (1)$$

Ελαχιστοποίηση

Περιορισμοί

(Στάδιο I και II)

$$K_{olt} = K_{ol,t-1} - \sum_{m \in M} \sum_{i \in \gamma_l \cap \mu_m} \sum_{p \in \lambda_t} r_{li} X_{omip} + Q_{olt}, \quad o \in O; l \in L; t \in T \quad (2)$$

(Στάδιο I)

$$\sum_{l'=1}^L \sum_{t'=1}^{\Delta_l+1} K_{ol',t-t'} \leq B(1 - Y_{olt}^l), \quad o \in O; l \in L; t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{t'=0}^{\Delta_l} Y_{ol,t-t'}^l \leq 1, \quad o \in O; t \in T \quad (4)$$

$$Cap_o^{\min} Y_{olt}^l \leq Q_{olt} \leq Cap_o^{\max} Y_{olt}^l, \quad o \in O; l \in L; t \in T \quad (5)$$

(Στάδιο II)

$$\sum_{o \in O} \sum_{\substack{m \in M \\ i \in \mu_m}} \sum_{p \in \lambda_t} X_{omip} + I_{i,t-1} + I_{it}^- = d_{it} + I_{i,t-1}^- + I_{it}, \quad t \in T; i \in N \quad (6)$$

$$\sum_{j \in \mu_m} \sum_{i \in \mu_m} \sum_{p \in \lambda_t \cap t \in T_1} b_{mji} Z_{mjip} + \sum_{o \in O} \sum_{i \in \mu_m} \sum_{p \in \lambda_t} a_{mi} X_{omip} \leq C_{mt}, \quad t \in T; m \in M \quad (7)$$

$$X_{omip} \leq \frac{C_{mt}}{a_{mi}} Y_{omip}^{II}, \quad o \in O; m \in M; i \in \mu_m; p \in \lambda_t; t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{i \in \mu_m} Y_{omip}^{II} = 1, \quad m \in M; p \in \lambda_t; t \in T_1 \quad (9)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{i \in \mu_m} Y_{omip}^{II} \leq \Omega, \quad m \in M; p \in \lambda_t; t \in T_2 \quad (10)$$

$$\sum_{o \in O} Y_{omj,p-1}^{II} = \sum_{i \in \mu_m} Z_{mjip}, \quad m \in M; j \in \mu_m; p \in \lambda_t; t \in T_1 \quad (11)$$

$$\sum_{o \in O} Y_{omip}^{II} = \sum_{j \in \mu_m} Z_{mjip}, \quad m \in M; i \in \mu_m; p \in \lambda_t; t \in T_1 \quad (12)$$

$$X_{omip} \geq 0; \quad K_{olt} \geq 0; \quad Q_{olt} \geq 0; \quad Z_{mjip} \geq 0$$

$$Y_{olt}^I \in \{0,1\}; \quad Y_{omip}^{II} \in \{0,1\}$$

Αντικειμενική συνάρτηση

Ο στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης του μοντέλου (1) είναι η ελαχιστοποίηση του απαραίτητου αποθέματος για την κάλυψη της ζήτησης, η ανικανότητα κάλυψης της ζήτησης και ένας όρος που είναι ανάλογος με το σύνολο των αλλαγών παραγωγής προϊόντων στη γραμμή εμφιάλωσης.

Περιορισμοί

Το σύνολο των περιορισμών (2) ενοποιούν το πρώτο στάδιο παραγωγής με το δεύτερο και αντιπροσωπεύουν το ισοζύγιο μάζας των δεξαμενών ζύμωσης. Σε περίπτωση που ετοιμαστεί ποσότητα υγρού $Q_{ol,t-1}$ και δε χρησιμοποιηθεί όλο στο ίδιο χρονικό διάστημα $(t-1)$ για την παραγωγή τελικών προϊόντων, το υγρό μπορεί να παραμείνει στην δεξαμενή ζύμωσης. Στο επόμενο χρονικό διάστημα (t) η τιμή του υγρού που παρέμεινε στη δεξαμενή θα είναι ίση με K_{olt} . Έτσι Οι περιορισμοί (3) και (4) βεβαιώνουν ότι οι δεξαμενές ζύμωσης θα είναι άδειες κατά τη διάρκεια της ζύμωσης/ωρίμανσης και μέχρι να ετοιμαστεί υγρό, δηλαδή για όλα τα χρονικά διαστήματα $t - (D_l + 1)$. Οι περιορισμοί (5) διατηρούν την ποσότητα του υγρού που ετοιμάζεται στις δεξαμενές ζύμωσης εντός των ορίων που είναι επιτρεπτά για κάθε δεξαμενή. Οι περιορισμοί (6) εκφράζουν τα ισοζύγια μάζας της αποθήκης, ενώ ταυτόχρονα, είναι υπεύθυνες για την κάλυψη της ζήτησης. Οι περιορισμοί (7) εξασφαλίζουν ότι η ποσότητα των παραγόμενων προϊόντων σε συνδυασμό με τον

απαιτούμενο χρόνο για μετάβαση της παραγωγής δεν ξεπερνούν τον διαθέσιμο χρόνο παραγωγής στο χρονικό διάστημα t . Οι περιορισμοί (8) διασφαλίζουν ότι η παραγωγή του τελικού προϊόντος i μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο στην περίπτωση που η δεξαμενή o τροφοδοτεί με υγρό την γραμμή παραγωγής m για την παραγωγή του συγκεκριμένου προϊόντος. Σύμφωνα με τους περιορισμούς (9) μόνο ένα προϊόν μπορεί να εμφιαλώνεται στη γραμμή εμφιάλωσης σε κάθε υποπερίοδο p στο πρώτο κομμάτι του χρονικού ορίζοντα T_1 . Στο πρώτο κομμάτι του χρονικού ορίζοντα, τα χρονικά διαστήματα t χωρίζονται σε Q υποπεριόδους p , ενώ στο δεύτερο κομμάτι του χρονικού ορίζοντα κάθε χρονικό διάστημα t έχει μόνο μία υποπερίοδο p . Έτσι, αντίστοιχα με πριν, οι περιορισμοί (10) ορίζουν ότι σε κάθε χρονικό διάστημα t μπορούν να πραγματοποιηθούν Q μεταβάσεις της παραγωγής. Τέλος, οι περιορισμοί (11) και (12) χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των μεταβάσεων της παραγωγής που πραγματοποιούνται στο πρώτο κομμάτι του χρονικού ορίζοντα (Baldo, et al., 2014).

Το μοντέλο που περιγράφηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων παραγωγής μπύρας με μικρό χρόνο ζύμωσης του υγρού δίνοντας αξιόλογα αποτελέσματα. Ωστόσο, όσο αυξάνεται ο χρόνος ζύμωσης του υγρού, η επίλυση του προβλήματος γίνεται πιο δύσκολη και η δυνατότητα για χρονοπρογραμματισμό ελαττώνεται. Συγκεκριμένα, για χρόνο ζύμωσης μεγαλύτερο από 20 μέρες, που είναι ο συνηθισμένος χρόνος ζύμωσης, καθίσταται αδύνατος ο χρονοπρογραμματισμός της παραγωγής σε βάθος μίας εβδομάδας. Οπότε, κρίνεται αναγκαία η χρήση προηγμένων μεθόδων πρόβλεψης της ζήτησης για να μπορεί να πραγματοποιηθεί πετυχημένος σχεδιασμός παραγωγής. Αν οι προβλεπόμενη ζήτηση δεν αποκλίνει σημαντικά από την πραγματική, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό παραγωγής όλου του χρόνου και στη συνέχεια για το μηνιαίο χρονοπρογραμματισμό της μονάδας. Για όλους του παραπάνω λόγους, αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο για το σχεδιασμό παραγωγής σε ζυθοποιία που αποτελεί επέκταση αυτού που ανέπτυξαν οι Baldo et. al (2014).

3.2 Μοντέλο Σχεδιασμού Παραγωγής

Ορισμός του Νέου Προβλήματος

Το μοντέλο που αναπτύσσεται σε αυτή την ενότητα έχει ως βάση το προηγούμενο που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 3.1, κρατώντας τους περιορισμούς

του πρώτου σταδίου και αλλάζοντας τους περιορισμούς του δεύτερου σταδίου. Λόγω του μεγάλου χρόνου ζύμωσης που έχουν συνήθως τα προϊόντα ζύθου, μεγαλύτερη βαρύτητα δίνεται στο σχεδιασμό παραγωγής. Για αυτό το λόγο, η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους της απώλειας πωλήσεων. Συμπεραίνεται ότι, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης πρέπει να είναι μηδέν, αφού επιθυμητό είναι να καλύπτεται η ζήτηση όλων των προϊόντων. Ουσιαστικά, ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός του μεγέθους παρτίδας και τα επίπεδα αποθέματος των τελικών προϊόντων προκειμένου να είναι δυνατή η κάλυψη της ζήτησης για όλο το χρόνο.

Ο χρονικός ορίζοντας σε αυτή την περίπτωση έχει μέγεθος μερικούς μήνες ή ολόκληρο το έτος και χωρίζεται σε χρονικά διαστήματα t . Ο χρονικός ορίζοντας δε τμηματοποιείται όπως και τα χρονικά διαστήματα δε χωρίζονται σε υποπεριόδους, οπότε προκύπτει ότι $t = p$ και $T_1 = T_2 = T$.

Μαθηματική Διατύπωση

Αντικειμενική συνάρτηση

Ελαχιστοποίηση

$$J = \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} h_i^- I_{it}^- \quad (2.1)$$

Περιορισμοί

(Στάδιο I και II)

$$K_{olt} = K_{ol,t-1} - \sum_{m \in M} \sum_{i \in \gamma_l \cap \mu_m} r_{li} X_{omit} + Q_{olt}, \quad o \in O; l \in L; t \in T \quad (2.2)$$

(Στάδιο I)

$$\sum_{l'=1}^L \sum_{t'=1}^{\Delta_l+1} K_{ol',t-t'} \leq B(1 - Y_{olt}^l), \quad o \in O; l \in L; t \in T \quad (2.3)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{t'=0}^{\Delta_l} Y_{ol,t-t'}^l \leq 1, \quad o \in O; t \in T \quad (2.4)$$

$$Q_{olt} = Cap_o^{max} Y_{olt}^l, \quad o \in O; l \in L; t \in T \quad (2.5)$$

(Στάδιο II)

$$\sum_{o \in O} \sum_{\substack{m \in M \\ i \in \mu_m}} X_{omit} + I_{i,t-1} + I_{it}^- = d_{it} + I_{i,t-1}^- + I_{it}, \quad t \in T; i \in N \quad (2.6)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{i \in \mu_m} a_{mi} X_{omit} \leq C_{mt}, \quad t \in T; m \in M \quad (2.7)$$

$$X_{omit} \leq \frac{C_{mt}}{a_{mi}} Y_{omit}^{II}, \quad o \in O; m \in M; i \in \mu_m; t \in T \quad (2.8)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{i \in \mu_m} Y_{omit}^{II} = \Omega_t, \quad m \in M; t \in T \quad (2.9)$$

$$\sum_{i \in N} I_{it} \bar{V}_i \leq Icap_{max}, \quad t \in T \quad (2.10)$$

$$\bar{Y}_{ot} \geq \sum_{i \in \mu_m} \frac{Y_{omit}^{II}}{2\Omega_t}, \quad o \in O; m \in M; t \in T \quad (2.11)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{i \in \gamma_i \cap \mu_m} \sum_{l \in L} r_{li} X_{omit} = Cap_{max} \bar{Y}_{ot}, \quad o \in O; t \in T \quad (2.12)$$

$$X_{omit} \geq 0; \quad K_{olt} \geq 0; \quad Q_{olt} \geq 0; \\ Y_{olt}^I \in \{0,1\}; \quad Y_{omit}^{II} \in \{0,1\}; \quad \bar{Y}_{ot} \in \{0,1\}$$

Για τις περιορισμοί (2.1) έως (2.9) ισχύουν όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως με μικρές διαφορές που αφορούν τις μεταβλητές του δεύτερου σταδίου. Συγκεκριμένα, οι μεταβλητές που πριν περιγράφονταν για κάθε υποπερίοδο του χρονικού διαστήματος t , τώρα περιγράφουν το σύνολο των χρονικών διαστημάτων. Οι περιορισμοί (2.10) αφορούν την μέγιστη αποθηκευτική δυναμικότητα της βιομηχανικής μονάδας. Αφού η αποθηκευτική δυναμικότητα είναι πεπερασμένη, κρίνεται αναγκαίος ο υπολογισμός της στο μοντέλο σχεδιασμού παραγωγής. Η μύρα είναι προϊόν που εμφανίζει εποχική ζήτηση, συγκεκριμένα παρατηρείται μεγάλη κατανάλωση τους θερινούς μήνες και μικρή τους χειμερινούς. Έτσι, προϊόντα μπορούν να παράγονται και να αποθηκεύονται στους μήνες με χαμηλή ζήτηση για να διανεμόνται τους μήνες με υψηλή. Οι περιορισμοί (2.11) και (2.12) διασφαλίζουν ότι αν το υγρό της δεξαμενής o χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή των προϊόντων i η δεξαμενή αυτή θα πρέπει να αδειάσει στο ίδιο χρονικό διάστημα πριν επιλεγεί κάποια άλλη. Στην πραγματικότητα, το έτοιμο υγρό μετά τη ζύμωση φιλτράρεται και αποθηκεύεται σε ενδιάμεσες δεξαμενές αποθήκευσης (Bright Beer Tanks – BBT) πριν την εμφιάλωσή της, ωστόσο αυτή η διαδικασία δεν υπολογίζεται στο μοντέλο.

3.3 Μοντέλο Χρονοπρογραμματισμού Παραγωγής

Ορισμός του Προβλήματος Χρονοπρογραμματισμού Παραγωγής

Το μοντέλο που περιγράφεται σε αυτή την ενότητα χρησιμοποιήθηκε για τον χρονοπρογραμματισμό της παραγωγής ζυθοποιίας. Το σύστημα περιορισμοί αποτελεί συνδυασμό κάποιων περιορισμοί του βιβλιογραφικού μοντέλου που περιγράφηκε στην υποενότητα 3.1 για το δεύτερο στάδιο παραγωγής (στάδιο της εμφιάλωσης) με ορισμένες προσθήκες. Οι νέες περιορισμοί ολοκληρώνουν τον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής χρησιμοποιώντας ως παραμέτρους τα αποτελέσματα του σχεδιασμού παραγωγής, που πραγματοποιείται όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη υποενότητα. Συνήθως, στόχος κατά το χρονοπρογραμματισμό παραγωγής αποτελεί η ελαχιστοποίηση του αριθμού των συνολικών αλλαγών από την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος σε ένα άλλο λόγω του κόστους που εμπεριέχει αυτή η διαδικασία. Ωστόσο, στην περίπτωση της ζυθοποιίας, η αλλαγή αυτή δεν εμπεριέχει κάποιο κόστος, αφού τα μηχανήματα καθαρίζονται απευθείας μετά τη χρήση χωρίς εξάρτηση από την αλληλουχία παραγωγής των προϊόντων. Έτσι, οι μεταβάσεις της παραγωγής προσδίδουν μόνο χρονική επιβάρυνση. Για αυτό, στόχο του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, σε αυτή την περίπτωση, αποτελεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των βαρδιών που απαιτούνται για την κάλυψη της ζήτησης, όπως προκύπτει από τον σχεδιασμό παραγωγής. Αυτό εμμέσως λαμβάνει υπόψιν μέρος του κόστους λειτουργίας της μονάδας.

Μαθηματική Διατύπωση

Αντικειμενική συνάρτηση

$$\begin{aligned} & \text{Ελαχιστοποίηση} \\ Shifts = & \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} S_{tm} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Περιορισμοί

(Στάδιο II)

$$\sum_{j \in \mu_m} \sum_{i \in \mu_m} \sum_{p \in \lambda_t \cap t \in T} b_{mji} Z_{mjip} + \sum_{o \in O} \sum_{i \in \mu_m} \sum_{p \in \lambda_t} a_{mi} X_{omip} \leq C_{mt}, \quad t \in T; m \in M \quad (3.2)$$

$$X_{omip} \leq \frac{C_{mt}}{a_{mi}} Y_{omip}^{II}, \quad o \in O; m \in M; i \in \mu_m; p \in \lambda_t; t \in T \quad (3.3)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{i \in \mu_m} Y_{omip}^{II} \leq 1, \quad m \in M; p \in \lambda_t; t \in T \quad (3.4)$$

$$Z_{mjip} \geq \sum_{o \in O} Y_{omj,p-1}^{II} + \sum_{o \in O} Y_{omip}^{II}, \quad m \in M; j \in \mu_m; i \in \mu_m; p \in \lambda_t; t \in T \quad (3.5)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{i \in \gamma_l \cap \mu_m} \sum_{p \in \lambda_t} r_{li} X_{omip} = Cap_{max} \bar{Y}_{olt}, \quad o \in O; l \in L; t \in T \quad (3.6)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{p \in \lambda_t} X_{omip} \geq \sum_{o \in O} \sum_{t \in T} \bar{X}_{omit}, \quad m \in M; i \in \mu_m \quad (3.7)$$

$$W_{tm} = \sum_{j \in \mu_m} \sum_{i \in \mu_m} \sum_{p \in \lambda_t \cap t \in T} b_{mji} Z_{mjip} + \sum_{o \in O} \sum_{i \in \mu_m} \sum_{p \in \lambda_t} a_{mi} X_{omip}, \quad m \in M; t \in T \quad (3.8)$$

$$S_{tm} \geq \frac{W_{tm}}{C_{mt}}, \quad m \in M; t \in T \quad (3.9)$$

$$X_{omip} \geq 0; S_{mt} \in \mathbf{Z}$$

$$Y_{olt}^I \in \{0,1\}; Y_{omip}^{II} \in \{0,1\}; Z_{mjip} \in \{0,1\}$$

Η εξίσωση (3.1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, που έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των βαρδιών εντός του μήνα. Οι περιορισμοί (3.2) έως (3.4) λειτουργούν όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Οι περιορισμοί (3.5) αποτελούν ένα συνδυασμό των περιορισμών (3.11) και (3.12) του βιβλιογραφικού μοντέλου που αφορούν τις μεταβάσεις της παραγωγής από την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος στην παραγωγή ενός άλλου. Οι περιορισμοί (3.6) και (3.7) εξασφαλίζουν ότι ανεξαρτήτως των προϊόντων που θα επιλεγούν να παραχθούν κατά τον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής, οι δεξαμενές θα πρέπει να αδειάσουν όπως υποδεικνύεται από το πλάνο που προκύπτει κατά το σχεδιασμό παραγωγής. Επισημαίνεται ότι η δυαδική μεταβλητή \bar{Y}_{olt} συνδέει τον σχεδιασμό παραγωγής με το χρονοπρογραμματισμό παραγωγής, αποτελεί δηλαδή την απόφαση που μεταφέρεται. Οι περιορισμοί (3.8) και (3.9) χρησιμοποιούνται ως λειτουργικοί περιορισμοί για τον ορισμό του αριθμού των βαρδιών που απαιτούνται για να καλυφθεί η ζήτηση.

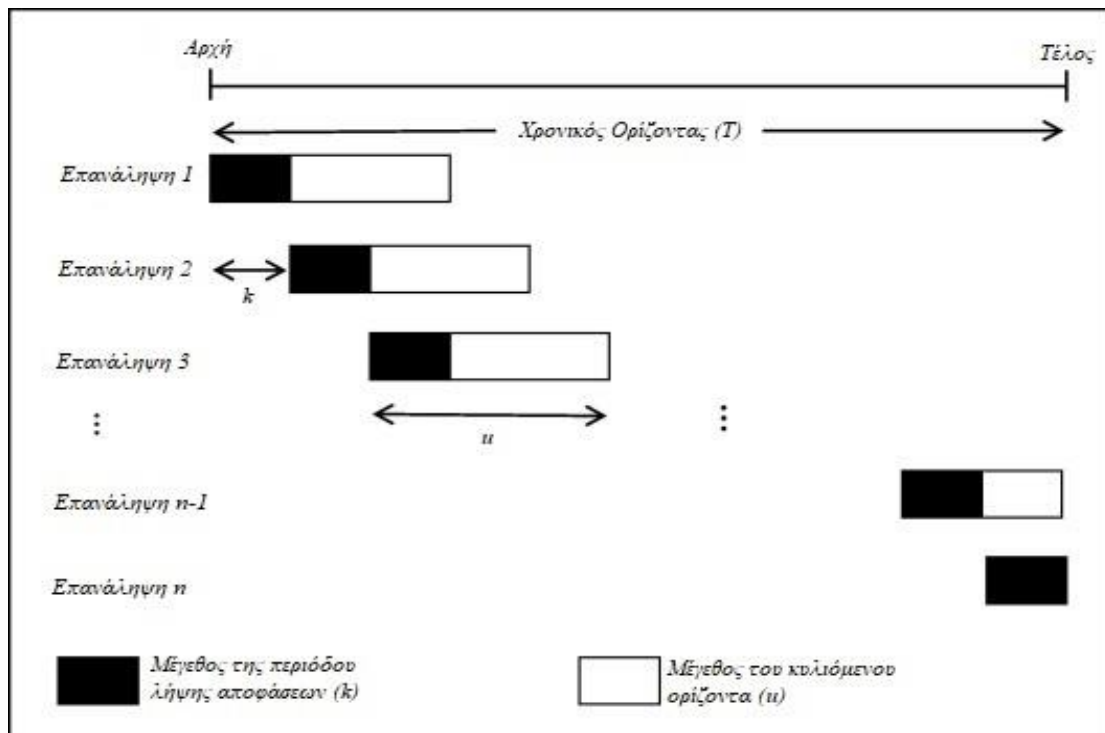
3.4 Ευρετικοί Αλγόριθμοι

Η μαθηματική μοντελοποίηση ενός προβλήματος αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τακτική επίλυσης προβλημάτων σχεδίασης και χρονοπρογραμματισμού παραγωγής. Ωστόσο, ο βαθμός πολυπλοκότητας της μονάδας,

ο χρόνος που απαιτείται για τη λήψη του τελικού προϊόντος από τη στιγμή εκκίνησης της διαδικασίας παραγωγής (lead time) και το πλήθος των τελικών προϊόντων που παράγονται οδηγούν σε μεγάλους χρόνους επίλυσης και εκθετικά αυξανόμενη ανάγκη για υπολογιστική δύναμη. Για το λόγο αυτό, αποτελεί συνήθη τακτική η χρήση ευρετικών αλγορίθμων επίλυσης, οι οποίοι είναι ικανοί να αποδίδουν μία λύση σε εξαιρετικά μικρότερο χρονικό διάστημα. Οι ευρετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μια λογική για τη διαίρεση ενός μεγάλου προβλήματος σε μικρότερα και ευκολότερα υποπροβλήματα. Ωστόσο, η διαίρεση πρέπει να γίνεται με συστηματικό τρόπο και το μέγεθος των υποπροβλημάτων να είναι επαρκές για την απόδοση μια σχεδόν βέλτιστης λύσης σε υπολογιστικό χρόνο αποδεκτό από τη βιομηχανία. Ο συνδυασμός των λύσεων των υποπροβλημάτων αποτελεί τη λύση του συνολικού, αρχικού προβλήματος.

Κυλιόμενος Ορίζοντας (Rolling Horizon Heuristic)

Η ανάγκη για υπολογιστική ισχύ στην περίπτωση του σχεδιασμού παραγωγής οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο μεγάλο μέγεθος του χρονικού ορίζοντα. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιώντας μια τεχνική αποδόμησης του χρονικού ορίζοντα (time decomposition technique) σε μικρότερα κομμάτια, η επίλυση του προβλήματος καθίσταται γρηγορότερη. Η τεχνική του κυλιόμενου ορίζοντα χρησιμοποιείται για την

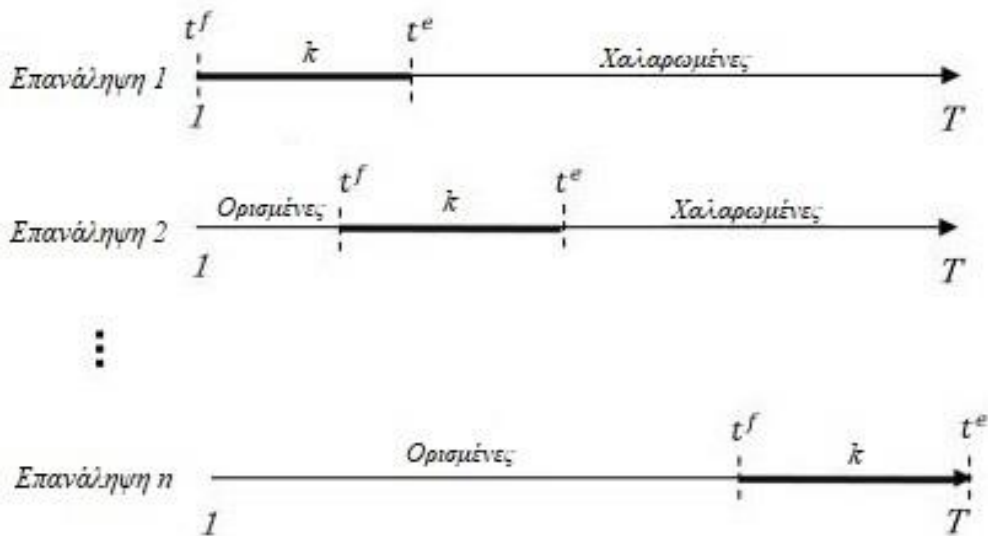


Σχήμα 3.1: Απεικόνιση της μεθόδου με κυλιόμενο ορίζοντα (Lu, et al., 2016).

λήψη κάποιων αποφάσεων (π.χ. του μεγέθους παρτίδας, τον καθορισμό της σειράς παραγωγής, τους χρόνους κ.α.) σε βάθος ορισμένης χρονικής περιόδου (k), υπολογίζοντας ταυτόχρονα τις ανάγκες για μελλοντική παραγωγή. Το μέγεθος του κυλιόμενου ορίζοντα (u) που χρησιμοποιείται πρέπει να επιλεγθεί προσεκτικά, καθώς η επιλογή μικρού μεγέθους μπορεί να οδηγήσει σε ανικανότητα επίλυσης του μοντέλου ενώ μεγάλο μέγεθος μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο χρόνο επίλυσης. Η διαδικασία που περιγράφηκε φαίνεται στο σχήμα 3.1 (Lu, et al., 2016).

Μέθοδος Χαλάρωσης και Ορισμού (Relax-and-Fix Heuristic)

Μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η μέθοδος της χαλάρωσης και ορισμού. Σε αυτή τη μέθοδο, ο χρονικός ορίζοντας χωρίζεται σε τρία κομμάτια, στο κομμάτι χαλαρωμένων μεταβλητών, στο κομμάτι λήψης αποφάσεων και στο κομμάτι ορισμένων μεταβλητών. Κατά την επίλυση του προβλήματος, ένα κομμάτι του χρονικού ορίζοντα (k) λύνεται ως πρόβλημα μεικτού-ακεραίου γραμμικό σύστημα όπου πραγματοποιείται λήψη αποφάσεων, ενώ οι δυαδικές μεταβλητές του υπόλοιπου ορίζοντα καθίστανται χαλαρές. Αφού το πρόβλημα βελτιστοποιηθεί στην περίοδο (k) οι τιμές που λαμβάνουν οι μεταβλητές ορίζονται ως σταθερές και η περίοδος (k) μετακινείται μέχρι την επίλυση του συνολικού προβλήματος. Σημειώνεται ότι η χρήση αυτής της μεθόδου δεν οδηγεί πάντα σε ολική βέλτιστη λύση, αλλά είναι ικανή να ελαττώσει το χρόνο επίλυσης του προβλήματος σημαντικά ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει ικανοποιητική, ως προς την ποιότητα, λύση. Στο σχήμα 3.2 απεικονίζεται η διαδικασία επίλυσης με τη χρήση της μεθόδου χαλάρωσης και ορισμού.



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση της μεθόδου χαλάρωσης και ορισμού (Deeratanasrikul & Mizuno, 2017).

4 Αποτελέσματα-Μελέτη Περιπτώσεων

4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται μέθοδοι βελτιστοποίησης σχεδιασμού και χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε ζυθοποιία, οι οποίες στη συνέχεια εφαρμόστηκαν σε πραγματική παραγωγή, συγκεκριμένα της Ζυθοποιία Μακεδονίας Θράκης. Η γραμμή παραγωγής στη Ζυθοποιία Μακεδονίας Θράκης περιλαμβάνει τον εξοπλισμό ζυθοποίησης, ζύμωσης, φιλτραρίσματος και μία γραμμή εμφιάλωσης που λειτουργούν σε σειρά. Στόχο του μοντέλου βελτιστοποίησης σχεδιασμού παραγωγής αποτελεί η ελαχιστοποίηση της ανικανοποίητης προβλεπόμενης ζήτησης σε κάθε μήνα, τηρώντας τα ισοζύγια μάζας των δεξαμενών ζύμωσης. Από τη άλλη, ο στόχος του μοντέλου βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των βαρδιών που είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν σε βάθος του εξεταζόμενου χρονικού ορίζοντα για την κάλυψη της ζήτησης. Εφόσον επιβεβαιωθεί η πρόβλεψη ζήτησης για ένα μήνα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν κατά τον σχεδιασμό παραγωγής για το χρονοπρογραμματισμό παραγωγής αυτού του μήνα. Έτσι, επιτυγχάνεται ολοκληρωμένη βελτιστοποίηση της παραγωγής.

Για την επίλυση του προβλήματος, υιοθετήθηκαν κάποιες περεταίρω απλοποιήσεις, οι οποίες δεν έχουν μεγάλο αντίκτυπο στον τελικό σχεδιασμό και χρονοπρογραμματισμό παραγωγής. Συγκεκριμένα, έπειτα από επικοινωνία με τη ζυθοποιία, θεωρήθηκε ότι ο υπολογισμός των ποσοτήτων της κόκκινης και μαύρης μύρας δεν είναι αναγκαίος, αφού οι ζητούμενες ποσότητες είναι μικρές. Έτσι, οι ποσότητες των προϊόντων κόκκινης και μαύρης μύρας συνυπολογίζονται με τις μύρες Weiss στο προϊόν “Bottled Special (500 mL)”. Ο κατάλογος των τελικών προϊόντων που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη περιπτώσεων δίνεται στον πίνακα 2. Επίσης, ο χρόνος μετάβασης της παραγωγής στη γραμμή εμβарέλωσης θεωρείται 0, επειδή είναι μικρός και δεν επηρεάζει σημαντικά.

Πίνακας 2: Πίνακας τελικών προϊόντων της Ζυθοποιίας Μακεδονίας Θράκης

	Φιάλη	Κουτάκι	Βαρέλι
Lager	500 / 330 (mL)	500 / 330 (mL)	30 (L)
Special	500 (mL)		30 (L)
Edelsteiner		500 / 330 (mL)	

Στην ενότητα 4.2 πραγματοποιείται ανάλυση των αποτελεσμάτων, όπως αυτά προέκυψαν, κατά τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού παραγωγής της Ζυθοποιίας Μακεδονίας Θράκης για το έτος 2018. Συγκεκριμένα, στην επόμενη υποενότητα παρουσιάζεται η λύση του μοντέλου με τη χρήση της μεθόδου του κυλιόμενου ορίζοντα σε συνδυασμό με περιορισμούς ελαχίστου αποθέματος. Στην επόμενη υποενότητα περιγράφεται η λύση με τη μέθοδο του κυλιόμενου ορίζοντα σε συνδυασμό με την τεχνική χαλάρωσης και ορισμού. Στην Τρίτη υποενότητα μελετάται η περίπτωση όπου το Μάρτιο πραγματοποιείται επαναπροσδιορισμός της προβλεπόμενης ζήτησης των τελικών προϊόντων του Μαΐου, θεωρώντας μία αύξηση κατά 10%. Τέλος, στην ενότητα 4.3 παρουσιάζεται ο αναλυτικός χρονοπρογραμματισμός των μηνών Ιανουαρίου, Απριλίου, Ιουνίου και Ιουλίου, με βάση τη λειτουργία των δεξαμενών ζύμωσης όπως αυτή προέκυψε κατά το σχεδιασμό παραγωγής στη δεύτερη υποενότητα. Η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του εργαλείου βελτιστοποίησης GAMS (General Algebraic Modeling System). Η επίλυση έγινε με τη χρήση του επιλυτή ILOG CPLEX, ο οποίος είναι ενσωματωμένος στο μαθηματικό εργαλείο GAMS (Brooke, A, et al. 1998).

4.2 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Σχεδιασμού Παραγωγής

Στην ενότητα 2 περιγράφηκε η διαδικασία παραγωγής μύρας, ενώ στην υποενότητα 3.2 η μαθηματική μοντελοποίηση για το σχεδιασμό παραγωγής της. Όπως επισημάνθηκε, λόγω της συνολικής διάρκειας της παραγωγικής διαδικασίας και των διαφόρων διεργασιών από τις οποίες αποτελείται, μοντελοποιήθηκαν οι δύο διεργασίες της παραγωγής που παρουσιάζουν συμφόρηση, δηλαδή το στάδιο της ζύμωσης και το στάδιο της εμφιάλωσης. Τα δεδομένα της Ζυθοποιίας Μακεδονίας Θράκης που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος παραθέτονται στο παράρτημα.

Ωστόσο, το σύστημα που προκύπτει από τη μαθηματική μοντελοποίηση για το σχεδιασμό παραγωγής είναι μεγάλο και η επίλυσή του καθίσταται ασύμφορη. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται ευρετικοί αλγόριθμοι που ελαττώνουν σημαντικά το χρόνο επίλυσης.

Χρήση Κυλιόμενου Ορίζοντα σε Συνδυασμό με Πολιτική Ελάχιστου Αποθέματος

Η επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού παραγωγής καθίσταται εφικτή χρησιμοποιώντας κάποια πολιτική ελάχιστου αποθέματος σε συνδυασμό με τη χρήση της ευρετικής μεθόδου του κυλιόμενου ορίζοντα. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, στο μοντέλο που αναπτύχθηκε στην ενότητα 3.2, προστίθεται ένας ακόμα περιορισμός που αφορά το ελάχιστο απόθεμα που πρέπει να επιτευχθεί στο τέλος του χρονικού ορίζοντα, ώστε να είναι δυνατή η επίλυση του προβλήματος. Το κατώφλι αποθέματος υπολογίζεται εμπειρικά και ορίζεται ανάλογα με το μήνα στον οποίο αναφέρεται, για παράδειγμα το απόθεμα θα πρέπει να είναι περισσότερο τους θερινούς μήνες για να είναι εφικτή η κάλυψη της ζήτησης ενώ δεν υπάρχει ιδιαίτερη ανάγκη για απόθεμα τους χειμερινούς. Οι περιορισμοί που περιγράφουν τον περιορισμό του ελάχιστου αποθέματος είναι όμοιες με τις περιορισμοί (2.10) όπως περιγράφηκαν στην ενότητα 3.2 για την μέγιστη αποθηκευτική δυναμικότητα. Οι περιορισμοί (2.10A) χρησιμοποιούνται για την ομοιόμορφη αποθήκευση τελικών προϊόντων.

$$\sum_{i \in N} I_{it} \bar{V}_i \geq Icap_{min}, \quad t \in T_f \quad (2.10')$$

$$I_{it} \bar{V}_i \geq 0.12 Icap_{min}, \quad i \in N; t \in T_f \quad (2.10A)$$

Ταυτόχρονα, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική κυλιόμενου ορίζοντα, όπου ο χρονικός ορίζοντας ενός έτους του προβλήματος σχεδιασμού παραγωγής διαιρέθηκε σε 3 κομμάτια των τεσσάρων μηνών. Για τη σύνδεση των τετραμήνων και την επιτυχή επίλυση του συνολικού προβλήματος, χρησιμοποιήθηκε η πολιτική ελάχιστου αποθέματος στην τελευταία μέρα κάθε τετραμήνου (T_f), όπως φαίνεται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3: Ελάχιστη ποσότητα αποθέματος στο τέλος κάθε τετραμήνου.

	Απρίλιος	Αύγουστος	Δεκέμβρης
$Icap_{min}$ (hL)	11000	2000	5000

Σε αυτή την περίπτωση η λύση του μαθηματικού μοντέλου δείχνει ότι η παραγωγή μπορεί να ικανοποιήσει την προβλεπόμενη ζήτηση, άρα $J = 0$. Ωστόσο, ο

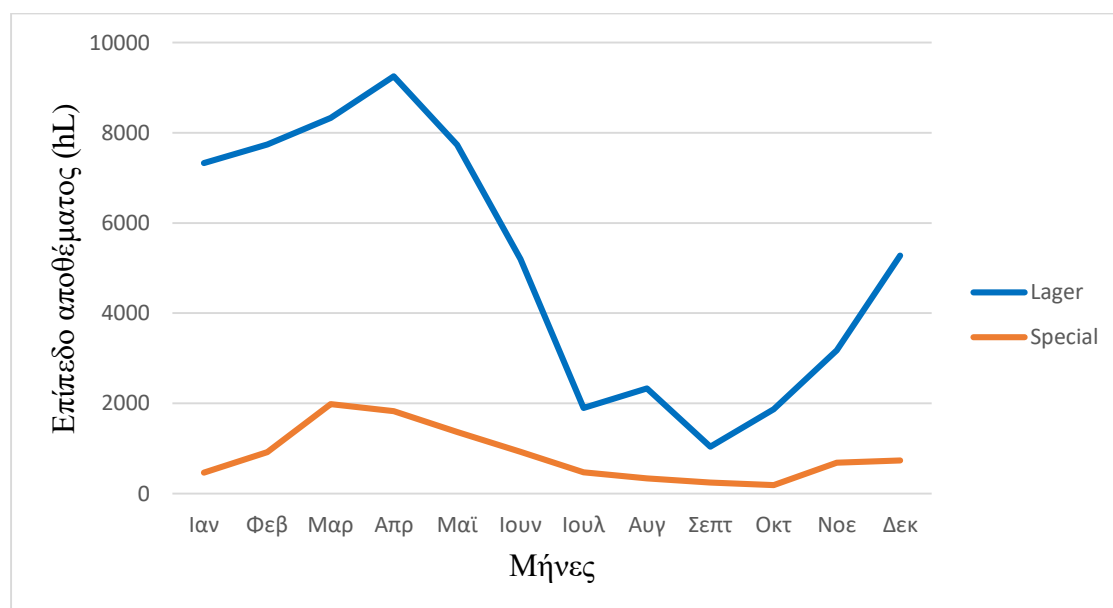
χρόνος επίλυσης του προβλήματος πλησιάζει τις 7 ώρες, πράγμα που επιδέχεται βελτίωση αλλά θεωρείται επαρκές για το σχεδιασμό παραγωγής ολόκληρου του έτους. Οι χρόνοι επίλυσης κάθε τετραμήνου παρουσιάζονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4: Χρόνος επίλυσης κάθε τετραμήνου.

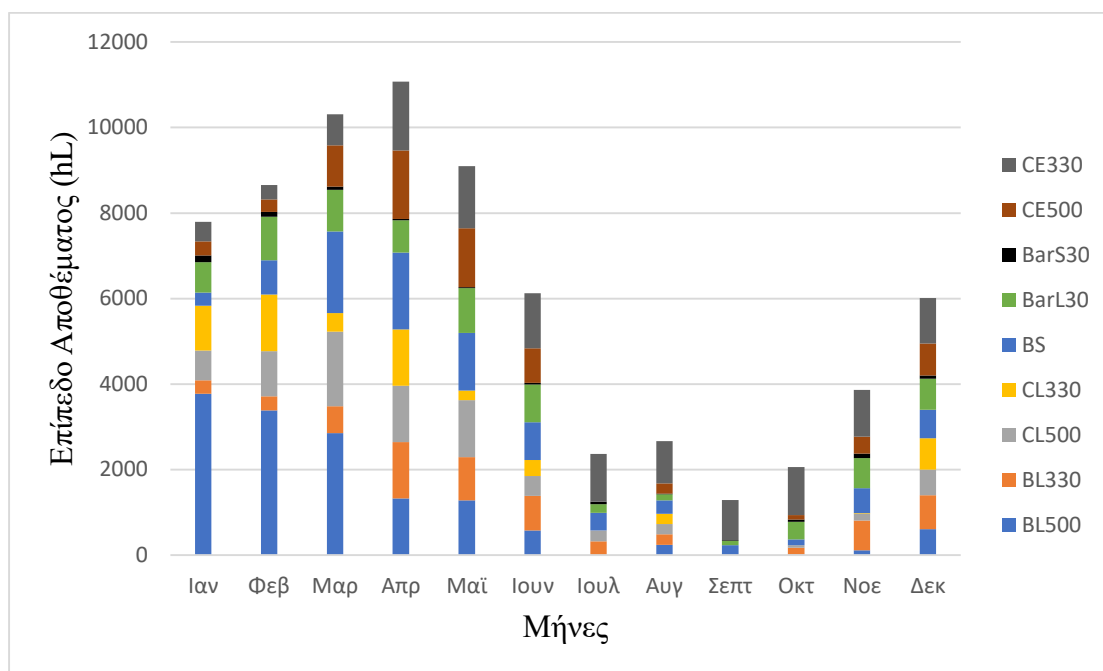
Στάδιο	Χρόνος επίλυσης
1 ^ο Τετράμηνο	43 λεπτά και 40 δευτερόλεπτα
2 ^ο Τετράμηνο	6 ώρες 5 λεπτά και 36 δευτερόλεπτα
3 ^ο Τετράμηνο	5 λεπτά και 10 δευτερόλεπτα

Όπως ήταν αναμενόμενο, η επίλυση του μοντέλου είναι δύσκολη κατά το δεύτερο στάδιο επίλυσης, δηλαδή το στάδιο που περιέχει τους μήνες με την υψηλότερη ζήτηση.

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα κατά το σχεδιασμό παραγωγής σε ζυθοποιία είναι ο προσδιορισμός του επιπέδου του αποθέματος. Αυτό συμβαίνει επειδή ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής στηρίζεται στο επίπεδο αποθέματος όπως αυτός προκύπτει κατά το σχεδιασμό παραγωγής αλλά και λόγω της επιθυμίας κάλυψης της ζήτησης ακόμα και σε περίπτωση που η προβλεπόμενη τιμή διαφέρει από την πραγματική. Τα επίπεδα του αποθέματος για κάθε υγρό και κάθε προϊόν στο τέλος κάθε μήνα όπως αυτά προέκυψαν με βάση τη μοντελοποίηση που αναφέρθηκε φαίνονται στο σχήμα 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1: Επίπεδα αποθέματος με βάση τον τύπο του υγρού μέσα στο έτος.

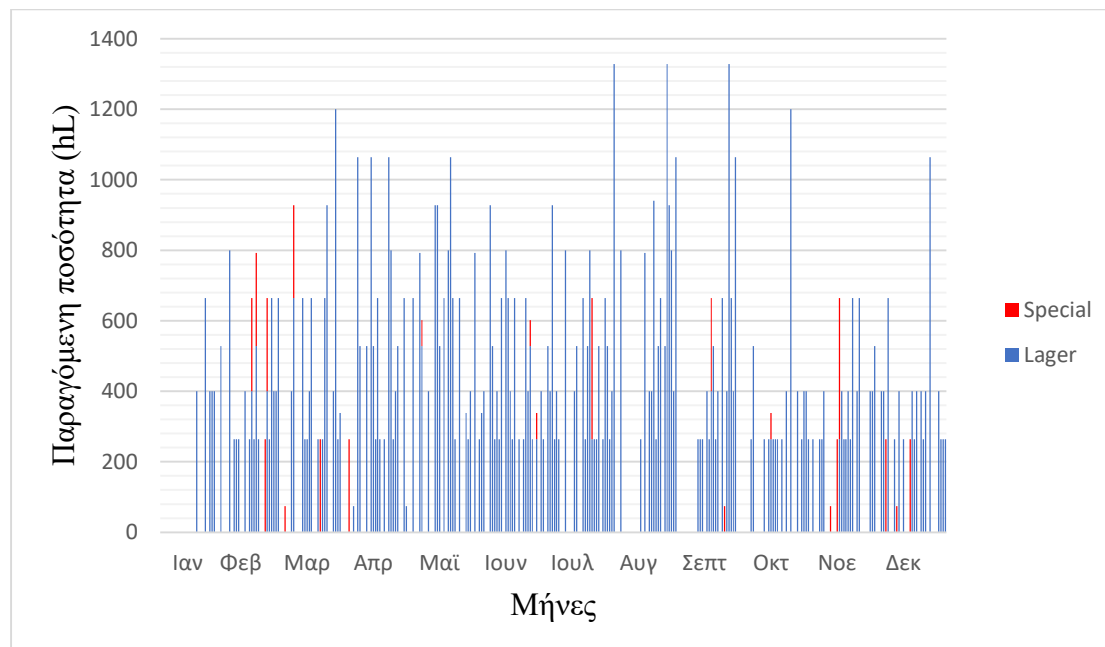


Σχήμα 4.2: Επίπεδα αποθέματος των προϊόντων μέσα στο έτος.

Γίνεται αντιληπτό ότι, κατά τους θερινούς μήνες η ικανοποίηση της ζήτησης δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί μόνο από την παραγωγή, για αυτό το επίπεδο του αποθέματος πρέπει να ρυθμίζεται. Έτσι, υπάρχει μια τάση για αποθήκευση προϊόντων τους μήνες της άνοιξης, ενώ το υπόλοιπο έτος είναι σημαντικό να ελέγχονται τα επίπεδα του αποθέματος για την εύρυθμη λειτουργία της μονάδας και την κάλυψη της ζήτησης.

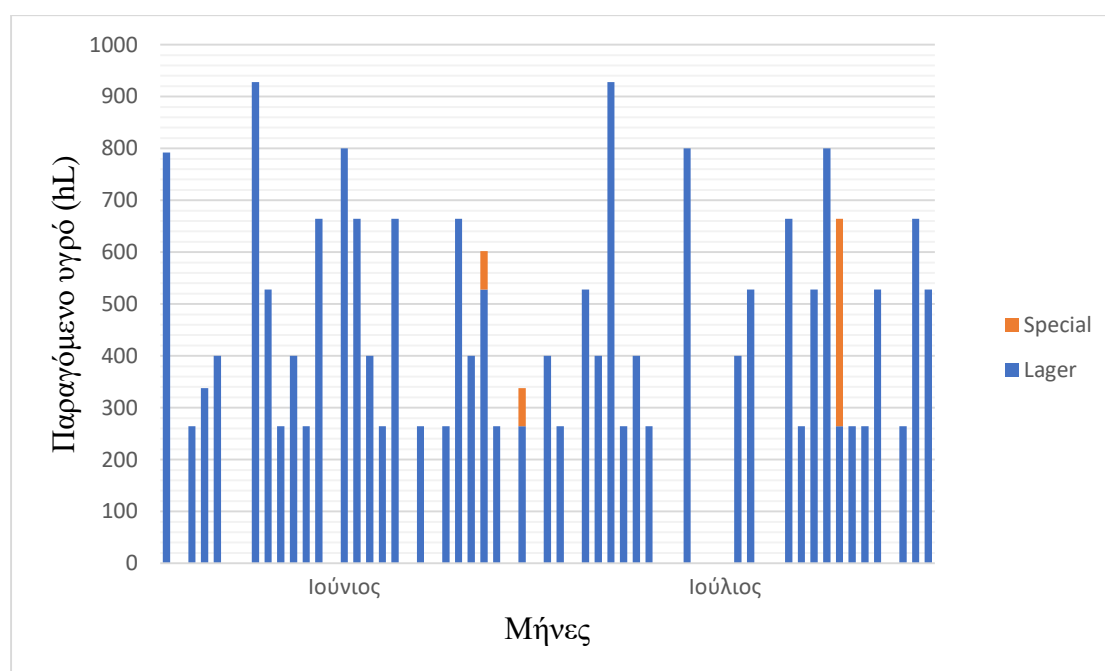
Ωστόσο, ο σχεδιασμός παραγωγής δε γίνεται μόνο για τη ρύθμιση του επιπέδου των αποθεμάτων. Ένας εξίσου σημαντικός λόγος που πραγματοποιείται σχεδιασμός παραγωγής είναι ο υπολογισμός και προσδιορισμός λειτουργίας των δεξαμενών ζύμωσης. Κατά το σχεδιασμό παραγωγής λαμβάνονται αποφάσεις για το άδειασμα, το γέμισμα και τη διάρκεια της ζύμωσης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παραγωγή τελικών προϊόντων για την ικανοποίηση της ζήτησης. Λόγω του χρόνου που απαιτείται για τη ζύμωση των υγρών ζύθου, η λήψη αποφάσεων για τη λειτουργία των δεξαμενών ζύμωσης αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα. Οι αποφάσεις σχετικά με τη ζύμωση σε κάποιο μήνα επηρεάζουν τις αποφάσεις της ζύμωσης του επόμενου μήνα όπως και επηρεάζονται από τις αποφάσεις του προηγούμενου. Επίσης, οι ανάγκες της παραγωγής έχουν επιρροή στη λήψη αποφάσεων για τη λειτουργία των δεξαμενών ζύμωσης. Για αυτό το λόγο, πρέπει να χρησιμοποιείται κάποια συστηματική μέθοδος καθορισμού της λειτουργίας των δεξαμενών ζύμωσης με τέτοιο τρόπο ώστε να

ικανοποιείται η παραγωγή προϊόντων για την κάλυψη της ζήτησης. Στο σχήμα 4.3 φαίνεται η ποσότητα του υγρού που παράγεται κάθε μέρα για ένα έτος κατά την επίλυση του μοντέλου.



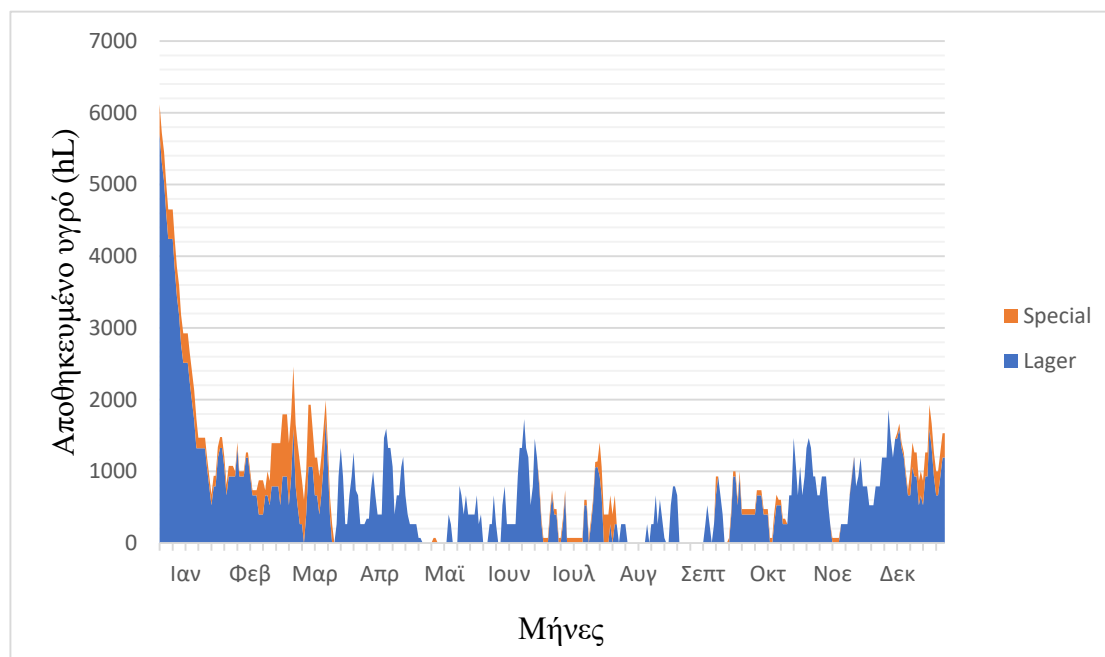
Σχήμα 4.3: Παραγόμενη ποσότητα υγρού κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Όπως φαίνεται, η ποσότητα του υγρού “Lager” που παράγεται είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της “Special”. Η ποσότητες των υγρών που παράγονται τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο, δηλαδή τους μήνες με τη μεγαλύτερη ζήτηση, φαίνονται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Παραγόμενη ποσότητα υγρού τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο.

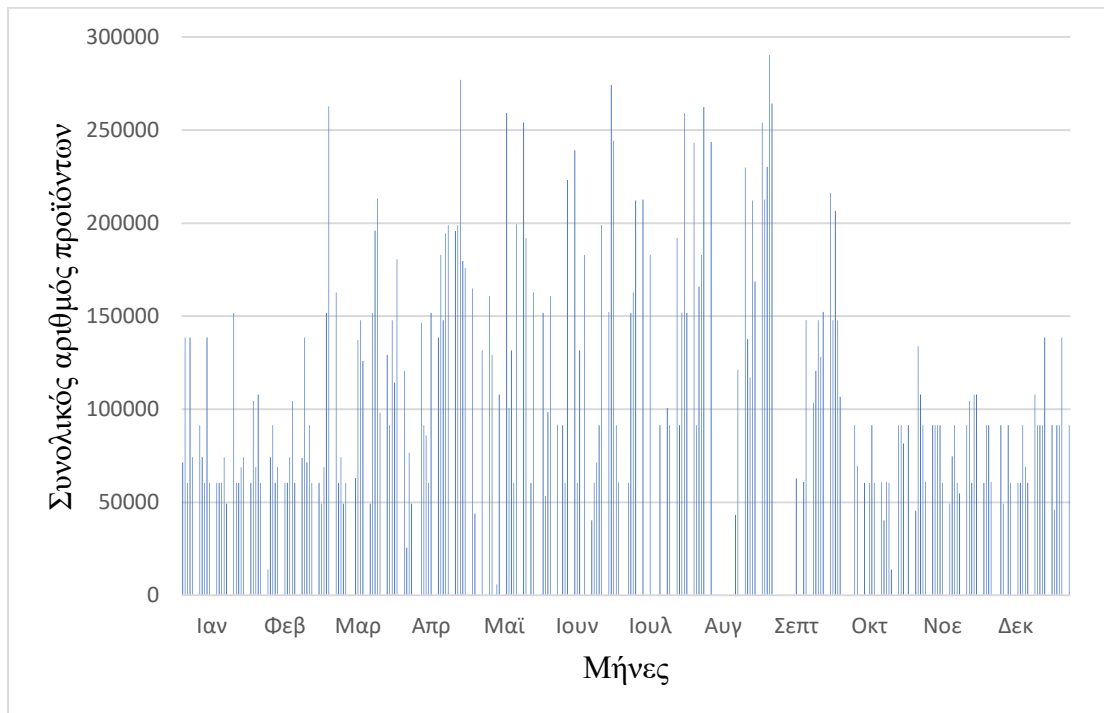
Ένας από τους στόχους της βιομηχανίας είναι η διείσδυση σε νέες αγορές και η πώληση όσο περισσότερων προϊόντων δύναται. Η βελτιστοποίηση της παραγωγής βοηθάει στην ικανοποίηση τέτοιων στόχων. Κατά τη βελτιστοποίηση της παραγωγής,



Σχήμα 4.5: Έτοιμο για εμφιάλωση, αποθηκευμένο υγρό ζύθου.

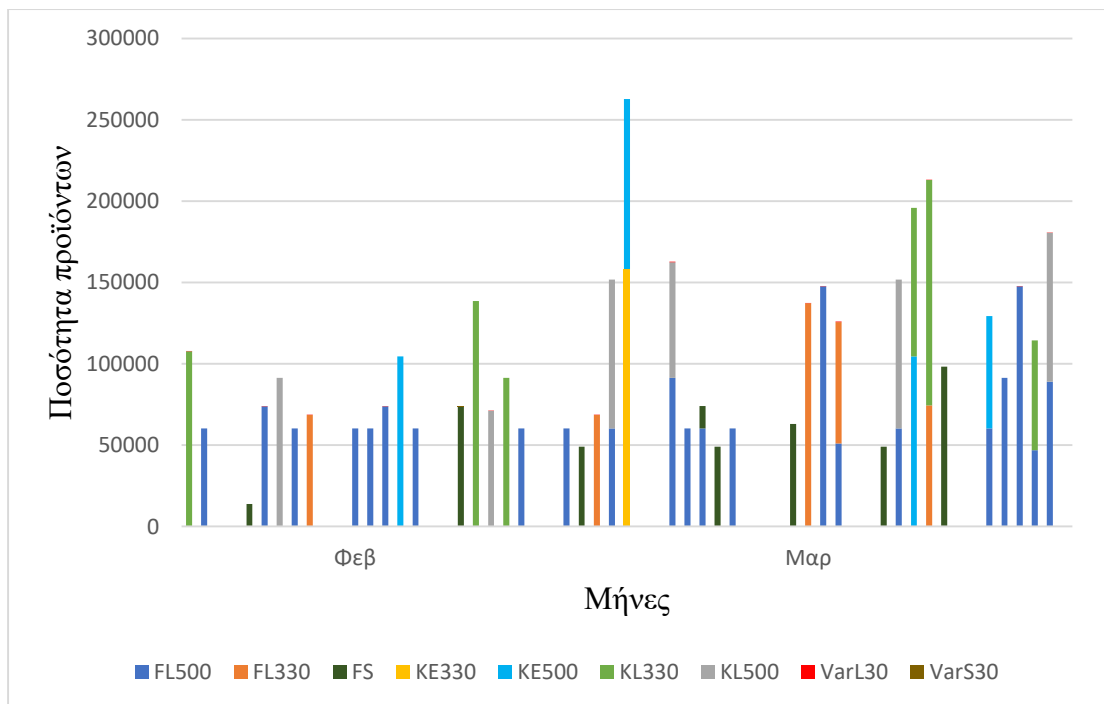
η μονάδα λειτουργεί ιδανικά αξιοποιώντας τους πόρους και τις συσκευές με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Στη ζυθοποιία, μεγάλη ανάγκη για ιδανική λειτουργία εμφανίζεται στις δεξαμενές ζύμωσης, αφού αυτές αποτελούν το σημαντικότερο σημείο συμφόρησης της παραγωγής. Στο σχήμα 4.5 απεικονίζεται η έτοιμη και αποθηκευμένη ποσότητα υγρού ζύθου στη διάρκεια του έτους. Όπως φαίνεται, η συνολική ποσότητα του έτοιμου αναξιοποίητου υγρού στην αρχή του χρονικού ορίζοντα είναι μεγάλη ενώ στη συνέχεια η ποσότητα αυτή ελαττώνεται, δείγμα βελτιστοποίησης της παραγωγής.

Το ετήσιο πρόγραμμα παραγωγής του συνόλου των τελικών προϊόντων όπως προκύπτει από τον σχεδιασμό παραγωγής φαίνεται στο σχήμα 4.6. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το πρόγραμμα παραγωγής που προκύπτει από το μοντέλο που εφαρμόζεται για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού παραγωγής δεν είναι το βέλτιστο, αλλά είναι ικανό να ικανοποιήσει την προβλεπόμενη ζήτηση.

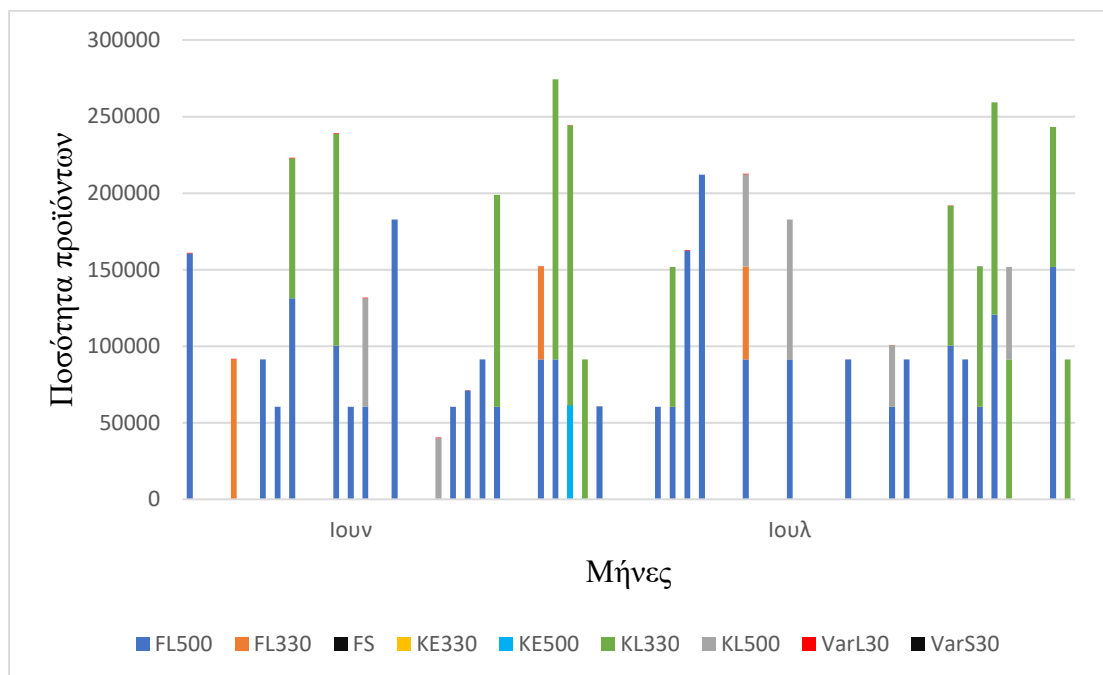


Σχήμα 4.6: Το ετήσιο πρόγραμμα της συνολικής παραγωγής, όπως προκύπτει κατά το σχεδιασμό παραγωγής.

Στα σχήματα 4.7 και 4.8 φαίνονται αναλυτικά οι ποσότητες τελικών προϊόντων που παράγονται σε δύο μήνες με χαμηλή ζήτηση και δύο μήνες με υψηλή ζήτηση προϊόντων αντίστοιχα.

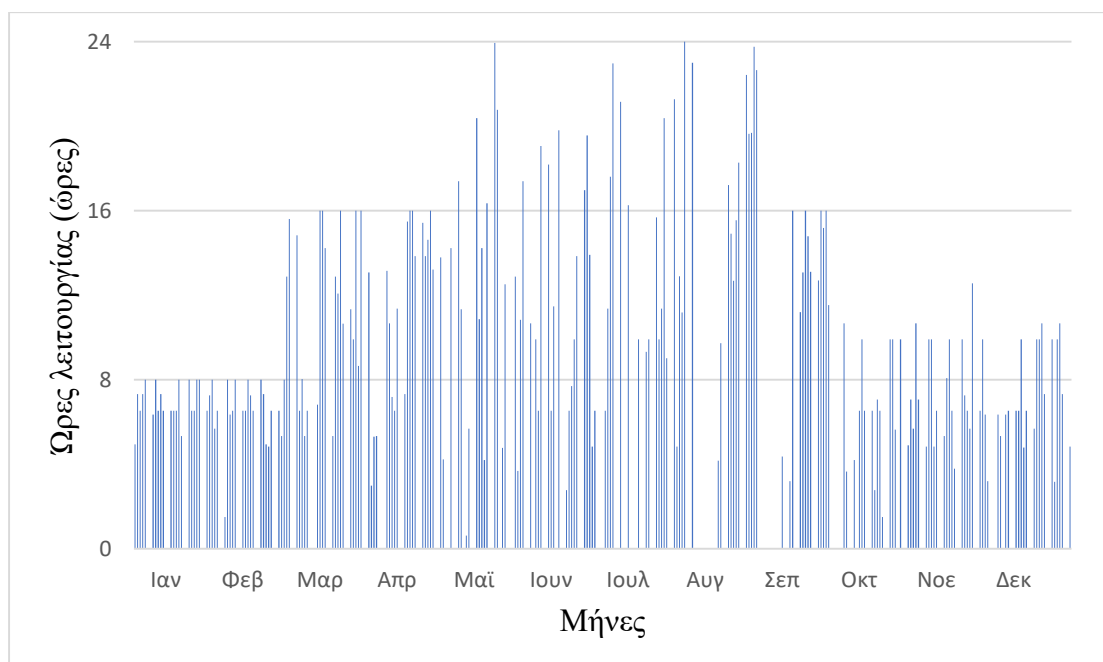


Σχήμα 4.7: Αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής δύο μηνών με χαμηλή ζήτηση.

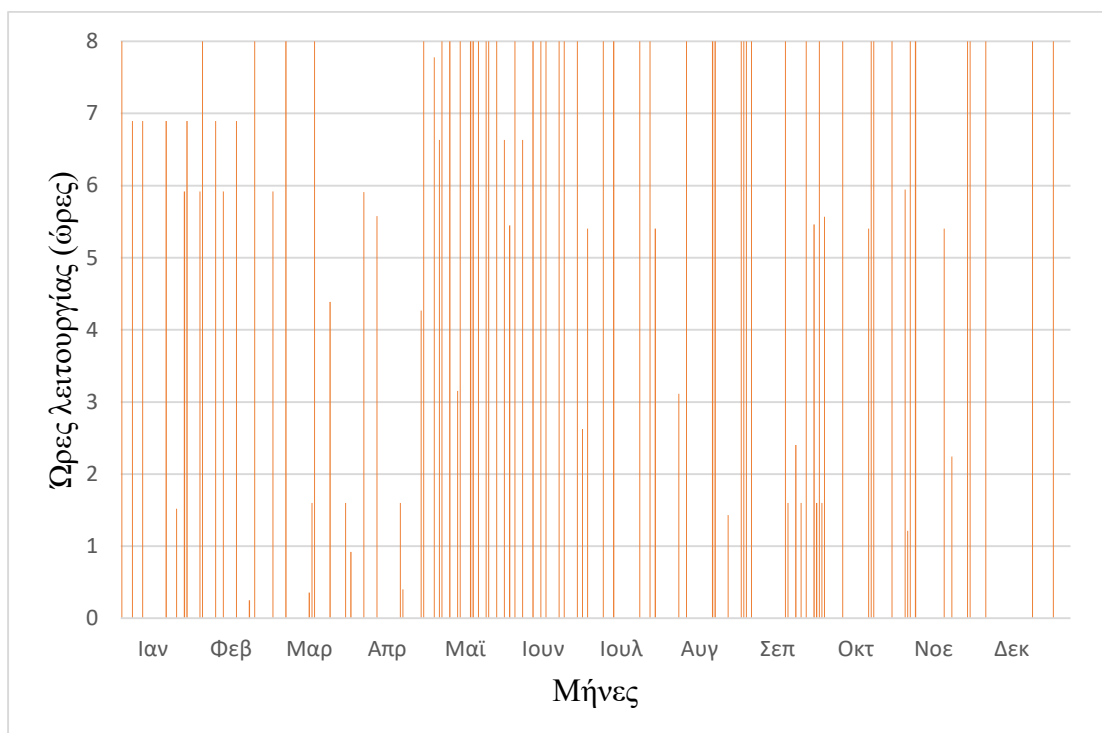


Σχήμα 4.8: Αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής δύο μηνών με υψηλή ζήτηση.

Ένας σημαντικός παράγοντας για τη λειτουργία της μονάδας είναι οι ώρες λειτουργίας της γραμμής εμφιάλωσης. Περισσότερες ώρες εμφιάλωσης οδηγούν σε γρηγορότερο άδειασμα των δεξαμενών ζύμωσης, ωστόσο αυξάνεται το πραγματικό κόστος παραγωγής, αφού πραγματοποιούνται περισσότερες βάρδιες. Στα σχήματα 4.9 και 4.10 φαίνονται οι ώρες λειτουργίας της γραμμής εμφιάλωσης και εμβαρέλωσης στη διάρκεια του έτους αντίστοιχα.



Σχήμα 4.9: Ημερήσια λειτουργία της γραμμής εμφιάλωσης σε βάθος ενός έτους.



Σχήμα 4.10: Ημερήσια λειτουργία της γραμμής εμβάρεωσης σε βάθος ενός έτους.

Είναι εμφανές, πως για την κάλυψη της ζήτησης τους μήνες με υψηλή ζήτηση πρέπει να αυξάνεται σταδιακά ο αριθμός των βαρδιών που πραγματοποιούνται κάθε μέρα.

Χρήση Κυλιόμενου Ορίζοντα με Μέθοδο Χαλάρωσης και Ορισμού

Η επίλυση με τη χρήση της προηγούμενης μεθόδου αποδείχθηκε μία εύκολη, ωστόσο, χρονοβόρα μέθοδος επίλυσης του προβλήματος σχεδιασμού παραγωγής σε ζυθοποιία. Επίσης, η χρήση περιορισμών ελαχίστου αποθέματος αποτελεί μια ημιεμπειρική μέθοδο, με αποτέλεσμα την πιθανή χρήση λανθασμένης τιμής για το κατώφλι αποθέματος και η επίλυση του προβλήματος να καθίσταται αδύνατη. Έτσι, δοκιμάστηκε η χρήση της συνδυασμένης μεθόδου κυλιόμενου ορίζοντα και χαλάρωσης και ορισμού. Σε αυτή την περίπτωση η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται σε δώδεκα βήματα, ενός μήνα (k) κάθε φορά. Σε κάθε βήμα επίλυσης, ο μήνας υπό εξέταση λύνεται ως σύστημα μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού και οι επόμενοι 4 μήνες ως σύστημα γραμμικού προγραμματισμού. Με αυτό τον τρόπο, σε κάθε βήμα επίλυσης συνυπολογίζονται οι απαιτήσεις για παραγωγή προϊόντων με στόχο την κάλυψη της παρούσας αλλά και της μελλοντικής ζήτησης.

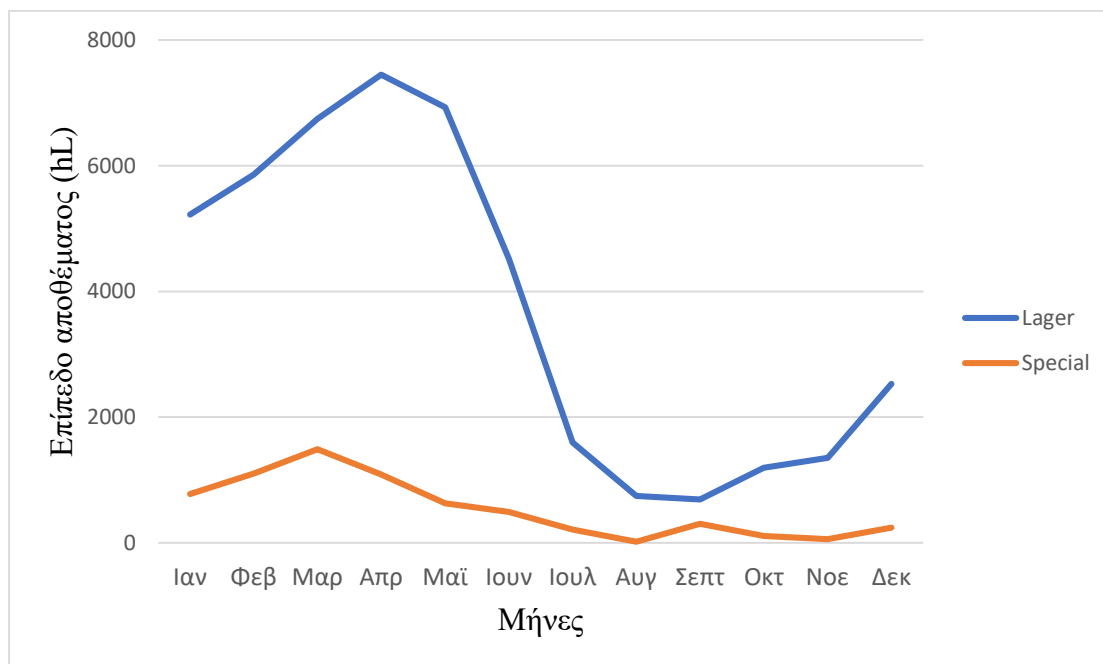
Η λύση με τη μέθοδο που περιγράφηκε παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα την εξολοκλήρου κάλυψη της ζήτησης χωρίς απώλεια πωλήσεων, άρα $J = 0$. Ο συνολικός χρόνος επίλυσης σε αυτή την περίπτωση είναι σχεδόν 2 ώρες και 50 λεπτά, σημαντικά μικρότερος από την προηγούμενη περίπτωση. Οι χρόνοι επίλυσης κάθε μήνα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.

Πίνακας 5: Χρόνος επίλυσης κάθε μήνα.

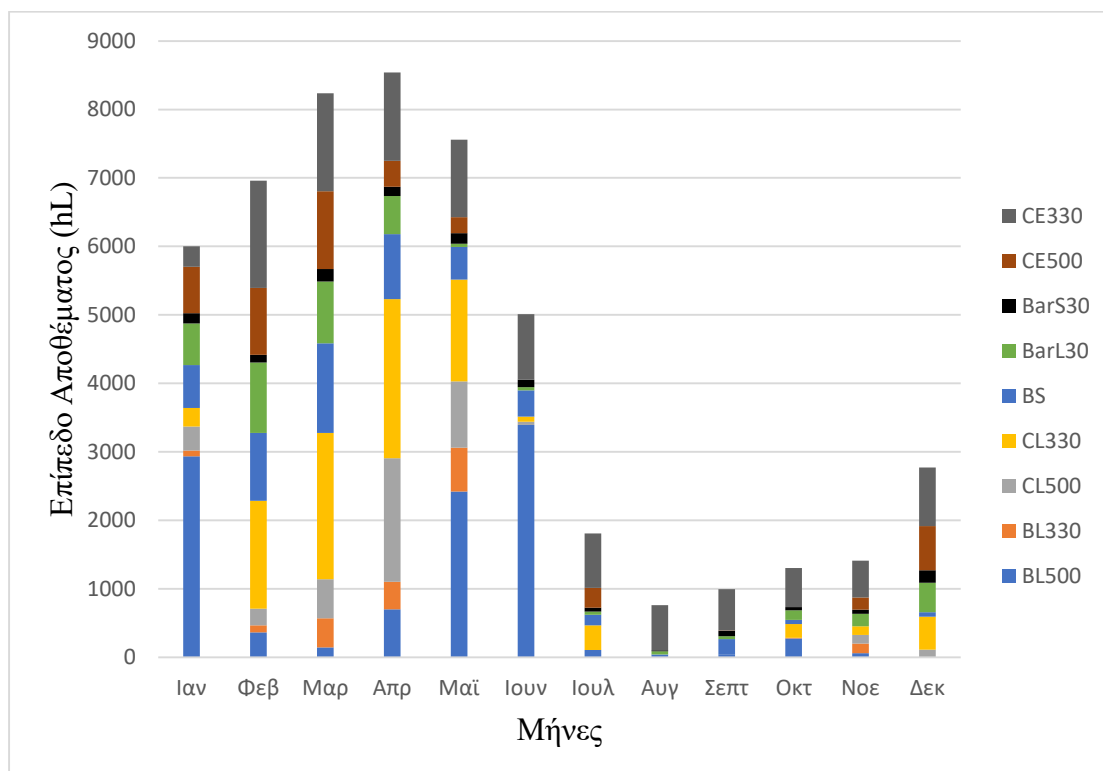
Στάδιο	Χρόνος επίλυσης
Ιανουάριος	4 λεπτά και 36 δευτερόλεπτα
Φεβρουάριος	8 λεπτά και 53 δευτερόλεπτα
Μάρτιος	23 λεπτά και 23 δευτερόλεπτα
Απρίλιος	1 ώρα 15 λεπτά και 28 δευτερόλεπτα
Μάιος	23 λεπτά και 55 δευτερόλεπτα
Ιούνιος	16 λεπτά και 25 δευτερόλεπτα
Ιούλιος	12 λεπτά και 54 δευτερόλεπτα
Αύγουστος	2 λεπτά και 50 δευτερόλεπτα
Σεπτέμβριος	42 δευτερόλεπτα
Οκτώβριος	20 δευτερόλεπτα
Νοέμβριος	15 δευτερόλεπτα
Δεκέμβριος	10 δευτερόλεπτα

Όπως και πριν, η επίλυση του μοντέλου δυσκολεύει κοντά στους θερινούς μήνες, καθώς η ζήτηση όπως και η απαίτηση για διατήρηση αποθέματος αυξάνονται.

Σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει περιορισμός που να αφορά το κατώφλι του αποθέματος. Αυτό σημαίνει πως κατά τη βελτιστοποίηση της παραγωγής η τιμή του αποθέματος μπορεί να λάβει οποιαδήποτε θετική τιμή. Ωστόσο, το επίπεδο του αποθέματος φαίνεται να ακολουθεί την ίδια τάση με την προηγούμενη λύση. Τα επίπεδα του αποθέματος για κάθε υγρό και κάθε προϊόν στο τέλος κάθε μήνα όπως αυτά προέκυψαν φαίνονται στο σχήμα 4.11 και 4.12 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.11: Επίπεδα αποθέματος με βάση τον τύπο του υγρού μέσα στο έτος.

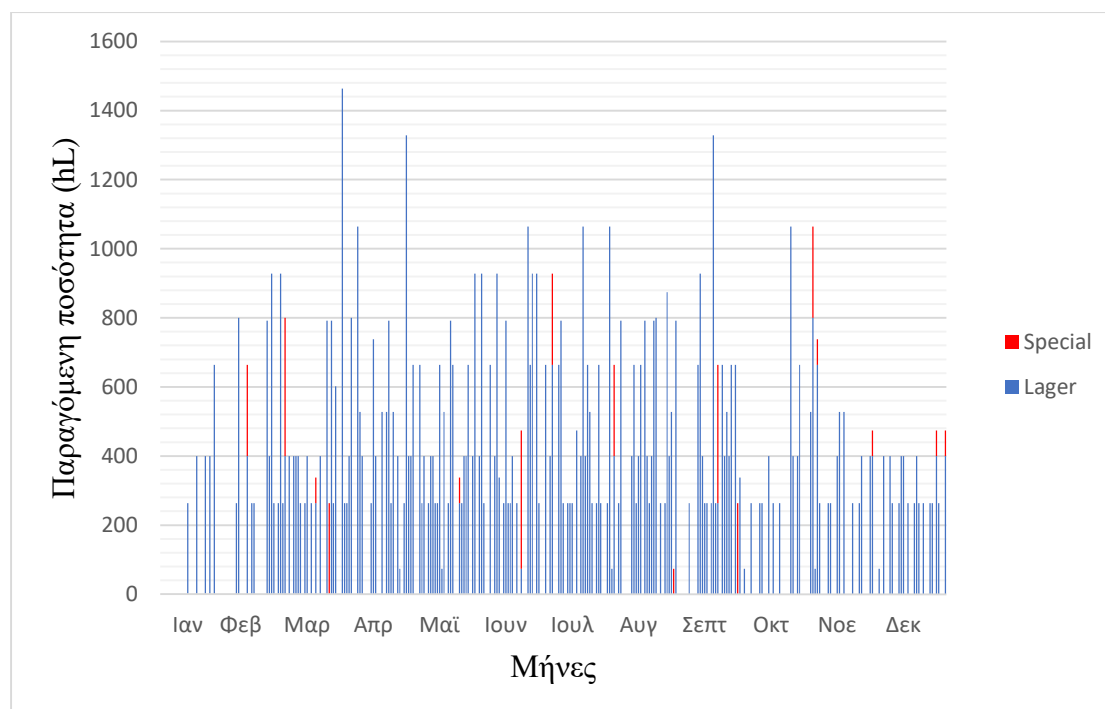


Σχήμα 4.12: Επίπεδα αποθέματος των προϊόντων μέσα στο έτος.

Φαίνεται, πως η τάση που ακολουθεί το επίπεδο του αποθέματος σε αυτή τη λύση είναι πιο ομαλή. Επίσης, λόγω της χαμηλής τιμής μέγιστου και ελάχιστου

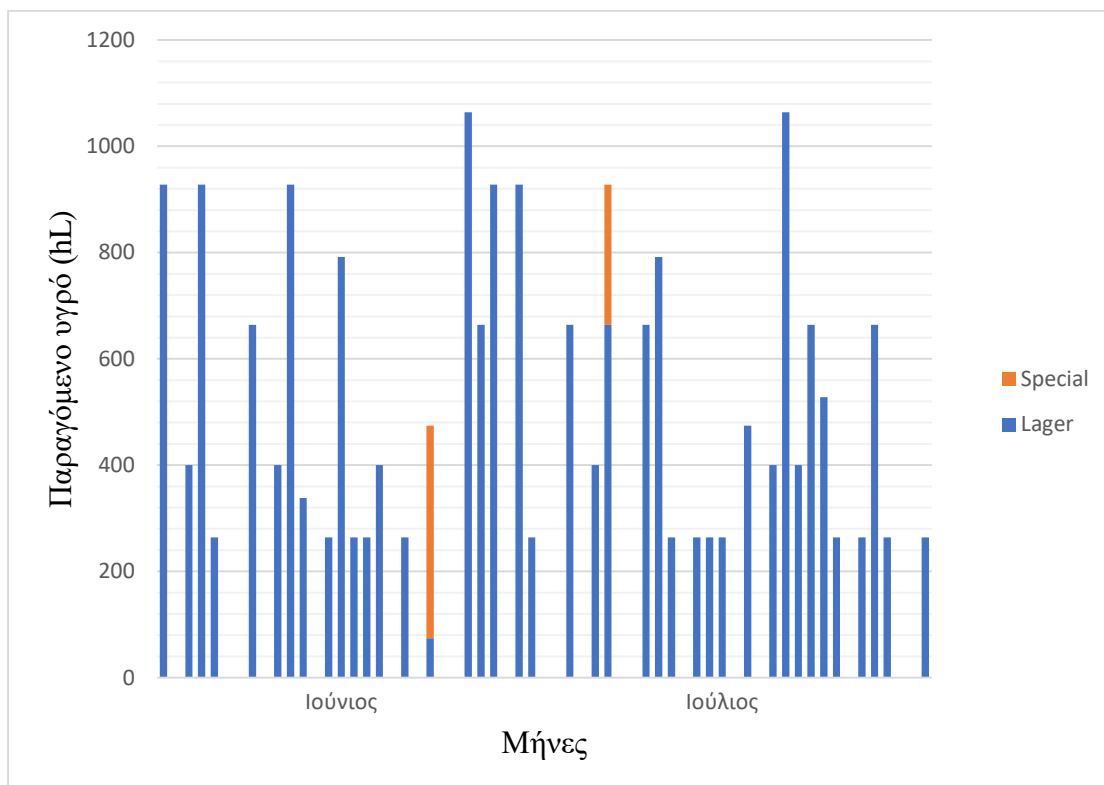
αποθέματος που εμφανίζονται στους μήνες Απρίλιο και Αύγουστο αντίστοιχα. Συμπεραίνεται ότι η λύση που βρέθηκε με τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι καλύτερη διότι το επίπεδο του αποθέματος επιλέγεται κατά την επίλυση και δεν ορίζεται ως περιορισμός.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενως η σωστή διαχείριση των δεξαμενών ζύμωσης είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία μίας ζυθοποιίας. Κατά το σχεδιασμό παραγωγής αποφασίζεται το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας των δεξαμενών ζύμωσης και ο τύπος υγρού που θα παράξουν. Τα αποτελέσματα, όπως αυτά προέκυψαν κατά τη βελτιστοποίηση σχεδιασμού παραγωγής με τη χρήση της συνδυαστικής μεθόδου κυλιόμενου ορίζοντα και χαλάρωσης και ορισμού φαίνονται στο σχήμα 4.13.



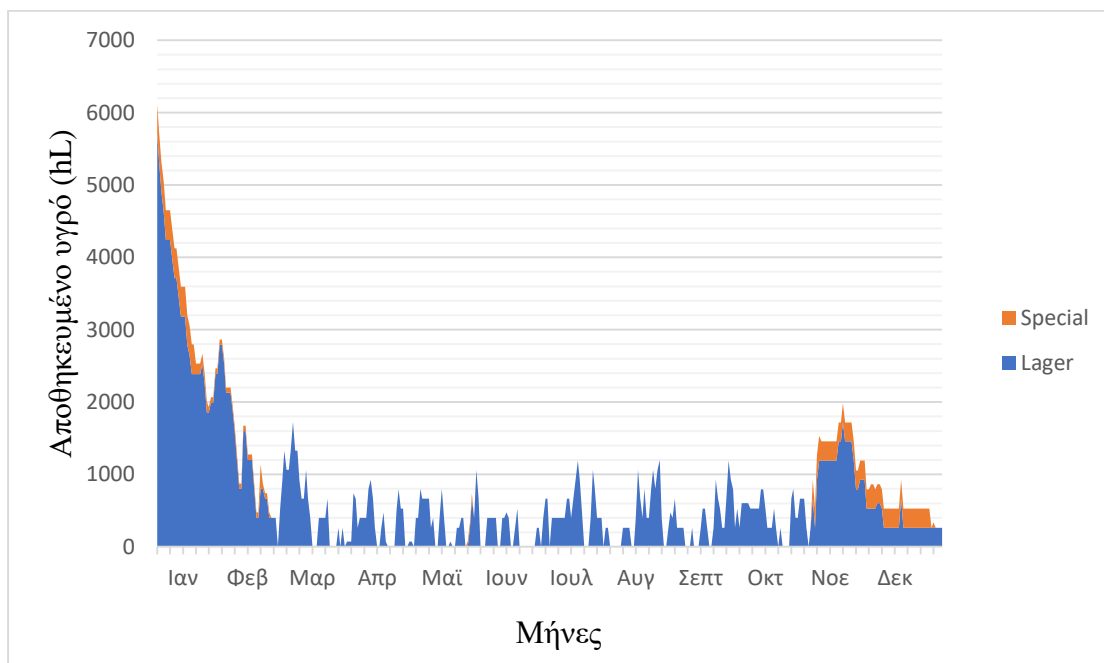
Σχήμα 4.13: Παραγόμενη ποσότητα υγρού κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Όπως και πριν, η ποσότητα του υγρού “Lager” που παράγεται είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της “Special”. Η ποσότητες των υγρών που παράγονται τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο, δηλαδή τους μήνες με τη μεγαλύτερη ζήτηση, φαίνονται στο σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.14: Παραγόμενη ποσότητα υγρού τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο.

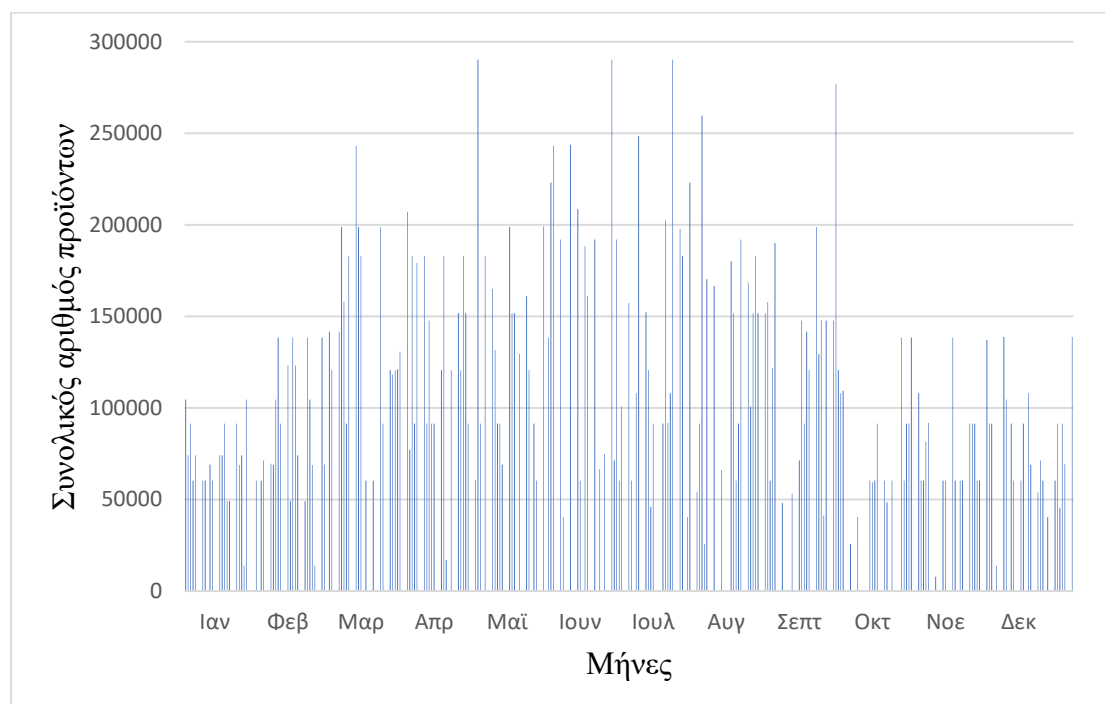
Στο σχήμα 4.15 φαίνεται η έτοιμη και αποθηκευμένη ποσότητα υγρού ζύθου στη διάρκεια του έτους. Όπως επισημάνθηκε ήδη, η συνολική ποσότητα του έτοιμου αναξιοποίητου υγρού στην αρχή του χρονικού ορίζοντα είναι μεγάλη ενώ στη συνέχεια η ποσότητα αυτή ελαττώνεται, δείγμα βελτιστοποίησης της παραγωγής.



Σχήμα 4.15: Έτοιμο για εμφιάλωση, αποθηκευμένο υγρό ζύθου.

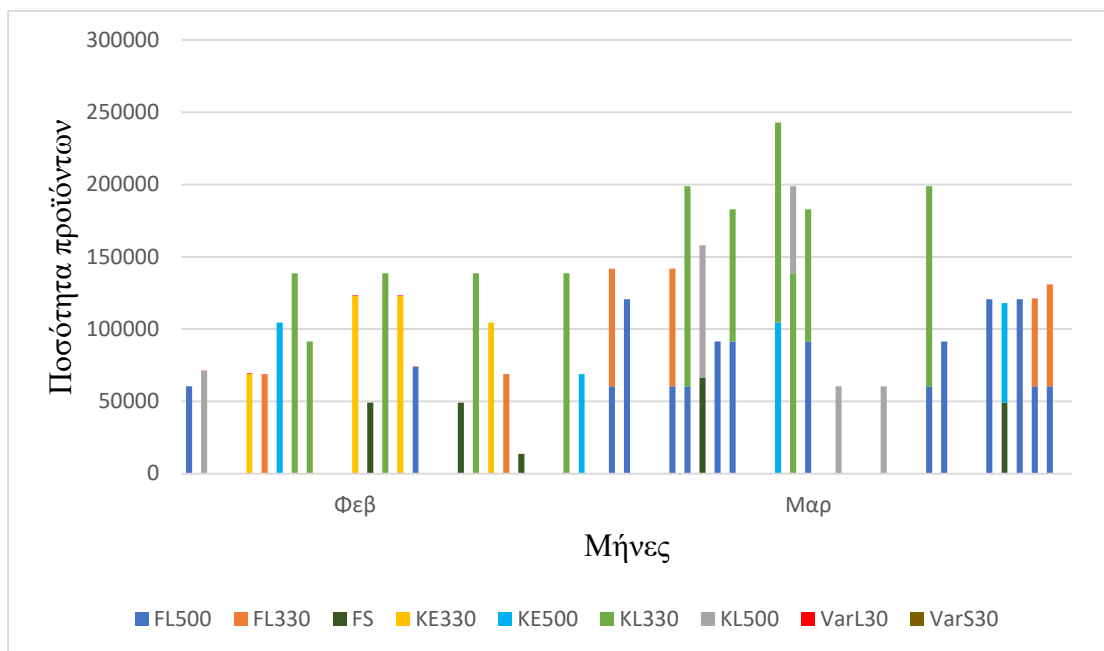
Η τάση για αποθήκευση έτοιμου υγρού στις δεξαμενές ζύμωσης φαίνεται ίδια με την προηγούμενη μέθοδο, ωστόσο, η διαχείριση φαίνεται να γίνεται ελαφρώς αποτελεσματικότερα.

Το ετήσιο πρόγραμμα παραγωγής του συνόλου των τελικών προϊόντων όπως προκύπτει από την επίλυση με τη χρήση αυτής της μεθόδου φαίνεται στο σχήμα 4.16. Όπως αναφέρθηκε, το πρόγραμμα παραγωγής που προκύπτει από το μοντέλο που εφαρμόζεται για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού παραγωγής δεν είναι το βέλτιστο, αλλά είναι ικανό να ικανοποιήσει την προβλεπόμενη ζήτηση.

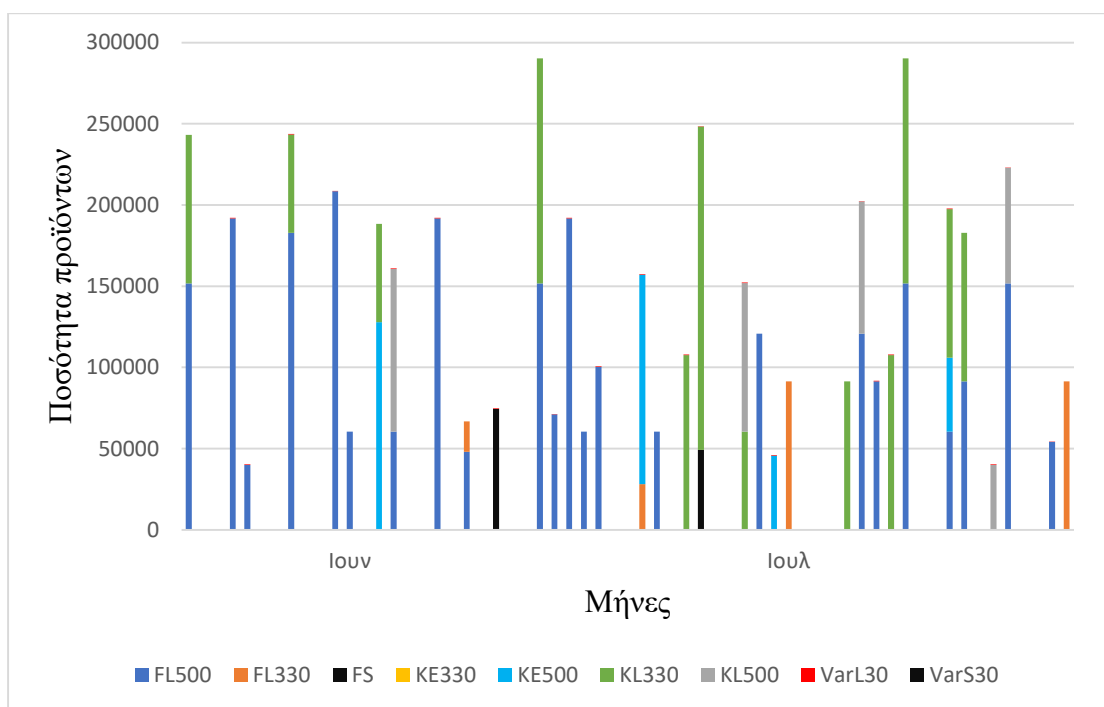


Σχήμα 4.16: Το ετήσιο πρόγραμμα της συνολικής παραγωγής, όπως προκύπτει κατά το σχεδιασμό παραγωγής.

Από τη σύγκριση του προγράμματος παραγωγής που προκύπτει σε σχέση με αυτό της προηγούμενης μεθόδου προκύπτουν κάποια συμπεράσματα. Είναι φανερό πως οι γραμμές παραγωγής προϊόντων είναι πιο αραιές και δεν υπάρχουν μεγάλα κενά. Αυτό σημαίνει πως η παραγωγή πραγματοποιείται με ομοιογενή τρόπο, πράγμα επιθυμητό από οποιαδήποτε βιομηχανία. Στα σχήματα 4.17 και 4.18 φαίνονται αναλυτικά οι ποσότητες τελικών προϊόντων που παράγονται σε δύο μήνες με χαμηλή ζήτηση και δύο μήνες με υψηλή ζήτηση προϊόντων αντίστοιχα.

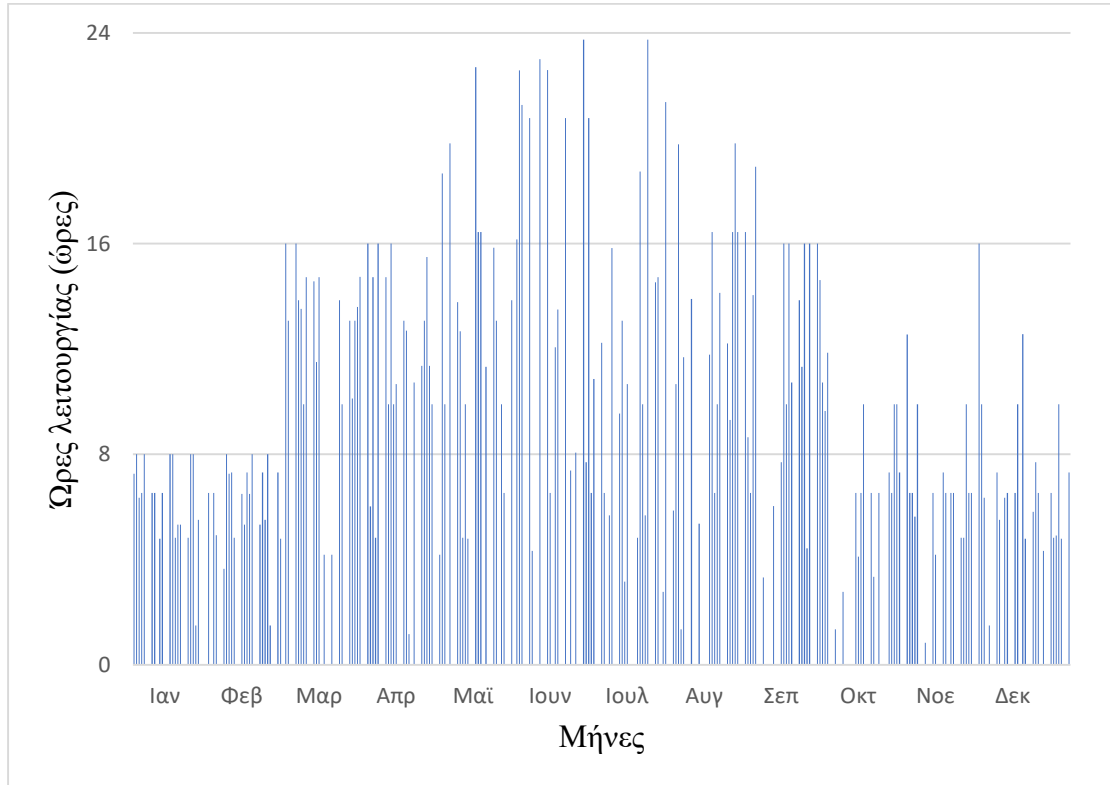


Σχήμα 4.17: Αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής δύο μηνών με χαμηλή ζήτηση.

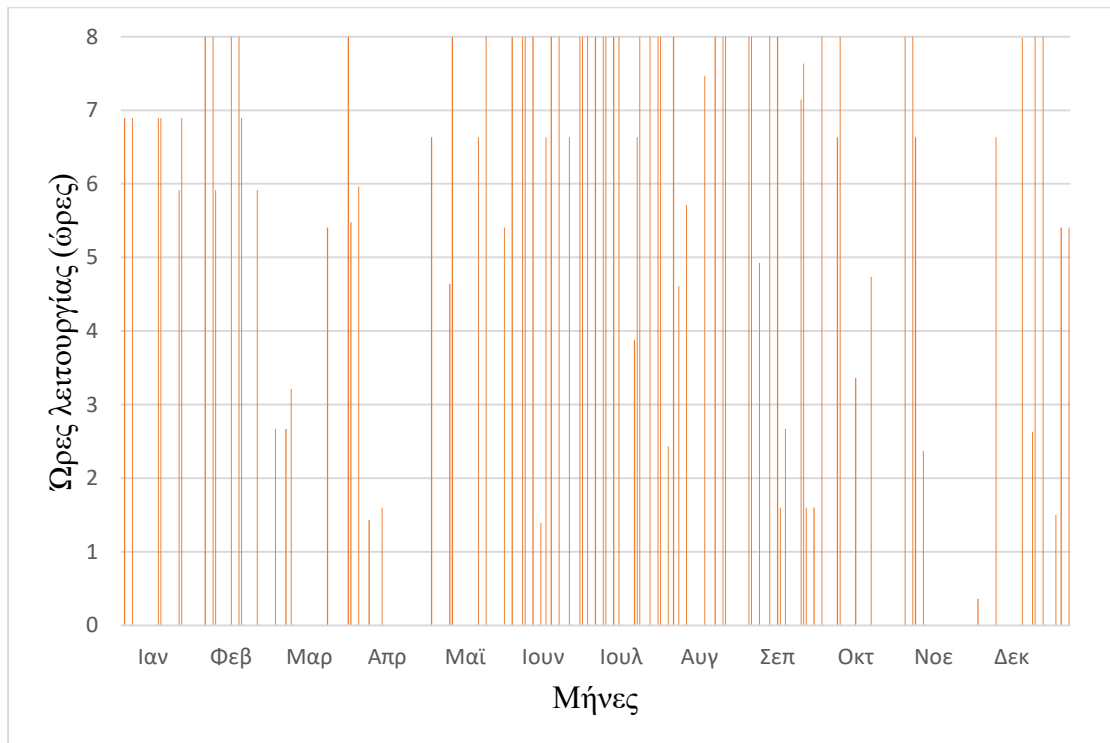


Σχήμα 4.18: Αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής δύο μηνών με υψηλή ζήτηση.

Στα σχήματα 4.19 και 4.20 φαίνονται οι ώρες λειτουργίας της γραμμής εμφιάλωσης και εμβарέλωσης στη διάρκεια του έτους αντίστοιχα.



Σχήμα 4.19: Ημερήσια λειτουργία της γραμμής εμφιάλωσης σε βάθος ενός έτους.



Σχήμα 4.20: Ημερήσια λειτουργία της γραμμής εμβαρέλωσης σε βάθος ενός έτους.

Είναι εμφανές, πως για την κάλυψη της ζήτησης τους μήνες με υψηλή ζήτηση πρέπει να αυξάνεται σταδιακά ο αριθμός των βαρδιών που πραγματοποιούνται κάθε μέρα. Όπως συμπεραίνεται και από τα σχήματα 4.19 και 4.20, οι χρόνοι λειτουργίας της μονάδας εμφιάλωσης και εμβαρέλωσης είναι πιο ομοιόμορφη, αφού οι γραμμές λειτουργίας είναι πιο αραιές και λιγότερο έντονες.

Χρήση Κυλιόμενου Ορίζοντα με Μέθοδο Χαλάρωσης και Ορισμού με επαναπροσδιορισμού της ζήτησης του Μαΐου κατά την επίλυση της 3^{ης} επανάληψης.

Για την επίλυση του προβλήματος του σχεδιασμού της παραγωγής χρησιμοποιήθηκε μια πρόβλεψη της ζήτησης των τελικών προϊόντων της Ζυθοποιίας Μακεδονίας Θράκης για κάθε μήνα. Ωστόσο, πολλές φορές η προβλεπόμενη ζήτηση διαφέρει από την πραγματική λόγω αλλαγής στρατηγικής μάρκετινγκ, προτιμήσεων των καταναλωτών ή, ειδικά στην περίπτωση της Ζυθοποιίας, κλιματικών αλλαγών κ.α. Σε αυτή την περίπτωση μελετάται η αύξηση της προβλεπόμενης ζήτησης του μήνα Μαΐου κατά 10%. Η αλλαγή αυτή εφαρμόζεται κατά την τρίτη επανάληψη της μεθόδου κυλιόμενου ορίζοντα σε συνδυασμό με τη μέθοδο χαλάρωσης και ορισμού, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα.

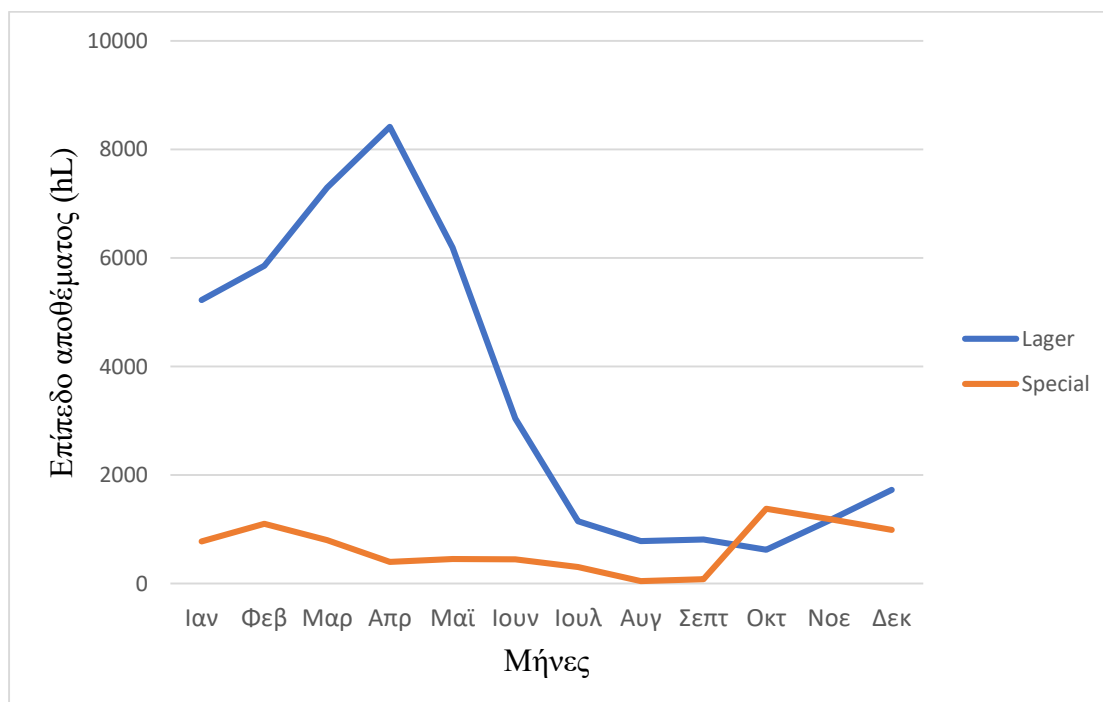
Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης δείχνουν πως η ζυθοποιία είναι ικανή να καλύψει την αλλαγή στη ζήτηση, καθώς δεν υπάρχει απώλεια πωλήσεων, δηλαδή $J = 0$. Ο συνολικός χρόνος επίλυσης σε αυτή την περίπτωση είναι σχεδόν 17 ώρες και 40 λεπτά. Συγκρίνοντας με την επίλυση της προβλεπόμενης ζήτησης, ο χρόνος επίλυσης αυξάνεται σημαντικά μετά την αλλαγή της, δηλαδή από τον μήνα Μάρτιο και ιδιαίτερα τον μήνα Απρίλιο. Παρότι ο χρόνος επίλυσης είναι εξαιρετικά μεγάλος, η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μικρές αλλαγές στην προβλεπόμενη ζήτηση. Οι χρόνοι επίλυσης κάθε μήνα φαίνονται στον πίνακα 6.

Πίνακας 6: Χρόνος επίλυσης κάθε μήνα.

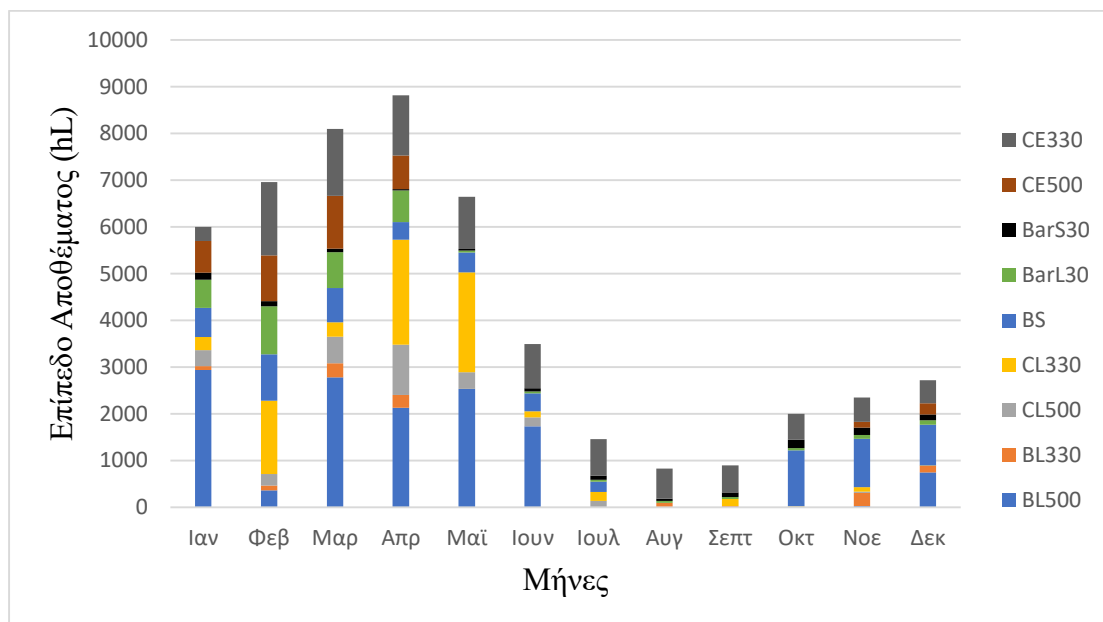
Στάδιο	Χρόνος επίλυσης
Ιανουάριος	4 λεπτά και 10 δευτερόλεπτα
Φεβρουάριος	8 λεπτά και 16 δευτερόλεπτα
Μάρτιος	47 λεπτά και 15 δευτερόλεπτα

Απρίλιος	12 ώρα 45 λεπτά και 07 δευτερόλεπτα
Μάιος	1 ώρα 33 λεπτά και 04 δευτερόλεπτα
Ιούνιος	26 λεπτά και 18 δευτερόλεπτα
Ιούλιος	1 ώρα 45 λεπτά και 51 δευτερόλεπτα
Αύγουστος	8 λεπτά και 31 δευτερόλεπτα
Σεπτέμβριος	3 λεπτά
Οκτώβριος	27 δευτερόλεπτα
Νοέμβριος	18 δευτερόλεπτα
Δεκέμβριος	13 δευτερόλεπτα

Τα επίπεδα του αποθέματος για κάθε υγρό και κάθε προϊόν στο τέλος κάθε μήνα όπως αυτά προέκυψαν φαίνονται στα σχήματα 4.21 και 4.22 αντίστοιχα.



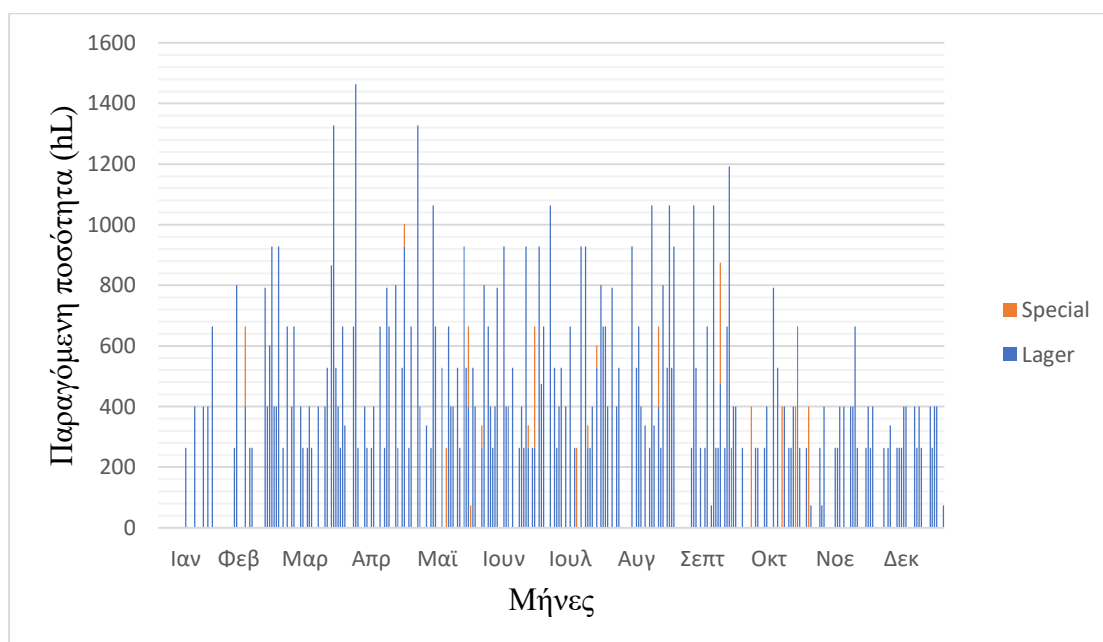
Σχήμα 4.21: Επίπεδα αποθέματος με βάση τον τύπο του υγρού μέσα στο έτος.



Σχήμα 4.22: Επίπεδα αποθέματος των προϊόντων μέσα στο έτος.

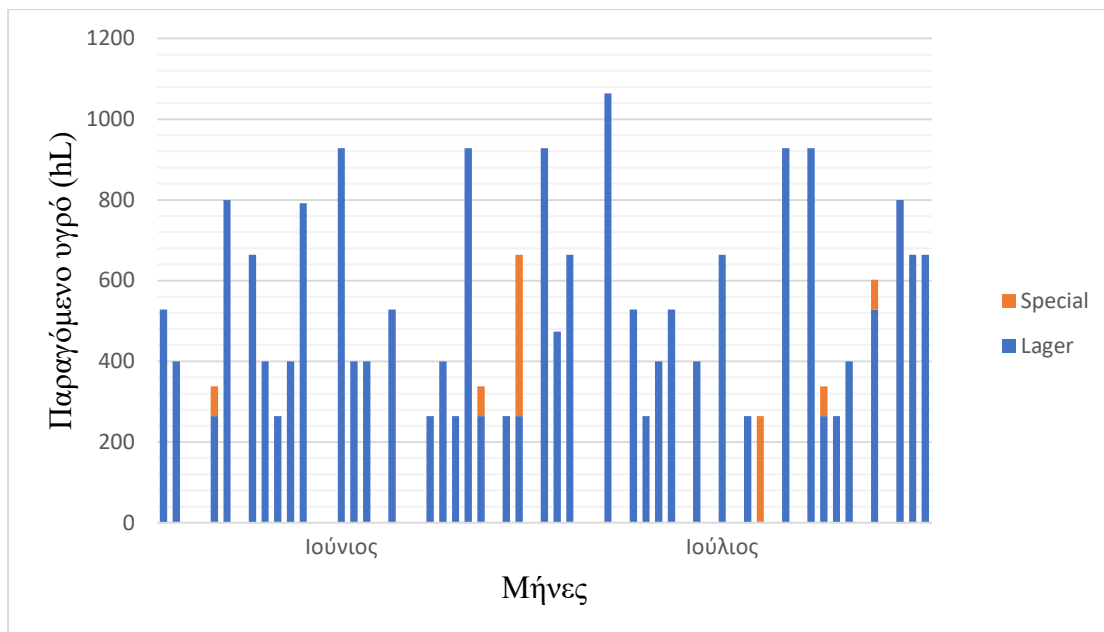
Η τάση που ακολουθεί το επίπεδο του αποθέματος σε σύγκριση με την προηγούμενη λύση είναι λίγο πιο απότομη τους μήνες πριν και μετά τον Απρίλιο, ενώ τα ακρότατα που εμφανίζονται έχουν υψηλότερη τιμή. Ωστόσο, η τάση του επιπέδου του αποθέματος ακολουθεί αυτή της προηγούμενης ενότητας, πράγμα που υποδεικνύει τη βελτιστοποίηση της παραγωγής.

Τα αποτελέσματα, που προέκυψαν κατά τη βελτιστοποίηση σχεδιασμού παραγωγής με διαφοροποίηση στη ζήτηση φαίνονται στο σχήμα 4.23.



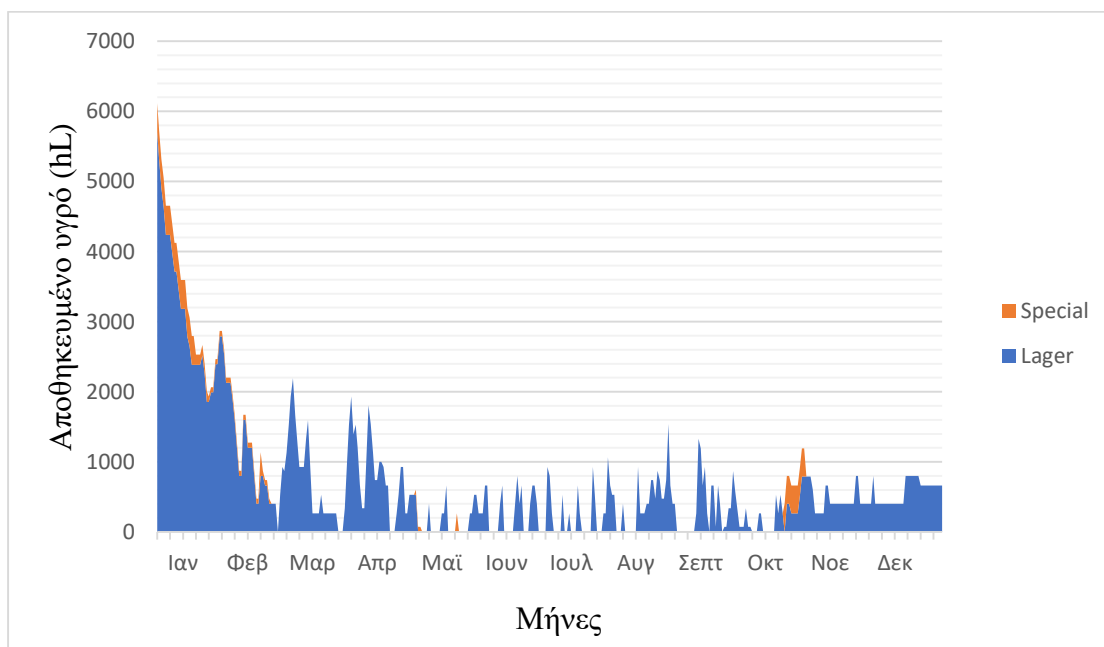
Σχήμα 4.23: Παραγόμενη ποσότητα υγρού κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Η ποσότητες των υγρών που παράγονται τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο, δηλαδή τους μήνες με τη μεγαλύτερη ζήτηση, φαίνονται στο σχήμα 4.24.



Σχήμα 4.24: Παραγόμενη ποσότητα υγρού τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο.

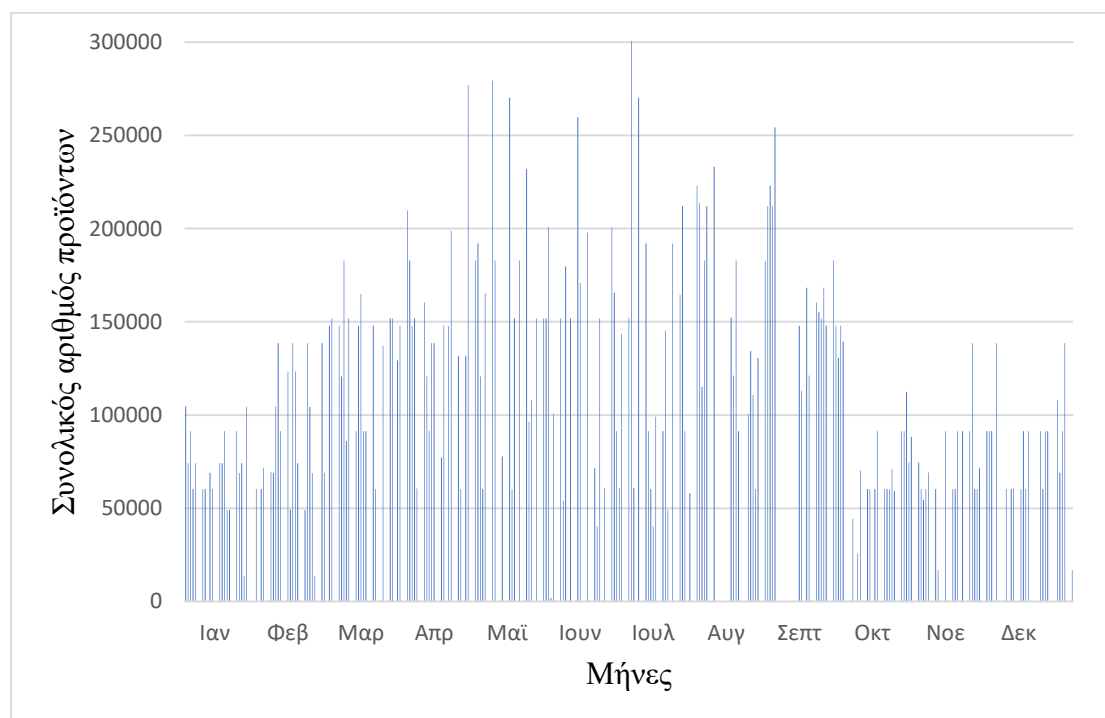
Στο σχήμα 4.25 φαίνεται η έτοιμη και αποθηκευμένη ποσότητα υγρού ζύθου στη διάρκεια του έτους.



Σχήμα 4.25: Έτοιμο για εμφιάλωση, αποθηκευμένο υγρό ζύθου.

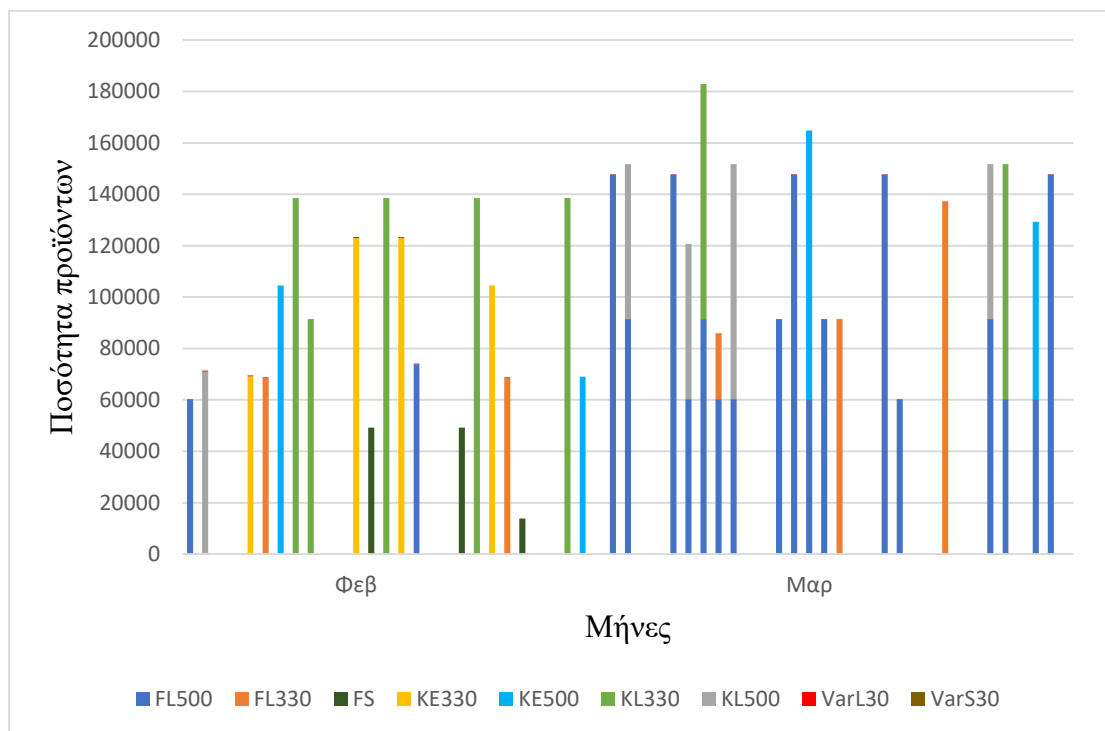
Η τάση για αποθήκευση έτοιμου υγρού στις δεξαμενές ζύμωσης φαίνεται αμετάβλητη, ωστόσο, η αποθήκευση υγρού το μήνα Μάρτιο είναι αυξημένη ενώ τους θερινούς μήνες φαίνεται να είναι μειωμένη.

Το ετήσιο πρόγραμμα παραγωγής του συνόλου των τελικών προϊόντων όπως προκύπτει από την επίλυση με την αύξηση της ζήτησης φαίνεται στο σχήμα 4.26.

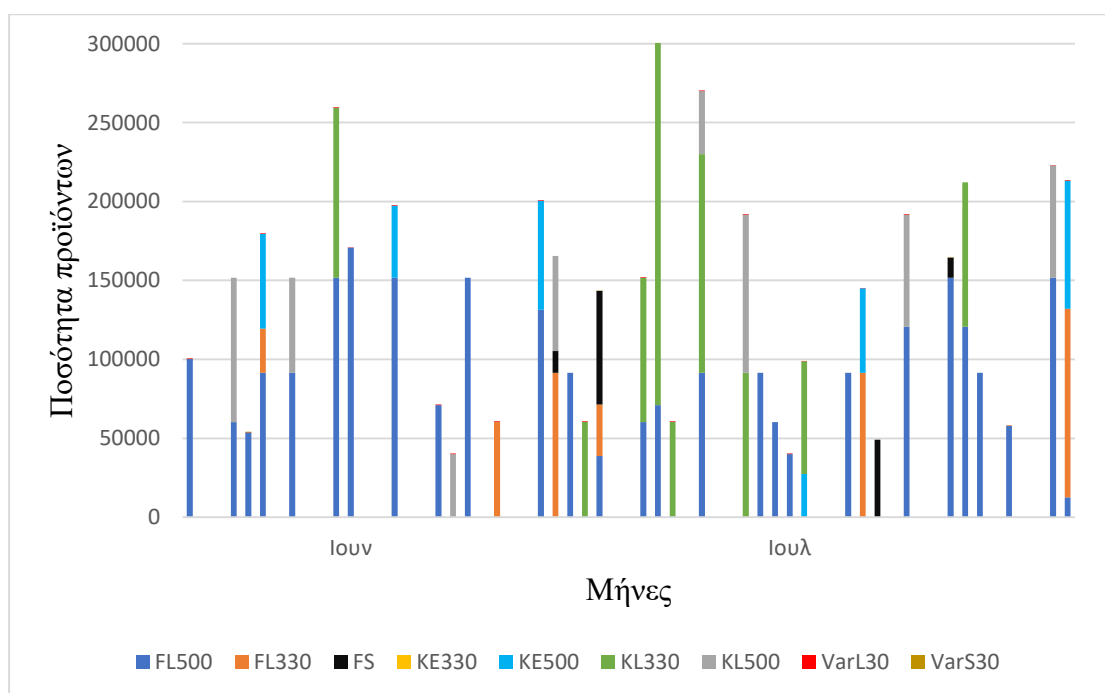


Σχήμα 4.26: Το ετήσιο πρόγραμμα της συνολικής παραγωγής, όπως προκύπτει κατά το σχεδιασμό παραγωγής.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η συνολική παραγωγή τους μήνες Μάρτιο, Απρίλιο και Μάιο φαίνεται αυξημένη, λόγω της αλλαγής που πραγματοποιήθηκε στη ζήτηση του Μαΐου. Στα σχήματα 4.27 και 4.28 φαίνονται αναλυτικά οι ποσότητες τελικών προϊόντων που παράγονται σε δύο μήνες με χαμηλή ζήτηση και δύο μήνες με υψηλή ζήτηση προϊόντων αντίστοιχα.

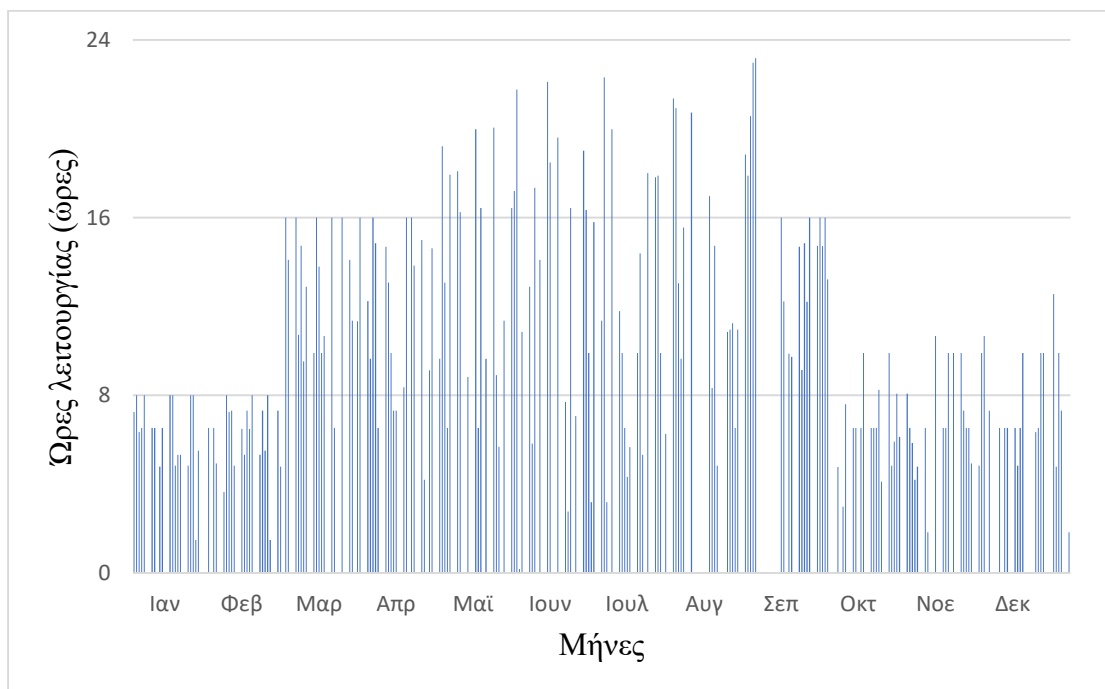


Σχήμα 4.27: Αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής δύο μηνών με χαμηλή ζήτηση.

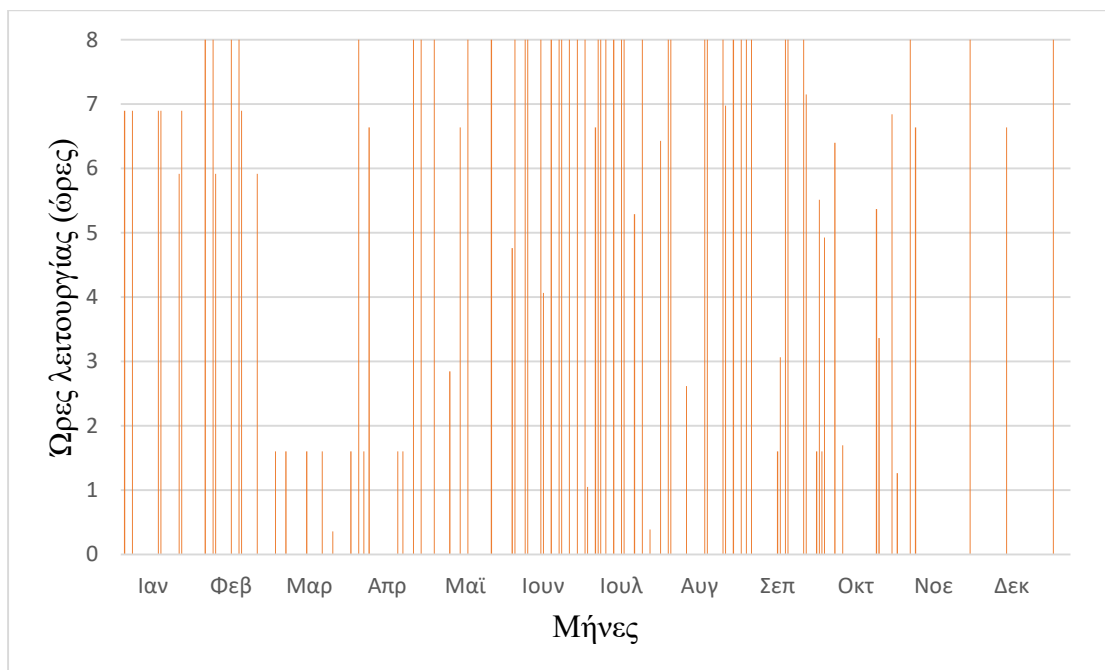


Σχήμα 4.28: Αναλυτικό πρόγραμμα παραγωγής δύο μηνών με υψηλή ζήτηση.

Ενώ στα σχήματα 4.29 και 4.30 φαίνονται οι ώρες λειτουργίας της γραμμής εμφιάλωσης και εμβарέλωσης στη διάρκεια του έτους αντίστοιχα.



Σχήμα 4.29: Ημερήσια λειτουργία της γραμμής εμφιάλωσης σε βάθος ενός έτους.



Σχήμα 4.30: Ημερήσια λειτουργία της γραμμής εμβαρέλωσης σε βάθος ενός έτους.

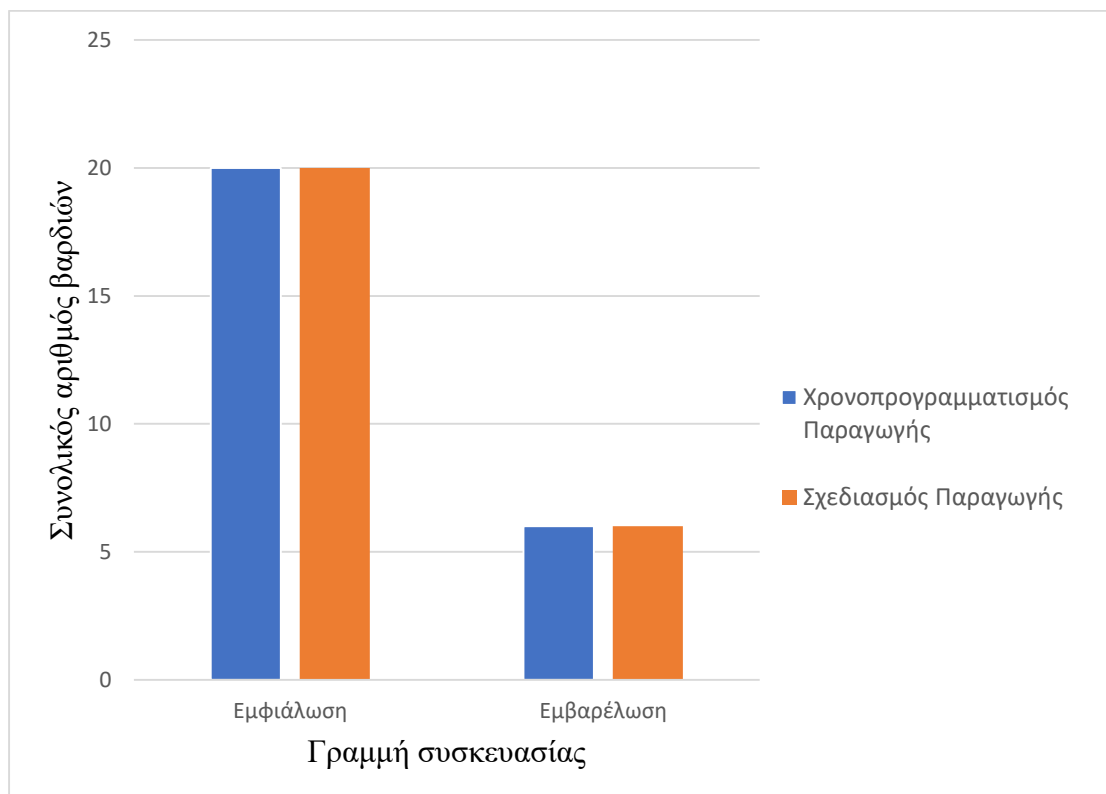
Λόγω της αύξησης της ζήτησης η γραμμή εμφιάλωσης απαιτείται να λειτουργεί περισσότερες ώρες για την κάλυψη της αύξησης αυτής, όπως φαίνεται από τα σχήματα 4.27, 4.28, 4.29 και 4.30.

4.3 Αποτελέσματα Χρονοπρογραμματισμού Παραγωγής

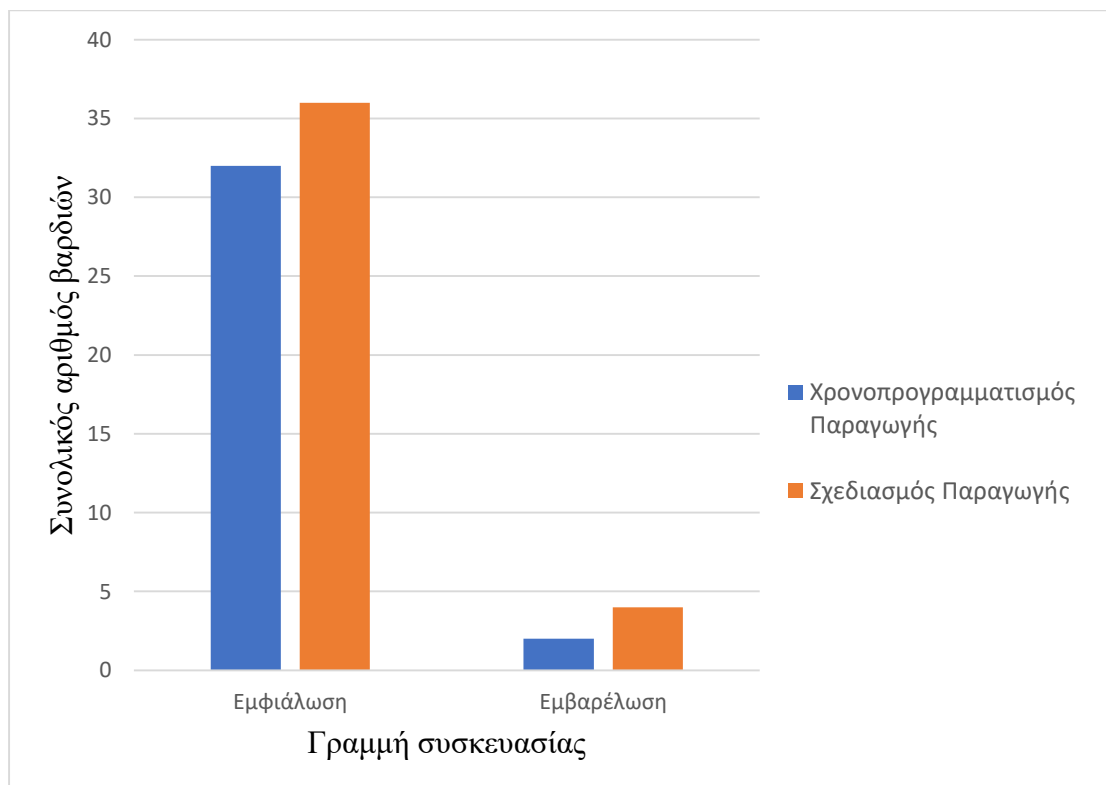
Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο σχεδιασμός παραγωγής είναι μία διαδικασία οργάνωσης της παραγωγής με τέτοιο τρόπο ώστε να πραγματοποιούνται κάποιοι μακροπρόθεσμοι στόχοι. Στην ενότητα 4.2 παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση και λύση του σχεδιασμού παραγωγής της Ζυθοποιίας Μακεδονίας Θράκης για το έτος 2018. Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστεί ο αναλυτικός χρονοπρογραμματισμός τεσσάρων μηνών, κλιμακούμενης προβλεπόμενης ζήτησης. Για τη λύση αυτή επιλέχθηκαν οι μήνες Ιανουάριος, Απρίλιος, Ιούνιος και Ιούλιος, των οποίων ο σχεδιασμός παραγωγής πραγματοποιήθηκε όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη υποενότητα. Ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου χρονοπρογραμματισμού ήταν 8, 18, 18 και 9 δευτερόλεπτα αντίστοιχα.

Στόχο του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής αποτελεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των βαρδιών, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται το πρόγραμμα εκκένωσης των δεξαμενών ζύμωσης, όπως προκύπτει από το σχεδιασμό παραγωγής, και καλύπτεται η προβλεπόμενη ζήτηση. Όπως αναφέρθηκε, κατά το χρονοπρογραμματισμό της παραγωγής εξετάστηκαν οι μήνες Ιανουάριος, Απρίλιος, Ιούνιος και Ιούλιος λόγω της διαδοχικά αυξανόμενης προβλεπόμενης ζήτησης.

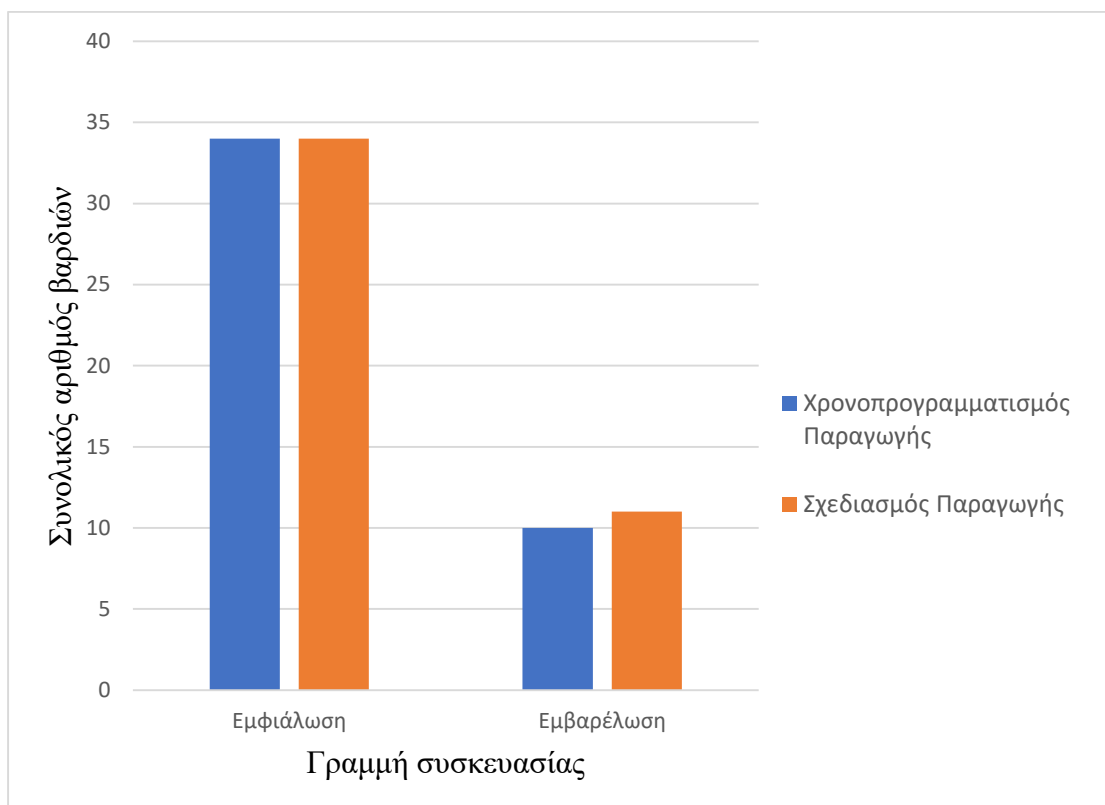
Τα συγκριτικά αποτελέσματα της βελτιστοποίησης κατά το σχεδιασμό παραγωγής και το χρονοπρογραμματισμός παραγωγής, όσον αφορά τον συνολικό αριθμό των βαρδιών, φαίνονται στα σχήματα 4.31 έως 4.34. Όπως φαίνεται, κατά το χρονοπρογραμματισμό παραγωγής ο συνολικός αριθμός των βαρδιών σε κάθε γραμμή συσκευασίας μπορεί να αλλάζει ή να παραμένει ίδιος με αυτόν που προκύπτει κατά το σχεδιασμό παραγωγής. Συγκεκριμένα, κατά τον χρονοπρογραμματισμό του Ιανουαρίου προκύπτει ότι ο αριθμός των βαρδιών δεν αλλάζει, ωστόσο στους υπόλοιπους μήνες παρατηρείται διαφοροποίηση. Τη σημαντικότερη αλλαγή παρουσιάζουν οι μήνες Απρίλιος και Ιούλιος, όπου ο συνολικός αριθμός των βαρδιών ελαττώνεται κατά 6 σε κάθε περίπτωση, ενώ το μήνα Ιούνιο η διαφορά είναι ίση με μία βάρδια. Η διαφορά στον συνολικό αριθμό των βαρδιών έχει ως αποτέλεσμα την οικονομικότερη λειτουργία της μονάδας, καθώς ελαττώνονται σημαντικά τα λειτουργικά έξοδα αλλά ταυτόχρονα υπάρχει περισσότερο χρόνο για συντήρηση και καθαρισμό των εγκαταστάσεων.



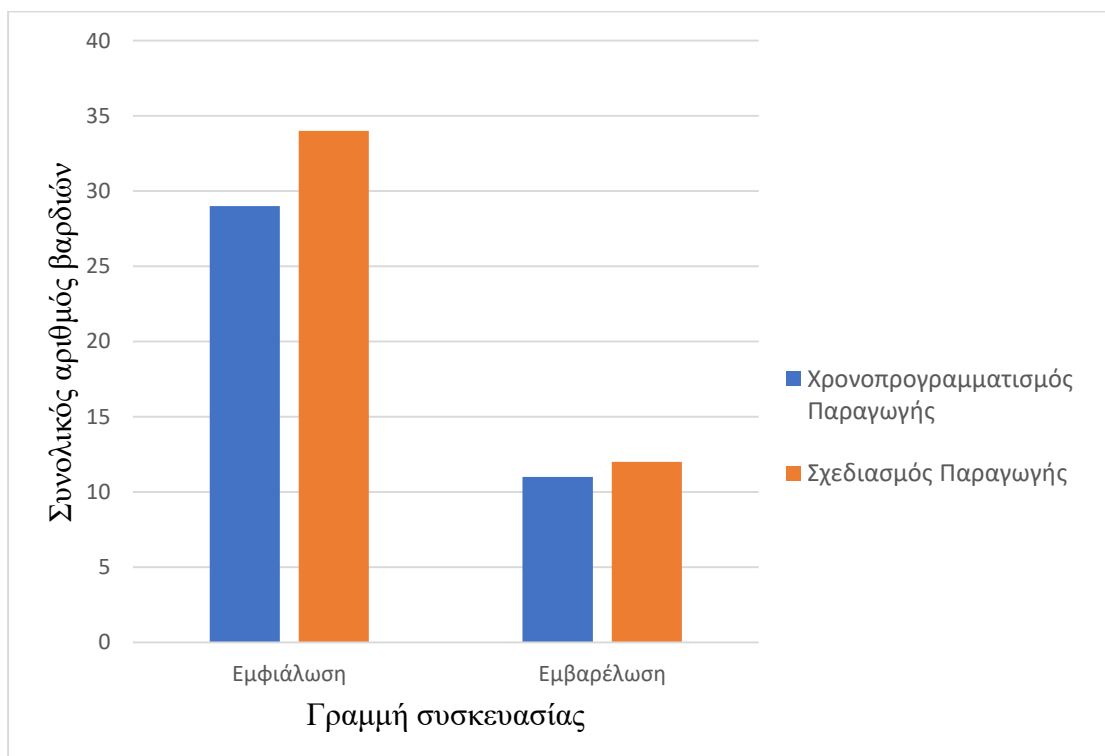
Σχήμα 4.31: Συγκριτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης της παραγωγής τον Ιανουάριο.



Σχήμα 4.32: Συγκριτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης της παραγωγής τον Απρίλιο.



Σχήμα 4.33: Συγκριτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης της παραγωγής τον Ιούνιο.



Σχήμα 4.34: Συγκριτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης της παραγωγής τον Ιούλιο.

5 Συμπεράσματα – Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

5.1 Συμπεράσματα

Κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και χρονοπρογραμματισμού μιας ζυθοποιίας. Επιπλέον τα προτεινόμενα μοντέλα συνδυάζονται με αποδοτικούς ευρετικούς αλγορίθμους για την επίλυση μεγάλων προβλημάτων που αντιμετωπίζουν πραγματικές βιομηχανίες σε μικρό υπολογιστικό χρόνο. Η μοντελοποίηση της παραγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη λειτουργικών και στρατηγικών αποφάσεων, όπως η επέκταση της δυναμικότητας των συσκευών ή η εγκατάσταση νέας μονάδας παραγωγής. Για την ανάπτυξη των μοντέλων και των προτεινόμενων στρατηγικών επίλυσης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα βελτιστοποίησης GAMS και για την επίλυση των εξαγόμενων προβλημάτων μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού αξιοποιήθηκε ο επιλυτής ILOG CPLEX. Με τη χρήση της συγκεκριμένης μοντελοποίησης, δίνεται η δυνατότητα μελέτης διαφόρων πιθανών ρεαλιστικών καταστάσεων σε μια πραγματική βιομηχανία παραγωγής ζύθου. Μία από αυτές είναι η αντιμετώπιση πιθανών μεταβολών στη ζήτηση, αλλά και η περίπτωση όπου η πραγματική ζήτηση διαφέρει από την προβλεπόμενη κατά τη διάρκεια του έτους. Σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει η δυνατότητα επανασχεδιασμού της παραγωγής (re-planning), ώστε να διαφυλαχθεί η εύρυθμη λειτουργία της βιομηχανικής παραγωγής.

Τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην ενότητα 3.2 και 3.3 εφαρμόστηκαν στο πρόβλημα σχεδιασμού και χρονοπρογραμματισμού της Ζυθοποιίας Μακεδονίας Θράκης. Η γραμμή παραγωγής στη ζυθοποιία είναι συνεχόμενη, δηλαδή οι πρώτες ύλες (βύνη, νερό, λυκίσκος) υπόκεινται επεξεργασία στο χώρο της ζυθοποίησης, στη συνέχεια μεταφέρονται στις δεξαμενές ζύμωσης με την προσθήκη της μαγιάς και το τελικό προϊόν ζύμωσης εμφιαλώνεται, μετά από φίλτρανση αποτελεί κομμάτι της συνταγής. Η βελτιστοποίηση της παραγωγής αφορά ολόκληρη τη γραμμή παραγωγής, ωστόσο επικεντρώνεται μόνο στα δύο σημεία συμφόρησης, το στάδιο της ζύμωσης και το στάδιο της εμφιάλωσης. Ο σχεδιασμός της παραγωγής αφορά το μακροχρόνιο σχεδιασμό, δηλαδή τη λειτουργία των δεξαμενών ζύμωσης

αφού αυτή αποτελεί την πιο χρονοβόρα διαδικασία. Ωστόσο, το πρόγραμμα παραγωγής που προκύπτει κατά το σχεδιασμό της παραγωγής μπορεί να καλύψει τη ζήτηση χωρίς απώλειες. Από την άλλη, ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής αφορά το στάδιο της εμφιάλωσης και η βελτιστοποίηση έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των βαρδιών που απαιτούνται για την κάλυψη της ζήτησης. Κατά το σχεδιασμό παραγωγής εξετάζεται η παραγωγή σε βάθος ενός έτους, ενώ κατά το χρονοπρογραμματισμό παραγωγής πραγματοποιείται βελτιστοποίηση σε βάθος ενός μήνα. Το εξεταζόμενο πρόβλημα εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλή πολυπλοκότητα καθώς συνδυάζονται διεργασίες διαλείπουσας και συνεχούς λειτουργίας σε δύο στάδια παραγωγής, τα οποία αποτελούνται από πολλαπλές παράλληλες συσκευές (31 δεξαμενές ζύμωσης και μία γραμμή εμφιάλωσης). Μια ακόμα ιδιαιτερότητα του προβλήματος είναι ο μεγάλος χρόνος για την παραγωγή κάθε προϊόντος (lead time), αλλά και η ανάγκη συγχρονισμού δύο σταδίων με πολύ διαφορετικό ρυθμό παραγωγής. Συγκεκριμένα, ο χρόνος ζύμωσης του υγρού ξεπερνάει τις τρεις εβδομάδες ενώ ο ρυθμός εμφιάλωσης είναι περίπου 400 hL ανά δέκα ώρες, ωστόσο παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση ανάλογα με το παραγόμενο προϊόν.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν κατά το σχεδιασμό παραγωγής με τη χρήση της μεθόδου του κυλιόμενου ορίζοντα με περιορισμού ελαχίστου αποθέματος και της μεθόδου του κυλιόμενου ορίζοντα με χαλάρωση και ορισμό είναι ότι η ζυθοποιία μπορεί να καλύψει την προβλεπόμενη ζήτηση χωρίς απώλειες, ενώ ο χρόνος επίλυσης ήταν σχετικά μικρός για ένα πρόβλημα ετήσιου σχεδιασμού παραγωγής (7 ώρες και 3 ώρες αντίστοιχα). Από τη στιγμή που ο στόχος του σχεδιασμού παραγωγής είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών κάλυψης της ζήτησης, δηλαδή η αντικειμενική συνάρτηση να έχει την τιμή 0, καλύτερη μέθοδος επίλυσης μπορεί να χαρακτηριστεί αυτή με το μικρότερο χρόνο επίλυσης. Ωστόσο, σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή με άλλες παραμέτρους και τελική ζήτηση προϊόντων, ο χρόνος επίλυσης της κάθε μεθόδου μπορεί να διαφέρει. Στη συνέχεια εξετάστηκε το ενδεχόμενο αύξησης της προβλεπόμενης ζήτησης του μήνα Μαΐου κατά 10%. Η επίλυση του σεναρίου πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του κυλιόμενου ορίζοντα με χαλάρωση και ορισμό, καθώς αυτή απέδωσε γρηγορότερη λύση προηγουμένως, και αποδείχθηκε πως αυτή η αύξηση μπορεί να καλυφθεί από την παραγωγή. Ο χρόνος επίλυσης του σεναρίου με την αυξημένη ζήτηση ήταν περίπου 18 ώρες.

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε χρονοπρογραμματισμός παραγωγής με τη χρήση των αποτελεσμάτων για τις δεξαμενές ζύμωσης, όπως προέκυψαν κατά τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ζύμωσης με τη χρήση της μεθόδου του κυλιόμενου ορίζοντα με χαλάρωση και ορισμό. Εξετάστηκαν 4 μήνες, ένας με χαμηλή ζήτηση, ένας με μέτρια και δύο με υψηλή, συγκεκριμένα ο Ιανουάριος, Απρίλιος, Ιούνιος και Ιούλιος αντίστοιχα. Κατά την επίλυση διαπιστώθηκε ότι, ενώ το πρόγραμμα παραγωγής που προκύπτει από το σχεδιασμό παραγωγής μπορεί να καλύψει την προβλεπόμενη ζήτηση, σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω μείωση του αριθμού των βαρδιών που απαιτούνται. Συγκεκριμένα, κατά το χρονοπρογραμματισμό παραγωγής ο βέλτιστος αριθμός των βαρδιών για τον μήνα Ιανουάριο είναι 20 βάρδιες στην εμφιάλωση και 6 βάρδιες στην εμβарέλωση, ίδιοι με τους αριθμούς που προκύπτουν κατά το σχεδιασμό. Ωστόσο, κατά το σχεδιασμό της παραγωγής του Απριλίου ο αριθμός των βαρδιών που προέκυψαν είναι 36 στην εμφιάλωση και 4 στην εμβарέλωση, ενώ λύνοντας το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού αυτές μειώθηκαν σε 32 βάρδιες στην εμφιάλωση και 2 στην εμβарέλωση. Αντίστοιχα, τον μήνα Ιούνιο οι βάρδιες από 34 στην εμφιάλωση και 11 στην εμβарέλωση μειώθηκαν στις 34 και 10 αντίστοιχα, ενώ τον Ιούλιο από 34 και 12 μειώθηκαν στις 29 και 11. Συνεπώς διαπιστώνεται, ότι ο βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής είναι κρίσιμος για τη αποδοτική λειτουργία της μονάδας και την μείωση των λειτουργικών εξόδων της. Ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου για το χρονοπρογραμματισμό παραγωγής ήταν λιγότερος του ενός λεπτού.

5.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Στην περίπτωση του μοντέλου μεικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής που αναπτύχθηκε ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των βαρδιών. Η λειτουργία των δεξαμενών ζύμωσης κρατάται αυτούσια με αυτήν που προκύπτει κατά το σχεδιασμό της παραγωγής, ενώ τα παραγόμενα προϊόντα και η σειρά με την οποία παράγονται μπορεί να αλλάξει. Σύμφωνα με το μοντέλο που αναπτύχθηκε, δεν υπολογίζονται τα κόστη αλλαγής της παραγωγής από την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος σε ένα άλλο ούτε τα κόστη καθαρισμού και αρχικοποίησης της παραγωγής. Η μελέτη των αναφερθέντων προσθηκών μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συνδυασμό με την αλλαγή της αντικειμενικής, έτσι ώστε να εκπληρώνει κάποιο άλλο στόχο της παραγωγής.

Επίσης, σε καμία μοντελοποίηση δε συμπεριλαμβάνονται οι δεξαμενές διαυγούς μπύρας μετά τη φίλτρανση του τελικού προϊόντος ζύθου. Αυτές οι δεξαμενές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεξαμενές ενδιάμεσης αποθήκευσης του τελικού προϊόντος ζύθου πριν την εμφιάλωση του τελικού προϊόντος. Η προσθήκη των δεξαμενών κατά τη μοντελοποίηση μπορεί να καταστεί σημαντική, καθώς η χρήση τους μπορεί να αυξήσει την ευελιξία παραγωγής αυξάνοντας τον εν δυνάμει χρόνο λειτουργίας των δεξαμενών ζύμωσης. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί πως η προσθήκη αυτών των περιορισμών μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στον χρόνο επίλυσης.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, το στάδιο της ζύμωσης αποτελεί σημείο συμφόρησης της παραγωγής. Αυτό οφείλεται στον απαιτούμενο χρόνο ζύμωσης, που συνήθως ξεπερνάει τις 3 εβδομάδες. Σε μελλοντική έρευνα μπορεί να χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για τη μελέτη της επιρροής της αύξησης του αριθμού των δεξαμενών ζύμωσης στη δυναμικότητα παραγωγής τελικών προϊόντων. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση, μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στη δυναμικότητα εμφιάλωσης του έτοιμου υγρού καθώς η αύξηση των δεξαμενών ζύμωσης μπορεί να οδηγήσουν σε αλλαγή του σημείου συμφόρησης (bottleneck shift) στο στάδιο της εμφιάλωσης.

Τέλος, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί συγχώνευση του μοντέλου του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής με αυτό του σχεδιασμού παραγωγής, ούτως ώστε να πραγματοποιείται ολοκληρωμένη οργάνωση της παραγωγής σε ένα στάδιο, όπως έκαναν οι Baldo et al. (2014). Αυτό αποτελεί δύσκολο εγχείρημα, καθώς ο συνδυασμός των μοντέλων θα οδηγήσει σε σημαντική αύξηση στην αναγκαία υπολογιστική δύναμη για την επίλυση του προβλήματος. Αυτό αναγκαστικά θα οδηγήσει σε διερεύνηση αποτελεσματικών τεχνικών επίλυσης του ολοκληρωμένου μοντέλου.

Βιβλιογραφία

- 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*, Volume 72, pp. 58-71.
- Baldo, T. A., Morabito, R., Santos, M. O. & Guimarães, L., 2017. Alternative Mathematical Models and Solution Approaches for Lot-Sizing and Scheduling Problems in the Brewery Industry: Analyzing Two Different Situations. *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-18.
- BetaEQ, 2016. *BETAEQ*. [Online] Available at: <https://betaeq.com.br/index.php/2016/05/27/bebidas-e-engenharia-quimica-episodio-2-cerveja/>
[Accessed 21 February 2019].
- Brooke, A; Kendrick, D; Meeraus, A; Raman, R; Rosenthal, R E, 1998. *GAMS-A User's Guide*. GAMS Development Corporation: Washington, DC.
- Clark, A. R., 2005. Rolling horizon heuristics for production planning and set-up scheduling with backlogs and error-prone demand forecasts. *Production Planning & Control*, 16(1), pp. 81-97.
- Clark, A. R. & Clark, S. J., 2000. Rolling-horizon lot-sizing when set-up times are sequence-dependent. *International Journal of Production Research*, 38(10), pp. 2287-2307.
- Deeratanasrikul, L. & Mizuno, S., 2017. Multiple-stage multiple-machine capacitated lot-sizing and scheduling with sequence-dependent setup: A case study in the wheel industry. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 13(1), pp. 413-428.
- Fargher, H. & Smith, R., 1992. *Method and system for production planning*. United States of America, Patent No. US5586021A.
- 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*, 196(2), pp. 697-706.

Giannelos, N. F. & Georgiadis, M. C., 2002. A Novel Event-Driven Formulation for Short-Term Scheduling of Multipurpose Continuous Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(10), pp. 2431-2439.

Harjunkski, I.; Maravelias, C. T.; Bongers, P.; Castro, P. M.; Engell, S.; Grossmann, I. E.; Hooker, J.; Méndez, C.; Sand, G.; Wassick, J., 2014. Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods. *Computers and Chemical Engineering*, Volume 62, pp. 161-193.

Kallrath, J., 2002. Planning and scheduling in the process industry. *OR Spectrum*, Volume 24, pp. 219-250.

Kondili, E., Pantelides, C. & Sargent, R., 1993. A GENERAL ALGORITHM FOR SHORT-TERM SCHEDULING OF BATCH OPERATIONS - MILP FORMULATION. *Computers & Chemical Engineerign*, 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*, 50(10), pp. 6316-6324.

Kopanos, G. M., Puigjaner, L. & Maravelias, C. T., 2011. Production Planning and Scheduling of Parallel Continuous Processes with Product Families. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(3), pp. 1369-1378.

Lu, C.-C., Ying, K.-C. & Chen, H.-J., 2016. Real-time relief distribution in the aftermath of disasters – A rolling horizon approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 93, pp. 1-20.

Maravelias, C. T. & Ignacio, G. E., 2003. A General Continuous State Task Network Formulation for Short Term Scheduling of Multipurpose Batch Plants with Due Dates. *Computer Aided Chemical Engineering*, Volume 15, pp. 274-279.

Mendez, C.; Cerda, J.; Grossmann, I.; Harjunkski, I.; Fahl, M., 2006. State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. *Computers and Chemical Engineering*, 30(6-7), pp. 913-946.

Méndez, C. & Cerdá, J., 2002. Dynamic scheduling in multiproduct batch plants. *Computers & Chemical Engineering*, 26(4-5), pp. 687-695.

Meyr, H., 2000. Simultaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization. *European Journal of Operational Research*, 120(2), pp. 311-326.

Meyr, H., 2002. Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines. *Production, Manufacturing and Logistics*, 139(2), pp. 277-292.

Pantelides, C., 1994. *Unified frameworks for optimal process planning and scheduling*. New York, Cache publications, pp. 253-274.

SANDSTRÖM, V., 2015. *User interface technologies for Manufacturing Execution Systems*. Helsinki: Aalto University.

Shim, I.-S., Kim, H.-C., Doh, H.-H. & Lee, D.-H., 2011. A two-stage heuristic for single machine capacitated lot-sizing and scheduling with sequence-dependent setup costs. *Computers & Industrial Engineering*, 61(4), pp. 920-929.

Toledo, C., França, P. M., Morabito, R. & Kimms, A., 2007. UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROBLEMA INTEGRADO DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM FÁBRICAS DE REFRIGERANTES. *Pesquisa Operacional*, 27(1), pp. 155-186.

Παράρτημα

Πίνακας Α. 1: Μηνιαία ζήτηση προϊόντων για το πρώτο εξάμηνο του έτους 2018.

Μήνες Προϊόντα	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος
Φιάλη Lager 500 mL	593534	649293	1133785	1115199	1325847	1515431
Φιάλη lager 330 mL	94551	129933	195391	190477	205023	212886
Κουτάκι Lager 500 mL	103445	92077	207117	221895	286917	284644
Κουτάκι Lager 330 mL	283160	252044	566943	607395	785381	779158
Φιάλες Special	29643	38679	51933	71683	95222	92860
Βαρέλι Lager 30 L	698	745	1209	1824	3208	3343
Βαρέλι Special 30 L	95	135	137	148	166	164
Κουτί Edelsteiner 500 mL	78773	113237	142244	151159	166994	174578
Κουτί Edelsteiner 330 mL	34167	35259	40837	44269	46843	51797

Πίνακας Α. 2: Μηνιαία ζήτηση προϊόντων για το δεύτερο εξάμηνο του έτους 2018.

Μήνες Προϊόντα	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβρης	Οκτώβρης	Νοέμβρης	Δεκέμβρης
Φιάλη Lager 500 mL	1560039	1453476	1115199	649293	679032	600968
Φιάλη Lager 330 mL	210920	193229	180845	105362	97106	149984
Κουτάκι Lager 500 mL	293056	306697	168467	88212	126180	94805
Κουτάκι Lager 330 mL	802184	839524	461147	241464	345393	259512
Φιάλες Special	94584	93045	60675	33371	33513	32832
Βαρέλι Lager 30 L	3610	2788	1871	987	487	590
Βαρέλι Special 30 L	165	144	102	92	71	112
Κουτί Edelsteiner 500 mL	162071	123882	67862	60277	45508	44044
Κουτί Edelsteiner 330 mL	51017	40213	17357	9829	10024	8425

Πίνακας Α. 3: Χρόνοι μετάβασης από την παραγωγή ενός προϊόντος σε ένα άλλο στη γραμμή εμφιάλωσης

	BL500	BL330	CL500	CL330	BS	BarL30	BarS30	CE500	CE330
BL500	0	3600	900	900	3600	0	0	900	900
BL330	3600	0	900	900	3600	0	0	900	900
CL500	900	900	0	900	900	0	0	900	900
CL330	900	900	900	0	900	0	0	900	900
BS	3600	3600	900	900	0	0	0	900	900
BarL30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BarS30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CE500	900	900	900	900	900	0	0	0	900
CE330	900	900	900	900	900	0	0	900	0

Πίνακας Α. 4: Χρόνοι μετάβασης από την παραγωγή ενός προϊόντος σε ένα άλλο στη γραμμή εμβαρέλωσης

	BL500	BL330	CL500	CL330	BS	BarL30	BarS30	CE500	CE330
BL500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BL330	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CL500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CL330	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BS	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BarL30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BarS30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CE500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CE330	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας Α. 5: Χρόνοι ζύμωσης των υγρών.

	Lager	Special
D ₁ (Days)	24	24

Πίνακας Α. 6: Αριθμός και μέγεθος των δεξαμενών ζύμωσης.

	74 (hL)	264 (hL)	400 (hL)
Αριθμός δεξαμενών	2	18	11

Πίνακας Α. 7: Χρόνος παραγωγής μίας μονάδας προϊόντος σε second (s).

	BL500	BL330	CL500	CL330	BS	BarL30	BarS30	CE500	CE330
Bottling	0,39	0,42	0,25	0,19	0,39			0,25	0,19
Barreling						84,71	84,71		

Πίνακας Α. 8: Αναγκαία ποσότητα υγρού για την παραγωγή ενός προϊόντος σε litre (L)

	BL500	BL330	CL500	CL330	BS	BarL30	BarS30	CE500	CE330
						0	0		
Lager	0,437 5	0,2887 5	0,437 5	0,2887 5		26,25		0,382 8	0,252 7
Special					0,53 7		32,22		

Συνθήκες δεξαμενών στην αρχή του έτους

Πίνακας Α. 9: Πόσο αδειασμένων δεξαμενών και μέχρι ποιο χρονικό διάστημα για τον μήνα Ιανουάριο.

	264 (hL)	400 (hL)
1 ^η Εβδομάδα	3	
2 ^η Εβδομάδα	3	
3 ^η Εβδομάδα		3

Πίνακας Α. 10: Ποσό γεμάτων δεξαμενών και με τι είδους υγρό για τον μήνα Ιανουάριο.

	74 (hL)	264 (hL)	400 (hL)
Lager		11	8
Special	2	1	

Πίνακας Α. 11: Μέγιστη αποθηκευτική δυναμικότητα της Ζυθοποιίας σε εκατόλιτρα τελικού προϊόντος.

<i>Icap_{max}</i>	11900 hL
---------------------------	----------