



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

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

Βελτιστοποίηση Χρονοπρογραμματισμού Παραγωγής **Βιομηχανικής Μονάδας Προϊόντων Μαστίχας Χίου**

Διπλωματική εργασία της
Δανάης Ζωγράφου
Α.Ε.Μ.: 5308

Επιβλέπων: Μιχαήλ Χ. Γεωργιάδης, Καθηγητής

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2023

Περίληψη

Στις μέρες μας, οι βιομηχανίες τροφίμων, ανεξάρτητα από το μέγεθός τους, έρχονται αντιμέτωπες με σωρεία προβλημάτων, όπως οι διαρκείς εξελίξεις στην εγχώρια και παγκόσμια οικονομία και το περιβάλλον. Ταυτόχρονα, επιθυμούν να αυξήσουν τα κέρδη τους προσπαθώντας, όμως, να παραμείνουν ανταγωνιστικές ικανοποιώντας τις μεταβαλλόμενες ανάγκες των πελατών. Για αυτόν τον λόγο, ολοένα και περισσότερες βιομηχανίες σταματούν να προγραμματίζουν την παραγωγή τους αποκλειστικά βασιζόμενες στην εμπειρία προηγούμενων ετών και στρέφονται στην αξιοποίηση μαθηματικών μοντέλων και λογισμικών για την βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού της παραγωγής τους. Η εργασία αυτή ερευνά το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μίας μικρής βιομηχανίας παραγωγής τοπικών προϊόντων με Μαστίχα Χίου, της Mediterra A.E., αναπτύσσοντας ένα μαθηματικό μοντέλο μεικτού-ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP) σε διακριτό χρονικό ορίζοντα μίας εβδομάδας. Οι διεργασίες που ακολουθούνται στα στάδια της παραγωγής των ασυσκευαστών προϊόντων και της συσκευασίας τους κατά την μοντελοποίηση αντιμετωπίστηκαν ως διαλείπουσας λειτουργίας, ανεξαρτήτως αν στην πραγματική διαδικασία είναι διαλείπουσας ή συνεχούς λειτουργίας. Το μοντέλο στοχεύει στην μεγιστοποίηση του κέρδους της βιομηχανίας μέσω βελτιστοποίησης του προγραμματισμού της παραγωγής, χρησιμοποιώντας διάφορες ρεαλιστικές περιπτώσεις μεταβαλλόμενης ζήτησης των τελικών προϊόντων για 11 εβδομάδες του έτους. Επίσης, γίνεται διερεύνηση των επιπτώσεων στο κέρδος και την παραγωγή που επιφέρει η σύμπτυξη ζητήσεων 2 εβδομάδων σε μία και η αύξηση της μέγιστης δυναμικότητας μίας συσκευής. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού βελτιστοποίησης GAMS χρησιμοποιώντας τον επιλυτή CPLEX. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης έδειξαν ότι είναι εφικτή η αύξηση της παραγωγής με την υπάρχουσα δυναμικότητα συσκευών, με αποτέλεσμα η βιομηχανία, ως έχει, να μπορεί να αυξήσει τα κέρδη της έως και 150%. Τα αποτελέσματα λήφθηκαν σε σχετικά εύλογο υπολογιστικό χρόνο και με μικρή απόκλιση από την ολική βέλτιστη λύση.

Abstract

In today's food industry landscape, enterprises of all sizes grapple with multifaceted challenges driven by economic and environmental shifts. Simultaneously, they seek to enhance profitability while staying competitive by meeting the changing needs of their customers. For this reason, more and more industries stop planning their production solely based on manual techniques and past years' experience and are turning to the use of mathematical models and software to optimise their production scheduling. This thesis explores the production scheduling problem of a small industry producing local products with Chios Mastic, Mediterra SA.. The tasks involved in the production and packaging stages were modelled as batch processes, regardless of their actual type of operation, batch or continuous, in the real plant production. More specifically, a mathematical model was used which employs mixed-integer linear programming (MILP) techniques to optimize production schedules within a one-week discrete time horizon. The model aims to maximize company's profit, considering various demand scenarios about 11 weeks of the year for several products. It, also, investigates the profit and production effects of combining 2-week demands into one and increasing the maximum capacity of a key processing unit. The model was implemented in GAMS optimization software and solved using the CPLEX solver. The optimization results demonstrate that it is feasible to increase production, with the same plant capacity, thus leading to increased profits of up to 150%. The results were obtained in a relatively reasonable computational time and with little deviation from the global optimal solution.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Μιχαήλ Χ. Γεωργιάδη, επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, ο οποίος με βοήθησε να ανακαλύψω τον τομέα της βελτιστοποίησης και την αξία των εφαρμογών της, αλλά και να ασχοληθώ με αυτόν στην διπλωματική μου εργασία. Η καθοδήγησή του καθ' όλη την περίοδο εκπόνησης αυτής της μελέτης ήταν πολύτιμη. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Μαρία-Ελένη Σαμουηλίδου, για την προθυμία της να με βοηθήσει με καθοριστικές για το αποτέλεσμα της εργασίας συμβουλές και να μοιραστεί τις γνώσεις της. Η άριστη συνεργασία και η διαρκής επικοινωνία μας με βοήθησαν να παραμείνω στον στόχο μου.

Ευχαριστώ πολύ το σύνολο του προσωπικού της Mediterra A.E., και ιδιαίτερα τους κυρίους Γιάννη Μανδάλα και Αντώνη Καλίτση, για την θετική τους στάση για την πραγματοποίηση αυτής της συνεργασίας, για τον χρόνο τους και για την παροχή δεδομένων. Ήταν πάντοτε στη διάθεσή μου για να απαντήσουν σε κάθε μου απορία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους εργαζόμενους στην παραγωγή της Mediterra A.E. που με φιλοξένησαν με χαρά στις εγκαταστάσεις τους, ώστε να κατανοήσω την δομή της παραγωγής, και ήταν πρόθυμοι να με βοηθήσουν με τις εμπειρικές τους γνώσεις.

Για τους γονείς και την οικογένειά μου, ένα ευχαριστώ είναι λίγο για την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη τους όλα αυτά τα χρόνια, που με κάθε μέσο, υλικό και μη, με βοηθούν να συνεχίζω να προσπαθώ και να ονειρεύομαι.

Τέλος, δε θα μπορούσα να παραλείψω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους που ήταν δίπλα μου σε αυτό το κεφάλαιο της ζωής μου και το έκαναν να μοιάζει ευκολότερο με τις αξέχαστες στιγμές που περάσαμε μαζί.

Δανάη Ζωγράφου

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1. Χρονοπρογραμματισμός παραγωγής – Ιστορική αναδρομή.....	1
1.2. Χρονοπρογραμματισμός παραγωγής σε βιομηχανίες τροφίμων & ποτών – Βιβλιογραφική ανασκόπηση	6
2. Περιγραφή της βιομηχανικής μονάδας	13
2.1. Γενικά δεδομένα.....	13
2.2. Περιγραφή παραγωγικής διαδικασίας.....	15
3. Ανάπτυξη Μαθηματικού Μοντέλου Βελτιστοποίησης.....	27
3.1. Ονοματολογία	27
3.2. Μαθηματική διατύπωση μοντέλου	29
4. Μελέτες Περίπτωσης & Αποτελέσματα	35
4.1. Περιπτώσεις Εβδομαδιαίας ζήτησης.....	36
4.2. Περιπτώσεις σύμπτυξης των παραγωγών	60
4.3. Περίπτωση επέκτασης του εξοπλισμού.....	64
5. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	67
5.1. Συμπεράσματα	67
5.2. Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.....	68
6. Βιβλιογραφία	71
Παράρτημα Α – Δεδομένα ζήτησης παραγωγικής διαδικασίας	76

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Απεικόνιση διαφοράς διαλείπουσας & (ημι)συνεχούς επεξεργασίας (Murphy, et al., 2016)	2
Σχήμα 1.2 Διακριτή & συνεχής αναπαράσταση του χρονικού ορίζοντα (Floudas & Lin, 2004)	3
Σχήμα 1.3 Παραδείγματα STN & RTN αναπαράστασης δικτύου (Koranos & Puigjaner, 2019)	5
Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής παραγωγής υποβρυχίου	17
Σχήμα 2.2 Διάγραμμα ροής παραγωγής (α) μεγάλων και (β) μικρών πιτών	17
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα STN των υποβρυχίων	18
Σχήμα 2.4 Διάγραμμα STN των μεγάλων & μικρών πιτών.....	19
Σχήμα 3.1 Αναπαράσταση του χρονικού ορίζοντα του προβλήματος	29
Σχήμα 4.1 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Φεβρουαρίου	36
Σχήμα 4.2 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Φεβρουαρίου	37
Σχήμα 4.3 Προφίλ των ποσοτήτων των προϊόντων πιτών (α) και υποβρυχίου (β) που αποθηκεύονται ή πωλούνται την εβδομάδα του Φεβρουαρίου	38
Σχήμα 4.4 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Μαρτίου.....	39
Σχήμα 4.5 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Μαρτίου	39
Σχήμα 4.6 Προφίλ των ποσοτήτων των ημιέτοιμων προϊόντων πιτών που αποθηκεύονται την εβδομάδα του Μαρτίου.....	40
Σχήμα 4.7 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Απριλίου	41
Σχήμα 4.8 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Απριλίου	41
Σχήμα 4.9 Προφίλ των ποσοτήτων των ημιέτοιμων προϊόντων πιτών που αποθηκεύονται την εβδομάδα του Απριλίου	42

Σχήμα 4.10 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Μαΐου	43
Σχήμα 4.11 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Μαΐου	43
Σχήμα 4.12 Προφίλ των ποσοτήτων των προϊόντων πιτών (a) και υποβρυχίου (b) που αποθηκεύονται ή πωλούνται την εβδομάδα του Μαΐου	44
Σχήμα 4.13 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Ιουνίου	45
Σχήμα 4.14 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Ιουνίου.....	45
Σχήμα 4.15 Προφίλ των ποσοτήτων των προϊόντων μικρών πιτών που αποθηκεύονται ή πωλούνται την εβδομάδα του Ιουνίου	46
Σχήμα 4.16 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Ιουλίου.....	47
Σχήμα 4.17 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Ιουλίου.....	47
Σχήμα 4.18 Προφίλ των αποθηκευμένων ποσοτήτων του προς ανάμιξη σιροπιού την εβδομάδα του Ιουλίου.....	48
Σχήμα 4.19 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Αυγούστου	49
Σχήμα 4.20 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Αυγούστου.....	49
Σχήμα 4.21 Προφίλ των αποθηκευμένων ποσοτήτων του προς ανάμιξη σιροπιού την εβδομάδα του Αυγούστου	50
Σχήμα 4.22 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Σεπτεμβρίου	51
Σχήμα 4.23 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Σεπτεμβρίου	51
Σχήμα 4.24 Προφίλ των ποσοτήτων των προϊόντων πιτών (a) και υποβρυχίου (b) που αποθηκεύονται ή πωλούνται την εβδομάδα του Σεπτεμβρίου	52
Σχήμα 4.25 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Οκτωβρίου	53

Σχήμα 4.26 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Οκτωβρίου.....	54
Σχήμα 4.27 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Νοεμβρίου	54
Σχήμα 4.28 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Δεκεμβρίου	55
Σχήμα 4.29 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για τις περιπτώσεις ζήτησης της εβδομάδας του Νοεμβρίου & Δεκεμβρίου.....	55
Σχήμα 4.30 Προφίλ καταστάσεων υλικών κατά την παραγωγή του προϊόντος ZAX092 την εβδομάδα του Νοεμβρίου	56
Σχήμα 4.31 Σύγκριση κέρδους προ & μετά βελτιστοποίησης για τις περιπτώσεις Απριλίου έως Σεπτεμβρίου.....	57
Σχήμα 4.32 Σύγκριση κέρδους προ & μετά βελτιστοποίησης για τις περιπτώσεις Οκτωβρίου έως Μαρτίου	57
Σχήμα 4.33 Ποσοστιαία κατανομή κέρδους λόγω της παραγωγής για όλες τις περιπτώσεις ανά μήνα και ανά εποχή.....	58
Σχήμα 4.34 Αριθμός επιπλέον παρτίδων ανά προϊόν που παράγεται από όλες τις περιπτώσεις	59
Σχήμα 4.35 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για τις 2 εβδομάδες του Φεβρουαρίου (ελαχιστοποίηση κέρδους)	61
Σχήμα 4.36 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για την 1η εβδομάδα του Φεβρουαρίου (ελαχιστοποίηση κέρδους)	61
Σχήμα 4.37 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για την 2η εβδομάδα του Φεβρουαρίου (ελαχιστοποίηση κέρδους)	62
Σχήμα 4.38 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για τις 2 εβδομάδες του Δεκεμβρίου (ελαχιστοποίηση κέρδους).....	63
Σχήμα 4.39 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για την 1η εβδομάδα του Δεκεμβρίου (ελαχιστοποίηση κέρδους).....	63
Σχήμα 4.40 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για την 2η εβδομάδα του Δεκεμβρίου (ελαχιστοποίηση κέρδους).....	64

Σχήμα 4.41 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Μαΐου με μεγαλύτερη δυναμικότητα συσκευής (περίπτωση σταθερής ζήτησης)	65
Σχήμα 4.42 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Μαΐου με μεγαλύτερη δυναμικότητα συσκευής (περίπτωση μεγιστοποίησης κέρδους)	66

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Κατανομή τελικών προϊόντων ανά συνταγή	14
Πίνακας 2.2 Μέγεθος πλήρων παρτίδων ανά τελικό προϊόν	14
Πίνακας 2.3 Συσκευασίες τελικών προϊόντων και το μέγεθός τους	16
Πίνακας 2.4 Δεδομένα βασικών διεργασιών συσκευασίας.....	21
Πίνακας 2.5 Δεδομένα εικονικών διεργασιών ρύθμισης των συσκευαστικών.....	22
Πίνακας 2.6 Δεδομένα βασικών διεργασιών παραγωγής	23
Πίνακας 2.7 Πληροφορίες για την αποθήκευση των καταστάσεων των υλικών.....	25
Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα βέλτιστου κέρδους για κάθε περίπτωση ζήτησης	58
Πίνακας 4.2 Στατιστικά στοιχεία επίλυσης στο GAMS	59
Πίνακας 4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων κάλυψης της ελάχιστης ζήτησης του Φεβρουαρίου με διαφορετικό τρόπο	60
Πίνακας 4.4 Στατιστικά στοιχεία επίλυσης στο GAMS (Φεβρουάριος)	62
Πίνακας 4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων κάλυψης της ελάχιστης ζήτησης του Δεκεμβρίου με διαφορετικό τρόπο	63
Πίνακας 4.6 Στατιστικά στοιχεία επίλυσης στο GAMS (Δεκέμβριος).....	64
Πίνακας 4.7 Στατιστικά στοιχεία επίλυσης στο GAMS (σταθερή ζήτηση).....	65
Πίνακας 4.8 Στατιστικά στοιχεία επίλυσης στο GAMS (μεγιστοποίηση κέρδους).....	66
Πίνακας A.1 Βασικά σενάρια ζήτησης για επιλεγμένες εβδομάδες κάθε μήνα (σε kg)	76
Πίνακας A.2 Συνολική βασική ζήτηση για τους μήνες με τις ελάχιστες ζητήσεις (σε kg).....	77

1. Εισαγωγή

1.1. Χρονοπρογραμματισμός παραγωγής – Ιστορική αναδρομή

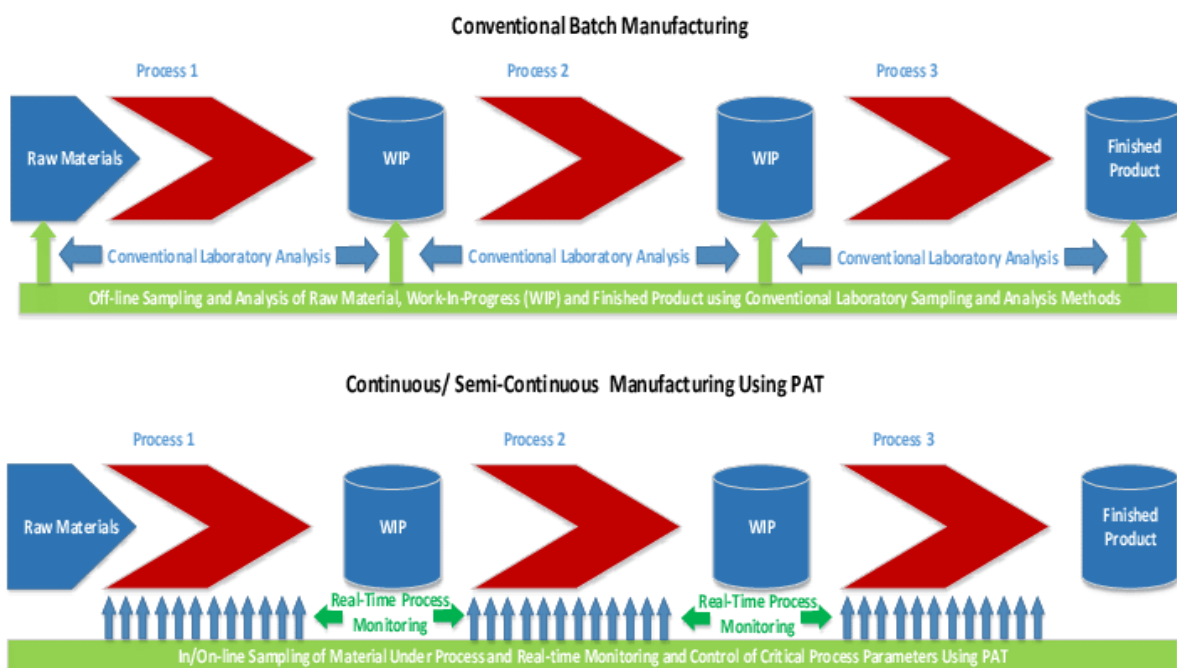
Τόσο οι εξελίξεις στην παγκόσμια οικονομία όσο και η πρόοδος της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια αυξάνονται με ραγδαίο ρυθμό. Αυτό δεν θα μπορούσε να αφήσει ανεπηρέαστο τον τρόπο λειτουργίας των βιομηχανιών, οι οποίες καθημερινά έρχονται αντιμέτωπες με μεταβολές των οικονομικών στοιχείων, αλλά και τον αυξημένο ανταγωνισμό. Καλούνται, λοιπόν, να αξιοποιήσουν τις διαθέσιμες τεχνικές μοντελοποίησης για την βελτίωση της παραγωγικότητας, διατηρώντας υψηλή την ποιότητα των προϊόντων τους και το ενδιαφέρον των αγοραστών αλλά με το μικρότερο δυνατό κόστος. Αυτό το ζήτημα είναι ιδιαίτερος καιρίο για τοπικές βιομηχανίες μικρής κλίμακας που πρέπει να κερδίσουν, να διατηρήσουν και να επεκτείνουν τη θέση τους στην αγορά απέναντι σε μεγάλες πολυεθνικές. Έτσι, εξαιτίας των σημαντικών πλεονεκτημάτων, δημιουργείται η ανάγκη χρονοπρογραμματισμού της παραγωγής και οι επιχειρήσεις, ανεξαρτήτως κλίμακας, στρέφονται σε επένδυση σε μελέτες βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού με συστηματικό τρόπο.

Με τον όρο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής, ο Pinedo (2012) αναφέρθηκε στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για την κατανομή των διαθέσιμων πόρων και διεργασιών εντός καθορισμένων χρονικών περιόδων, που χρησιμοποιείται ευρέως από επιχειρήσεις ανεξάρτητα από τα προϊόντα ή τις υπηρεσίες που παρέχουν. Σκοπός του χρονοπρογραμματισμού είναι η βελτιστοποίηση ενός ή περισσότερων στόχων που μπορεί να έχει μία επιχείρηση, οι οποίοι μπορεί να είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους ή του χρόνου παραγωγής, η μεγιστοποίηση του κέρδους κ.α., με ταυτόχρονη ικανοποίηση περιορισμών, όπως η αλληλουχία προϊόντων/διεργασιών ή η έγκαιρη κάλυψη της ζήτησης (Méndez, et al., 2006). Ως πόροι μίας βιομηχανίας μπορεί να χαρακτηριστούν οι πρώτες ύλες, ο διαθέσιμος εξοπλισμός, οι βοηθητικές παροχές, το εργατικό προσωπικό, ενώ οι διεργασίες περιλαμβάνουν τη λειτουργία του εξοπλισμού (Georgiadis, et al., 2020).

Κατά την προσέγγιση του χρονοπρογραμματισμού ανά τα έτη αναλύθηκαν προβλήματα τα οποία περιγράφονται με εναλλακτικούς τρόπους αντιμετώπισης/διατύπωσης επηρεάζοντας το μοντέλο βελτιστοποίησης. Αυτά διαφέρουν στο είδος των διεργασιών, τον τρόπο αναπαράστασης του χρονικού ορίζοντα, τον τρόπο αναπαράστασης των ισοζυγίων μάζας κ.α. Ως προς το είδος τους οι διεργασίες κατηγοριοποιούνται σε:

- i) Συνεχούς λειτουργίας (continuous), εκείνες όπου κατά την επεξεργασία η τροφοδοσία είναι συνεχής και το παραγόμενο προϊόν εξέρχεται με σταθερή ροή, χωρίς διακοπές στη λειτουργία. Πλεονεκτούν στον τομέα της μαζικής παραγωγής, γιατί επιτυγχάνουν συνέπεια στην ποιότητα με μειωμένο κόστος και φύρα. Η δυσκολία τους έγκειται στην ανάγκη ηλεκτρονικού χειρισμού των εναλλαγών προϊόντων ή του καθαρισμού/συντήρησής τους.
- ii) Ημι-συνεχούς λειτουργίας (semi-continuous), που αν και λειτουργούν με συνεχή τρόπο, δίνουν τη δυνατότητα τερματισμού και επανεκκίνησης ανά μεγάλες χρονικές περιόδους (campaigns). Συνήθως, παράγεται ένας τύπος προϊόντος ανά χρονική περίοδο δίνοντας, έτσι, το πλεονέκτημα της ευελιξίας στην παραγωγή, που τις καθιστά εξαιρετικά χρήσιμες σε δυναμικές διεργασίες με αβέβαιες συνθήκες λειτουργίας.
- iii) Διαλείπουσας λειτουργίας (batch), όπου η παραγωγή περνά από αυτοτελείς σταθμούς επεξεργασίας και η μετάβαση στον επόμενο σταθμό μπορεί να γίνει μόνο αφού ολοκληρωθεί η παραγωγή στον προηγούμενο. Η παραγωγή μίας παρτίδας έχει συνήθως προκαθορισμένο χρόνο επεξεργασίας για κάθε σταθμό. Χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή διάφορων προϊόντων, ιδιαίτερα σε εποχικά είδη με άτακτη ζήτηση, ή σε πιλοτικές παραγωγές μειώνοντας το ρίσκο. Ένα μειονέκτημα αυτού του τρόπου λειτουργίας είναι ότι η παραγόμενη ποσότητα είναι διαθέσιμη μόνο μετά τον χρόνο λήξης της επεξεργασίας της παρτίδας (Koranos & Puigjaner, 2019).

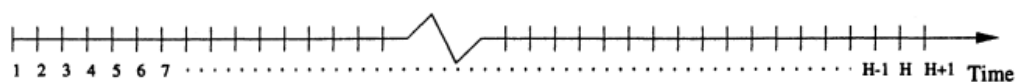
Μία καλή αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας των διαλειπουσών και των (ημι)συνεχών διεργασιών φαίνεται στο Σχήμα 1.1.



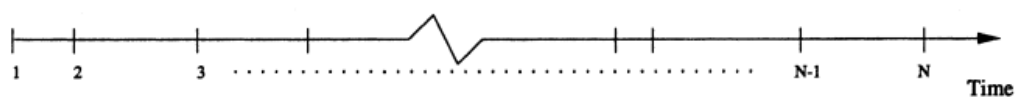
Σχήμα 1.1 Απεικόνιση διαφοράς διαλείπουσας & (ημι)συνεχούς επεξεργασίας (Murphy, et al., 2016)

Η αναπαράσταση του χρονικού ορίζοντα (βλ. Σχήμα 1.2) είναι βασικό χαρακτηριστικό των προσεγγίσεων μαθηματικού προγραμματισμού και μπορεί να γίνεται με τρεις τρόπους:

- i) Διακριτή αναπαράσταση. Ο χρονικός ορίζοντας είναι χωρισμένος σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα ίσης διάρκειας, με τέτοιο τρόπο ώστε η έναρξη ή η λήξη μιας διεργασίας να γίνεται μόνο στα όρια των διαστημάτων. Έτσι, συνήθως υπάρχουν πολλά μικρά διαστήματα για να καλυφθεί αυτή η ιδιαιτερότητα, για παράδειγμα, ο μέγιστος κοινός διαιρέτης των χρόνων επεξεργασίας (Floudas & Lin, 2004). Σημαντικό στοιχείο είναι ότι το μέγεθος και η υπολογιστική απόδοση του μαθηματικού μοντέλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλήθος των χρονικών διαστημάτων (Korpanos & Puigjaner, 2019). Ωστόσο, μειονεκτούν σε προβλήματα όπου οι χρόνοι επεξεργασίας δεν είναι σταθεροί, αλλά εξαρτώνται από το μέγεθος της παρτίδας, αλλά και όταν απαιτείται αναπαράσταση συνεχών/ημισυνεχών διεργασιών. Στην τελευταία περίπτωση, η διάρκεια των διεργασιών προσαρμόζεται στη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος (Méndez, et al., 2006).
- ii) Συνεχής αναπαράσταση. Η διαίρεση του χρονικού ορίζοντα γίνεται σε λιγότερα διαστήματα ποικίλων μεγεθών, ανάλογα με τη διάρκεια των διαδικασιών, τα οποία ορίζονται με βάση τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης που λαμβάνει χώρα (Korpanos & Puigjaner, 2019). Η προσέγγιση μπορεί να γίνει με εστίαση είτε σε διαδοχικές είτε σε γενικές διαδικασίες που αντιπροσωπεύουν το δίκτυο. Η βασική διαφορά τους είναι ότι οι διαδοχικές διεργασίες α) εμφανίζονται σε σειρά ή κατά παρτίδες και β) δεν απαιτούν την εξέταση των ισοζυγίων μάζας κατά τη μοντελοποίηση (Floudas & Lin, 2004).
- iii) Μικτή αναπαράσταση. Είναι ένας συνδυασμός της διακριτής αναπαράστασης και της συνεχούς. Ο χρονικός ορίζοντας χωρίζεται σε σταθερά διαστήματα (π.χ. μέρες), εντός των οποίων οι χρόνοι διεξαγωγής των διεργασιών είναι μεταβλητοί (Korpanos & Puigjaner, 2019).



Discrete-time representation



Continuous-time representation

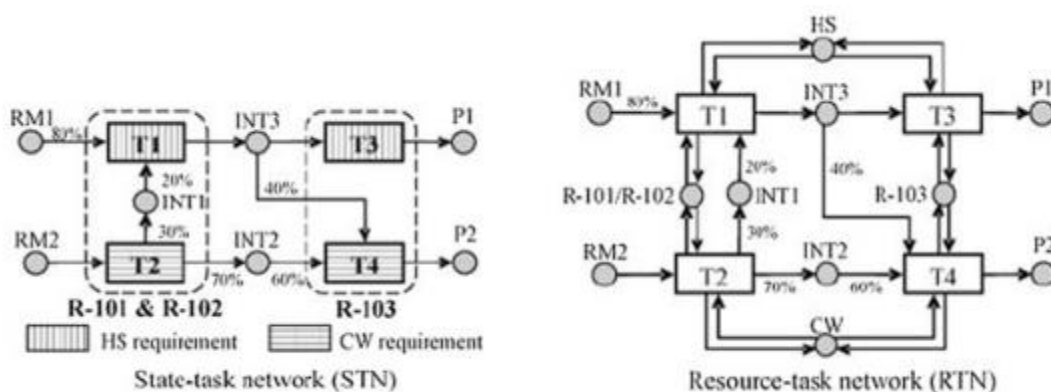
Σχήμα 1.2 Διακριτή & συνεχής αναπαράσταση του χρονικού ορίζοντα (Floudas & Lin, 2004)

Ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης των παρτίδων και των μεγεθών τους, η αναπαράσταση μπορεί να γίνει με βάση το δίκτυο των διεργασιών (για πολύπλοκες συνταγές προϊόντων που ακολουθούν διαφορετικές διεργασίες παραγωγής) ή τις παρτίδες (για διαδοχικές διεργασίες παραγωγής προϊόντων με κοινά στάδια). Η αναπαράσταση του δικτύου (network-based) αφορά σε μονολιθικές προσεγγίσεις, οι οποίες ασχολούνται ταυτόχρονα με το βέλτιστο σύνολο παρτίδων (αριθμός και μέγεθος), την κατανομή και την αλληλουχία των κατασκευαστικών πόρων και το χρονοδιάγραμμα των εργασιών επεξεργασίας. Αυτό, συνήθως, οδηγεί σε μεγάλα σε έκταση μοντέλα και για απλοποίηση του προγραμματισμού προτιμάται η χρήση αυτής της προσέγγισης σε προβλήματα με μικρό αριθμό εργασιών επεξεργασίας και περιορισμένους χρονικούς ορίζοντες (Méndez, et al., 2006). Από την άλλη, η αναπαράσταση παρτίδων (batch-based) βασίζονται σε παρτίδες γνωστού μεγέθους και αριθμού, που χρησιμοποιούνται για διεργασίες ενός ή πολλών σταδίων (single or multi-stage) και πολλαπλών χρήσεων (multi-purpose). Σε αυτές οι παρτίδες επεξεργάζονται διαδοχικά, χωρίς να είναι επιτρεπτός ο διαχωρισμός/ανάμιξη παρτίδων ή οι ροές ανακύκλωσης. Το πρόβλημα παρτίδας αντιμετωπίζεται σε δύο στάδια α) της μετατροπής της ζήτησης προϊόντων σε μεμονωμένες παρτίδες και έπειτα β) την κατανομή των παρτίδων στους διαθέσιμους πόρους, με τελικό στόχο τη βελτιστοποίηση κάποιου κριτηρίου. Αυτή η προσέγγιση βρίσκει εφαρμογές σε μεγάλα, πολύπλοκα προβλήματα των βιομηχανιών, που δεν είναι απλό να λυθούν με την network-based προσέγγιση (Korpanos & Puigjaner, 2019) (Méndez, et al., 2006).

Οι αναπαραστάσεις δικτύου γίνονται είτε με το μοντέλο State-Task Network (STN) είτε με το Resource-Task Network (RTN), παραδείγματα των οποίων φαίνονται στο Σχήμα 1.3. Πρώτοι που πρότειναν αυτές τις αναπαραστάσεις ήταν οι Kondili et al (1993) και ο Pantelides (1994), αντίστοιχα, ώστε να διευκολύνουν την κατανόηση ενός προβλήματος. Στα μοντέλα STN παρουσιάζονται διεργασίες και καταστάσεις υλικών που παράγονται ή καταναλώνονται, χωρίς αναφορά στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται κατά την επεξεργασία. Στο διάγραμμα αυτό οι διεργασίες (tasks) απεικονίζονται ως ορθογώνια, οι καταστάσεις υλικών (states), που αντιπροσωπεύουν τις πρώτες ύλες, τα ενδιάμεσα και τα τελικά προϊόντα, ως κύκλοι, και μεταξύ τους συνδέονται με βέλη που δείχνουν την πορεία των υλικών (είσοδος/έξοδος σε/από κάποια διεργασία). Στα βέλη αυτά αναγράφεται το κλάσμα του υλικού που μεταφέρεται, αν αυτό δεν ισούται με 1. Στα θετικά της STN αναπαράστασης συγκαταλέγονται η πρόσδοση σαφούς εικόνας για τις σχέσεις μεταξύ διεργασιών και υλικών, χωρίς την πολυπλοκότητα που εισάγουν οι σχέσεις αλληλουχίας των διεργασιών, θεωρώντας ότι μία διεργασία μπορεί να εκτελεστεί αν υπάρχει διαθεσιμότητα των ποσοτήτων των υλικών και του εξοπλισμού που

χρησιμοποιούνται σε αυτή. Ταυτόχρονα, διευκολύνει την περιγραφή πολύ γενικών συνταγών διεργασιών, με στάδια όπως ο διαχωρισμός και η ανάμειξη παρτίδων, η ανακύκλωση υλικών και η ενδιάμεση αποθήκευση. Στον αντίποδα, τα μειονεκτήματα που εμφανίζονται είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη τη δυνατότητα χρήσης περισσότερων του ενός συσκευών για την εκτέλεση μίας διεργασίας ή την ύπαρξη πολλών ίδιων συσκευών. Επίσης, διεργασίες που δεν αλλάζουν την κατάσταση του υλικού (π.χ. εναλλαγές ή μεταφορά των υλικών), όπως και διαφορετικά είδη πόρων (π.χ. υλικά, συσκευές, βοηθητικές παροχές) απαιτούν ειδικό χειρισμό, εισάγοντας πολλούς διαφορετικούς τύπους περιορισμών που επιβαρύνουν τις υπολογιστικές απαιτήσεις του προγράμματος βελτιστοποίησης (Koranos & Puigjaner, 2019).

Τις δυσκολίες αυτές εξομαλύνει το μοντέλο RTN, όπου γίνεται ομοιόμορφη απεικόνιση των διαθέσιμων πόρων (καταστάσεις υλικών, εξοπλισμός επεξεργασίας και αποθήκευσης, μεταφορά υλικών και βοηθητικές παροχές), ως κύκλους. Οι διεργασίες που χρησιμοποιούν έστω και έναν διαφορετικό πόρο (π.χ. συσκευή), πλέον αντιμετωπίζονται ως διαφορετικές διεργασίες (Floudas & Lin, 2004). Όλοι οι πόροι αντιμετωπίζονται σαν να καταναλώθηκαν στην αρχή μιας εργασίας και να παράγονται στο τέλος. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του RTN είναι ότι μία συσκευή σε διαφορετικές συνθήκες (π.χ. "καθαρή" ή "βρώμικη") μπορεί να θεωρηθεί διαφορετικός πόρος, δίνοντας τη δυνατότητα ευκολότερης αναπαράστασης εργασιών όπως ο καθαρισμός. Πλεονεκτεί, λοιπόν, σε προβλήματα με πολλές όμοιες συσκευές, διότι εισάγουν μόνο μία δυαδική μεταβλητή αντί για τις πολλαπλές μεταβλητές που απαιτούνται στην STN αναπαράσταση, απλοποιώντας το σε πρόβλημα ισορροπίας πόρων που χρησιμοποιούνται στα διαστήματα του χρονικού ορίζοντα (Koranos & Puigjaner, 2019).



Σχήμα 1.3 Παραδείγματα STN & RTN αναπαράστασης δικτύου (Koranos & Puigjaner, 2019)

1.2. Χρονοπρογραμματισμός παραγωγής σε βιομηχανίες τροφίμων & ποτών – Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στη διάρκεια των χρόνων, διάφοροι ερευνητές έχουν μελετήσει πρακτικά προβλήματα χρονοπρογραμματισμού σε μικρές και μεγάλες βιομηχανίες, με αποτελέσματα και προτάσεις που εξέλιξαν τις δυνατότητες βελτιστοποίησης. Ακολουθώντας, αναλύονται το μοντέλο και βασικά αποτελέσματα που προέκυψαν από ορισμένες από αυτές τις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε βιομηχανίες τροφίμων.

Το (2001) για χάρη της Kellogg Company, εταιρείας παραγωγής δημητριακών πρωινού και άλλων τροφίμων, οι Brown et al. Μοντελοποίησαν το δίκτυο παραγωγής και διανομής της. Αυτό έγινε με ένα LP (linear programming) πρόγραμμα με δυνατότητα εφαρμογής σε διάφορους χρονικούς ορίζοντες, με διαστήματα που μπορούσαν να αντιστοιχούν σε εβδομάδες ή μήνες.

Βασισμένοι στην απεικόνιση STN, οι Giannelos & Georgiadis (2003) δημιούργησαν ένα νέο μοντέλο MILP (mixed-integer linear programming) στο οποίο χρησιμοποίησαν συνεχή χρονικό ορίζοντα, ώστε να εξάγουν βέλτιστα χρονοδιαγράμματα παραγωγής καταναλωτικών αγαθών σε εύλογο υπολογιστικό χρόνο. Το πρόβλημα ήταν απαιτητικό ως προς την ακολουθία εναλλαγής των προϊόντων και την ευελιξία ενδιάμεσης αποθήκευσής τους. Ύστερα από δοκιμή σε πραγματικά βιομηχανικά δεδομένα, αποδείχθηκε ότι το νέο μοντέλο με την απλούστερη διατύπωση έχει βέλτιστα αποτελέσματα σε γραμμή παραγωγής μεσαίας κλίμακας, ενώ σε μεγαλύτερη κλίμακα τα χρονοδιαγράμματα που εξάγονται έχουν απόκλιση της τάξης του 5-10% από την βέλτιστη ολική λύση.

Οι Entrup et al. (2005) παρουσίασαν τρεις διαφορετικές συνθέσεις μοντέλων MILP, μικτού χρονικού ορίζοντα, για προβλήματα χρονοπρογραμματισμού και προγραμματισμού του σταδίου συσκευασίας αναμεμιγμένου γιαουρτιού. Αφορούσαν ζητήματα διάρκειας ζωής για την προμήθεια της αγοράς με φρέσκα προϊόντα. Ωστόσο, οι χρόνοι εναλλαγής προϊόντων και το κόστος παραγωγής αγνοήθηκαν, με αποτέλεσμα το μοντέλο να μην προσφέρεται τόσο για σκοπούς χρονοπρογραμματισμού, όπου οι πληροφορίες εναλλαγών προϊόντων είναι απαραίτητες.

Το (2007), το καίριο πρόβλημα του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παρτίδων, μελέτησαν οι Soman et al., προτείνοντας μία νέα προσέγγιση. Πρότειναν ένα πλαίσιο σχεδιασμού

παραγωγής και ελέγχου αποθεμάτων για συνδυασμένη λειτουργία παραγωγής κατά παραγγελία (MTO) και make-to-stock (MTS), το οποίο αναπτύχθηκε για μια ολλανδική εταιρεία επεξεργασίας τροφίμων που παράγει 230 προϊόντα σε μία γραμμή με περιορισμένη δυναμικότητα. Αυτό το πλαίσιο δεν είναι γνωστό αν τελικά εφαρμόστηκε στην εταιρεία.

Οι Marinelli et al. (2007) ασχολήθηκαν με το πρόβλημα σχεδιασμού γραμμής συσκευασίας 17 προϊόντων γιαουρτιού σε 5 παράλληλα συσκευαστικά μηχανήματα που αξιοποιούν κοινούς πόρους. Η βελτιστοποίηση στόχευε στην ελαχιστοποίηση α) των αποθεμάτων, β) του κόστους παραγωγής και γ) του κόστους ρύθμισης των μηχανημάτων. Το μοντέλο που παρουσίασαν δεν επέτυχε βελτιστοποίηση του πραγματικού προβλήματος σε αποδεκτό χρόνο υπολογισμού και για αυτό, πρότειναν ένα ευρετικό σύστημα δύο σταδίων, το οποίο παρείχε σχεδόν βέλτιστες λύσεις για το πρόβλημα.

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής γιαουρτιού σε μια ελληνική γαλακτοβιομηχανία, εξετάστηκε από τους Doganis & Sarimveis (2007). Στόχος τους ήταν ο προγραμματισμός λειτουργίας δύο (ή τριών) παράλληλων συζευγμένων συσκευαστικών μηχανημάτων, κατά τη διάρκεια ενός 5ήμερου ορίζοντα παραγωγής, για την κάλυψη της εβδομαδιαίας ζήτησης 25 διαφορετικών προϊόντων. Για να πραγματοποιηθεί αυτό λήφθηκαν υπόψη οι χρόνοι και τα κόστη εναλλαγής των προϊόντων, ενώ ήταν αναγκαία η ικανοποίηση της συνολικής ζήτησης. Μία ιδιαιτερότητα του προβλήματος ήταν ότι απαγορευόταν η ταυτόχρονη συσκευασία πολλαπλών προϊόντων, δεδομένου ότι η οι παράλληλες μηχανές μοιράζονταν την ίδια γραμμή τροφοδοσίας.

Με δεδομένα μίας βιομηχανίας παραγωγής λουκάνικων, οι Polon et al. (2009) δημιούργησαν ένα μοντέλο με στόχο την αποτελεσματικότερη χρήση των διαθέσιμων πόρων για την ανταπόκριση σε αυξημένη ζήτηση, τη μείωση του κόστους και του χρόνου παράδοσης. Οι διεργασίες διαλείπουσας λειτουργίας για την παραγωγή διακρίνονται σε δύο κύρια στάδια. Σημαντικός περιορισμός τίθεται στην κάλυψη της ζήτησης χωρίς επιπλέον παραγωγή, λόγω ευπάθειας των προϊόντων. Το μοντέλο MILP επιλύθηκε στο λογισμικό βελτιστοποίησης GAMS (General Algebraic Modeling System) με θετικά αποτελέσματα για την αποτελεσματικότητα χρήσης του εξοπλισμού και την παραγωγικότητα της μονάδας.

Οι Koranos et al. (2011) παρουσίασαν ένα πρόβλημα προγραμματισμού παραγωγής περιορισμένων πόρων σε ημισυνεχείς διαδικασίες σε πραγματική βιομηχανία παραγωγής γιαουρτιού. Σε μεικτό χρονικό ορίζοντα, πρότειναν ένα μοντέλο MILP προγραμματισμού βασισμένο στον ορισμό των οικογενειών προϊόντων και των εναλλαγών τους, μειώνοντας την

ποσότητα των επιμέρους προϊόντων και κατά συνέπεια το μέγεθος του μοντέλου. Σε παρόμοιο μήκος κύματος κινήθηκαν και στην έρευνα του (2012), όπου, πέρα από τις οικογένειες προϊόντων, εφάρμοσαν ισοζύγια υλικών για κάθε συγκεκριμένο προϊόν, επιτρέποντας τη λεπτομερή βελτιστοποίηση του κόστους παραγωγής, αποθέματος και μεταφοράς και εξέτασαν εναλλακτικούς τρόπους για τη διανομή των τελικών προϊόντων. Αυτή είναι η πρώτη γνωστή εργασία πάνω σε πρόβλημα βιομηχανίας τροφίμων ημισυνεχούς επεξεργασίας και σχεδιασμού logistics, με αποτελέσματα που έχουν εφαρμογή και σε άλλες βιομηχανίες τροφίμων και ποτών.

Στην έρευνά τους οι εξετάζουν το πρόβλημα προγραμματισμού παραγωγής σε μια πραγματική βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων πολλαπλών σταδίων. Δημιούργησαν ένα νέο MILP μοντέλο συνεχούς χρονικού ορίζοντα, το μαθηματικό πλαίσιο του οποίου βασίζεται σε μια αποτελεσματική προσέγγιση μοντελοποίησης των αποφάσεων αλληλουχίας, στην ολοκληρωμένη μοντελοποίηση όλων των σταδίων παραγωγής και στη συμπερίληψη ενός συνόλου ισχυρών περιορισμών. Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση όλων των σταδίων επεξεργασίας στοχεύει σε καλύτερα αποτελέσματα ως προς την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων της διαδικασίας παραγωγής. Επιπλέον, προτείνεται μια εναλλακτική στρατηγική λύσης, που χρησιμοποιεί τη μέθοδο της αποσύνθεσης, βασισμένη σε MILP προγραμματισμό για την αντιμετώπιση προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής μεγάλης κλίμακας. Αν και αυτή η μέθοδος μπορεί να μην εγγυάται συνολική βελτιστοποίηση, ευνοεί χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις και λύσεις πολύ καλής ποιότητας.

Το (2015) διαμορφώθηκε από τους Alborno & González-Araya ένα πρόγραμμα MILP για την μεγιστοποίηση του κέρδους, εφαρμόσιμο σε μονάδες επεξεργασίας και συσκευασίας κρέατος, λαμβάνοντας υπόψη ποιοτικές (π.χ. φρεσκάδα προϊόντων), βιολογικές (π.χ. διαφορετικό βάρος ζώων) αλλά και οικονομικές παραμέτρους.

Στην έρευνά τους οι Khorram Niaki et al. (2017) εξετάζουν ένα πρόβλημα ακέραιου μεγέθους παρτίδας και προγραμματισμού παραγωγής σε παρτίδες και προτείνουν μια νέα διατύπωση MILP με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις. Το εξεταζόμενο σύστημα παραγωγής περιέχει ημι-συνεχείς γραμμές παραγωγής και εφαρμόζεται σε ένα πρόγραμμα ζήτησης έξι εβδομάδων μιας γαλακτοκομικής εταιρείας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τόσο το λειτουργικό κόστος όσο και ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης έχουν βελτιστοποιούνται με το μοντέλο αυτό.

Οι Georgiadis et al., το (2019), χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο MILP, που είχαν αναπτύξει σε προηγούμενη έρευνα, για ένα πρόβλημα μεγέθους παρτίδας και προγραμματισμού παραγωγής μίας μεγάλης πραγματικής γαλακτοβιομηχανίας. Λαμβάνοντας υπόψη τους απαραίτητους περιορισμούς για τα ισοζύγια των υλικών, τον εξοπλισμό, τις δυνατότητες αποθήκευσης και δεδομένα παραγγελιών, επέτυχαν την εξαγωγή ενός χρονοδιαγράμματος που ελαχιστοποιεί το κόστος σε εβδομαδιαίο χρονικό ορίζοντα. Ο χρονικός ορίζοντας επιλέχθηκε, στρατηγικά, να είναι κυλιόμενος ώστε η λύση να είναι σύμφωνη με νέες πληροφορίες που προκύπτουν από επαναπρογραμματισμό της παραγωγής σύμφωνα με τις διαρκείς αλλαγές των παραγγελιών.

Το (2019) οι Elekidis et al. ασχολήθηκαν με τον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής μιας πραγματικής πολυεθνικής εταιρείας καταναλωτικών αγαθών με πολλαπλά συνεχή στάδια, δίνοντας έμφαση στο στάδιο συσκευασίας που αποτελεί το κύριο σημείο συμφόρησης της παραγωγής. Για αυτό το στάδιο προτάθηκαν δύο μοντέλα MILP, άμεσης και γενικής προτεραιότητας, λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς προηγούμενων σταδίων, και δύο MILP αλγόριθμοι αποσύνθεσης που χρησιμεύουν σε δυναμικά περιβάλλοντα όπως αυτό μίας πολυεθνικής βιομηχανίας, με πολλαπλά προϊόντα και αστάθμητους παράγοντες. Η βελτιστοποίηση, αν και δεν είναι συνολική, επέτυχε σημαντικές μειώσεις του χρόνου εναλλαγών μεταξύ προϊόντων αυξάνοντας την παραγωγικότητα της βιομηχανίας μεγάλης κλίμακας.

Εξαιτίας εποχιακών παραγόντων και της ευπάθειας της πρώτης ύλης παραγωγής σάλτσας τσίλι, οι τιμές πώλησης αυξήθηκαν δραματικά σε περιόδους εκτός εποχής συγκομιδής των πρώτων υλών. Για αυτό, οι Jonrinaldi & Novira (2019) μελέτησαν το πρόβλημα αυτό, ώστε να βρεθεί βέλτιστος τρόπος κατανομής των διαθέσιμων πρώτων υλών, για την επίτευξη κάλυψης της ολοένα αυξανόμενης ζήτησης σε λογική τιμή πώλησης, ανεξαρτήτως εποχής. Με ένα MILP μοντέλο χρονικού ορίζοντα τεσσάρων εβδομάδων, βασισμένο σε περιορισμούς διαθεσιμότητας πρώτων υλών και παραγωγικής δυναμικότητας, στόχευσαν και πέτυχαν την ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους και τη σωστή διαχείριση των πρώτων υλών σε μία πραγματική βιομηχανία της Ινδονησίας.

Στο πρόβλημα προγραμματισμού παραγωγής μιας βιομηχανίας τροφίμων, με βάση μία πραγματική βιομηχανία παραγωγής κονσερβοποιημένων ψαριών, οι Georgiadis et al (2020) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για τη βελτιστοποίηση των εβδομαδιαίων προγραμμάτων για την περίπτωση εγκατάστασης πολλαπλών σταδίων, παράλληλων συσκευών και προϊόντων με διαλείπουσες αλλά και συνεχείς διαδικασίες επεξεργασίας. Στόχος ήταν η μείωση της

υπολογιστικής πολυπλοκότητας για την επίλυση του προβλήματος σε εύλογο χρόνο. Για αυτό, αναπτύχθηκαν δύο ξεχωριστά μοντέλα MILP μικτού χρονικού ορίζοντα και μια τεχνική αποσύνθεσης βάσει των παραγγελιών. Στα MILP μοντέλα υιοθετείται μια συγκεντρωτική προσέγγιση, μόνο τα συνεχή στάδια μοντελοποιούνται ρητά, ενώ οι συσκευές διαλείπουσας λειτουργίας μοντελοποιούνται ως ανανεώσιμοι πόροι. Ο αλγόριθμος αποσύνθεσης εισάγεται για την διασφάλιση της επίλυσης του προβλήματος εντός ενός επιθυμητού υπολογιστικού χρόνου. Σε αυτή τη μέθοδο, τα προϊόντα βελτιστοποιούνται επαναληπτικά, σύμφωνα με μια πολιτική εισαγωγής που ορίζεται από το χρήστη. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που ελαχιστοποιούνται είναι αυτές του χρόνου λειτουργίας (makespan) και των εναλλαγών (changeovers). Σημαντικό στοιχείο αυτής της έρευνας είναι ότι το μοντέλο έχει εφαρμογή σε πραγματικά προβλήματα βιομηχανιών με παρόμοια χαρακτηριστικά, ενώ τα περισσότερα μοντέλα είναι κυρίως θεωρητικά σε ακαδημαϊκό επίπεδο.

Η μελέτη των Angizeh et al. (2020) είχε στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής, με ταυτόχρονη επίτευξη του βέλτιστου χρονοδιάγραμμα λειτουργίας των γραμμών παραγωγής πολλαπλών προϊόντων συγκεκριμένης ζήτησης. Για την βελτίωση της απόδοσης, παρουσιάστηκε ένα μοντέλο, ως πρόβλημα MILP, το οποίο εφαρμόστηκε τόσο με θεωρητικά όσο και με πραγματικά δεδομένα από μονάδα παραγωγής τροφίμων (5 γραμμές παραγωγής- 12 τύποι προϊόντων γιαουρτιού). Συνυπολογίστηκαν και περιορισμοί που αφορούσαν την κατανάλωση/κόστος ενέργειας, τα changeovers, το κόστος των εργατικών κ.α, ενώ πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου για διάφορες ζητήσεις. Φαίνεται ότι τα τελευταία χρόνια, ολοένα και περισσότερες έρευνες βρίσκουν εφαρμογή σε πραγματικά περιβάλλοντα βιομηχανιών, αποτελώντας χρήσιμο εργαλείο για τις εταιρείες και όχι αποκλειστικά ακαδημαϊκό πεδίο.

Στην μελέτη του (2021) των Georgiadis et al. εξετάζεται ένα πολύπλοκο πρόβλημα προγραμματισμού σε μονάδα παραγωγής μύρας, που περιλαμβάνει διαλείποντα και συνεχή στάδια επεξεργασίας, πολλές ανόμοιες συσκευές και αυστηρούς περιορισμούς στην λειτουργία αλλά και στην κάλυψη των παραγγελιών. Χρησιμοποιώντας μια μικτή αναπαράσταση διακριτού-συνεχούς χρόνου και το πλαίσιο άμεσης προτεραιότητας, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο MILP για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής, η αποτελεσματικότητα και η υπολογιστική απόδοση του οποίου συγκρίθηκε για διάφορες περιπτώσεις με μοντέλα της βιβλιογραφίας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίλυση του προβλήματος σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα, εξαιτίας των μεγάλων χρόνων που απαιτούνται για την παράδοση των παραγγελιών που προκύπτουν από την μεγάλη διάρκεια των διαδικασιών ζύμωσης/ωρίμανσης της μύρας.

Για αυτό στο πλαίσιο της έρευνας αυτής, προτάθηκε και ένας αλγόριθμος στρατηγικής αντιμετώπισης του προβλήματος με μία προσέγγιση αποσύνθεσής του.

Οι Tirkes et al. (2021) για τον προγραμματισμό παραγωγής μιας μικρής βιομηχανίας προϊόντων σιροπιού και μαρμελάδας δημιούργησαν ένα MILP μοντέλο για πολλαπλές γραμμές παραγωγής που χρησιμοποιούν την ίδια συσκευή περιορισμένης δυναμικότητας. Η λύση του μοντέλου οδηγεί σε ένα αποτελεσματικό χρονοδιάγραμμα που καταδεικνύει την αλληλουχία των διεργασιών παραγωγής προϊόντων στις συσκευές, δίνοντας εναλλακτικές λύσεις παραγωγής που μεγιστοποιούν το κέρδος με την αξιοποίηση της υπολειπόμενης δυναμικότητας, πέραν αυτής που απαιτείται για την κάλυψη της υπάρχουσας ζήτησης, για επιπλέον παραγωγή προϊόντων.

Προσφάτως, αναπτύχθηκε ένα καινοτόμο μοντέλο μη γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού για την βελτιστοποίηση ενός προβλήματος χρονοπρογραμματισμού παραγωγής βιομηχανίας καταναλωτικών αγαθών από τους Fruytier & Georgiadis (2023). Το πρόβλημα αφορά σε ένα σύστημα παραγωγής πολλαπλών σταδίων με ιδιαιτερότητες σε μεγάλους χρόνους ρύθμισης, στις εναλλαγές των προϊόντων, σε περιορισμούς αποθηκευτικής δυναμικότητας και σε καθυστερημένες, ή μη, παραγγελίες. Με την βελτιστοποίηση που έγινε σε κυλιόμενο ορίζοντα 2 εβδομάδων επιτεύχθηκαν αποτελεσματικά διψήφια απόλυτες βελτιώσεις για στρατηγικούς στόχους, όπως το άμεσο περιθώριο κέρδους, η ελαχιστοποίηση των αποθεμάτων των πόρων και η εξυπηρέτηση πελατών, σε πολύ μικρό υπολογιστικό χρόνο.

Σε αυτή την μελέτη πραγματοποιείται βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μιας βιομηχανίας παραγωγής τοπικών προϊόντων με Μαστίχα Χίου, της Mediterra A.E., και συγκεκριμένα δύο κύριων προϊόντων της, των υποβρυχίων και των γλυκών παραδοσιακών πιτών. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η αύξηση του κέρδους της βιομηχανίας μέσω της αύξησης της παραγόμενης ποσότητας αυτών των δύο τύπων προϊόντων, χωρίς ανάγκη ύπαρξης υπερωριών. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο μεικτού-ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP), σε διακριτό χρονικό ορίζοντα και επιλύεται με τη βοήθεια του λογισμικού βελτιστοποίησης GAMS (General Algebraic Modeling System).

Στα Κεφάλαια που ακολουθούν, αρχικά, γίνεται ο ορισμός του προβλήματος και αναλύονται σημαντικά χαρακτηριστικά της βιομηχανίας και των διεργασιών, που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον χρονοπρογραμματισμό της παραγωγής (Κεφάλαιο 2). Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο που δημιουργήθηκε για χάρη της βελτιστοποίησης κέρδους και παρατίθενται οι συμβολισμοί (συνόλων, παραμέτρων και μεταβλητών), όπως και οι περιορισμοί που αφορούν στην λειτουργία του εξοπλισμού, τα ισοζύγια μάζας, τις εναλλαγές των προϊόντων κ.α. καθώς και την αντικειμενική συνάρτηση κέρδους που μεγιστοποιείται. Στο Κεφάλαιο 4, γίνεται η παράθεση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων για διάφορες περιπτώσεις ζήτησης στη διάρκεια ενός έτους και για την περίπτωση αύξησης της δυναμικότητας ενός στοιχείου του εξοπλισμού. Η εργασία αυτή ολοκληρώνεται με το Κεφάλαιο 5, όπου γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα που προέκυψαν και σε ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω μελέτη σε μελλοντικό χρόνο.

2. Περιγραφή της βιομηχανικής μονάδας

Για την εκπόνηση αυτής της μελέτης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από μία ελληνική βιομηχανία παραγωγής προϊόντων με Μαστίχα Χίου, την Mediterra A.E.. Προκειμένου να διαφυλαχθούν τα δεδομένα των συνταγών της βιομηχανίας, κατά την περιγραφή του προβλήματος και του μαθηματικού μοντέλου οι διεργασίες και τα υλικά που χρησιμοποιούνται αναφέρονται με κωδικοποιημένο τρόπο. Ακολούθως, γίνεται ανάλυση της ροής διεργασιών και του διαγράμματος STN, δίνοντας βάση στις καταστάσεις των υλικών (π.χ. πρώτες ύλες, ενδιάμεσα, τελικά προϊόντα) και των συσκευών που αξιοποιούνται για την παραγωγή των γλυκών προϊόντων. Παρατίθενται με την μεγαλύτερη επιτρεπτή ανάλυση χαρακτηριστικά της βιομηχανίας που επηρεάζουν τη μετέπειτα δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, που επεξηγείται στο Κεφάλαιο 3.

Επιλέχθηκε να μελετηθούν δύο από τις κυριότερες γραμμές παραγωγής, αυτή των γλυκών υποβρυχίων και αυτή των γλυκών πιτών με διάφορες γεύσεις. Για τη μελέτη αυτή γίνεται η θεώρηση ότι οι 2 αυτές γραμμές αποτελούν τις κύριες παραγωγές της βιομηχανίας. Αυτές οι γραμμές χρησιμοποιούν κοινές συσκευές για την παραγωγή και για αυτό τον λόγο υπάρχει δυσκολία στην παραγωγή και των δύο προϊόντων στην ίδια δωρη βάρδια, πρόβλημα που χρήζει αντιμετώπισης. Στόχος είναι η αύξηση του κέρδους της βιομηχανίας αυξάνοντας την παραγωγή, με βάση δεδομένα της ζήτησης του τελευταίου έτους η οποία αποτελεί την ελάχιστη ποσότητα που πρέπει να παράγεται. Η βελτιστοποίηση του κέρδους σε αυτή την μελέτη επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του λογισμικού βελτιστοποίησης GAMS.

2.1. Γενικά δεδομένα

Για την παραγωγή των δύο κατηγοριών προϊόντων ακολουθούνται 5 διαφορετικές συνταγές, εκ των οποίων οι 2 είναι για την παραγωγή υποβρυχίων και οι 3 για τις πίτες. Από αυτές προκύπτουν, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, συνολικά 12 διαφορετικοί τύποι τελικών προϊόντων με τον συμβολισμό ZAX, οι οποίοι μπορεί να διαφέρουν ως προς το είδος, τη γεύση, την ποσότητα ή την συσκευασία τους.

Πίνακας 2.1 Κατανομή τελικών προϊόντων ανά συνταγή

Συνταγή 1	Συνταγή 2	Συνταγή 3	Συνταγή 4	Συνταγή 5
ZAX220	ZAX351	ZAX081	ZAX082	ZAX083
ZAX222		ZAX091	ZAX093	ZAX092
ZAX349				ZAX280
				ZAX337

Οι συνταγές παράγουν υποβρύχιο με γεύση μαστίχα και βανίλια και πίτες με γεύση μαστίχα-αμύγδαλο, μέλι-αμύγδαλο και μαστίχα-φιστίκι/αραχίδα. Η ζήτηση αυτών των προϊόντων δεν είναι ομοιόμορφη για όλα και δεν είναι σταθερή στη διάρκεια του χρόνου, αλλά κυμαίνεται ανά προϊόν και εποχή/μήνα. Από δεδομένα της βιομηχανίας για τις παραγωγές που έλαβαν χώρα στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι κατά τους ανοιξιάτικους και καλοκαιρινούς μήνες η παραγωγή, κατά συνέπεια και η ζήτηση, είναι αυξημένη σε όλα τα προϊόντα σε αντίθεση με την φθινοπωρινή και χειμερινή περίοδο. Για παράδειγμα, η συνολική ζήτηση σε υποβρύχιο το φθινόπωρο και τον χειμώνα του τελευταίου έτους ήταν μικρότερη των 10 παρτίδων, σε αντίθεση με την άνοιξη και το καλοκαίρι που ανήλθε σχεδόν στις πλήρεις 70 παρτίδες. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται τα κιλά τελικού προϊόντος που αντιστοιχούν σε μία πλήρη παρτίδα για κάθε διαφορετικό είδος τελικού προϊόντος, έτσι όπως ορίζονται από την βιομηχανία.

Πίνακας 2.2 Μέγεθος πλήρων παρτίδων ανά τελικό προϊόν

Προϊόν	Μέγεθος παρτίδας (kg)	Προϊόν	Μέγεθος παρτίδας (kg)
ZAX220	360	ZAX083	52
ZAX222	360	ZAX091	52
ZAX349	360	ZAX092	52
ZAX351	360	ZAX093	56
ZAX081	52	ZAX280	46
ZAX082	56	ZAX337	46

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η βιομηχανία λειτουργεί μόνο 5 μέρες την εβδομάδα για 8 ώρες την ημέρα. Εντός της δωρης βάρδιας πρέπει να ολοκληρώνονται όλες οι διεργασίες. Οι υπερωρίες σε ορισμένες περιπτώσεις, στις έως τώρα παραγωγές της βιομηχανίας, είναι συχνές, αλλά στόχος του μοντέλου είναι να μηδενιστούν. Ο καθαρισμός και η απολύμανση όλων των εξοπλισμών γίνεται σε ενδιάμεσα ή ταυτόχρονα με τις κύριες διεργασίες χωρίς να επηρεάζουν τον χρόνο διεκπεραίωσής τους ή την σειρά τους.

Αν και οι δύο αυτοί τύποι προϊόντων είναι κύριοι, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη και άλλων προϊόντων που παράγονται από την βιομηχανία, που δεν επιτρέπουν την εξολοκλήρου μεγιστοποίηση της παραγωγής, αλλά θέτει έναν περιορισμό.

2.2. Περιγραφή παραγωγικής διαδικασίας

Τόσο για την παραγωγή υποβρυχίων όσο και για την παραγωγή πιτών, οι διεργασίες που ακολουθούνται στα πρώτα βήματα είναι κοινές, αλλά διαφέρουν ως προς τα συστατικά, την ποσότητά τους και τον χρόνο επεξεργασίας. Αρχικά, γίνεται η φόρτωση των καζανιών με νερό, ζάχαρη και γλυκόζη και ξεκινάει ο βρασμός, ώστε να παραχθεί το σιρόπι που είναι το βασικό στοιχείο των προϊόντων. Όταν ολοκληρωθεί ο βρασμός, το σιρόπι μεταφέρεται σε ανοξείδωτα δοχεία όπου αναμένει έως ότου φτάσει σε ικανοποιητική θερμοκρασία για να είναι δυνατή η ανάμιξή του με τα υπόλοιπα συστατικά. Παράλληλα με την αναμονή πτώσης θερμοκρασίας του σιροπιού, γίνεται το καβούρδισμα των ξηρών καρπών αλλά και η προετοιμασία και η παραγωγή της μαρέγκας, που προστίθενται στο μίγμα της γέμισης των πιτών. Ύστερα από το στάδιο της ανάμιξης οι διεργασίες διαφοροποιούνται.

- Το μίγμα υποβρυχίου μεταφέρεται για συσκευασία και αφού ρυθμιστεί το συσκευαστικό και προετοιμαστούν τα υλικά συσκευασίας, συσκευάζεται σε καθαρά προτυπωμένα δοχεία με καπάκι με ταυτόχρονη διενέργεια δειγματοληπτικού ελέγχου βάρους. Ακολουθεί η εκτύπωση των στοιχείων της συγκεκριμένης παρτίδας, το πακετάρισμα σε κούτες συγκεκριμένου βάρους, οι οποίες αποτελούν το τελικό προϊόν, και η παλετοποίηση.
- Από την άλλη, το μίγμα της γέμισης των πιτών (pougat) τοποθετείται ανάμεσα σε δύο κομμάτια βάρδας, μικρού ή μεγάλου μεγέθους. Το προϊόν αυτό παρασκευάζεται παραδοσιακά από το σημείο του γεμίματος και έπειτα, δηλαδή χωρίς τη χρήση μηχανοκίνητου εξοπλισμού, αλλά με τη βοήθεια ανθρώπων. Παράλληλα με το γέμισμα των πιτών γίνεται δειγματοληπτικός έλεγχος βάρους και ύστερα οι πίτες τοποθετούνται σε χώρο όπου αναμένουν ώστε να παγώσουν επαρκώς και να μην αλλοιωθεί η ποιότητά τους

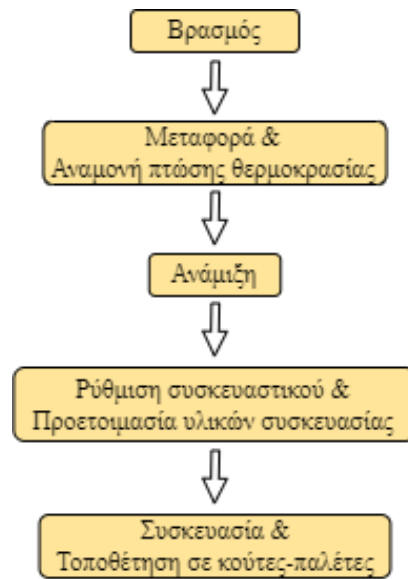
κατά τη συσκευασία. Οι παγωμένες μεγάλες πίτες τοποθετούνται σε πλαστικά σακουλάκια, έπειτα τυλίγονται με ειδικό τρόπο σε προτυπωμένο χαρτί και τέλος εκτυπώνονται σε αυτές τα στοιχεία της παρτίδας και συσκευάζονται ως χύμα προϊόν σε κούτες συγκεκριμένου βάρους ή σε display 15 τεμαχίων που τοποθετούνται σε παλέτες. Οι παγωμένες μικρές πίτες συσκευάζονται σε πλαστική συσκευασία δύο διαφορετικών τύπων από ειδικό συσκευαστικό, το οποίο έχει προηγουμένως ρυθμιστεί, που εκτυπώνει συγχρόνως τα στοιχεία της παρτίδας. Τα συσκευασμένα πιτάκια είτε τοποθετούνται ως χύμα προϊόν σε κούτες συγκεκριμένου βάρους, είτε σε display 15 τεμαχίων. Τα παλετοποιημένα τελικά προϊόντα διατίθενται στους πελάτες ανάλογα με τη ζήτηση ή αποθηκεύονται έως ότου πωληθούν και αυτά.

Ως τελικά προϊόντα θεωρούνται υποβρύχια ή πίτες σε κούτες καθορισμένου βάρους. Μία σύνοψη των συσκευασιών παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.3.

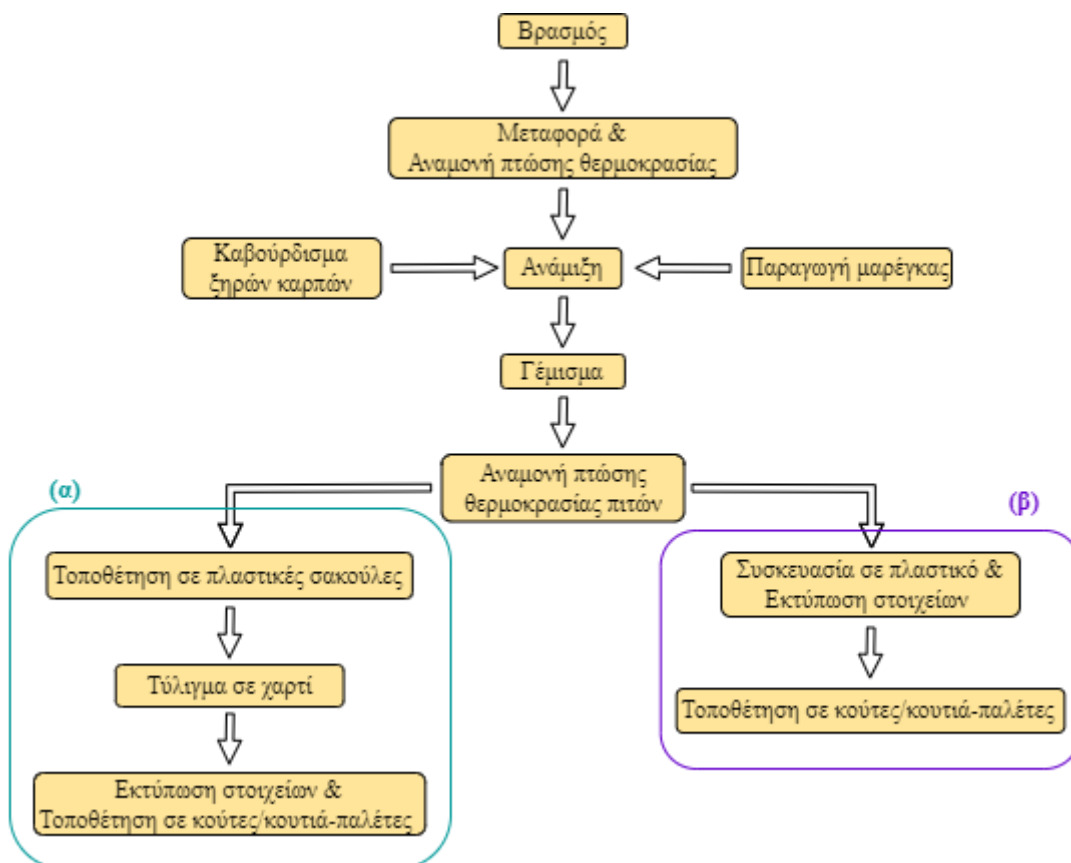
Πίνακας 2.3 Συσκευασίες τελικών προϊόντων και το μέγεθός τους

Είδος συσκευασίας	Ποσότητα × Βάρος
Κούτες με δοχεία με πόμα	12 × 300g
>>	12 × 600g
Κούτες με χύμα τεμάχια	75 × 80g
>>	~ 200 × 25g
Κουτιά display	15 × 80g
>>	15 × 25g

Συνοπτική αναπαράσταση των διεργασιών της παραγωγικής διαδικασίας εμφανίζεται ως διάγραμμα ροής, ξεχωριστά για το υποβρύχιο (Σχήμα 2.1) και για τις μεγάλες (α) και μικρές (β) πίτες (Σχήμα 2.2), ανεξαρτήτως της γεύσης τους και άλλων ειδικών χαρακτηριστικών.

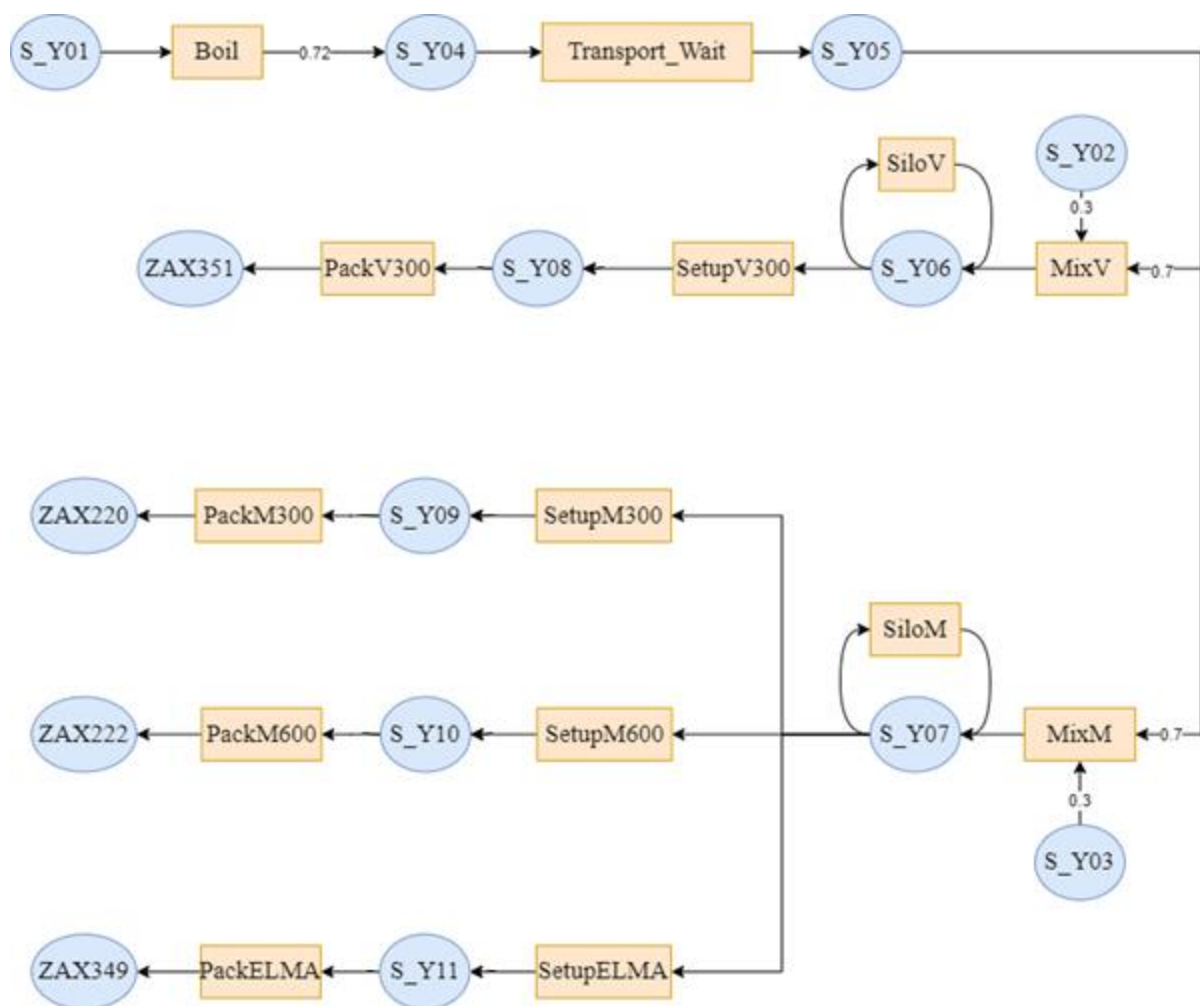


Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής παραγωγής υποβρυχίου

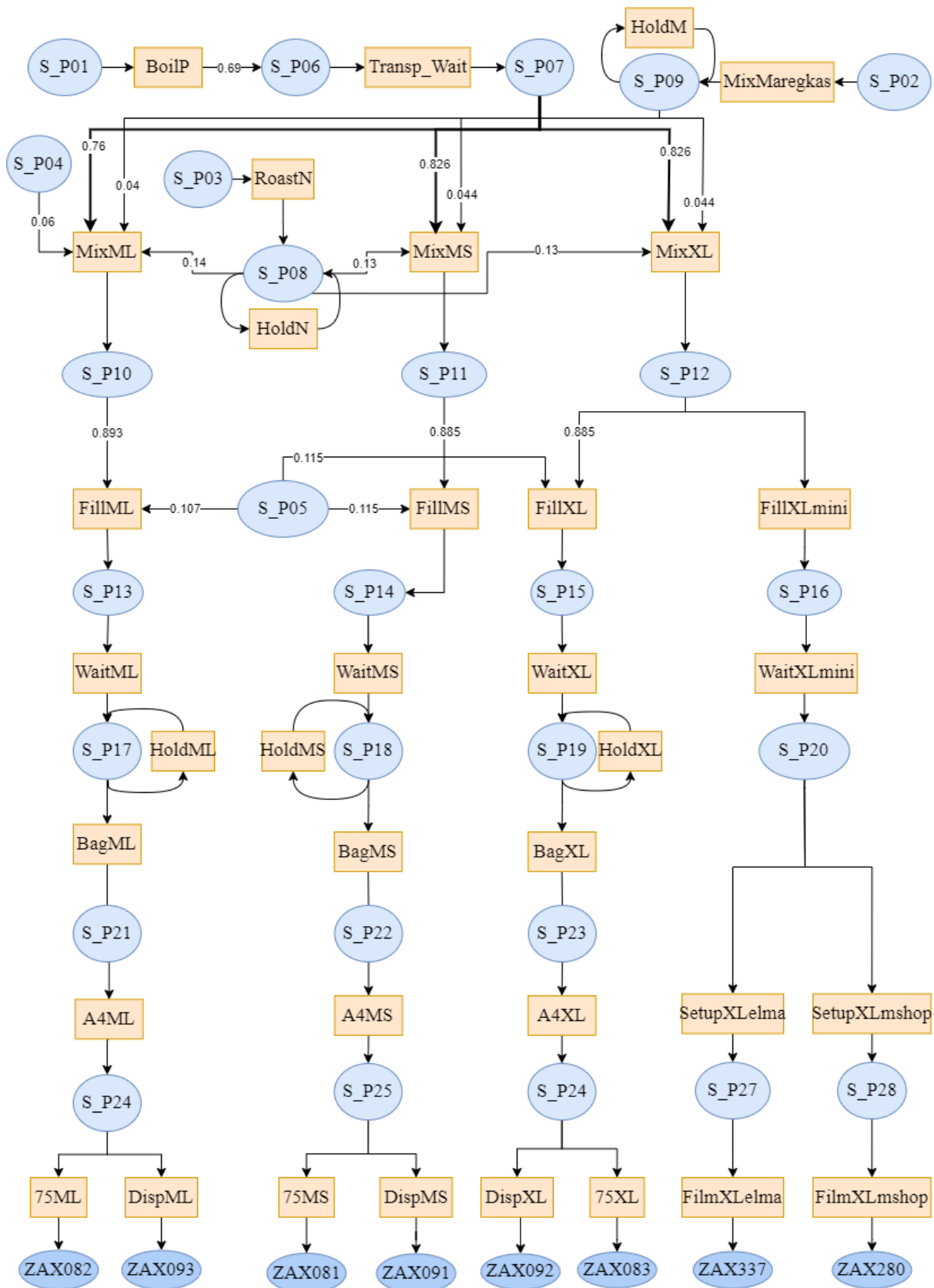


Σχήμα 2.2 Διάγραμμα ροής παραγωγής (α) μεγάλων και (β) μικρών πιτών

Στο Σχήμα 2.3 και 2.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα STN για τα υποβρύχια και τις πίτες, αντίστοιχα, όπου οι καταστάσεις των υλικών εμφανίζονται σε γαλάζιους κύκλους και οι διεργασίες με κίτρινα ορθογώνια, μέσα στα οποία αναγράφεται η ονομασία τους. Οι διεργασίες που εμφανίζονται σε ορθογώνια που συνδέονται με καμπυλόγραμμο βέλη με τις καταστάσεις των υλικών, εκφράζουν την προσωρινή αποθήκευση των υλικών αυτών για ένα χρονικό διάστημα του χρονικού ορίζοντα, σε συσκευή που μπορεί να εκτελέσει την προηγούμενη διεργασία. Τα STN είναι απλοποιημένα, αφού δεν περιέχουν όλα τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται κατά την ανάμειξη διότι θεωρήθηκαν αμελητέα.



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα STN των υποβρυχίων



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα STN των μεγάλων & μικρών πιτών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο βρασμός των πρώτων υλών γίνεται σε καζάνια. Όλες οι πρώτες ύλες είναι διαθέσιμες σε απεριόριστες αρχικές ποσότητες. Τα διαθέσιμα καζάνια είναι 2 ίδιου μεγέθους, όμως μόνο το ένα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την παραγωγή πιτών. Ο χρόνος που διαρκεί ο βρασμός είναι διαφορετικός για το υποβρύχιο και για τις πίτες, όμως θεωρείται σταθερός για μία παρτίδα και ανεξάρτητος από το μέγεθος αυτής, εφόσον ρυθμίζεται η παροχή ατμού για τη θέρμανση των καζανιών ανάλογα με τις ανάγκες. Παράλληλα, έχει οριστεί ένα ελάχιστο μέγεθος παρτίδας για το υποβρύχιο και τις πίτες κάτω από το οποίο δεν μπορεί να παραχθεί η επιθυμητή ποιότητα σιροπιού. Σύμφωνα με τα δεδομένα της βιομηχανίας, η ταυτόχρονη παροχή ατμού σε δύο καζάνια μπορεί να πραγματοποιείται για μέγιστο χρόνο 2 ωρών. Γι' αυτό, λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο βρασμού για την παραγωγή σιροπιού υποβρυχίου, δηλαδή για τη διεργασία *Boil*, που φαίνεται στον Πίνακα 2.5, σε περίπτωση που την ίδια ημέρα υπάρχει ανάγκη αξιοποίησης και των 2 καζανιών η εκκίνηση του δεύτερου καζανιού πρέπει να γίνεται με διαφορά 1 ώρας από του πρώτου.

Για την ανάμιξη, υπάρχουν δύο πανομοιότυπα *mixer* τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν τόσο το μίγμα υποβρυχίου όσο και των πιτών. Ανεξάρτητα από το μέγεθος της παρτίδας ή το μίγμα (υποβρύχιο ή γέμιση πιτών) η ανάμιξη διαρκεί 30 λεπτά. Σημειώνεται ότι το μίγμα των πιτών είναι πιο ελαφρύ αλλά πιο ογκώδες από του υποβρυχίου και συνήθως επεξεργάζεται μόνο σε ένα από τα δύο *mixer*. Επίσης, για λόγους ασφάλειας των προϊόντων, επιβάλλεται η παραγωγή του υποβρυχίου να γίνεται προγενέστερα ή σε διαφορετικό *mixer* όταν την ίδια μέρα γίνεται και παραγωγή πιτών. Αυτό συμβαίνει γιατί το μίγμα των πιτών περιέχει ξηρούς καρπούς και ασπράδι αυγού τα οποία είναι αλλεργιογόνα συστατικά, που θα μπορούσαν να επιμολύνουν το υποβρύχιο. Σε περίπτωση που προηγείται η παραγωγή μίγματος πιτών, απαιτείται χρόνος εναλλαγής 2.5 ωρών για τον καθαρισμό.

Όσον αφορά στην παραγωγή μαρέγκας, πραγματοποιείται σε ειδικό *mixer* με μέγιστη δυναμικότητα ίση με την μέγιστη ποσότητα μαρέγκας που απαιτείται για την μέγιστη ποσότητα γέμισης που μπορεί να αναμιχθεί στα *mixer*. Στο δοχείο του *mixer* της μαρέγκας είναι δυνατή η προσωρινή αποθήκευσή της έως ότου χρησιμοποιηθεί, *HoldM*, με τον αυστηρό περιορισμό ο χρόνος αυτός να είναι μέχρι 15 λεπτά, ώστε να μην αλλοιωθεί η μαρέγκα. Ακόμα, οι ξηροί καρποί αφού καβουρδιστούν μπορούν να διατηρηθούν προσωρινά στον φούρνο, *HoldN*, όμως όλη η ποσότητα που ψήθηκε πρέπει να χρησιμοποιηθεί την ίδια μέρα.

Οι διεργασίες που ακολουθούνται στα στάδια της παραγωγής των ασυσκευαστων προϊόντων στην πραγματικότητα αποτελούν διεργασίες διαλείπουσας λειτουργίας. Τα στάδια

συσκευασίας και για τις δύο κατηγορίες προϊόντων είναι ημι-συνεχούς/συνεχούς λειτουργίας αλλά κατά τη μοντελοποίηση αντιμετωπίζονται ως διαλείπουσας, όπως ορίζει το μοντέλο STN που περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 1. Αυτές οι διεργασίες έχουν διάρκεια 1 χρονικού διαστήματος και δυναμικότητα ίση με τον επιλεγμένο ρυθμό συσκευασίας επί τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος. Όπως ήδη αναφέρθηκε, ένα μέρος της παρασκευής και το μεγαλύτερο μέρος της συσκευασίας των μεγάλων πιτών γίνεται από εργάτες. Έτσι, υπάρχει μια ομάδα εργατών, *Fillers1*, που είναι υπεύθυνοι για το γέμισμα των πιτών και την τοποθέτησή τους σε πλαστικά σακουλάκια και ένας εξειδικευμένος εργαζόμενος για το τύλιγμα των πιτών, *ExternalPartner*. Αυτές οι διεργασίες μπορεί να έχουν ρυθμό παραγωγής που διαφέρει από μέρα σε μέρα λόγω του ανθρώπινου παράγοντα. Παρόλα αυτά, για την απλοποίηση του προβλήματος, αντιμετωπίζονται όπως οι συνεχείς διεργασίες, δηλαδή θεωρούνται διαλείπουσες με σταθερή ποσότητα παραγωγής σε κάθε χρονικό διάστημα.

Ορισμένα σημαντικά δεδομένα για αυτές τις διεργασίες καταγράφονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4 Δεδομένα βασικών διεργασιών συσκευασίας

Συσκευή	Διεργασία	Διαθέσιμος Αριθμός Συσκευών	Δυναμικότητα (kg)	
			Ελάχιστη	Μέγιστη
ExternalPartner	A4ML	1	4	
	A4MS			
	A4XL			
FlowPack	FilmXLelma	1	3.538	
	FilmXLmshop			
PackagingP	75ML	1	0	56
	DispML		1.2	56
	75MS		0	52
	DispMS		1.2	52
	75XL		0	52
	DispXL		1.2	52
PackagingY	PackV300	1	60	
	PackM300		60	
	PackM600		90	
	PackELMA		60	

Για την συσκευασία υποβρυχίων στο συσκευαστικό *PackagingY* και των μικρών πιτών στο συσκευαστικό *FlowPack*, απαιτείται αρχική ρύθμιση των συσκευαστικών ως προς τον ρυθμό συσκευασίας των προϊόντων, το σωστό βάρος προϊόντος εντός του περιέκτη για τα υποβρύχια και της ορθής συσκευασίας πλαστικού για τις μικρές πίτες. Για τις ανάγκες μοντελοποίησης αυτής της διαδικασίας έγινε η παραδοχή ύπαρξης δύο νέων εικονικών συσκευών, *Setup* και *SetupFP*, όπου πραγματοποιούνται οι διεργασίες ρύθμισης δεδομένα για τις οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5 Δεδομένα εικονικών διεργασιών ρύθμισης των συσκευαστικών

Συσκευή	Διεργασία	Διαθέσιμος Αριθμός Συσκευών	Δυναμικότητα (kg)	
			Ελάχιστη	Μέγιστη
Setup	SetupV300	1	0	360
	SetupM300		0	360
	SetupM600		0	360
	SetupELMA		0	360
SetupFP	SetupXLmini	1	23	92
	SetupXLelma		23	92

Οι αλλαγές μεταξύ των διαφορετικών προϊόντων που επεξεργάζονται στον ίδιο εξοπλισμό άλλοτε απαιτούν χρόνο (setup time) και άλλοτε όχι. Για παράδειγμα, οι αλλαγές στα mixer θεωρούνται αμελητέες διότι δεν απαιτείται καθαρισμός τους. Τα mixer έχουν αποσπώμενα δοχεία και αναδευτήρες, αρκετά ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται διαφορετικό σε κάθε διαφορετική συνταγή, και ο χρόνος εγκατάστασης και απεγκατάστασής τους είναι πολύ μικρός ώστε να λογίζεται αμελητέος. Αντίθετα, στο τμήμα της συσκευασίας αυτές η αλλαγές μπορεί να διαρκούν περισσότερο χρόνο. Για παράδειγμα, στην συσκευασία υποβρυχίου η αλλαγή γεύσης απαιτεί καθαρισμό του συσκευαστικού διάρκειας 1.5 ώρας, η αλλαγή μεταξύ μεγάλης και μικρής συσκευασίας στην ίδια γεύση διαρκεί μόλις 15 λεπτά. Στην συσκευασία των μικρών πιτών, ο χρόνος εναλλαγής μεταξύ των δύο διαφορετικών διαδικασιών είναι 15 λεπτά, επίσης, στα οποία το συσκευαστικό πιτών παραμένει ανενεργό.

Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται πιο συγκεκριμένα δεδομένα για τις συσκευές, την μέγιστη και ελάχιστη δυναμικότητά τους και τους χρόνους επεξεργασίας των βασικότερων διεργασιών της παραγωγής.

Πίνακας 2.6 Δεδομένα βασικών διεργασιών παραγωγής

Συσκευή	Διεργασία	Διαθέσιμος Αριθμός Συσκευών	Δυναμικότητα (kg)		Διάρκεια Διεργασίας (mins)
			Ελάχιστη	Μέγιστη	
Cauldron	Boil	2	350	350	150
Cauldron	BoilP	1	110	350	105
SS	Transport_Wait	3	0	360	90
SSP	Transp_WaitP	4	0	38	135
Mixer	MixV	2	45	60	30
	MixM		45	60	30
Mixer	MixML	1	50	50	30
	MixMS		46	46	30
	MixXL		46	46	30
Fillers1	FillML	1	14 kg/15min		-
	FillMS		13 kg/15min		-
	FillXL		13 kg/15min		-
	BagML		28 kg/15min		-
	BagMS		26 kg/15min		-
	BagXL		26 kg/15min		-
Fillers2	FillXLmini	1	5.75 kg/15min		-
Oven	RoastN	1	12	42	30
	HoldN		0	42	30
MixerMaregkas	MixMaregkas	1	0	2	15
	HoldM				15

Αξίζει να σημειωθεί ότι η χωρητικότητα των αποθηκών τόσο για τις πρώτες ύλες, $S_Y01 - 03$ & $S_P01 - 05$, όσο και για τα τελικά προϊόντα, ZAX , θεωρείται απεριόριστη. Για τις υπόλοιπες καταστάσεις υλικών, υπάρχει δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης είτε σε δοχεία/χώρους, τα *Silo*, είτε στις αποθήκες. Αναλυτικότερα, στον Πίνακα 2.7 παρουσιάζεται ο τρόπος και η μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης ανά κατάσταση υλικού, εκτός από αυτές που αντιστοιχούν στις πρώτες ύλες και τα τελικά προϊόντα.

Καμία κατάσταση υλικού, εκτός των πρώτων υλών, δεν παραμένει επ' αόριστο αποθηκευμένη αλλά χρησιμοποιείται εντός της ίδιας βάρδιας ή μέχρι το τέλος του χρονικού ορίζοντα. Συγκεκριμένα, ενδιαφέρον στην επίλυση του προβλήματος παρουσιάζει το γεγονός ότι η παραγωγή μίας παρτίδας πιτών (μικρών ή μεγάλων) διαρκεί δύο δωρες βάρδιες. Έτσι, υπάρχουν τα ενδιάμεσα ημιέτοιμα προϊόντα πιτών, $S_P20 - 23$, τα οποία αποθηκεύονται σεβόμενα την μέγιστη χωρητικότητα των αποθηκών. Το S_P20 αποθηκεύεται μόνο έως την επόμενη βάρδια όπου συσκευάζεται και δίνει το τελικό προϊόν, ενώ τα $S_P21 - 23$ μπορούν να παραμείνουν αποθηκευμένα και να συσκευαστούν σε μεταγενέστερες βάρδιες.

Από την βιομηχανία δόθηκαν, επίσης, δεδομένα για τις εβδομαδιαίες ζητήσεις ανά προϊόν που καλύφθηκαν το προηγούμενο έτος, για κάθε εβδομάδα του έτους αυτού. Από αυτές επιλέχθηκαν προς μελέτη μία εβδομάδα από κάθε μήνα, η οποία είναι ενδεικτική της ζήτησης που υπάρχει σε αυτόν τον μήνα. Οι ζητήσεις αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα Α.1 του Παραρτήματος Α και αποτελούν τις ελάχιστες ποσότητες που οφείλει η βιομηχανία να παράγει και θεωρούνται ως οι βασικές περιπτώσεις παραγωγής (basic) που επιτύγχανε η βιομηχανία με τον συμβατικό προγραμματισμό.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όλα τα στοιχεία κέρδους που εξάγονται βασίζονται στις τιμές κέρδους ανά κιλό προϊόντος, που παρείχε εμπιστευτικά η εταιρεία. Σε όλη την έκταση της εργασίας, οι τιμές θεωρούνται σταθερές κατά τη διάρκεια του έτους και ανεπηρέαστες από τις αλλαγές σε παγκόσμιους οικονομικούς δείκτες.

Πίνακας 2.7 Πληροφορίες για την αποθήκευση των καταστάσεων των υλικών

Κατάσταση υλικού	Τρόπος αποθήκευσης	Μέγιστη χωρητικότητα (kg)	Κατάσταση υλικού	Τρόπος αποθήκευσης	Μέγιστη χωρητικότητα (kg)
S_Y04	-	-	S_P14	Προσωρινά	∞
S_Y05	Προσωρινά*	∞	S_P15	Προσωρινά	∞
S_Y06	<i>Silo</i> **	∞	S_P16	Προσωρινά	∞
S_Y07	<i>Silo</i>	∞	S_P17	<i>SiloML</i>	224
S_Y08	Προσωρινά	∞	S_P18	<i>SiloMS</i>	208
S_Y09	Προσωρινά	∞	S_P19	<i>SiloXL</i>	208
S_Y10	Προσωρινά	∞	S_P20	Αποθήκη***	92
S_Y11	Προσωρινά	∞	S_P21	Αποθήκη	∞
S_P06	-	-	S_P22	Αποθήκη	∞
S_P07	Προσωρινά	∞	S_P23	Αποθήκη	∞
S_P08	<i>Oven</i>	42	S_P24	Προσωρινά	∞
S_P09	<i>MixerMaregkas</i>	2	S_P25	Προσωρινά	∞
S_P10	Προσωρινά	∞	S_P26	Προσωρινά	∞
S_P11	Προσωρινά	∞	S_P27	Προσωρινά	∞
S_P12	Προσωρινά	∞	S_P28	Προσωρινά	∞
S_P13	Προσωρινά	∞			

*Προσωρινά = Η κατάσταση του υλικού φυλάσσεται σε προστατευμένο αποθηκευτικό χώρο έως ότου χρησιμοποιηθεί εντός της ίδιας βάρδιας.

** Τα αναγραφόμενα με πλάγια γραφή αντιστοιχούν σε συσκευές.

*** Αποθήκη = Η κατάσταση του υλικού αποθηκεύεται τουλάχιστον μέχρι την επόμενη βάρδια στις αποθήκες.

3. Ανάπτυξη Μαθηματικού Μοντέλου Βελτιστοποίησης

Για την βελτιστοποίηση του προβλήματος που περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, αξιοποιείται το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο. Η ανάπτυξη αυτού έγινε σε μεγάλο βαθμό ακολουθώντας το καινοτόμο μοντέλο που προτάθηκε από τους Kondili et al (1993), για διακριτή αναπαράσταση του χρονικού ορίζοντα με σύνθεση βασισμένη στην αναπαράσταση STN. Για να επιτευχθεί η μοντελοποίηση έγιναν διάφορες παραδοχές και απλοποιήσεις (βλ. Κεφάλαιο 2).

Το πρόβλημα περιέχει μόνο γραμμικούς περιορισμούς και οι μεταβλητές είναι διακριτές (ακέραιες ή δυαδικές), οπότε είναι τύπου MILP και η βελτιστοποίηση χρησιμοποιεί τον προκαθορισμένο επιλυτή CPLEX. Επίσης, επιλέχθηκε η μέγιστη απόκλιση της τελικής λύσης από την ολική βέλτιστη λύση να είναι της τάξης του 2%.

3.1. Ονοματολογία

Σύνολα

$i, ii \in I$	Σύνολο διεργασιών (tasks) στις γραμμές παραγωγής
$j, jj \in J$	Σύνολο συσκευών (devices) στις γραμμές παραγωγής
$s \in S$	Σύνολο καταστάσεων υλικών (states) που παράγονται/καταναλώνονται στις γραμμές παραγωγής
$t, ,tt, th \in T$	Σύνολο των χρονικών διαστημάτων (time intervals) του χρονικού ορίζοντα

Υποσύνολα

$i \in PackI_i$	Σύνολο διεργασιών (tasks) i που πακετάρουν προϊόντα σε συσκευασίες συγκεκριμένων γραμμαρίων
$i \in MixY_i$	Σύνολο διεργασιών (tasks) i που αναμιγνύουν τα συστατικά για την παραγωγή του υποβρυχίου
$i \in MixP_i$	Σύνολο διεργασιών (tasks) i που αναμιγνύουν τα συστατικά για την παραγωγή της γέμισης των πιτών
$t \in Day1_i$	Σύνολο χρονικών διαστημάτων που αντιστοιχεί στην 1 ^η μέρα
$t \in Day2_i$	Σύνολο χρονικών διαστημάτων που αντιστοιχεί στην 2 ^η μέρα
$t \in Day3_i$	Σύνολο χρονικών διαστημάτων που αντιστοιχεί στην 3 ^η μέρα

$t \in Day4_i$	Σύνολο χρονικών διαστημάτων που αντιστοιχεί στην 4 ^η μέρα
$t \in Day5_i$	Σύνολο χρονικών διαστημάτων που αντιστοιχεί στην 5 ^η μέρα

Παράμετροι

P_i	Χρόνος επεξεργασίας της διεργασίας i
$IJ_{i,j}$	Διεργασίες (tasks) i που μπορούν να εκτελεστούν από την συσκευή j
$Initial_s$	Ποσότητα των υλικών καταστάσεων s στην αρχή του χρονικού ορίζοντα
C_s	Μέγιστη διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης του υλικού κατάστασης s
$Demand_s$	Ζήτηση του προϊόντος s στον χρονικό ορίζοντα που μελετάται
$Profit_s$	Κέρδος ανά κιλό προϊόντος s
$V_{i,j}^{min}$	Ελάχιστη χωρητικότητα της συσκευής j για την εκτέλεση της διεργασίας i
$V_{i,j}^{max}$	Μέγιστη χωρητικότητα της συσκευής j για την εκτέλεση της διεργασίας i
$PISC_{i,s}$	Ποσοστό του υλικού κατάστασης s που καταναλώνεται από τη διεργασία i
$PISP_{i,s}$	Ποσοστό του υλικού κατάστασης s που παράγεται από τη διεργασία i

Βαθμωτά μεγέθη (Scalars)

V	Συμβολίζει το τελευταίο χρονικό διάστημα t κάθε ημέρας του χρονικού ορίζοντα και αλλάζει με βήμα 32 ($v = \{32, 64, 96, 128, 160\}$)
-----	--

Συνεχείς Μεταβλητές

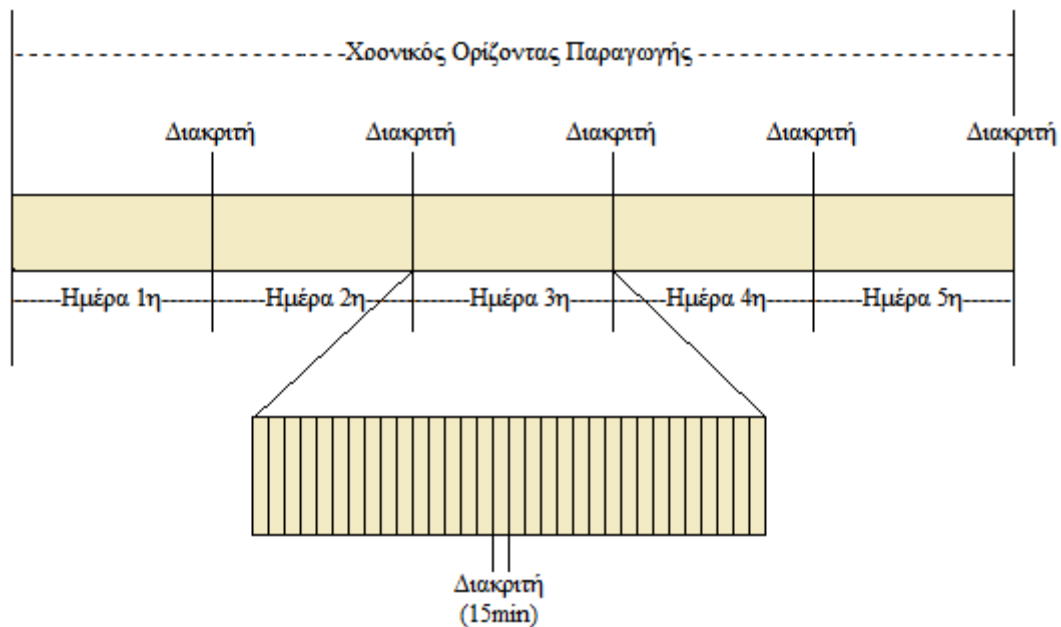
$B_{i,j,t}$	Ποσότητα του υλικού που ξεκινάει να επεξεργάζεται η συσκευή j κατά την εκτέλεση της διεργασίας i στην αρχή του χρονικού διαστήματος t
$D_{s,t}$	Ποσότητα υλικού κατάστασης s που παραδίδεται σε πελάτες στην αρχή του χρονικού διαστήματος t
$ST_{s,t}$	Ποσότητα υλικού κατάστασης s που είναι αποθηκευμένη στο τέλος του χρονικού διαστήματος t

Διαδικές Μεταβλητές

$W_{i,j,t}$	Επιλογή (= 1) ή όχι (= 0) της συσκευής j για την εκτέλεση της διεργασίας i στην αρχή του διαστήματος t
-------------	--

3.2. Μαθηματική διατύπωση μοντέλου

Σε αυτό το μαθηματικό μοντέλο επιλέχθηκε η αναπαράσταση του χρονικού ορίζοντα να είναι διακριτή σε διαστήματα ίσης χρονικής διάρκειας μεταξύ τους. Η διάρκεια των διαστημάτων ισούται με τον μέγιστο κοινό διαιρέτη όλων των διαρκειών των διαλειπουσών διεργασιών. Έτσι, ο χρονικός ορίζοντας που αναπαριστά τη λειτουργία της μονάδας στο πλαίσιο μίας εβδομάδας διακριτοποιείται σε 160 ίσα χρονικά διαστήματα χρονικής διάρκειας 15 min. Λόγω του γεγονότος ότι η βιομηχανία δεν λειτουργεί 24 ώρες την ημέρα, αλλά μόνο ένα 8ωρο κάθε μέρα της εβδομάδας, οι διεργασίες πρέπει να ολοκληρώνονται εντός της βάρδιας. Μοιάζει, λοιπόν, ο χρονικός ορίζοντας να διαθέτει μεγαλύτερες διακριτές περιόδους που συμβολίζουν την βάρδια κάθε μέρας, όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό στο Σχήμα 3.1. Τα διαστήματα που αντιστοιχούν στην εκκίνηση κάθε μέρας είναι το 1^ο, το 33^ο, το 65^ο, το 97^ο και το 129^ο.



Σχήμα 3.1 Αναπαράσταση του χρονικού ορίζοντα του προβλήματος

Οι περιορισμοί του μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος είναι γραμμικοί και για αυτό το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως Μεικτού-Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed-Integer Linear Programming, MILP). Οι διάφοροι τύποι των περιορισμών αφορούν στα ισοζύγια μάζας των υλικών, στην λειτουργία και τη δυναμικότητα του εξοπλισμού, στην μη διαθεσιμότητα συσκευών ή ενδιάμεσης αποθήκευσης υλικών σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, καθώς και σε θέματα ικανοποίησης της ζήτησης. Σκοπός είναι η ταυτόχρονη ικανοποίηση των παραπάνω

περιορισμών και η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης κέρδους της βιομηχανίας. Παρατίθενται οι περιορισμοί που αναπτύχθηκαν σύμφωνα με το μοντέλο των Kondili, et al (1993) και των ιδιαιτεροτήτων της συγκεκριμένης βιομηχανίας.

Περιορισμοί λειτουργίας των συσκευών

Με τον περιορισμό (3.1) διασφαλίζεται ότι κάθε συσκευή j , αν και εν δυνάμει πραγματοποιεί περισσότερες από μία διεργασίες, σε κάθε χρονικό διάστημα t μπορεί να εκτελεί το πολύ μία διεργασία i . Έτσι, δεν είναι δυνατόν να εκκινήσουν ταυτόχρονα την εκτέλεσή τους δύο διεργασίες στην ίδια συσκευή, αλλά ούτε να ξεκινήσει η εκτέλεση μίας διεργασίας εφόσον δεν έχει ολοκληρωθεί η προηγούμενη. Για τις ανάγκες αυτής της έκφρασης ορίζεται ένα χρονικό μέγεθος θ που αναπαριστά την εκκίνηση διεργασιών σε προηγούμενα χρονικά διαστήματα και λαμβάνει τιμές εντός του εύρους $0 \leq \theta \leq P_i - 1$.

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{\theta=0}^{P_i-1} W_{i,j,t-\theta} \leq 1 \quad \forall j, t \quad (3.1)$$

Εάν η διεργασία i δεν ανήκει σε αυτές που μπορούν να εκτελεστούν σε μία συσκευή j , τότε δεν μπορεί να επιλεγθεί.

$$W_{i,j,t} = 0 \quad \forall (i,j) \notin I_j, t \quad (3.2)$$

Μία διεργασία η οποία δεν μπορεί να ολοκληρωθεί εντός της δωρης βάρδιας (3.3) αλλά και εντός του χρονικού ορίζοντα (3.4), δεν επιτρέπεται να ξεκινήσει.

$$W_{i,j,t} = 0 \quad \forall i, j, t \in (v - P_i, v] \quad (3.3)$$

$$W_{i,j,t} = 0 \quad \forall i, j, t \geq 161 - P_i \quad (3.4)$$

Περιορισμοί δυναμικότητας του εξοπλισμού

Αν σε κάποιο χρονικό διάστημα η συσκευή j δεν εκτελεί κάποια διεργασία, τότε το μέγεθος της παρτίδας (batch) πρέπει να είναι μηδενικό. Όταν, όμως, μία συσκευή j επιλεγθεί για την εκτέλεση μίας διεργασίας είναι αναγκαίο να λειτουργεί αποτελεσματικά και χωρίς προβλήματα. Για αυτό, η ποσότητα υλικού i κάθε παρτίδας, $B_{i,j,t}$, που επεξεργάζεται πρέπει

να κυμαίνεται μεταξύ μιας ελάχιστης, $V_{i,j}^{min}$, και μιας μέγιστης δυναμικότητας, $V_{i,j}^{max}$, που έχει δοθεί από τον κατασκευαστή. Έτσι, προκύπτει ο περιορισμός (3.5).

$$W_{i,j,t} V_j^{min} \leq B_{i,j,t} \leq W_{i,j,t} V_j^{max} \quad \forall i, j, t \quad (3.5)$$

Περιορισμοί αποθηκευτικής δυναμικότητας και αδυναμίας αποθήκευσης υλικών

Η αποθηκευμένη ποσότητα υλικών κατάστασης s κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε χρονικού διαστήματος t δεν πρέπει να υπερβαίνει την μέγιστη χωρητικότητα των αποθηκών για αυτή την κατάσταση υλικού.

$$ST_{s,t} \leq C_s \quad \forall s, t \quad (3.6)$$

Στο τέλος του χρονικού ορίζοντα δεν είναι δυνατό να παραμένει αποθηκευμένη καμία κατάσταση υλικού s , εκτός από τις καταστάσεις υλικών που αντιστοιχούν στις πρώτες ύλες.

$$ST_{s,t} = 0 \quad \forall s \neq \{SY_{01} \dots SY_{03}\} \cup \{SP_{01} \dots SP_{05}\}, t = \{161\} \quad (3.7)$$

Στο τελευταίο χρονικό διάστημα κάθε δωρης βάρδιας μπορούν να παραμένουν αποθηκευμένες μόνο οι πρώτες ύλες, τα τελικά προϊόντα και κάποια ημι-έτοιμα προϊόντα.

$$ST_{s,t} = 0 \quad \forall s = \{SY_{04} \dots SY_{11}\} \cup \{SP_{06} \dots SP_{19}\} \cup \{SP_{24} \dots SP_{28}\}, t = \{v\} \quad (3.8)$$

Η αποθηκευτική δυναμικότητα του ημι-έτοιμου προϊόντος κατάστασης υλικού s που αντιστοιχεί στο SP_{26} στο τέλος κάθε δωρης βάρδιας, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 46 kg.

$$ST_{s,t} \leq 46 \quad \forall s = \{SP_{26}\}, t = \{v\} \quad (3.9)$$

Περιορισμοί ισοζυγίων μάζας υλικών

Η ποσότητα του υλικού κατάστασης s στο τέλος ενός χρονικού διαστήματος t ισούται με το άθροισμα της υπάρχουσας αποθηκευμένης ποσότητας και αυτής που παράγεται από τις διάφορες διεργασίες στο προηγούμενο χρονικό διάστημα $t-1$, αφαιρώντας την ποσότητα που καταναλώνεται από κάποια διεργασία και την ζητούμενη ποσότητα που δίνεται στους καταναλωτές στην αρχή του διαστήματος t .

$$ST_{s,t} = ST_{s,t-1} + \sum_{i \in I_j} \sum_{j \in I_j} (PISP_{i,s} \cdot B_{i,j,t-P_i}) - \sum_{i \in I_j} \sum_{j \in I_j} (PISC_{i,s} \cdot B_{i,j,t}) - D_{s,t} \quad \forall s, t \quad (3.10)$$

Περιορισμοί ικανοποίησης ζήτησης

Η παραγόμενη ποσότητα κάθε υλικού κατάστασης s , εντός του χρονικού ορίζοντα, πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον την εβδομαδιαία ζήτηση.

$$\sum_t D_{s,t} \geq Demand_s \quad \forall s = Demand_s \quad (3.11)$$

Το πλεονέκτημα των συγκεκριμένων ζαχαρωδών προϊόντων, έναντι άλλων πιο ευαίσθητων όπως τα γαλακτοκομικά προϊόντα, είναι η μακρά περίοδος που μεσολαβεί από την ημερομηνία παραγωγής τους μέχρι την ημερομηνία λήξης τους (9 και 36 μήνες). Για αυτόν τον λόγο και με δεδομένο ότι δεν υπάρχει πρόβλημα αποθηκευτικού χώρου, η παραγωγή μπορεί να είναι τύπου “make to stock”.

Η παραγωγή δεν μπορεί να είναι απεριόριστη, λόγω ύπαρξης παραγωγών άλλων προϊόντων που δεν μελετώνται. Για κάθε εβδομάδα περιορίζεται η παραγωγή ώστε να μην υπερβαίνει το τριπλάσιο κέρδος ανά εβδομάδα, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.12).

$$z \leq 3 * \sum_s Profit_s * Demand_s \quad \forall s = Demand_s \quad (3.12)$$

Επίσης, δεν επιτρέπεται η παραγωγή κάποιας κατάστασης υλικού s , όταν δεν υπάρχει ζήτηση για αυτή στον χρονικό ορίζοντα που μελετάται.

$$D_{s,t} = 0 \quad \forall t, s \neq Demand_s \quad (3.13)$$

Περιορισμοί εναλλαγών στον εξοπλισμό συσκευασίας

Όταν στο ίδιο mixer παράγονται υποβρύχιο και πίτες, απαιτείται χρόνος 10 χρονικών διαστημάτων για την εναλλαγή από μίγμα για πίτες σε υποβρύχιο. Αυτό συμβαίνει γιατί το μίγμα της γέμισης των πιτών περιέχει αλλεργιογόνα συστατικά και έτσι είναι καλό να προηγείται καλός καθαρισμός πριν την παραγωγή ενός μη αλλεργιογόνου προϊόντος, όπως το υποβρύχιο. Στην αντίθετη εναλλαγή (υποβρύχιο προς μίγμα πιτών), η εναλλαγή γίνεται αμέσως, χωρίς ανάγκη καθαρισμού.

$$W_{i,j,t} + W_{ii,j,tt} \leq 1 \quad \forall i = MixP_i, ii = MixY_i, j = \{Mixer\}, t, tt \in [t, t + 10] \quad (3.14)$$

Για την 1^η γραμμή παραγωγής:

Κατά τη συσκευασία των υποβρυχίων, για να υπάρξει εναλλαγή μεταξύ των προϊόντων συσκευασιών μικρότερου και μεγαλύτερου μεγέθους, και αντιστρόφως, απαιτείται χρόνος ίσος με ένα χρονικό διάστημα, κατά το οποίο το συσκευαστικό παραμένει ανενεργό.

$$W_{i,j,t} + W_{ii,j,t+1} \leq 1 \quad \forall i \in PackI_i, ii = \{PackM600\}, j = \{PackagingY\}, t \quad (3.15)$$

$$W_{ii,j,t} + W_{i,j,t+1} \leq 1 \quad \forall i \in PackI_i, ii = \{PackM600\}, j = \{PackagingY\}, t \quad (3.16)$$

Κατά τη συσκευασία των υποβρυχίων, για να υπάρξει εναλλαγή μεταξύ των δύο γεύσεων απαιτείται χρόνος ίσος με 6 χρονικά διαστήματα για τον καθαρισμό του συσκευαστικού. Σε αυτόν τον χρόνο το συσκευαστικό παραμένει ανενεργό.

$$W_{i,j,t} + W_{ii,j,tt} \leq 1 \quad \forall i = \{PackM300, PackM600, PackELMA\}, ii = \{PackV300\},$$

$$j = \{PackagingY\}, t, tt \in [t, t + 6] \quad (3.17)$$

$$W_{ii,j,t} + W_{i,j,tt} \leq 1 \quad \forall i = \{PackM300, PackM600, PackELMA\}, ii = \{PackV300\},$$

$$j = \{PackagingY\}, t, tt \in [t, t + 6] \quad (3.18)$$

Για την 2^η γραμμή παραγωγής:

Κατά τη συσκευασία των δύο ειδών μικρών πιτών, για να υπάρξει εναλλαγή μεταξύ των ειδών απαιτείται χρόνος ίσος με ένα χρονικό διάστημα, κατά το οποίο το συσκευαστικό παραμένει ανενεργό.

$$W_{i,j,t} + W_{ii,j,t+1} \leq 1 \quad \forall (i, ii) = \{FilmXLelma, FilmXLmshop\}, ii \neq i,$$

$$j = \{FlowPack\}, t \quad (3.19)$$

Περιορισμοί μη διαθεσιμότητας εξοπλισμού

Για την 1^η γραμμή παραγωγής:

Τα καζάνια για τον βρασμό σιροπιού για την παραγωγή υποβρυχίου πρέπει να εκκινούν με διαφορά τουλάχιστον τεσσάρων χρονικών διαστημάτων.

$$\sum_{j \in I_{i,j}} \sum_t^{t+4} W_{i,j,t} \leq 1 \quad \forall i = \{Boil\}, j, t \quad (3.20)$$

Για την 2^η γραμμή παραγωγής:

Σε μία δωρη βάρδια επιτρέπεται η λειτουργία ενός μόνο καζανιού για την παραγωγή σιροπιού για τις πίτες.

$$\sum_{j \in I_{i,j}} \sum_t W_{i,j,t} \leq 1 \quad \forall i = \{BoilP\}, j, t \in \{Day1_i, Day2_i, Day3_i, Day4_i, Day5_i\} \quad (3.21)$$

Ο μέγιστος χρόνος που μπορεί να αποθηκευτεί η έτοιμη μαρέγκα εντός του κάδου του mixer της μαρέγκας είναι 1 χρονικό διάστημα t , καθώς είναι πολύ ασταθές προϊόν.

$$W_{i,j,t} + W_{i,j,tt} \leq 1 \quad \forall i = \{HoldM\}, j = \{MixerMaregkas\}, t, tt \in [t, t + P_i] \quad (3.22)$$

Το γέμισμα και η συσκευασία μικρών πιτών δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιείται ταυτόχρονα, διότι οι ίδιοι εργάτες που εκτελούν τη μία διεργασία εκτελούν και την άλλη.

$$W_{i,j,t} + W_{ii,jj,t} \leq 1 \quad \forall i = \{FilmXLelma, FilmXLmshop\}, ii = \{Silo\}, j, jj, t \quad (3.23)$$

Αντικειμενική Συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου έχει στόχο την μεγιστοποίηση του κέρδους για τη βιομηχανία το οποίο επικεντρώνεται στην αύξηση της παραγόμενης ποσότητας. Το κέρδος υπολογίζεται συμπεριλαμβανομένης της ποσότητας προϊόντων που έχει ήδη πωληθεί ώστε να καλύψει τη ζήτηση, αλλά και της ποσότητας που παραμένει αποθηκευμένη στο τέλος του χρονικού ορίζοντα και πρόκειται να πωληθεί εν ευθέτω χρόνω, επί το κέρδος ανά kg προϊόντος, $Profit_s$, που έχει εκτιμηθεί από την βιομηχανία.

$$\max \sum_s (Profit_s * ST_{s,161}) + \sum_s \sum_t (Profit_s * D_{s,t}) \quad (3.24)$$

4. Μελέτες Περίπτωσης & Αποτελέσματα

Στη συνέχεια της μελέτης, παρατίθενται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού της παραγωγής της Mediterra A.E. για διάφορες περιπτώσεις ζήτησης εντός ενός έτους και αναλύονται ορισμένα συμπεράσματα που προκύπτουν. Στόχος πάντοτε είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους μέσω μεγιστοποίησης της παραγωγής, ικανοποιώντας, όμως, το κατώφλι της υπάρχουσας ζήτησης αλλά και την πολιτική της εταιρείας για την φρεσκάδα των προϊόντων της. Επίσης, συνυπολογίστηκε ότι τα προϊόντα που εξετάζει η μελέτη δεν είναι τα μοναδικά που παράγει η βιομηχανική μονάδα. Σε όλη την έκταση της εργασίας αυτής γίνεται η θεώρηση ότι υπάρχει διαθέσιμο αγοραστικό κοινό για τα επιπλέον προϊόντα που παράγονται και ότι το κέρδος ανά κιλό προϊόντος είναι σταθερό για όλο το έτος.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα βέλτιστα αποτελέσματα των διαφορετικών εβδομαδιαίων περιπτώσεων ζήτησης των προϊόντων μέσα στο έτος. Τα σενάρια ζήτησης είναι ρεαλιστικά και αφορούν πραγματικές εβδομαδιαίες ζητήσεις του προηγούμενου έτους, δοσμένες από την βιομηχανία. Επίσης, γίνεται σύγκριση του κέρδους αλλά και του αριθμού παραγόμενων παρτίδων του βασικού σεναρίου ζήτησης προ βελτιστοποίησης (basic) και μετά βελτιστοποίησης (optimal). Παρατίθενται, ακόμα, διαγράμματα της διακύμανσης των ποσοτήτων ορισμένων καταστάσεων υλικών στη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα για κάποιες περιπτώσεις. Έπειτα, στην Ενότητα 4.2 εξετάζονται οι περιπτώσεις και τα αποτελέσματα σύμπτυξης της παραγωγής δύο εβδομάδων σε μία, για δύο χειμερινούς μήνες με μικρή ζήτηση προϊόντων. Τέλος, για μία εβδομάδα αναλύονται οι επιπτώσεις που θα είχε στην παραγωγή και το κέρδος η αύξηση της δυναμικότητας μίας συσκευής.

Τα αποτελέσματα, που εξάχθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού GAMS (επιλυτής CPLEX), απεικονίζονται σε διαγράμματα τύπου “Gantt Chart”, τα οποία αναπαριστούν τη ροή των εργασιών επεξεργασίας για κάποιες βασικές συσκευές. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζονται οι συσκευές, ενώ στον οριζόντιο άξονα ο εβδομαδιαίος χρονικός ορίζοντας στον οποίο κατανέμονται οι εργασίες (χρωματιστά ορθογώνια). Τα χρώματα που αντιστοιχούν σε κάθε διεργασία διατηρούνται ενιαία σε όλο το εύρος του Κεφαλαίου 4, προς διευκόλυνση του αναγνώστη. Οι κάθετες γραμμές συμβολίζουν το τέλος μίας βάρδιας/ημέρας και την έναρξη της επόμενης, καθώς όπως αναφέρθηκε πρωτύτερα το εργοστάσιο λειτουργεί για 1 μόνο δωρη βάρδια την ημέρα, ενώ το σαββατοκύριακο παραμένει κλειστός. Τα Gantt Charts κατασκευάστηκαν με τη βοήθεια της πλατφόρμας Tableau Public, ενώ τα υπόλοιπα διαγράμματα με τη βοήθεια του Microsoft Excel.

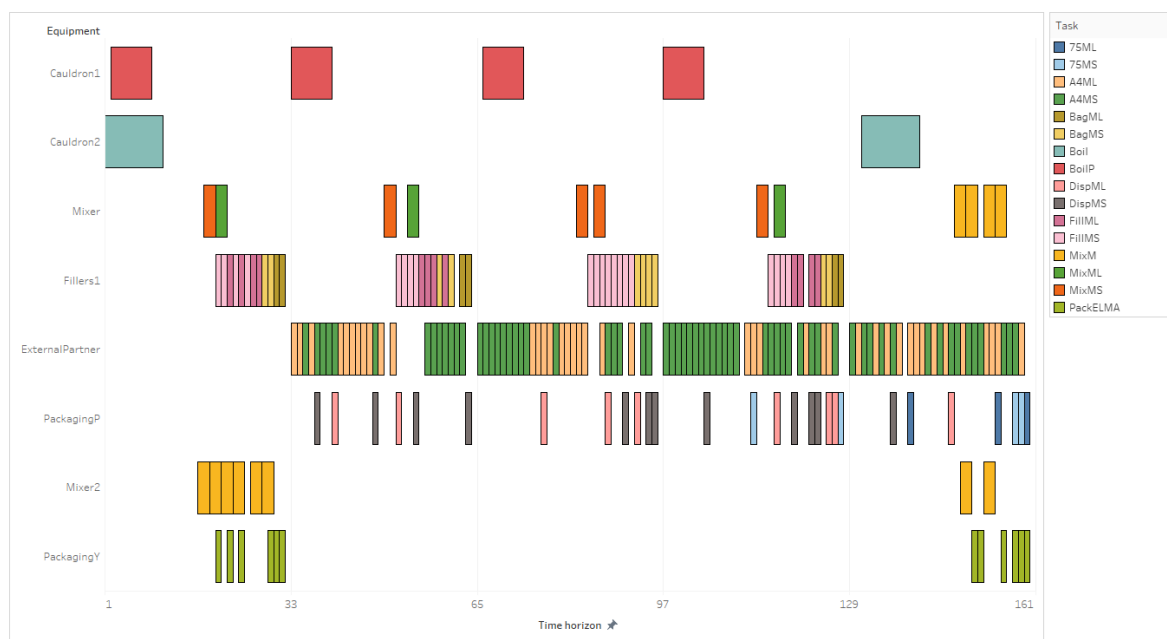
4.1. Περιπτώσεις Εβδομαδιαίας Ζήτησης

Εντός του έτους η ζήτηση κυμαίνεται από πολύ μικρή κατά τη διάρκεια του χειμώνα έως τη μέγιστη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Το πρόβλημα που περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 μελετήθηκε για διάφορες εβδομάδες εντός του έτους, σύμφωνα με δεδομένα της εταιρείας για την προηγούμενη χρονιά. Τα χρονοδιαγράμματα παραγωγής που ακολουθούν αφορούν σε επιλεγμένες χαρακτηριστικές εβδομάδες του έτους, οι ζητήσεις των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα Α.1 του Παραρτήματος Α.

Τον Ιανουάριο δεν υπάρχει ζήτηση, οπότε δεν υπάρχει ανάγκη για παραγωγή. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, γενικότερα, το συγκεκριμένο έτος για 9 εβδομάδες κατά τους χειμερινούς μήνες η ζήτηση για αυτά τα προϊόντα είναι μηδενική. Αυτό δεν σημαίνει ότι το εργοστάσιο δεν λειτουργεί, αλλά ότι παράγονται άλλου τύπου προϊόντα, που δεν είναι αντικείμενο αυτής της μελέτης. Το συγκεκριμένο μοτίβο ζήτησης παρατηρείται και σε προηγούμενα έτη.

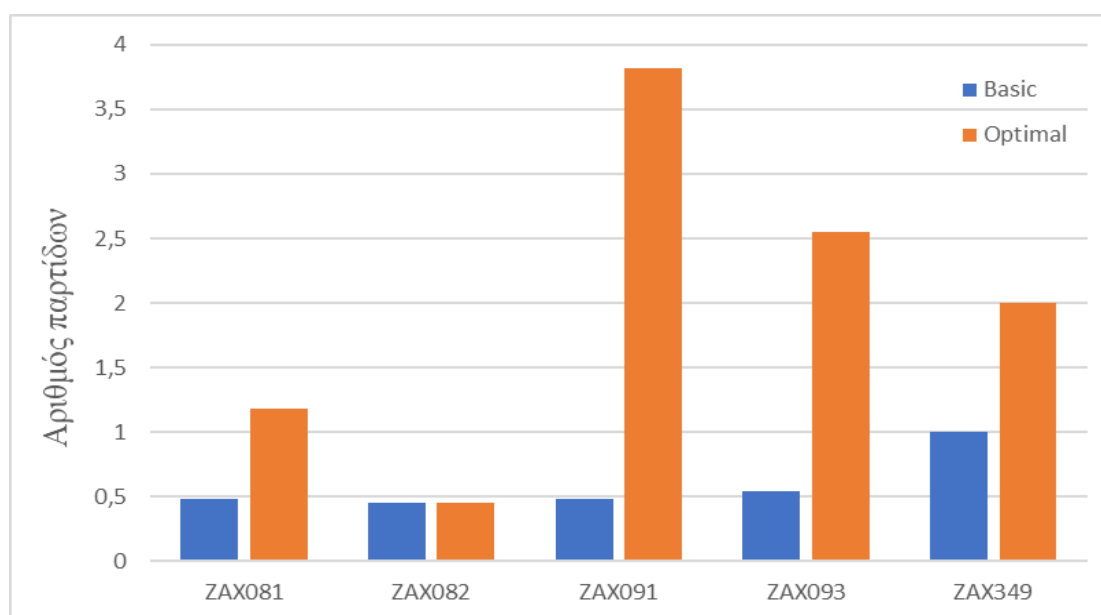
Περίπτωση Φεβρουαρίου

Είναι αρκετά σύνηθες τις εβδομάδες που δεν υπάρχει μεγάλη ζήτηση, να αποφεύγεται η παραγωγή υποβρυχίων και πιτών στην ίδια βάρδια και η παραγωγή να μοιράζεται και στις 5 μέρες του χρονικού ορίζοντα. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 4.1, όπου με κόκκινο χρώμα συμβολίζεται βρασμός πρώτων υλών για παραγωγή πιτών, η οποία γίνεται με χρήση των συσκευών *mixer*, *fillers1*, *external partner* και *packagingP*, ενώ με γαλάζιο ο βρασμός για παραγωγή υποβρυχίων, στην οποία χρησιμοποιούνται και τα *mixer/mixer2* και το *packagingY*.



Σχήμα 4.1 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Φεβρουαρίου

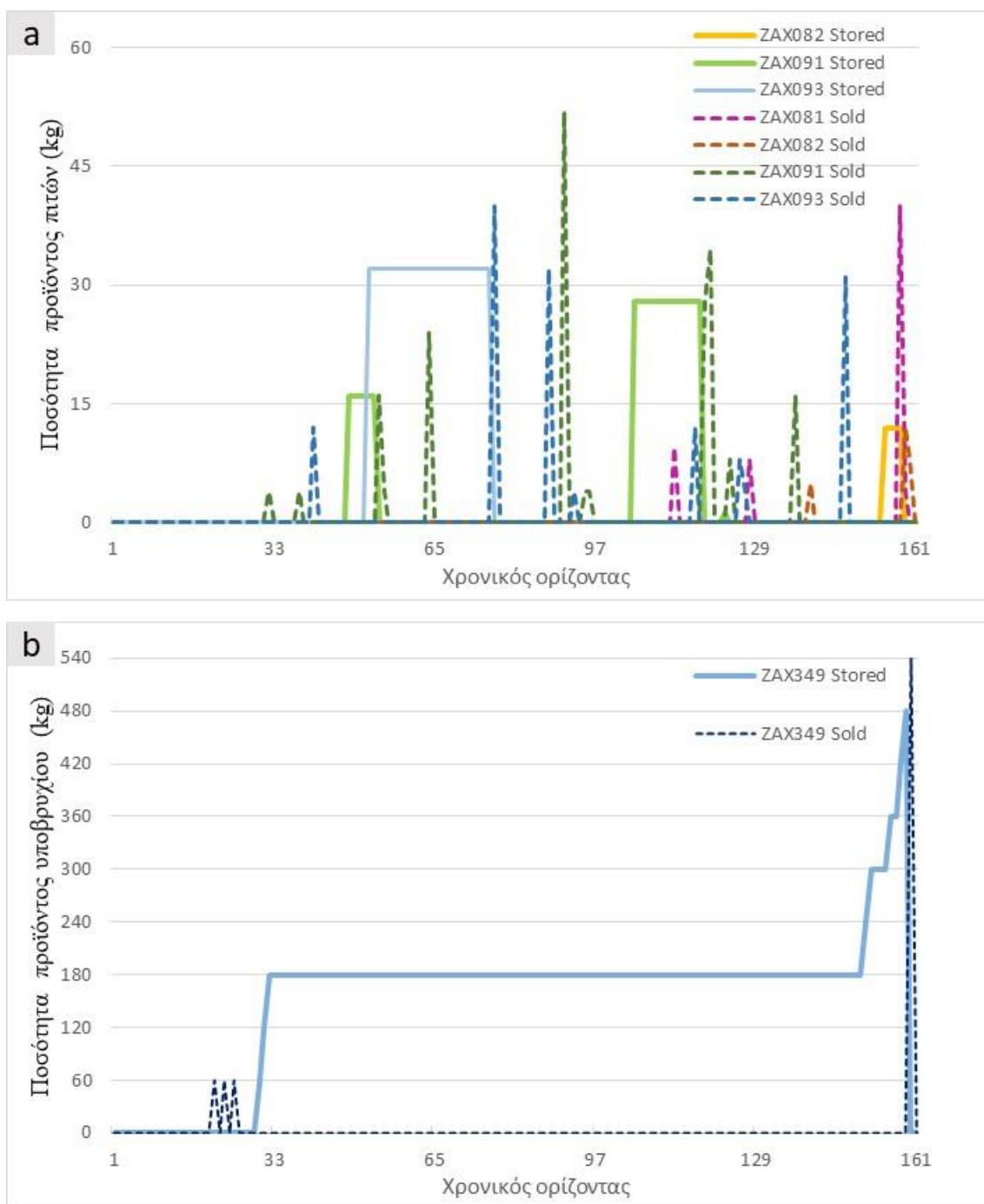
Από την βελτιστοποίηση που έγινε και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1, το μέγιστο κέρδος για την συγκεκριμένη εβδομάδα του Φεβρουαρίου ανέρχεται στα 5,590€, συνυπολογίζοντας ότι εφόσον η αρχική ζήτηση είναι μικρή, η παραγωγή δεν μπορεί να ξεπερνά κάποια όρια, λόγω κινδύνου αυτά να αργήσουν να πωληθούν, γεγονός που αντικρούει την πολιτική της εταιρείας για τη φρεσκάδα των προϊόντων της όταν αυτά φτάνουν στον καταναλωτή. Στο Σχήμα 4.2 γίνεται σύγκριση των παρτίδων για το βασικό σενάριο ζήτησης πριν την βελτιστοποίηση, με τις παρτίδες που τελικά επιλέχθηκαν να παραχθούν στη βελτιστοποίηση. Ως μέγεθος για τον κατακόρυφο άξονα επιλέχθηκε ο αριθμός παρτίδων, και όχι τα παραγόμενα κιλά προϊόντων, διότι με αυτή η αναπαράσταση είναι πιο εύληπτη η σύγκριση. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως φαίνεται και στη σχέση kg/πλήρη παρτίδα στον Πίνακα 2.2, για τα προϊόντα υποβρυχίου είναι πολύ βαρύτερα από τα προϊόντα πιτών, με αποτέλεσμα σε μία σύγκριση βάσει βάρους η ποσότητες που αντιστοιχούν στις πίτες να μην είναι ευδιάκριτες.



Σχήμα 4.2 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Φεβρουαρίου

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το προφίλ των ποσοτήτων αποθήκευσης (συνεχής γραμμή) και πώλησης (διακεκομμένη γραμμή) των τελικών προϊόντων που παράγονται κατά την εβδομάδα του Φεβρουαρίου. Στο Σχήμα 4.3a, παρατηρείται ότι οι γραμμές που αναπαριστούν την πώληση είναι οξείες κορυφές, δηλαδή η πώληση γίνεται στιγμιαία, ενώ η αποθήκευση έχει την μορφή πύλης, δηλαδή η ίδια ποσότητα ξεκινά να αποθηκεύεται και παραμένει αποθηκευμένη (οριζόντιο τμήμα) έως ότου πωληθεί. Για το μοτίβο πώλησης υπάρχουν δύο τινά: i) μία ποσότητα προϊόντος πωλείται αμέσως μόλις παράγεται, ή ii) μία ποσότητα αποθηκεύεται για

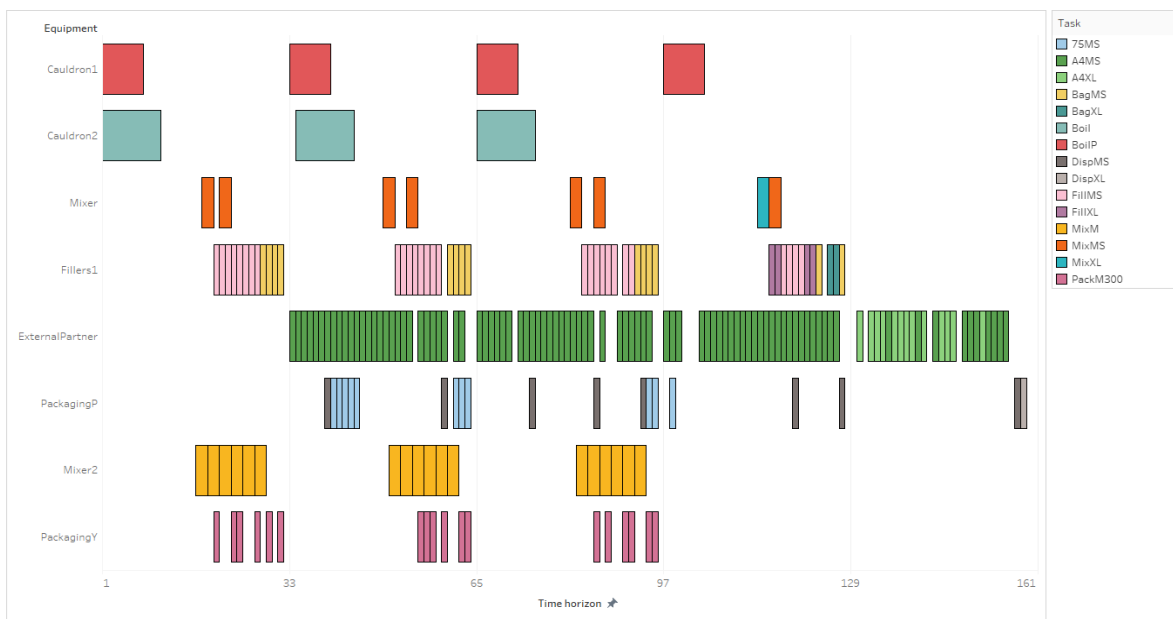
μία χρονική περίοδο και στο τέλος της πωλείται, οπότε στο τέλος κάθε πύλης υπάρχει μία οξεία κορυφή πώλησης. Στο διάγραμμα του υποβρυχίου (Σχήμα 4.3b), γίνεται εμφανές ότι μία ποσότητα τελικού προϊόντος που είναι έτοιμη στην αρχή της εβδομάδας, μπορεί να παραμείνει αποθηκευμένη έως ότου πωληθεί στο τέλος της εβδομάδας, μαζί με την ποσότητα που παράχθηκε την τελευταία ημέρα του χρονικού ορίζοντα. Το μοντέλο είναι ορισμένο έτσι ώστε στο τέλος της εβδομάδας να μην παραμένουν αποθηκευμένα τελικά προϊόντα.



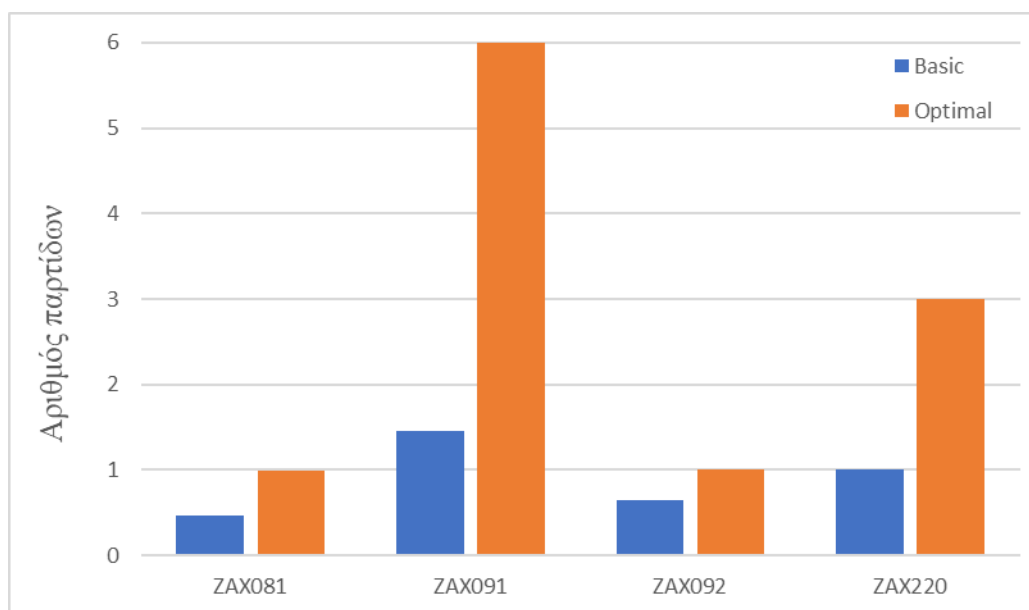
Σχήμα 4.3 Προφίλ των ποσοτήτων των προϊόντων πιτών (a) και υποβρυχίου (b) που αποθηκεύονται ή πωλούνται την εβδομάδα του Φεβρουαρίου

Περίπτωση Μαρτίου

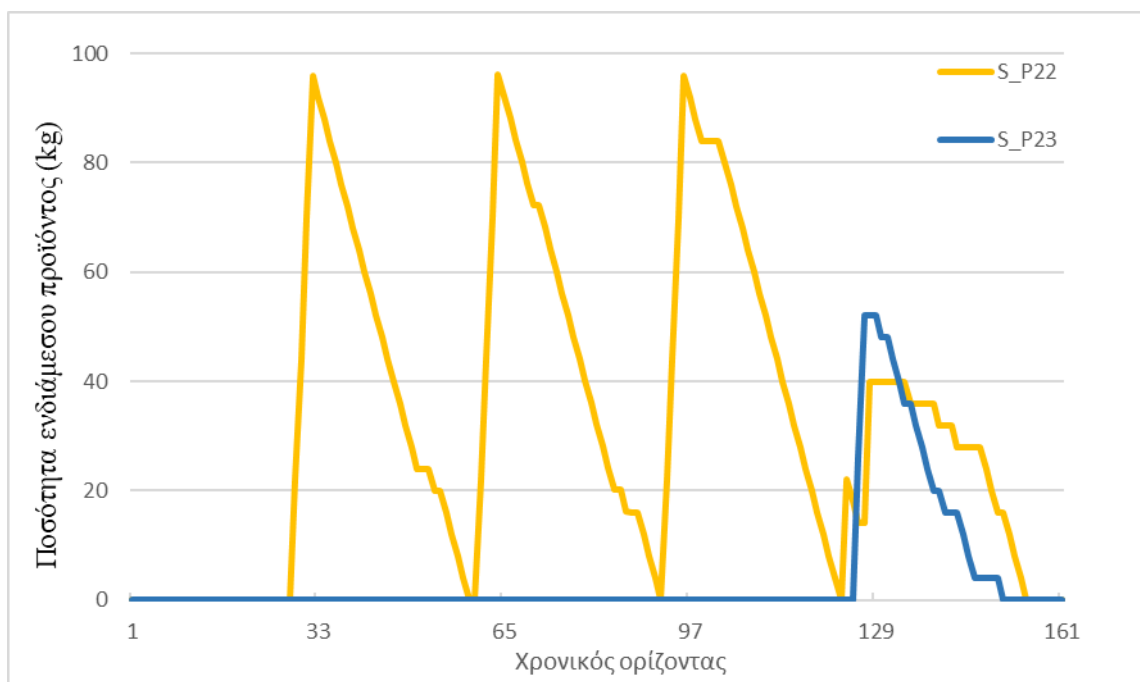
Στην βελτιστοποίηση που έγινε για εβδομάδα του Μαρτίου (Σχήμα 4.4), φαίνεται η τάση αποφυγής χρήσης του πρώτου mixer για παραγωγή υποβρυχίου κατά τις βάρδιες που υπάρχει παραγωγή πιτών. Επιβεβαιώνεται με αυτόν τον τρόπο ότι τα συστατικά που περιέχονται στις πίτες και προκαλούν αλλεργίες δεν θα προκαλέσουν διασταυρούμενη επιμόλυνση στα υποβρύχια. Και για αυτή την περίπτωση, στο Σχήμα 4.5 γίνεται σύγκριση των παρτίδων για προ και μετά βελτιστοποίησης



Σχήμα 4.4 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Μαρτίου



Σχήμα 4.5 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Μαρτίου



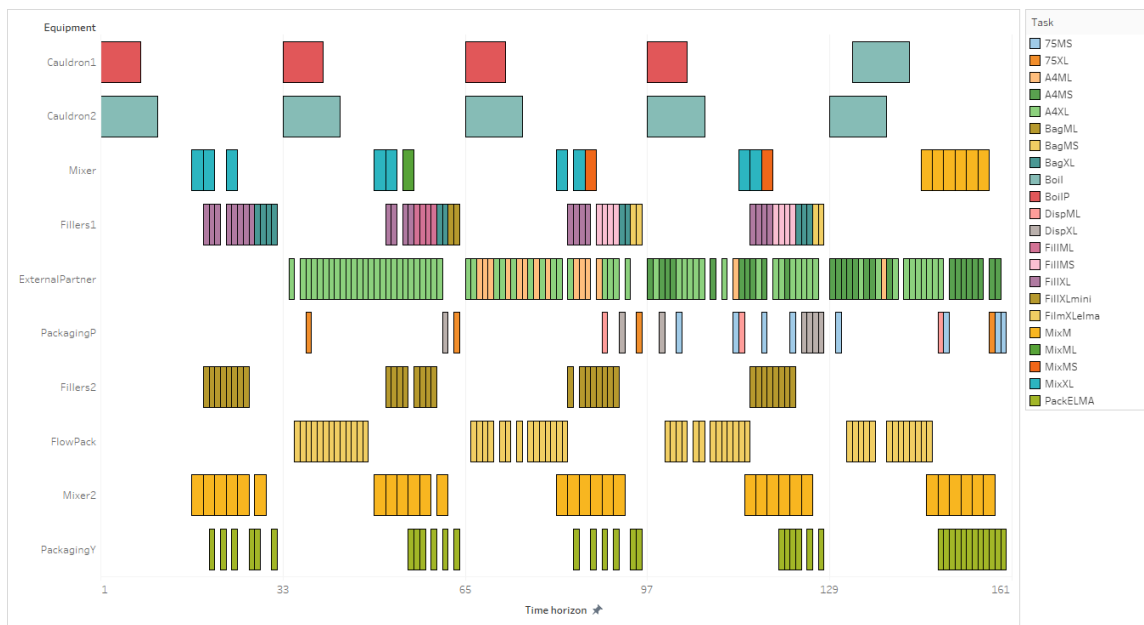
Σχήμα 4.6 Προφίλ των ποσοτήτων των ημιέτοιμων προϊόντων πιτών που αποθηκεύονται την εβδομάδα του Μαρτίου

Η περίπτωση του Μαρτίου παρουσιάζει ενδιαφέρον ως προς τον τρόπο αποθήκευσης/κατανάλωσης των ενδιάμεσων ημιέτοιμων προϊόντων πιτών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6, οι καταστάσεις υλικών S_P22 και S_P23 , παράγονται και αποθηκεύονται κοντά στο τέλος κάθε βάρδιας και από την αρχή της επόμενης, μικρές ποσότητες, σταδιακά σε κάθε χρονικό διάστημα, σταματούν να αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται από τον *ExternalPartner* για την συσκευασία σε χαρτί. Χαρακτηριστικό είναι ότι στην περίπτωση αυτή η ποσότητα που παράχθηκε και αποθηκεύτηκε κατά την πρώτη βάρδια, συσκευάζεται ολόκληρη πριν αρχίσει να αποθηκεύεται η ποσότητα της δεύτερης βάρδιας κ.ο.κ.. Σημαντικό είναι ότι οι κορυφές σχηματίζονται με βηματικές αυξήσεις/μειώσεις των ποσοτήτων που αποθηκεύονται σε κάθε χρονικό διάστημα, όμως ο πολύ μικρός διαμερισμός του χρονικού ορίζοντα δεν κάνει ορατή σε όλα τα σημεία την αύξηση/μείωση με μορφή “σκαλοπατιών”.

Περίπτωση Απριλίου

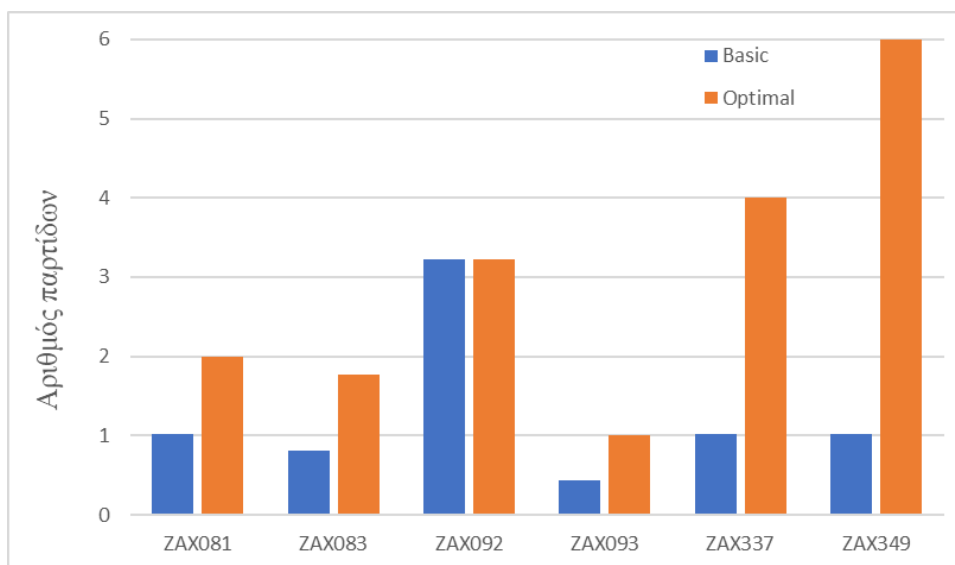
Από τον Απρίλιο, και για τους επόμενους μήνες μέχρι και τον Αύγουστο, η παραγωγή αυξάνεται εξαιτίας της αυξημένης ζήτησης την καλοκαιρινή σεζόν. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις βελτιστοποίησης, φαίνεται ότι όλες οι απαραίτητες συσκευές λειτουργούν κάθε μέρα της εβδομάδας. Από τα αποτελέσματα του GAMS, προκύπτει ότι υπάρχει η επιθυμητή τάση οι συσκευές να λειτουργούν στα μέγιστα όρια των δυναμικοτήτων τους. Για την 5^η ημέρα

παραγωγής, που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7, όπου δεν υπάρχει παραγωγή σιροπιού για τις πίτες, αξιοποιούνται και τα 2 διαθέσιμα καζάνια και μίξερ για το υποβρύχιο. Αυτό παρατηρείται γενικότερα στους μήνες με μεγάλη ζήτηση.



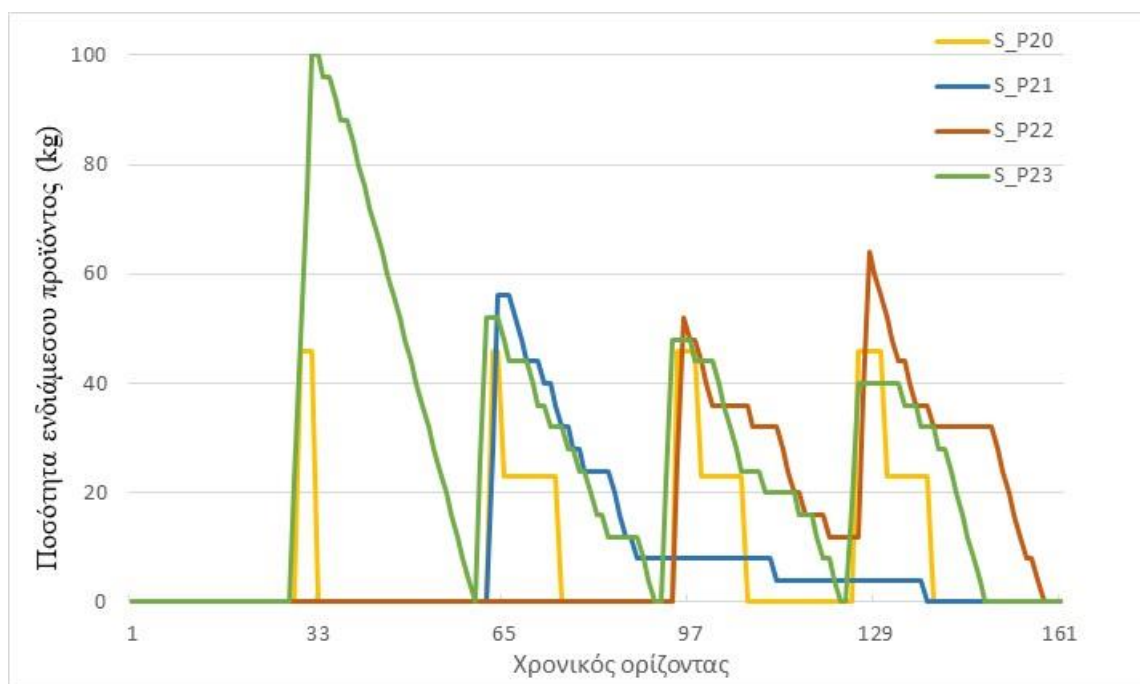
Σχήμα 4.7 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Απριλίου

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, για τις μεγάλες πίτες (ZAX081, ZAX083, ZAX092, ZAX093) η επιπλέον παραγωγή δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένη, ενώ για τις μικρές (ZAX337) τετραπλασιάζεται και για το υποβρύχιο με κωδικό ZAX349 γίνεται εξαπλάσια.



Σχήμα 4.8 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Απριλίου

Στο Σχήμα 4.9 για την συμπεριφορά των ενδιάμεσων προϊόντων πιτών που αποθηκεύονται παρατηρούνται διάφορα μοτίβα. Το S_P20 , που αντιστοιχεί στις μικρές ημιέτοιμες πίτες, καταναλώνονται σε ένα εφάπαξ στάδιο ή σε δύο ισόποσα με διαφορά κάποιων διαστημάτων. Για το S_P21 γίνεται φανερό ότι η ποσότητα των ενδιάμεσων προϊόντων για τις μεγάλες πίτες δεν απαιτείται να καταναλωθεί ολόκληρη στην αμέσως επόμενη βάρδια από αυτή της παραγωγής της, αλλά μπορεί να χρησιμοποιείται και σε μεταγενέστερες. Η καμπύλη του S_P21 έχει το χαρακτηριστικό ότι η ποσότητα που παράχθηκε στην 3^η βάρδια, δεν καταναλώνεται ολόκληρη στη διάρκεια της 4^{ης}, με αποτέλεσμα σε αυτή να προστίθεται και η ποσότητα του ίδιου ενδιάμεσου προϊόντος που παράχθηκε στην 4^η βάρδια. Αυτό δεν είναι ιδιαίτερα επιθυμητό, διότι στην πράξη μπορεί να προκαλέσει σύγχυση για την παρτίδα προέλευσης του προϊόντος, στοιχείο σημαντικό για την ιχνηλάτηση που διενεργεί η βιομηχανία. Τέλος, το S_P23 ακολουθεί την συμπεριφορά που περιεγράφηκε και για τα προϊόντα του Σχήματος 4.6, αλλά με μεγαλύτερους χρόνους αποθήκευσης και πιο εμφανή “σκαλοπάτια” μείωσης.

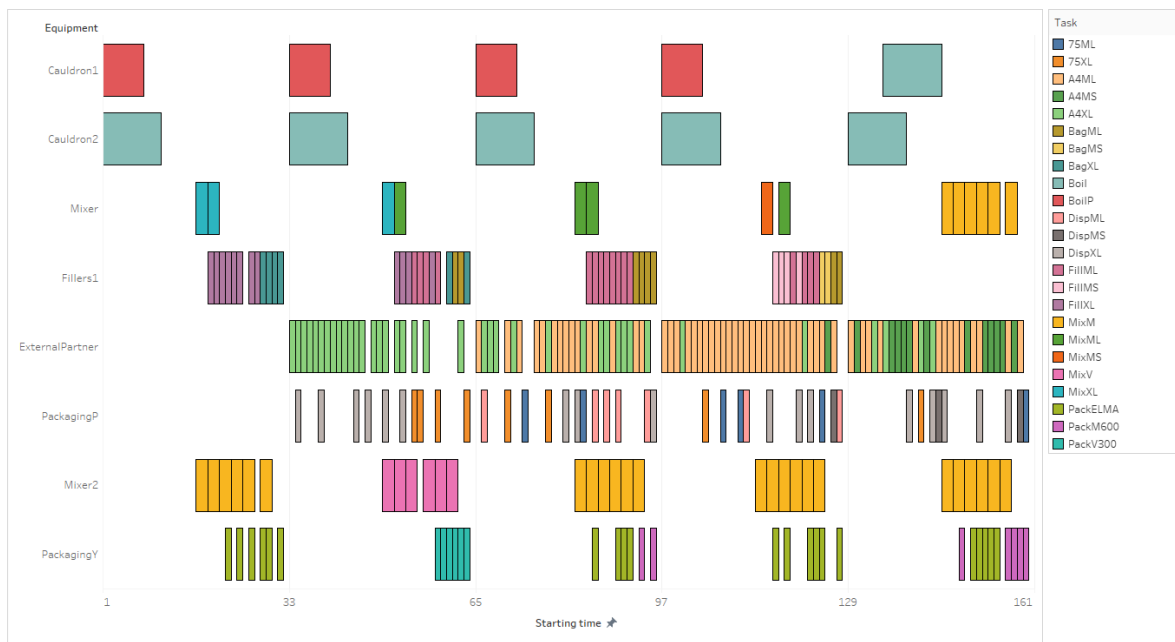


Σχήμα 4.9 Προφίλ των ποσοτήτων των ημιέτοιμων προϊόντων πιτών που αποθηκεύονται την εβδομάδα του Απριλίου

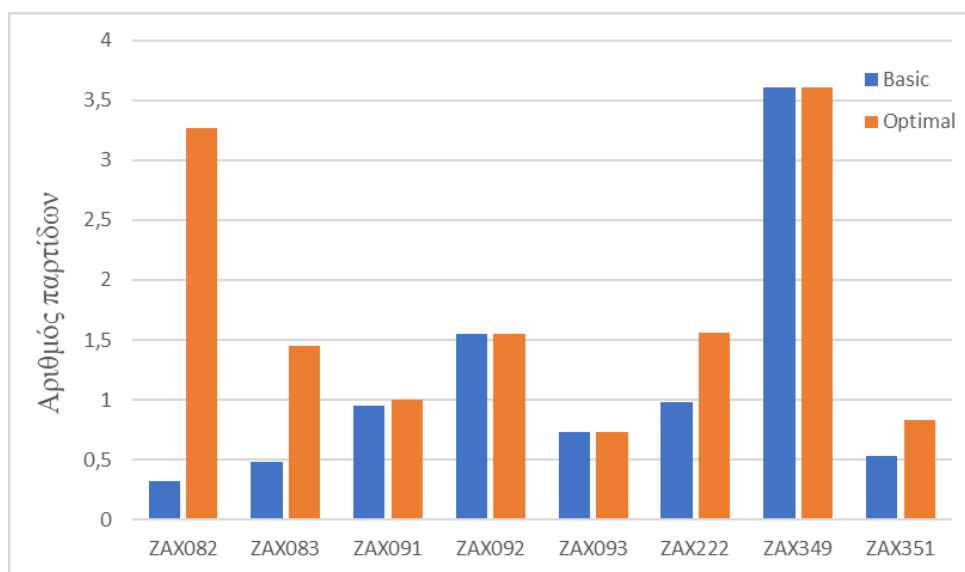
Περίπτωση Μαΐου

Το βέλτιστο σενάριο παραγωγής που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10 δίνει καλή εικόνα του μοτίβου changeover που ακολουθείται στη συσκευασία των υποβρυχίων, *packagingY*. Η

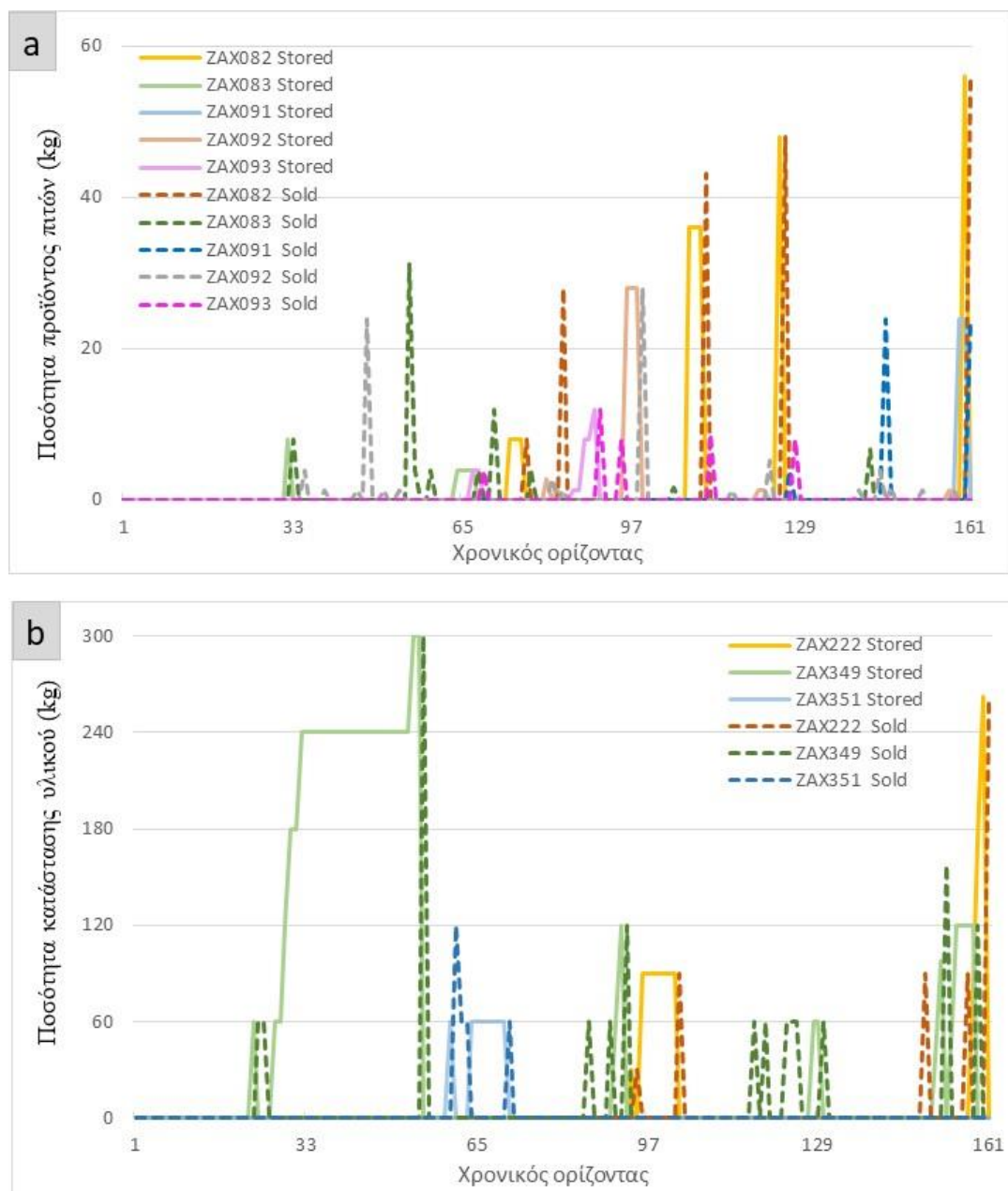
παραγωγή διαφορετικής γεύσης υποβρυχίου επιλέγεται να γίνει σε ξεχωριστή μέρα, ώστε να αποφευχθεί η διαδικασία καθαρισμού του συσκευαστικού μεταξύ των δύο γεύσεων. Αντίθετα, η εναλλαγή μεγέθους συσκευασίας στην ίδια μέρα είναι πιο απλή, διαρκεί λιγότερο και δεν είναι τόσο επιβαρυντική για την επίτευξη του μέγιστου κέρδους. Για τον κωδικό ZAX082 η παραγωγή αυξήθηκε κατακόρυφα, ενώ για τα υπόλοιπα προϊόντα έμεινε σταθερή (Σχήμα 4.11). Παρατηρείται, επίσης, ότι αυξήθηκε και η ποικιλία των προϊόντων που ζητείται, αφού πλησιάζει η θερινή περίοδος, και ότι οι κορυφές πώλησης των προϊόντων δεν περιορίζονται στο τέλος κάθε βάρδιας αλλά υπάρχουν σε μεγάλο εύρος του χρονικού ορίζοντα (Σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.10 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Μαΐου



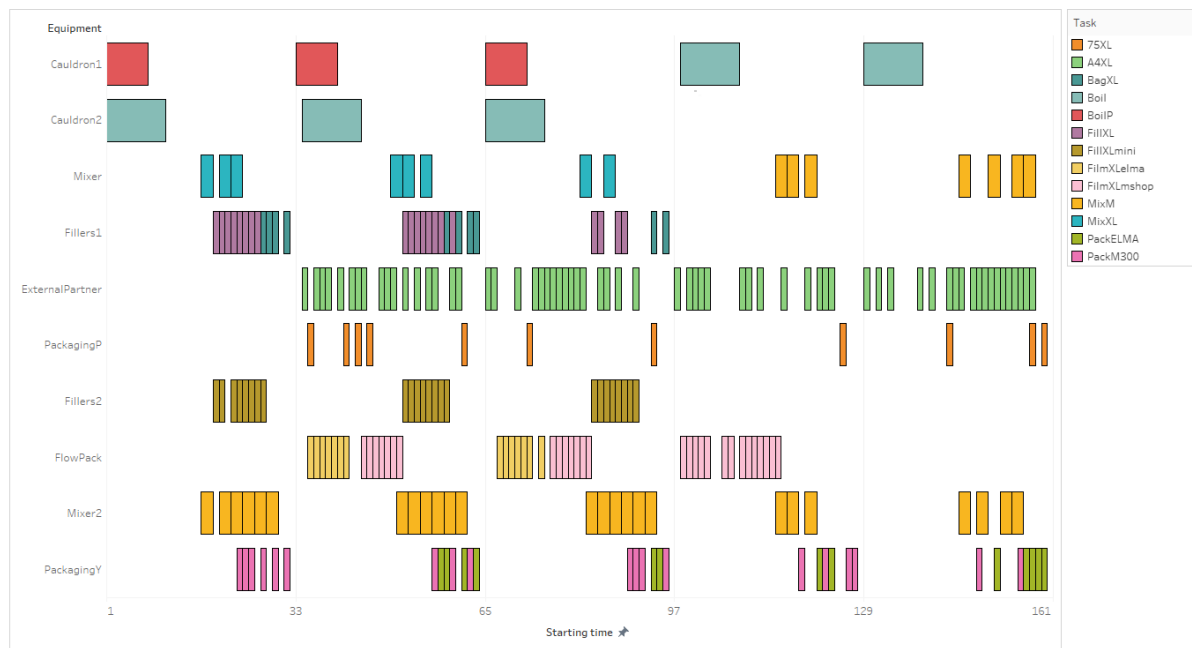
Σχήμα 4.11 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Μαΐου



Σχήμα 4.12 Προφίλ των ποσοτήτων των προϊόντων πιτών (a) και υποβρυχίου (b) που αποθηκεύονται ή πωλούνται την εβδομάδα του Μαΐου

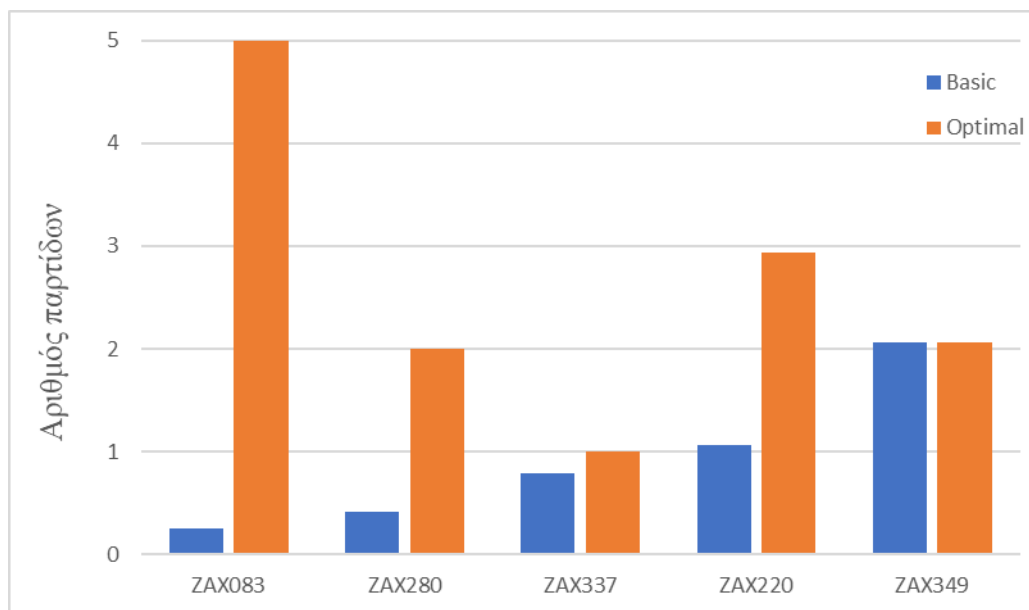
Περίπτωση Ιουνίου

Στο Σχήμα 4.13, στη συσκευασία μικρών πιτών, *FlowPack*, επιλέχθηκε, σε 2 διαφορετικές βάρδιες, η πραγματοποίηση ενός changeover μεταξύ των δύο διαφορετικών συσκευασιών με διάρκεια τουλάχιστον ενός διαστήματος. Σε αυτή την περίπτωση φαίνεται εύκολα ότι η συσκευασία των μικρών πιτών πραγματοποιείται την αμέσως επόμενη μέρα από την παραγωγή τους και ολοκληρώνεται πριν από την έναρξη της νέας παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο αξιοποιείται το ίδιο εξειδικευμένο προσωπικό τόσο κατά το γέμισμα όσο και στη συσκευασία.

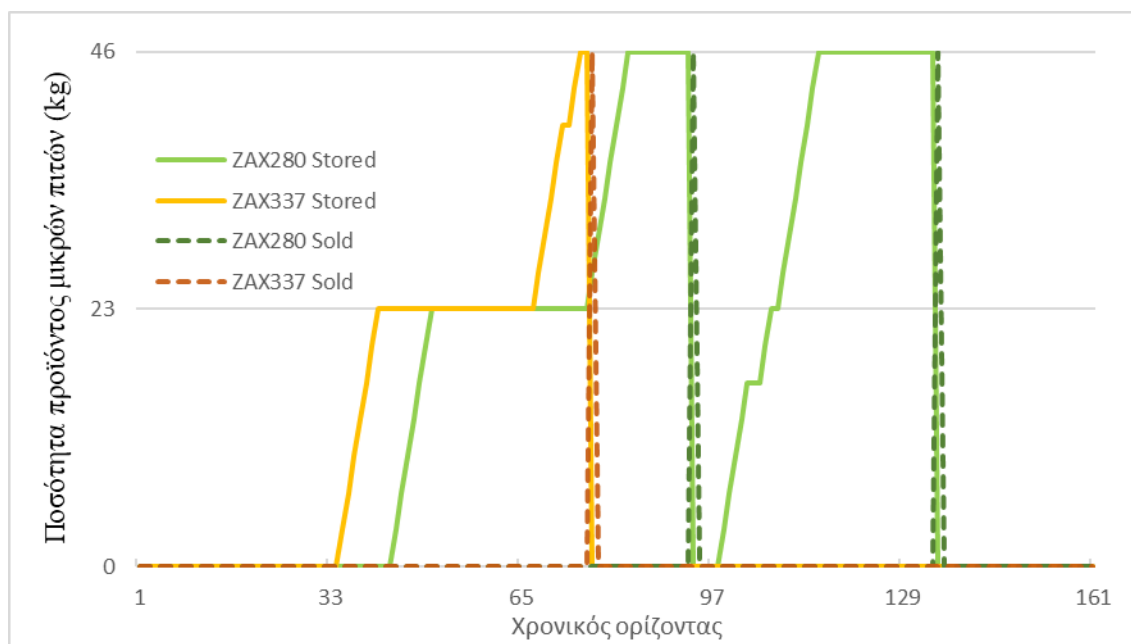


Σχήμα 4.13 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Ιουνίου

Σε αυτή την εβδομάδα τα προϊόντα που παράγονται σε μεγάλη περίσσεια (ZAX083, ZAX280, ZAX220) είναι διαφορετικά από αυτά που παράχθηκαν στις περιπτώσεις των προηγούμενων μηνών (Σχήμα 4.14). Αυτό είναι θετικό, διότι η επιπλέον παραγωγή δεν δείχνει να συσσωρεύεται σε λίγα συγκεκριμένα προϊόντα.



Σχήμα 4.14 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Ιουνίου



Σχήμα 4.15 Προφίλ των ποσοτήτων των προϊόντων μικρών πιτών που αποθηκεύονται ή πωλούνται την εβδομάδα του Ιουνίου

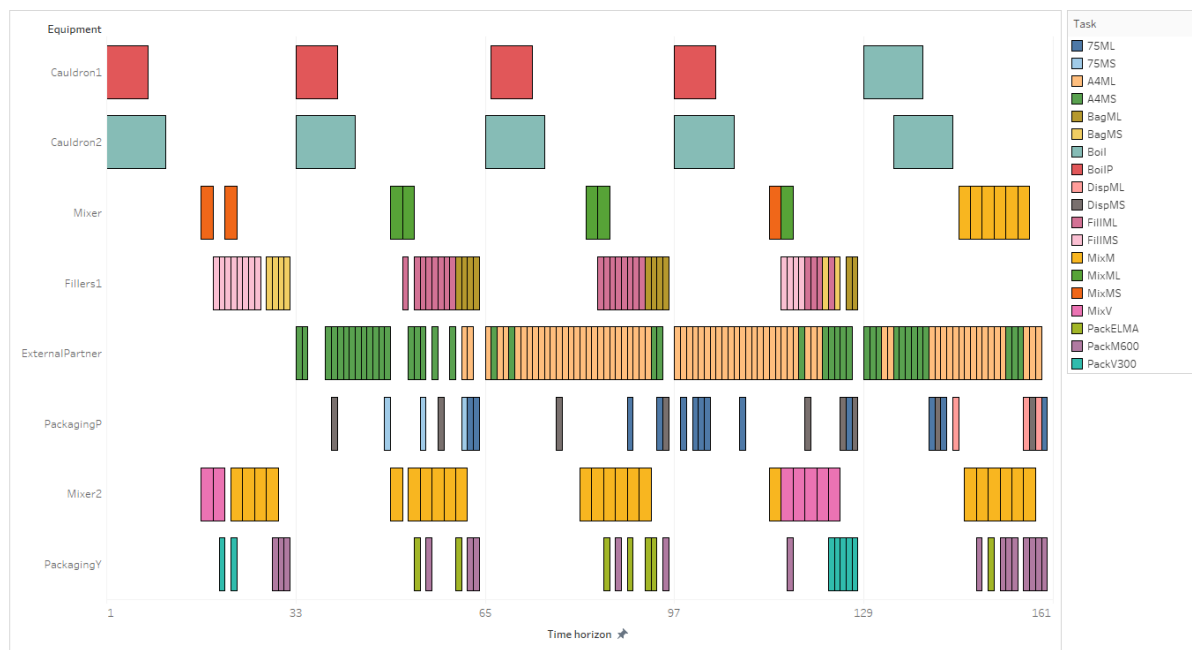
Στο Σχήμα 4.15 απεικονίζονται οι ποσότητες των μικρών πιτών που αποθηκεύονται, η καμπύλη των οποίων έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα του χρονοδιαγράμματος παραγωγής του Σχήματος 4.13. Φαίνεται, επίσης, ότι σε αυτό το σενάριο οι κορυφές των ζητήσεων είναι λιγότερες και ψηλότερες απ' ό,τι συνήθως.

Περίπτωση Ιουλίου

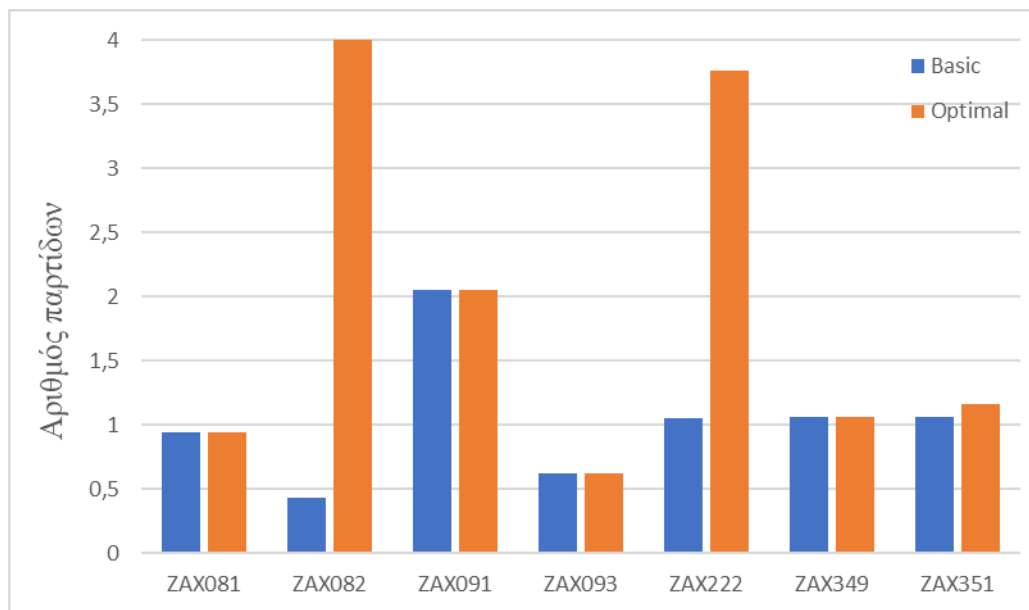
Σπάνια, υπάρχει η περίπτωση την ίδια μέρα να παράγονται και οι 2 γεύσεις υποβρυχίου, γεγονός που αντικρούει την παρατήρηση που έγινε για το Σχήμα 4.10. Μια τέτοια περίπτωση είναι αυτή του Σχήματος 4.16, όπου οι ανάγκες της ζήτησης στην 1^η και την 4^η βάρδια δεν απαιτούν την παραγωγή πλήρους παρτίδας υποβρυχίου μαστίχας ή βανίλιας, με αποτέλεσμα να πρέπει να πραγματοποιηθεί καθαρισμός του συσκευαστικού κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Αυτό δεν είναι ιδανικό σενάριο και θα μπορούσε να αποφευχθεί, σε άλλη μελέτη με στόχο την ελαχιστοποίηση των εναλλαγών προϊόντων.

Φαίνεται ότι για την περίπτωση του Ιουλίου (Σχήμα 4.17) δεν επιδιώκεται η παραγωγή περίσσειας για όλα τα προϊόντα αλλά υπάρχει έντονη υπερπαραγωγή σε μόνο δύο προϊόντα.

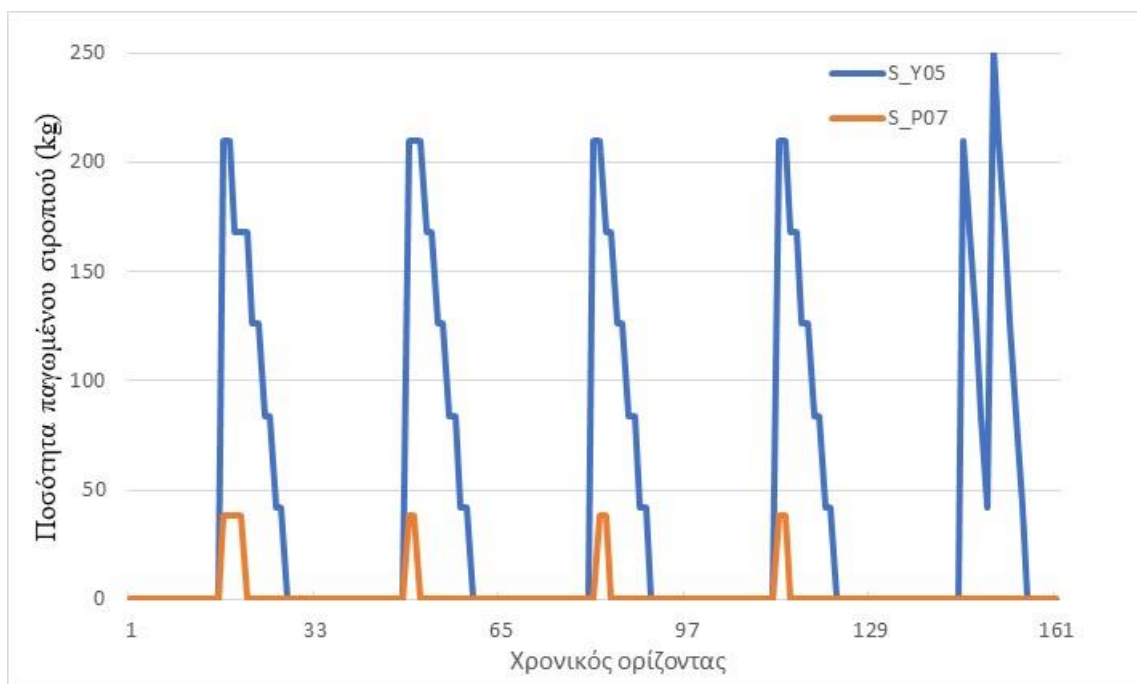
Αυτό ιδανικά θα έπρεπε να αποφεύγεται. Το θετικό είναι ότι το προϊόν υποβρυχίου ZAX222 δεν έχει υπάρξει ξανά σε περίσσεια.



Σχήμα 4.16 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Ιουλίου



Σχήμα 4.17 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Ιουλίου

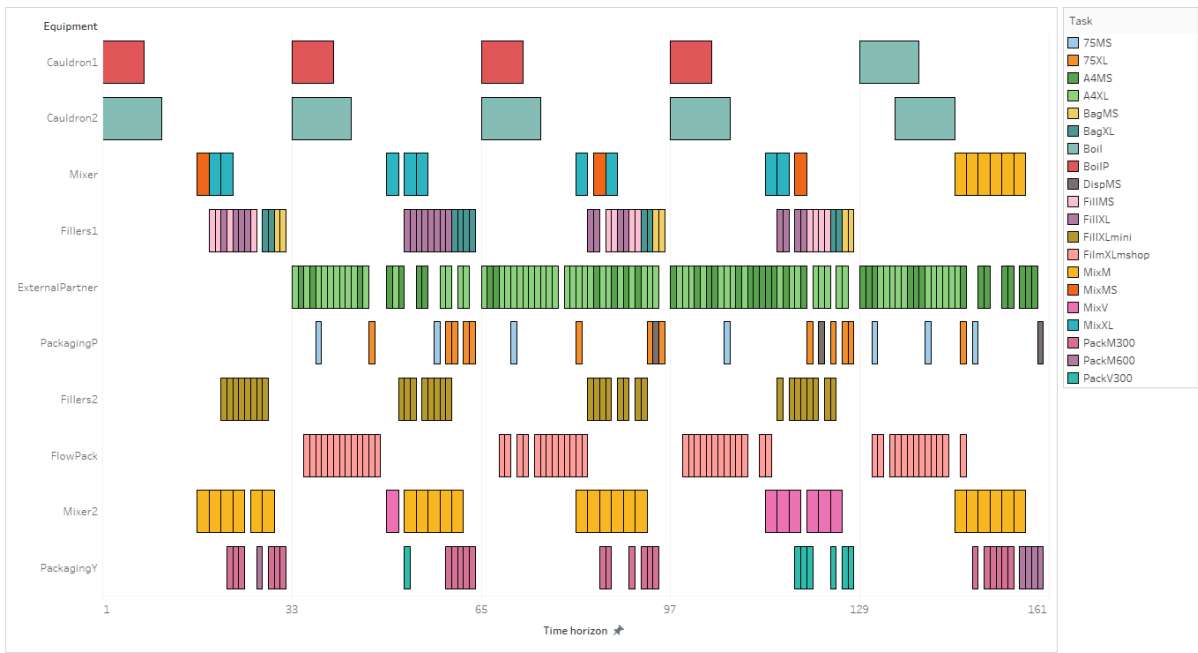


Σχήμα 4.18 Προφίλ των αποθηκευμένων ποσοτήτων του προς ανάμιξη σιροπιού την εβδομάδα του Ιουλίου

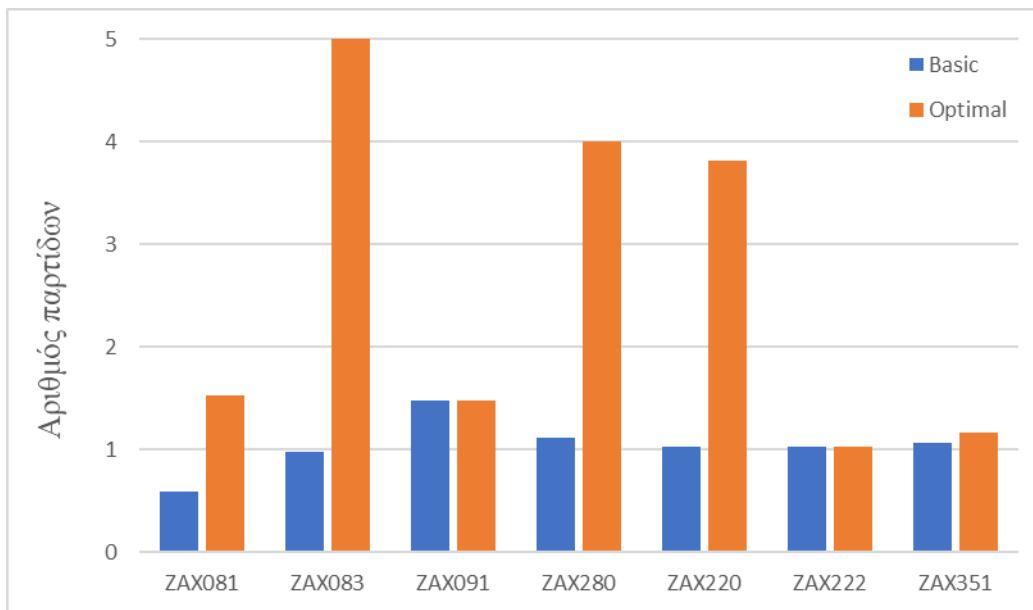
Στο Σχήμα 4.18, η πορτοκαλί καμπύλη αντιστοιχεί στο σιρόπι που παράχθηκε για την παρασκευή πιτών και η αποθηκευμένη ποσότητα που φαίνεται προορίζεται για τη δεύτερη διεργασία ανάμιξης που πραγματοποιείται στο *mixer* σε κάθε μία από τις βάρδιες αυτές. Ο τρόπος με τον οποίο φθίνει η μπλε καμπύλη του σιροπιού για υποβρύχιο δείχνει τη σταδιακή χρήση της αποθηκευμένης ποσότητας από το *mixer2* κατά τις 4 πρώτες βάρδιες. Στην 5^η βάρδια η μορφή της καμπύλης δείχνει ότι υπάρχει διπλή παραγωγή υποβρυχίου και χρήση και των δύο *mixer* με διαφορά εκκίνησης 1 χρονικού διαστήματος.

Περίπτωση Αυγούστου

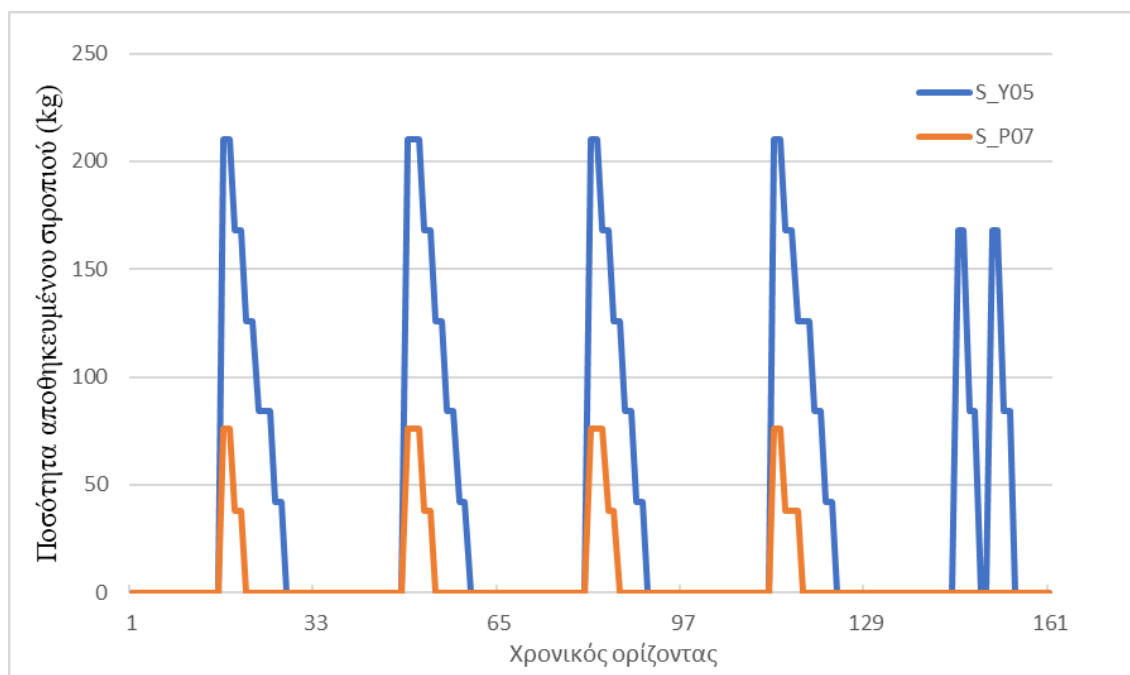
Σε όλες τις περιπτώσεις που αναλύθηκαν έως αυτό το σημείο, ο εργαζόμενος που εξειδικεύεται στην παραδοσιακή συσκευασία πιτών σε χαρτί, *ExternalPartner*, εργάζεται ασταμάτητα. Αυτό το φαινόμενο εντείνεται κατά την περίοδο αύξησης της ζήτησης, κυρίως τους 3 μήνες του καλοκαιριού όπου κορυφώνεται. Για τον μήνα Αύγουστο (Σχήμα 4.19), το μέγιστο εβδομαδιαίο κέρδος που επιτεύχθηκε με την βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματισμού ανέρχεται στις 16,715€, σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό της εβδομάδας του Φεβρουαρίου. Η ποικιλία προϊόντων που παράγονται σε περίσσεια είναι μεγαλύτερη για την εβδομάδα του Αυγούστου που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.20.



Σχήμα 4.19 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Αυγούστου



Σχήμα 4.20 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Αυγούστου

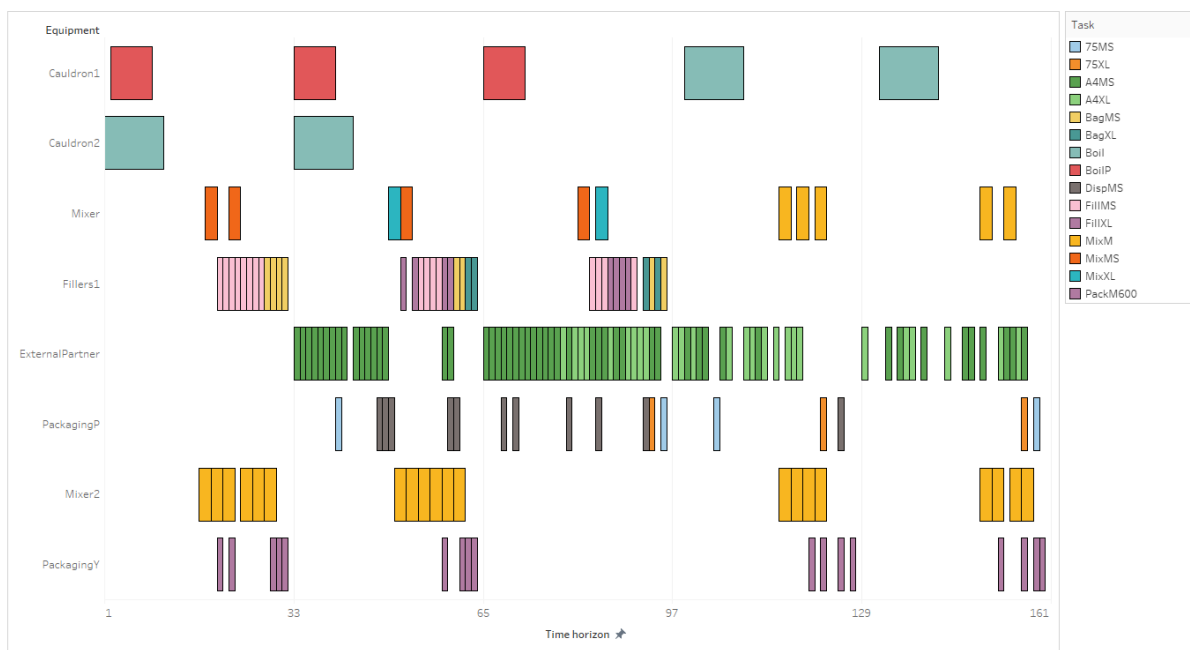


Σχήμα 4.21 Προφίλ των αποθηκευμένων ποσοτήτων του προς ανάμιξη σιροπιού την εβδομάδα του Αυγούστου

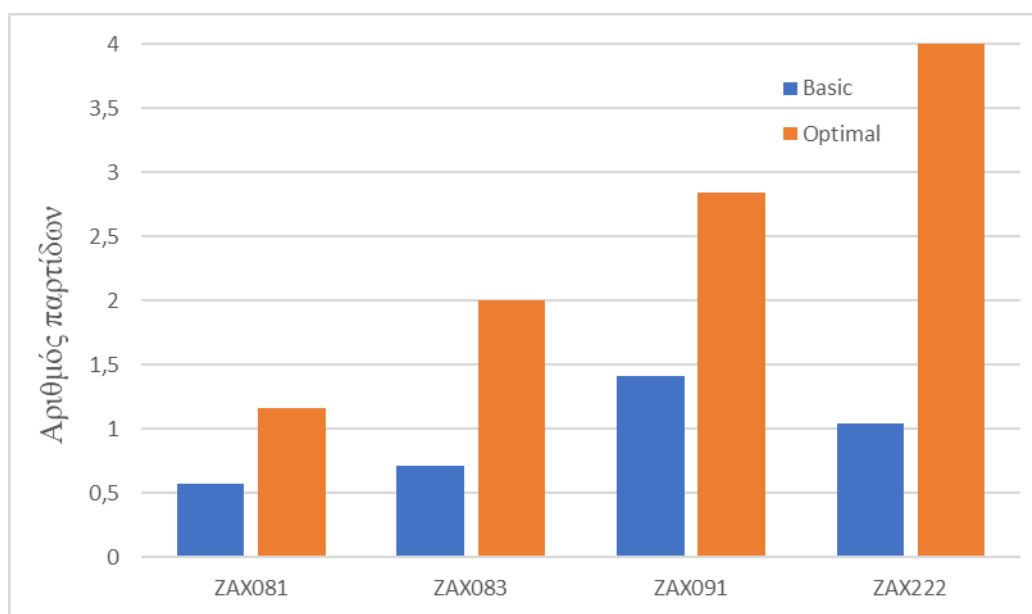
Στο Σχήμα 4.21, οι καμπύλες για τις 4 πρώτες μέρες του χρονικού ορίζοντα ακολουθούν το ίδιο μοτίβο με αυτό του Σχήματος 4.18, με την διαφορά ότι υπάρχουν 3 διεργασίες ανάμιξης πιτών οπότε 2 “σκαλοπάτια” στην μείωση της αποθηκευμένης ποσότητας σιροπιού. Για την 5^η ημέρα το μοτίβο διαφοροποιείται και αυτό συμβαίνει διότι για διπλή παραγωγή σιροπιού, τα δύο mixer εκκινούν ταυτόχρονα.

Περίπτωση Σεπτεμβρίου

Ήδη από τον Σεπτέμβριο, παρατηρείται ότι η ανάγκη για παραγωγή ποικιλίας διαφορετικών προϊόντων αρχίζει να μειώνεται, όπως και ο φόρτος εργασίας για τον *ExternalPartner* (Σχήμα 4.22). Παρόλα αυτά, η περίσσεια παραγωγών που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.23 κατανέμεται σε όλα τα διαφορετικά προϊόντα εκείνης της εβδομάδας, όχι σε ένα μόνο προϊόν.

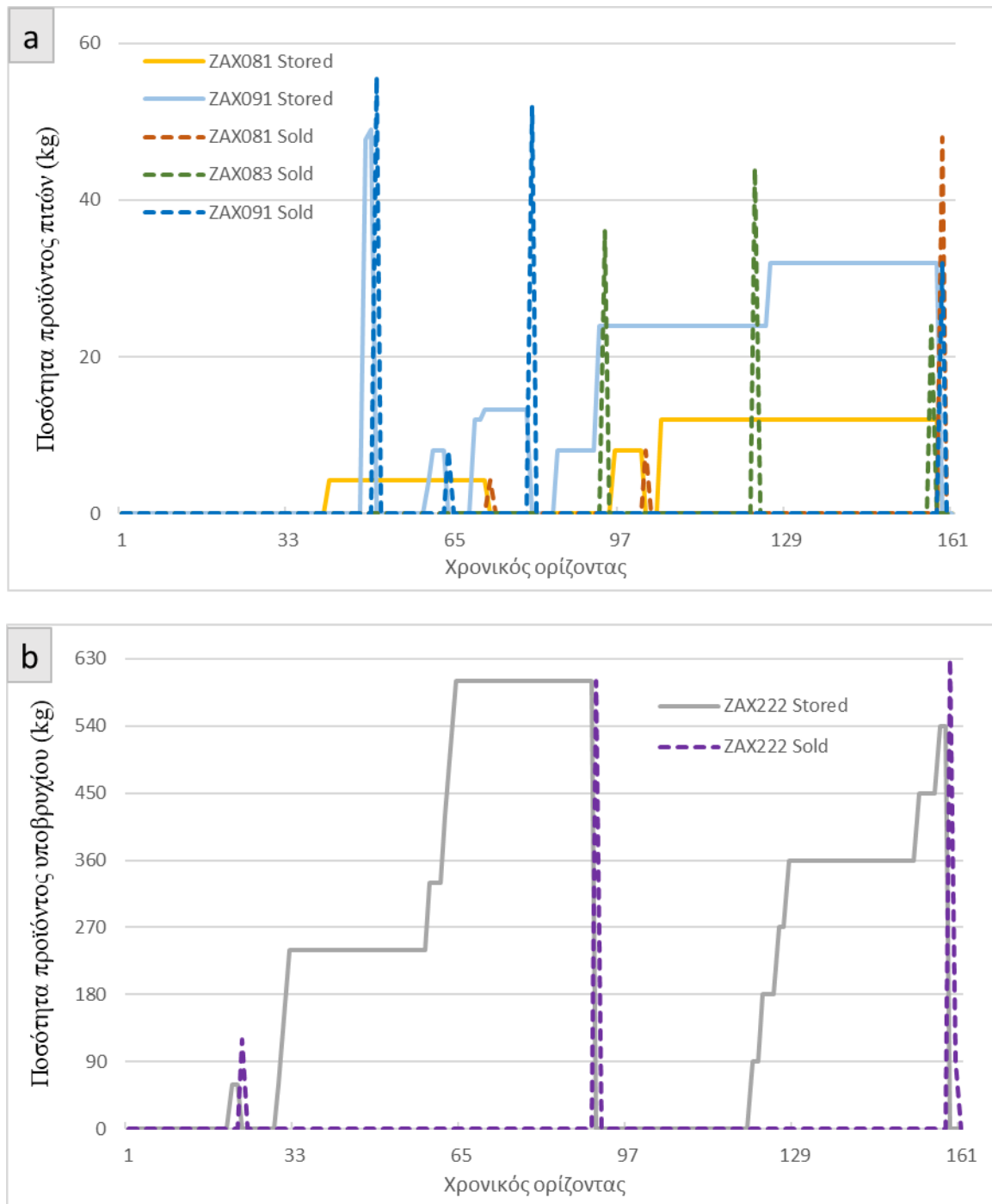


Σχήμα 4.22 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Σεπτεμβρίου



Σχήμα 4.23 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Σεπτεμβρίου

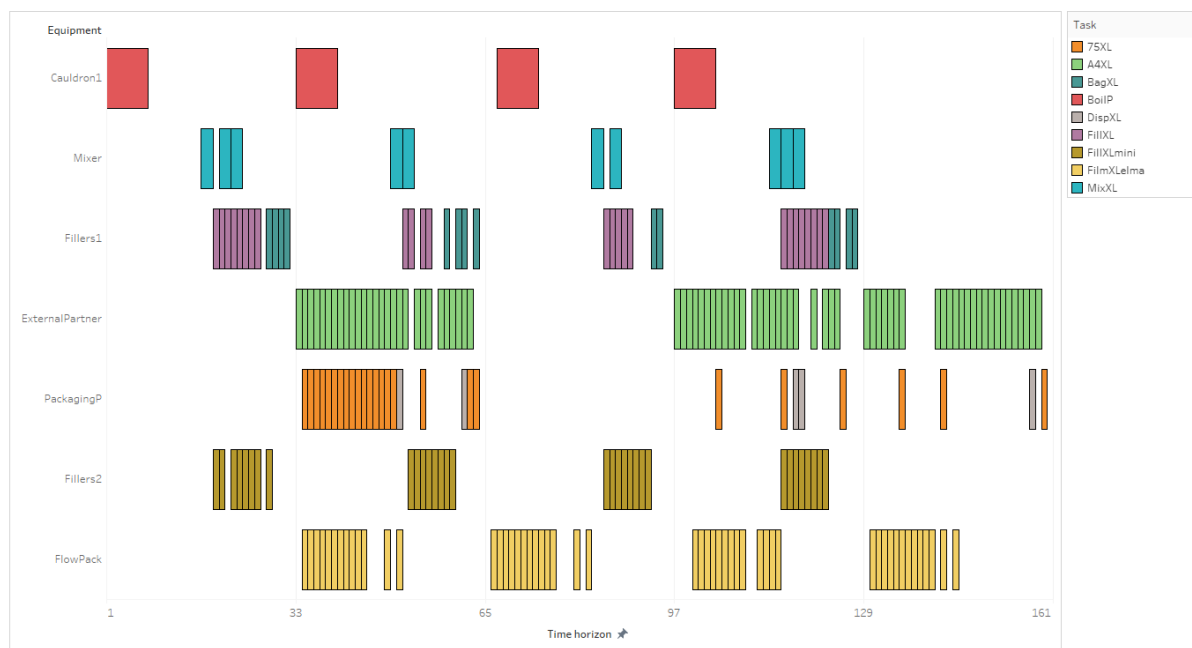
Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται μεγάλες περίοδοι αποθήκευσης των τελικών προϊόντων και μία τάση κάλυψης της ζήτησης κυρίως στο τέλος των ημερών λειτουργίας. Η μεγαλύτερη πυκνότητα στο τέλος του χρονικού ορίζοντα οφείλεται στον περιορισμό κανένα υλικό, πέρα από τις πρώτες ύλες, να μην μένει αποθηκευμένο στο τέλος της εβδομάδας (Σχήμα 4.24).



Σχήμα 4.24 Προφίλ των ποσοτήτων των προϊόντων πιτών (α) και υποβρυχίου (β) που αποθηκεύονται ή πωλούνται την εβδομάδα του Σεπτεμβρίου

Περίπτωση Οκτωβρίου

Όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό από τα χρονοδιαγράμματα παραγωγής που έχουν παρουσιαστεί μέχρι αυτό το σημείο της μελέτης, η ολοκλήρωση της παραγωγής μικρών ή μεγάλων πιτών απαιτεί τουλάχιστον 2 βάρδιες έως ότου ολοκληρωθεί.



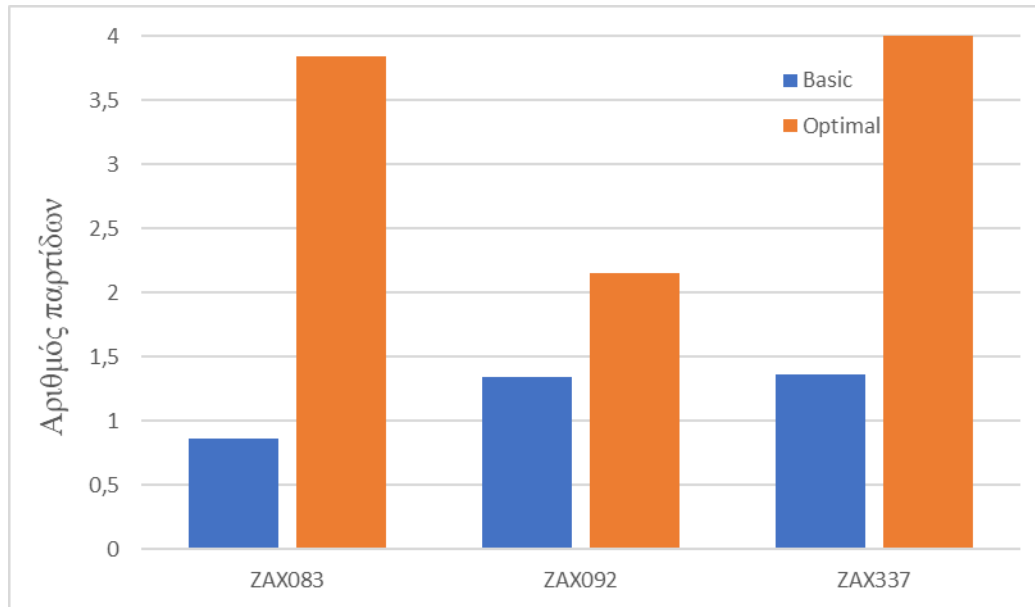
Σχήμα 4.25 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Οκτωβρίου

Αναλύοντας το χρονοδιάγραμμα παραγωγής χρονοπρογραμματισμού του Σχήματος 4.25, γίνονται οι εξής παρατηρήσεις:

- Την 1η βάρδια που γίνεται παραγωγή πιτών, αυτή περιλαμβάνει τα στάδια μέχρι και την τοποθέτηση των πιτών σε πλαστικά σακουλάκια (ή την συναρμολόγηση της γέμισης με τις βιάφλες, αν πρόκειται για μικρές πίτες). Κατά την 2η βάρδια επεξεργασίας της ίδιας παρτίδας/ων πιτών γίνεται η συσκευασία τους σε χαρτί (ή πλαστική συσκευασία αν πρόκειται για μικρές πίτες) και, έπειτα, στην τελική συσκευασία. Οι 2 βάρδιες είναι σε συνεχόμενες μέρες.
- Η ποσότητα πιτών που παράγεται κατά τη 2η βάρδια (διάστημα 33-64) συσκευάζεται κατά την 4η βάρδια (διάστημα 97-128). Έτσι συμπεραίνεται ότι οι μεγάλες πίτες έχουν τη δυνατότητα αναμονής σε πλαστικά σακουλάκια για περισσότερες βάρδιες, έως ότου συσκευαστούν σε χαρτί.
- Η τελευταία μέρα του χρονικού ορίζοντα δεν ενδείκνυται για παραγωγή πιτών, εφόσον μεσολαβεί σαββατοκύριακο μέχρι την επόμενη μέρα λειτουργίας και το προϊόν θα έμνε ημιέτοιμο.

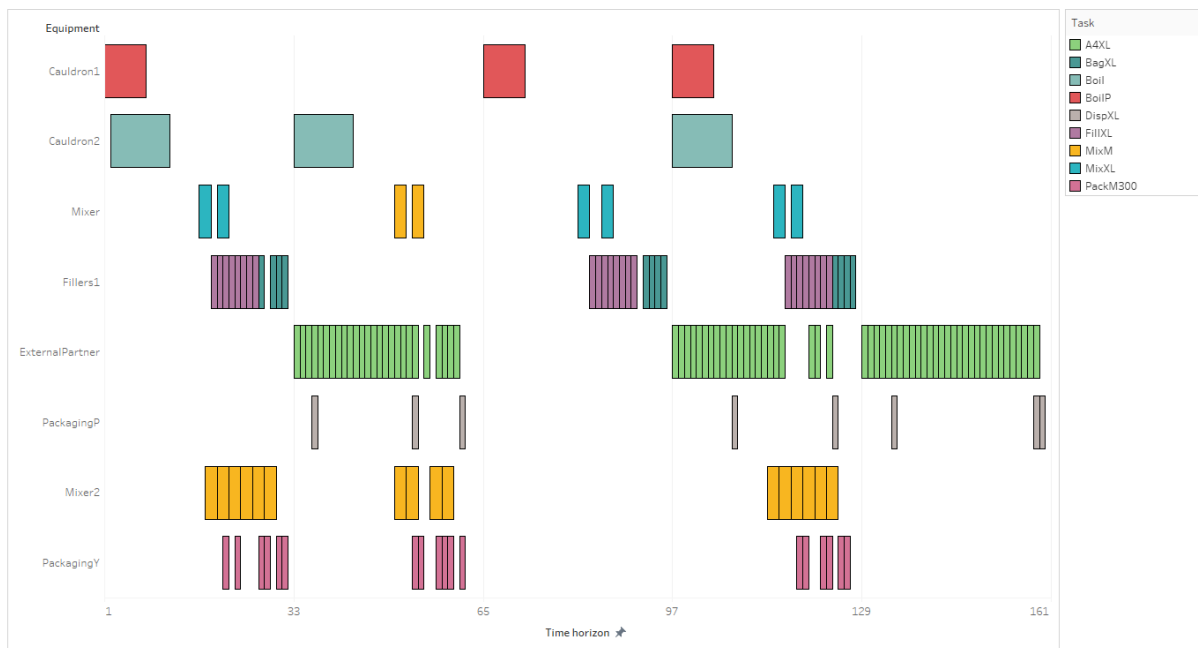
Τη συγκεκριμένη εβδομάδα φαίνεται από το Σχήμα 4.25 και 4.26 ότι παράγονται μόνο 3 διαφορετικά τελικά προϊόντα μικρών και μεγάλων πιτών τα οποία προέρχονται και από την

ίδια συνταγή (ίδια γεύση). Είναι σημαντικό ότι αυτή η γεύση πιτών παραδοσιακά έχει την μεγαλύτερη ζήτηση.

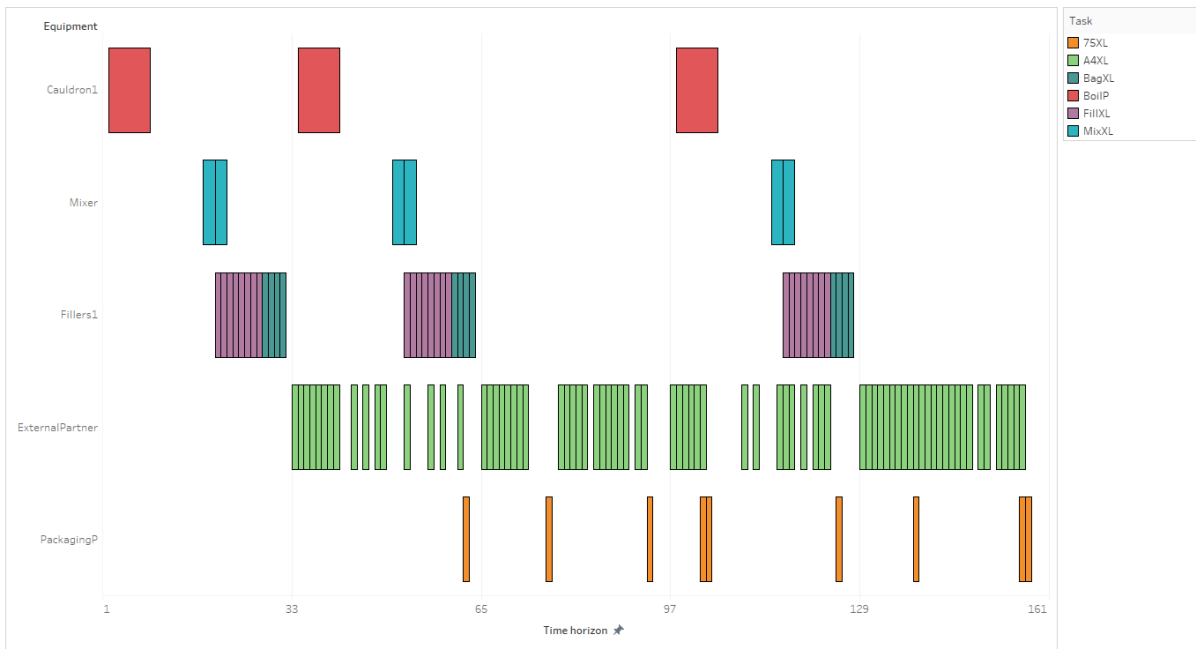


Σχήμα 4.26 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για την περίπτωση ζήτησης της εβδομάδας του Οκτωβρίου

Περιπτώσεις Νοεμβρίου & Δεκεμβρίου

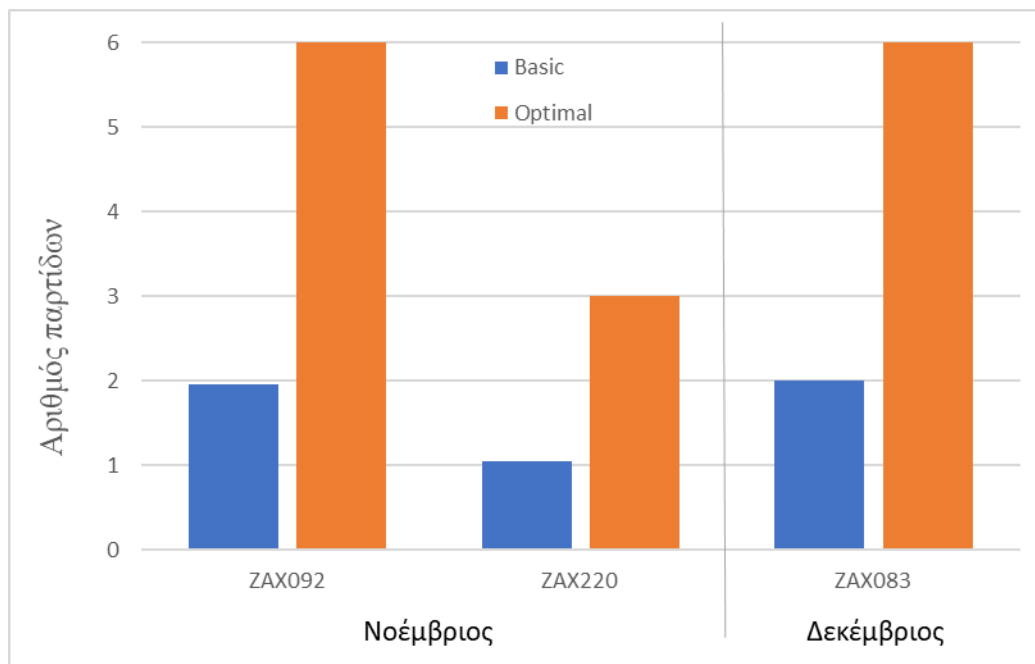


Σχήμα 4.27 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Νοεμβρίου

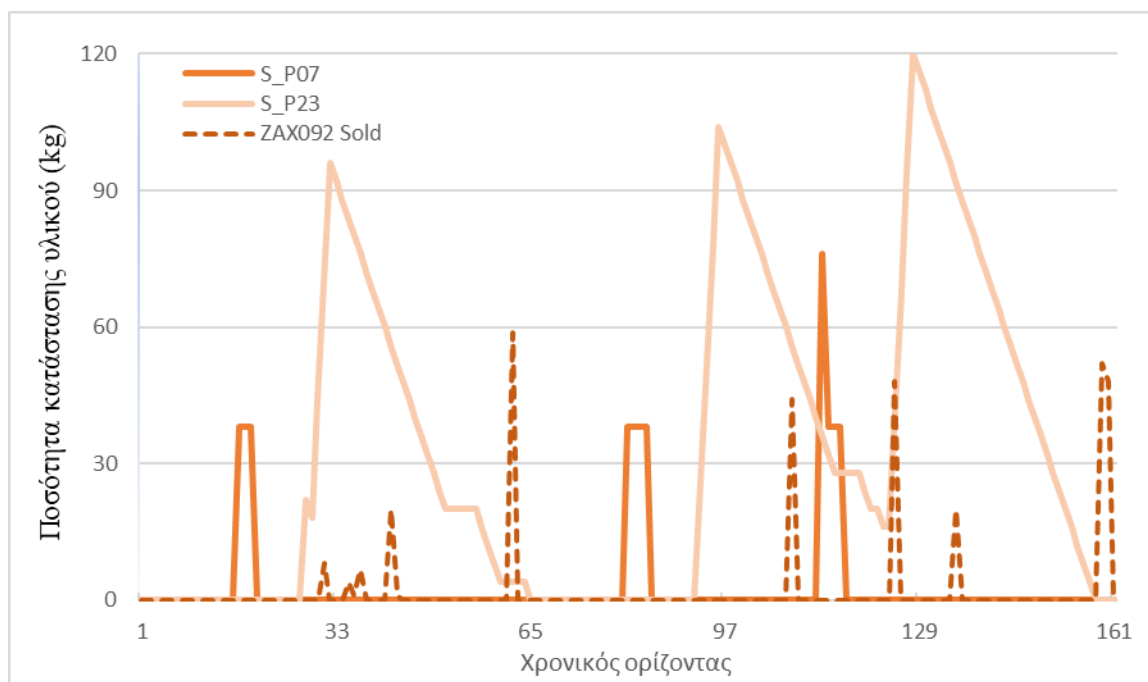


Σχήμα 4.28 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Δεκεμβρίου

Οι περιπτώσεις του Νοεμβρίου και του Δεκεμβρίου εξετάζονται μαζί διότι η ποικιλία αλλά και η αναγκαία ποσότητα/παραγωγή των συνολικά τριών διαφορετικών προϊόντων που παράγονται είναι πολύ μικρή. Επιβεβαιώνεται ότι κατά τους χειμερινούς μήνες τα προϊόντα αυτά δεν προτιμώνται από τους καταναλωτές. Έτσι, αποτελεί αντικείμενο προβληματισμού η παραγωγή εξαπλάσιας ποσότητας από την απαιτούμενη (Σχήμα 4.29).



Σχήμα 4.29 Αριθμός παραγόμενων παρτίδων προ και μετά βελτιστοποίησης για τις περιπτώσεις ζήτησης της εβδομάδας του Νοεμβρίου & Δεκεμβρίου

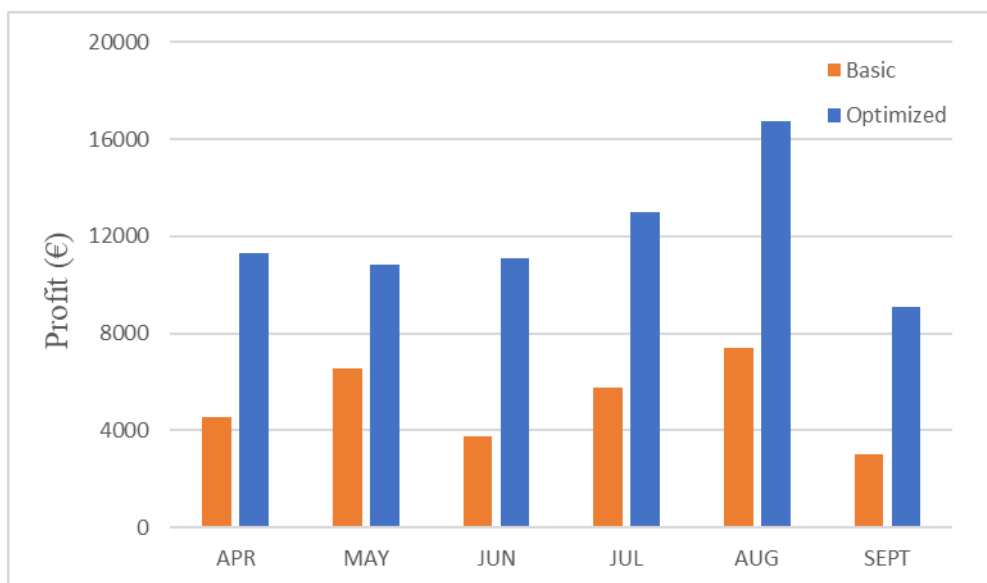


Σχήμα 4.30 Προφίλ καταστάσεων υλικών κατά την παραγωγή του προϊόντος ZAX092 την εβδομάδα του Νοεμβρίου

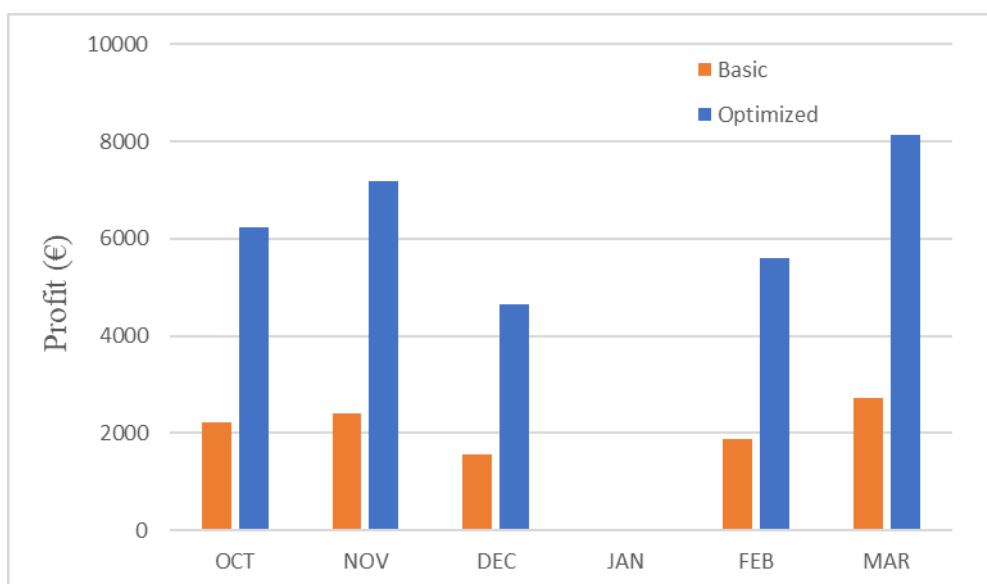
Το Σχήμα 4.30 απεικονίζει τα προφίλ ορισμένων ενδεικτικών καταστάσεων υλικών που αποθηκεύονται κατά την παραγωγή του προϊόντος ZAX092 και τις διακεκομμένες κορυφές πωλήσεων. Φαίνεται ότι η αποθήκευση του ημιέτοιμου προϊόντος S_P023 εμφανίζει μέγιστο στο τέλος της βάρδιας στην οποία παράγεται και στην επόμενη βάρδια καταναλώνεται σταδιακά και για αυτό χρειάζεται να παραμείνει αποθηκευμένο για αρκετό χρόνο

Σύνοψη Αποτελεσμάτων κέρδους για όλες τις περιπτώσεις

Αφού εξετάστηκαν όλες οι επιμέρους περιπτώσεις ζήτησης ανά το έτος, στα παρακάτω στα σχήματα συνοψίζονται τα αποτελέσματα κέρδους που προέκυψαν. Γίνεται σύγκριση του κέρδους που θα υπήρχε αν καλυπτόταν μόνο η ζητούμενη ποσότητα προϊόντων με το βέλτιστο κέρδος, που προέκυψε από την επίλυση στο GAMS του προβλήματος που περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, για το εξάμηνο μέγιστης ζήτησης στο Σχήμα 4.31, και το εξάμηνο ελάχιστης ζήτησης στο Σχήμα 4.32.



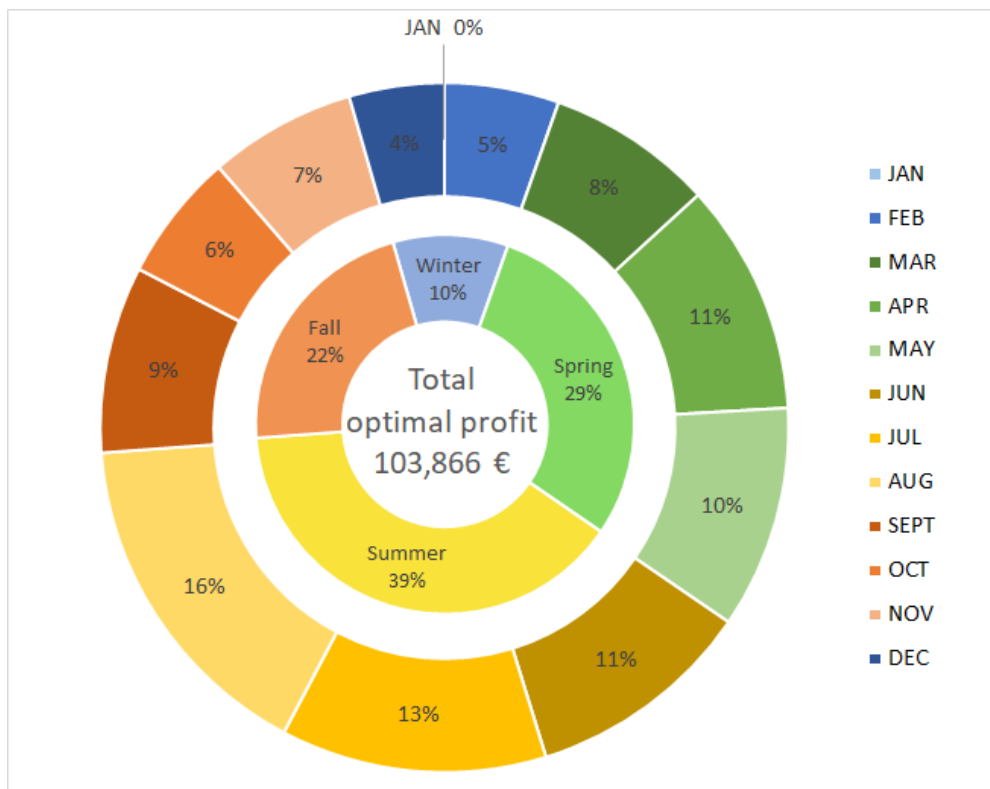
Σχήμα 4.31 Σύγκριση κέρδους προ & μετά βελτιστοποίησης για τις περιπτώσεις Απριλίου έως Σεπτεμβρίου



Σχήμα 4.32 Σύγκριση κέρδους προ & μετά βελτιστοποίησης για τις περιπτώσεις Οκτωβρίου έως Μαρτίου

Στο διάγραμμα πίτας του Σχήματος 4.33, φαίνεται η ποσοστιαία κατανομή του κέρδους των αντιπροσωπευτικών εβδομαδιαίων περιπτώσεων βελτιστοποίησης για κάθε μήνα, αλλά και κάθε εποχή του χρόνου. Όλα τα αποτελέσματα κέρδους προέκυψαν βάσει των τιμών κέρδους ανά κιλό τελικού προϊόντος που παρείχε η εταιρεία. Το βέλτιστο κέρδος για το σύνολο των περιπτώσεων που μελετήθηκαν είναι 103,866 € και στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζεται αναλυτικά

η αντιστοιχία του στις διάφορες περιπτώσεις. Εξ αυτών, το επιπλέον κέρδος που προέκυψε από την αύξηση της παραγωγής λόγω βελτιστοποίησης, χωρίς να υπολογίζεται αυτό της βασικής ζήτησης (41,770 €), είναι 62,096 €, δηλαδή μία αύξηση της τάξης του 150%. Είναι σημαντικό ότι αυτή η αύξηση επιτεύχθηκε αποκλειστικά εξαιτίας της αύξησης των παραγόμενων προϊόντων με καλύτερη οργάνωση της αλληλουχίας των διεργασιών και αξιοποίηση της μέγιστης ικανότητας παραγωγής των ήδη υπάρχουσών συσκευών, χωρίς ανάγκη επέκτασης της δυναμικότητας ή υπερωριών των εργαζομένων.

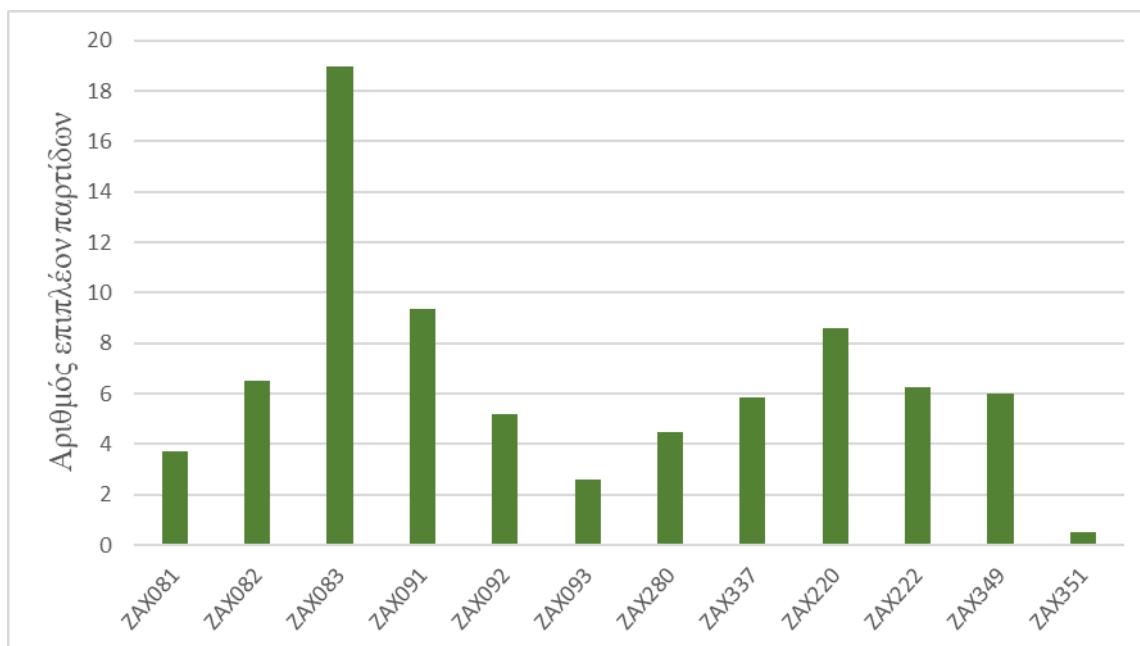


Σχήμα 4.33 Ποσοστιαία κατανομή κέρδους λόγω της παραγωγής για όλες τις περιπτώσεις ανά μήνα και ανά εποχή

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα βέλτιστου κέρδους για κάθε περίπτωση ζήτησης

Περίπτωση	Μέγιστο Κέρδος (€)	Περίπτωση	Μέγιστο Κέρδος (€)
Ιανουάριος	-	Ιούλιος	12,977.7
Φεβρουάριος	5,590.11	Αύγουστος	16,724.5
Μάρτιος	8,130.51	Σεπτέμβριος	9,108.84
Απρίλιος	11,304.06	Οκτώβριος	6,242.79
Μάιος	10,852.58	Νοέμβριος	7,181.19
Ιούνιος	11,108.75	Δεκέμβριος	4,644.57

Τέλος, στο Σχήμα 4.34 συνοψίζονται όλες οι επιπλέον παρτίδες που παράχθηκαν για κάθε ένα από τα προϊόντα από το σύνολο των περιπτώσεων. Η μέγιστη παραγωγή, η οποία διαφέρει κατά πολύ από τις υπόλοιπες, είναι για το προϊόν πιτών ZAX083, το οποίο όμως είναι ψηλά στην προτίμηση των καταναλωτών, και η ελάχιστη για το προϊόν υποβρυχίου ZAX351. Αν εξαιρεθούν αυτές οι δύο ακραίες τιμές, για τα υπόλοιπα προϊόντα η περίσσεια αντιστοιχεί κατά μέσο όρο στις 6 επιπλέον παρτίδες.



Σχήμα 4.34 Αριθμός επιπλέον παρτίδων ανά προϊόν που παράγεται από όλες τις περιπτώσεις

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία επίλυσης του προβλήματος στο GAMS.

Πίνακας 4.2 Στατιστικά στοιχεία επίλυσης στο GAMS

Εξισώσεις	103,283
Συνεχείς Μεταβλητές	46,691
Διαδικές Μεταβλητές	20,769
Απόκλιση από την ολική βέλτιστη λύση	$\leq 2\%$
Μέσος χρόνος επίλυσης (s)	600

4.2. Περιπτώσεις σύμπτυξης των παραγωγών

Για τους μήνες Φεβρουάριο και Δεκέμβριο παρατηρείται ότι α) δεν υπάρχει τόσο μεγάλη ανάγκη για περίσσεια παραγωγών, και β) η συνολική μηνιαία ζήτηση, για όλες τις εβδομάδες του μήνα, είναι δυνατό να υπερκαλυφθεί σε μόλις 1 εβδομάδα.

Αυτή η γνώση είναι σημαντική, διότι αυτό αποβαίνει προσοδοφόρο για την εταιρεία αν υπολογίσει κανείς την μείωση κόστους που θα μπορούσε να επιτευχθεί σε μία τέτοια περίπτωση, πρώτον από την μείωση εργατοωρών και, δεύτερον, από την επίτευξη ελαχιστοποίησης των απαιτούμενων διεργασιών βρασμού, που απαιτούν αρκετή ποσότητα βοηθητικών παροχών (ατμός). Η βιομηχανία επέλεξε να μην παρέχει δεδομένα κόστους για τον ατμό που απαιτείται για τον βρασμό και για τα εργατικά. Έτσι, αποφασίστηκε η εξέταση αυτών των περιπτώσεων να επικεντρωθεί στη σύγκριση της συνεπτυγμένης μηνιαίας ζήτησης με τις επιμέρους εβδομαδιαίες περιπτώσεις ζήτησης, ως προς τις ώρες λειτουργίας και τον αριθμό απαιτούμενων παρτίδων. Η συνεπτυγμένη μηνιαία βασική ζήτηση παρουσιάζεται στον Πίνακα Α.2 του Παραρτήματος Α. Για να γίνει εξέταση αυτής της περίπτωσης, η αντικειμενική συνάρτηση κέρδους (3.24) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, επιλέγεται να ελαχιστοποιηθεί κατά την επίλυση στο GAMS.

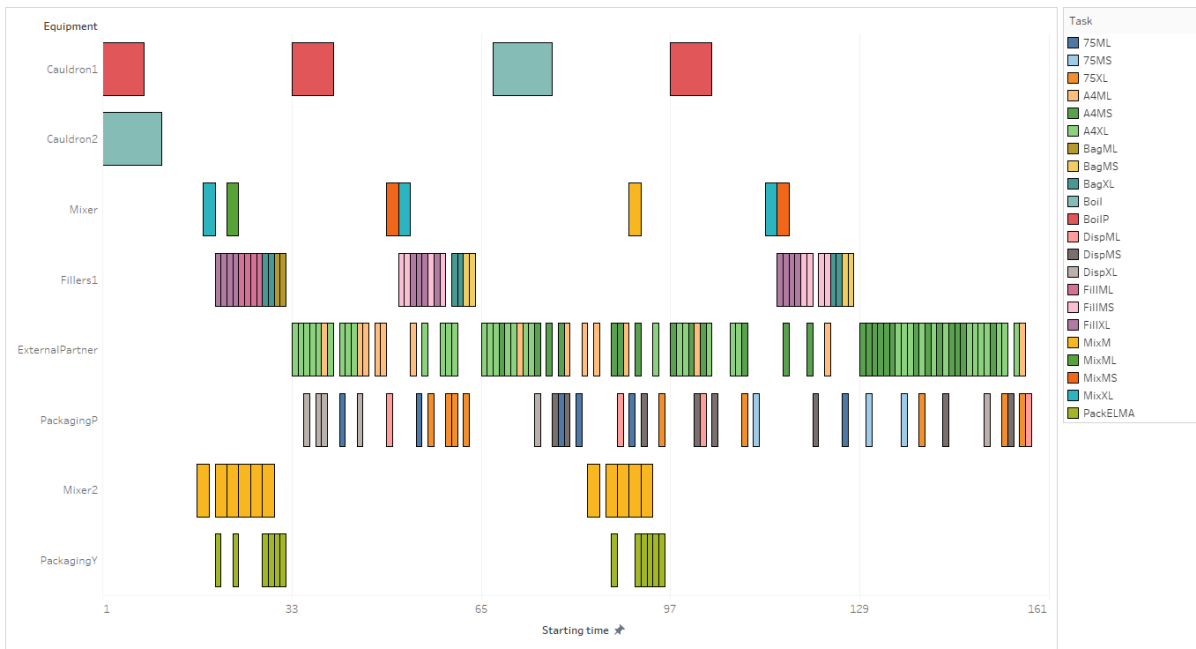
Περίπτωση Φεβρουαρίου

Η κάλυψη της ελάχιστης ζήτησης για όλο τον μήνα αποδίδει κέρδος 5,501 €.

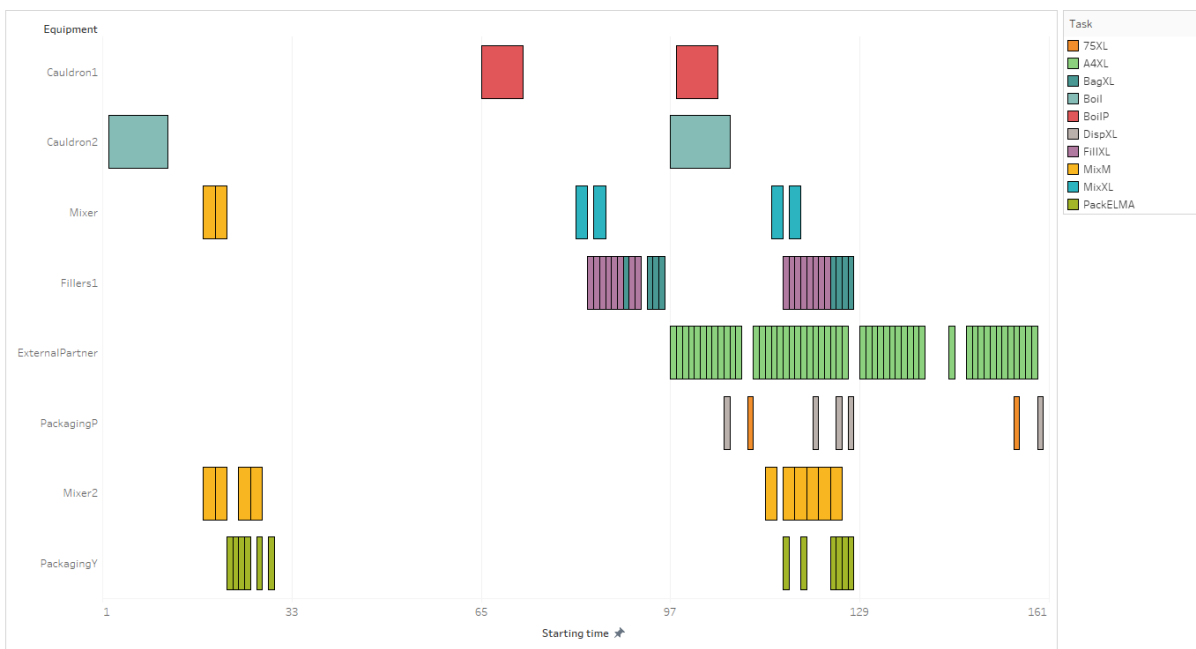
Στον Πίνακα 4.3 συγκρίνονται ο αριθμός των καζανιών που θέτονται σε λειτουργία και οι μέρες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της παραγωγής, αν η ολική ελάχιστη ζήτηση καλυφθεί σε μόνο 1 εβδομάδα ή σε επιμέρους. Αυτά τα αποτελέσματα φαίνονται και στα χρονοδιαγράμματα παραγωγής των Σχημάτων 4.35, 4.36 και 4.37 .

Πίνακας 4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων κάλυψης της ελάχιστης ζήτησης του Φεβρουαρίου με διαφορετικό τρόπο

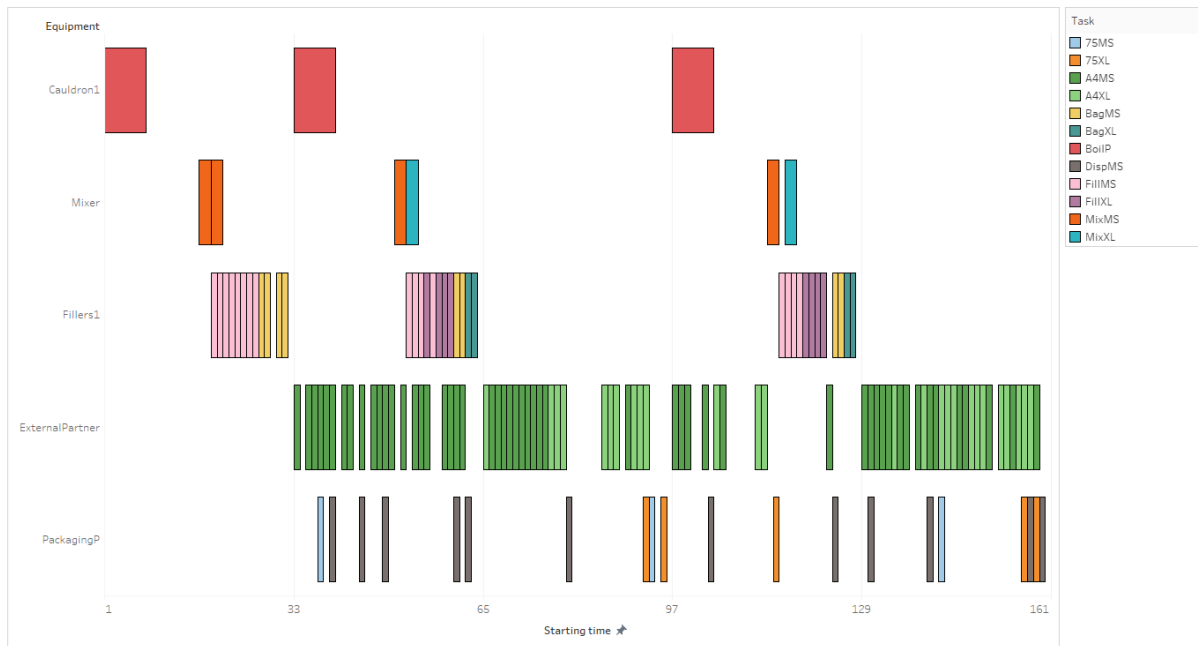
Ζήτηση	Ολόκληρου μήνα	Επιμέρους		
		1 ^η εβδομάδα	2 ^η εβδομάδα	Σύνολο
Αριθμός Καζανιών	3+2	2+2	3+0	5+2
Ημέρες παραγωγής	5	4	5	9



Σχήμα 4.35 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για τις 2 εβδομάδες του Φεβρουαρίου (ελαχιστοποίηση κέρδους)



Σχήμα 4.36 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για την 1η εβδομάδα του Φεβρουαρίου (ελαχιστοποίηση κέρδους)



Σχήμα 4.37 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για την 2η εβδομάδα του Φεβρουαρίου (ελαχιστοποίηση κέρδους)

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία επίλυσης του προβλήματος στο GAMS.

Πίνακας 4.4 Στατιστικά στοιχεία επίλυσης στο GAMS (Φεβρουάριος)

	Ολική	1^η εβδομάδα	2^η εβδομάδα
Απόκλιση από την ολική βέλτιστη λύση	1.9%	0.0%	1.3%
Χρόνος επίλυσης (s)	1,178	529	516

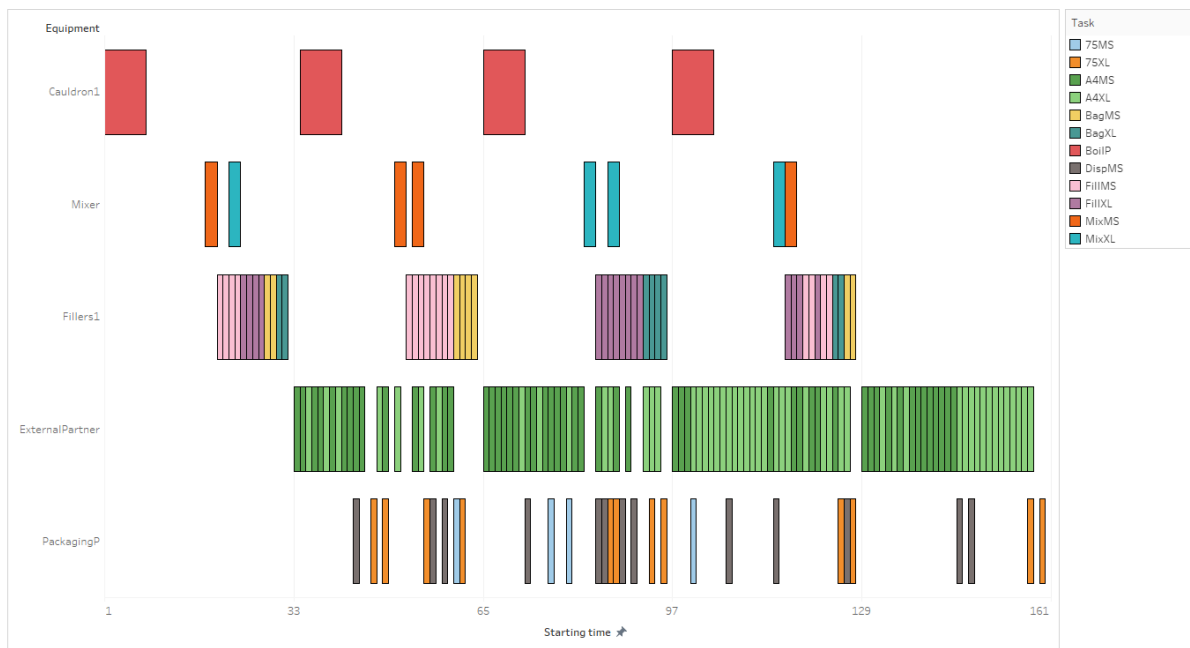
Περίπτωση Δεκεμβρίου

Η κάλυψη της ελάχιστης ζήτησης για όλο τον μήνα αποδίδει κέρδος 5,081 €.

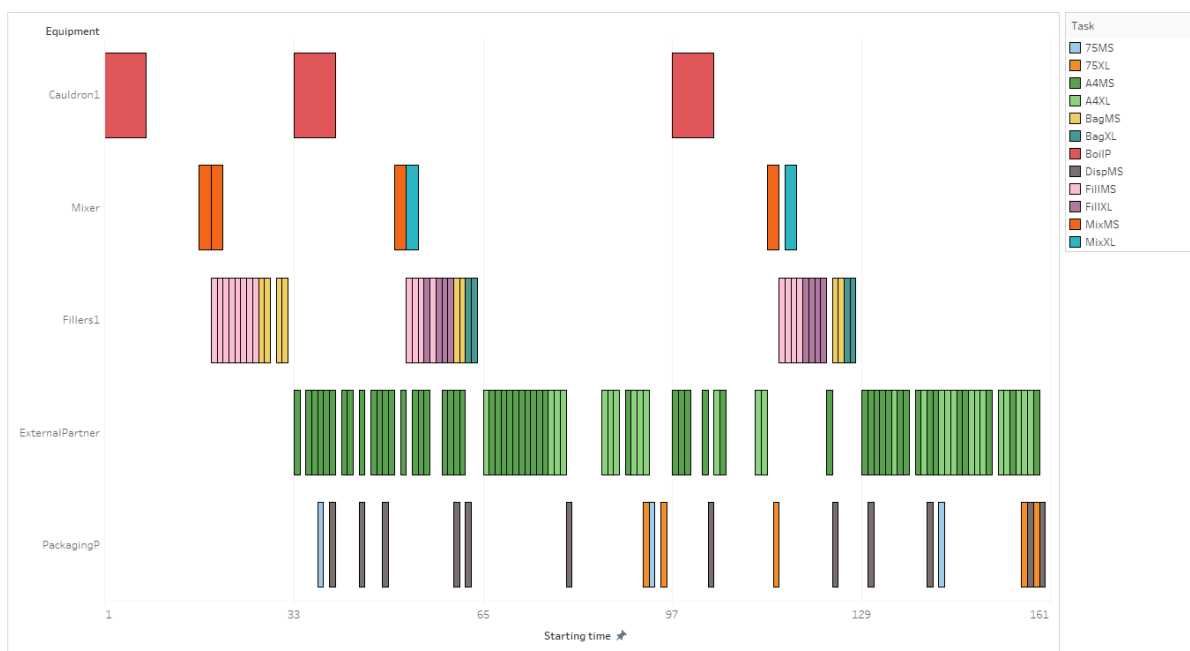
Στον Πίνακα 4.5 γίνεται σύγκριση του αριθμού των καζανιών και των ημερών λειτουργίας της παραγωγής, για την ολική ελάχιστη ζήτηση όλου του μήνα και των επιμέρους εβδομάδων του. Αυτά τα αποτελέσματα φαίνονται και στα Σχήματα 4.38, 4.39 και 4.40.

Πίνακας 4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων κάλυψης της ελάχιστης ζήτησης του Δεκεμβρίου με διαφορετικό τρόπο

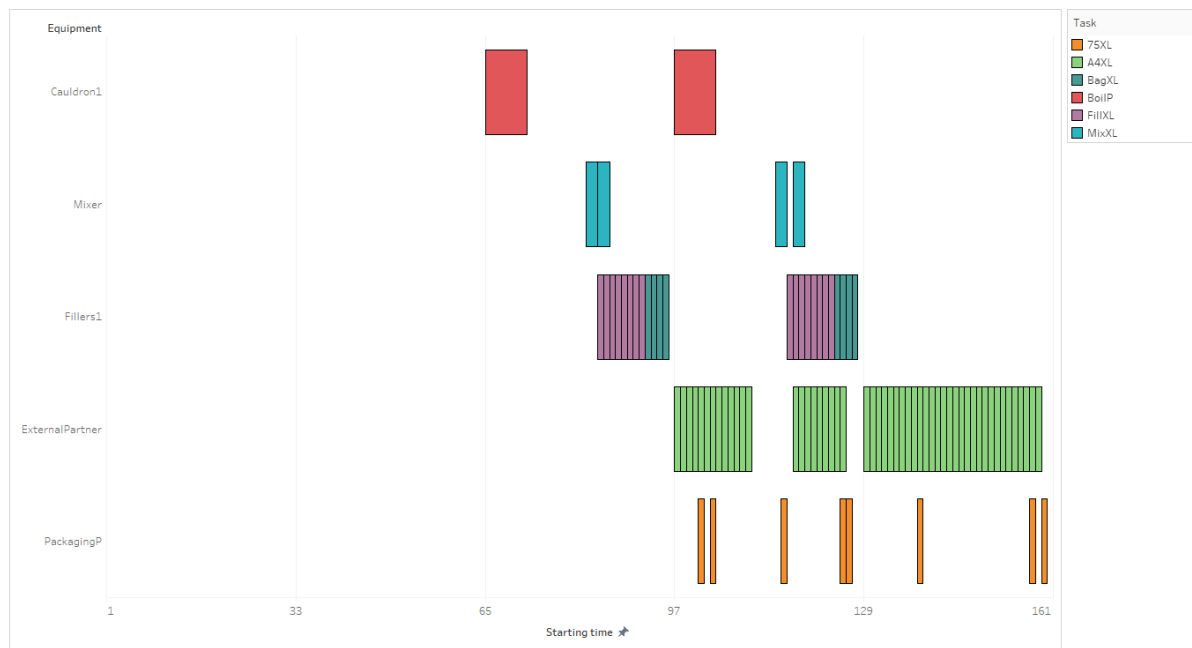
Ζήτηση	Ολόκληρου μήνα	Επιμέρους		
		1 ^η εβδομάδα	2 ^η εβδομάδα	Σύνολο
Αριθμός Καζανιών	4	3	2	5
Ημέρες παραγωγής	5	5	2	7



Σχήμα 4.38 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για τις 2 εβδομάδες του Δεκεμβρίου (ελαχιστοποίηση κέρδους)



Σχήμα 4.39 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για την 1η εβδομάδα του Δεκεμβρίου (ελαχιστοποίηση κέρδους)



Σχήμα 4.40 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για την 2η εβδομάδα του Δεκεμβρίου (ελαχιστοποίηση κέρδους)

Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία επίλυσης του προβλήματος στο GAMS για τις παραγωγές του Δεκέμβρη.

Πίνακας 4.6 Στατιστικά στοιχεία επίλυσης στο GAMS (Δεκέμβριος)

	Ολική	1^η εβδομάδα	2^η εβδομάδα
Απόκλιση από τη βέλτιστη λύση	1.9%	1.7%	0.0%
Χρόνος επίλυσης (min)	162	26	9.25

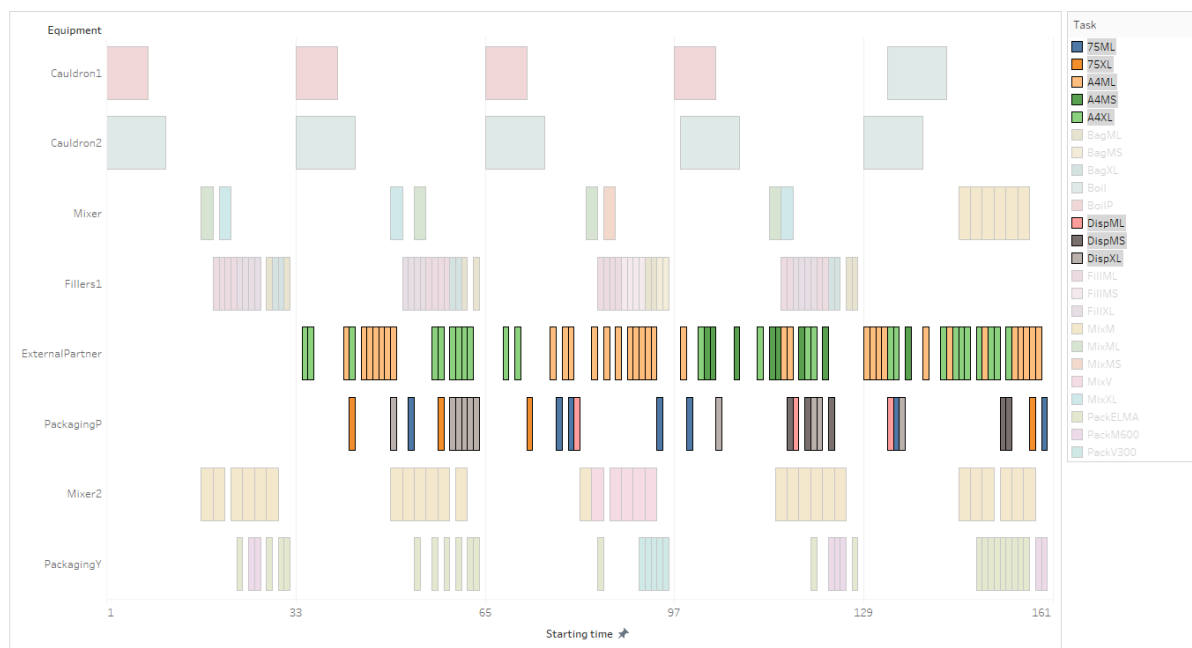
4.3. Περίπτωση επέκτασης του εξοπλισμού

Όπως αναφέρθηκε και φαίνεται στα χρονοδιαγράμματα παραγωγής στην Ενότητα 4.1. η συσκευή η οποία δουλεύει διαρκώς, είτε υπάρχει μεγάλη είτε μικρή ζήτηση, είναι ο *ExternalPartner*, που χρησιμεύει για το τύλιγμα των πιτών σε χαρτί. Είναι μία εργασία που εξαρτάται από την ταχύτητα του εργάτη που την εκτελεί και δημιουργεί αρκετή συμφόρηση στην γραμμή παραγωγής πιτών. Για αυτό, μελετήθηκε η περίπτωση αξιοποίησης δεύτερου εργάτη για το τύλιγμα των πιτών σε χαρτί. Οι όροι που τέθηκαν ήταν ότι α) οι δύο εργάτες εργάζονται πάντα ταυτόχρονα και β) ο δεύτερος εργάτης τυλίγει με πιο αργό ρυθμό από τον πρώτο (3 kg/15min), λόγω πολύχρονης εμπειρίας και εξειδίκευσης του πρώτου. Έτσι, μπορούν

να θεωρηθούν σαν 1 συσκευή με μεγαλύτερο ρυθμό επεξεργασίας, ίσο με το άθροισμα των επιμέρους ρυθμών.

Περίπτωση Μαΐου Α (σταθερή ζήτηση)

Για την επίτευξη κέρδους 10,852 €, η ζήτηση τέθηκε ακριβώς ίση με την βέλτιστη που βρέθηκε στην περίπτωση του Μαΐου στην Ενότητα 4.1. Με την αύξηση του ρυθμού επεξεργασίας για τον *ExternalPartner*, εξοικονομούνται 10.5 ώρες. Αυτό φαίνεται στη διαφορά του φόρτου εργασίας του *ExternalPartner* στο χρονοδιάγραμμα παραγωγής του Σχήματος 4.41 (16.5 h), με τον φόρτο εργασίας στο Σχήμα 4.10 (27 h), όπου έχει γίνει η βελτιστοποίηση για την ίδια εβδομάδα, αλλά για μικρότερο ρυθμό τυλίγματος πιτών σε χαρτί. Για διευκόλυνση, οι εργασίες του τυλίγματος και της συσκευασίας εμφανίζονται με εντονότερα χρώματα. Στον Πίνακα 4.7, φαίνεται η ακρίβεια και η ταχύτητα επίλυσης.



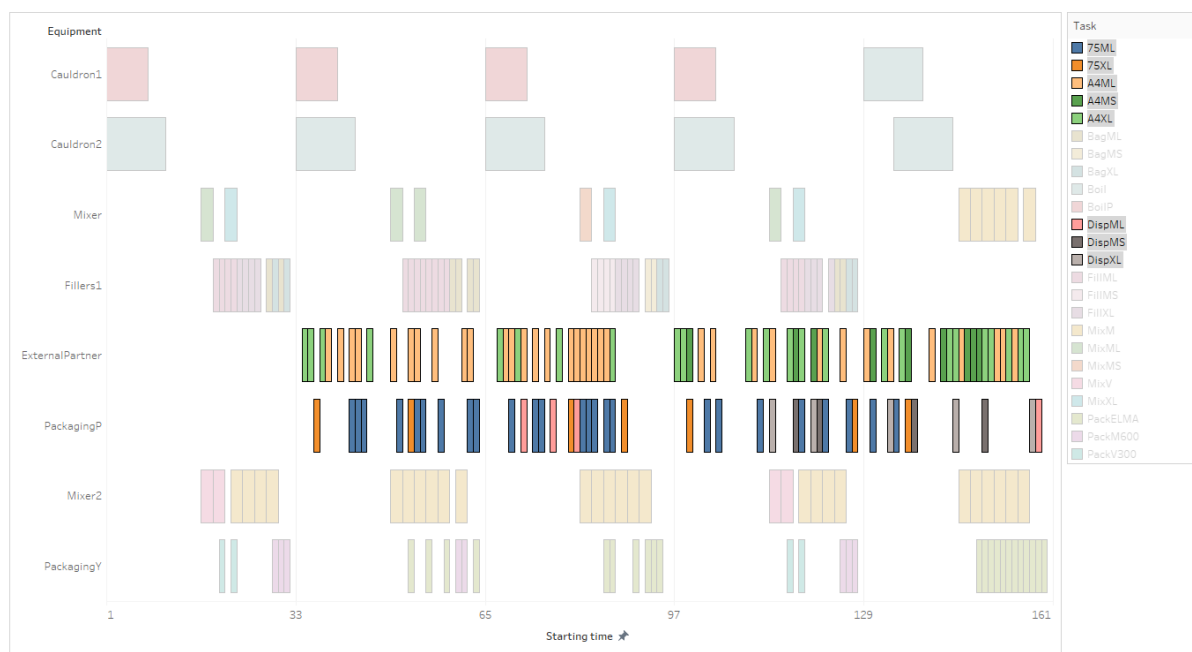
Σχήμα 4.41 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Μαΐου με μεγαλύτερη δυναμικότητα συσκευής (περίπτωση σταθερής ζήτησης)

Πίνακας 4.7 Στατιστικά στοιχεία επίλυσης στο GAMS (σταθερή ζήτηση)

Απόκλιση από την ολική βέλτιστη λύση	0.0%
Χρόνος επίλυσης (s)	543

Περίπτωση Μαΐου Β (μεγιστοποίηση κέρδους)

Η αξιοποίηση 2^{ου} εργάτη στο τύλιγμα πιτών μπορεί να αυξήσει το εβδομαδιαίο κέρδος, αφού η συμφόρηση που υπήρχε μειώνεται. Έτσι, με βελτιστοποίηση για τον μήνα Μάιο με το ίδιο σενάριο αρχικής ζήτησης με την αντίστοιχη περίπτωση της Ενότητας 4.1, προέκυψε ότι το κέρδος από 10,852 € αυξήθηκε στα 11,081€. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση που παρατηρείται, αν δεν οφείλεται στην υπολογιστική απόκλιση του 2%, είναι πολύ μικρή για να θεωρηθεί καλή επιλογή η δέσμευση επιπλέον εργάτη. Επίσης, γίνεται φανερό ότι παρά την διαρκή εργασία του *ExternalPartner*, το τύλιγμα των πιτών δεν είναι στην πραγματικότητα σημείο συμφόρησης. Τα αποτελέσματα αυτής της βελτιστοποίησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.42 και στον Πίνακα 4.8.



Σχήμα 4.42 Βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής για 1 εβδομάδα του Μαΐου με μεγαλύτερη δυναμικότητα συσκευής (περίπτωση μεγιστοποίησης κέρδους)

Πίνακας 4.8 Στατιστικά στοιχεία επίλυσης στο GAMS (μεγιστοποίηση κέρδους)

Απόκλιση από την ολική βέλτιστη λύση	1.9%
Χρόνος επίλυσης (min)	112

5. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

5.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε και επιλύθηκε ένα πρόβλημα βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μίας τοπικής βιομηχανίας τροφίμων, της Mediterra A.E.. Η βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής βοηθά στην αύξηση της ανταγωνιστικότητας της εταιρείας και των κερδών της, ώστε αυτή να παραμένει στον χάρτη της αγοράς τροφίμων παρά τις ραγδαίες αλλαγές. Το πρόβλημα βελτιστοποιείται με χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου MILP, το οποίο λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα και τους ρεαλιστικούς περιορισμούς για τη ζήτηση, τους διαθέσιμους πόρους, τους χρόνους επεξεργασίας, την αποθηκευτική ικανότητα, τις βάρδιες της βιομηχανίας και οικονομικά στοιχεία, στοχεύει στη μεγιστοποίηση του κέρδους εντός του χρονικού ορίζοντα. Αυτό γίνεται με εισαγωγή του μοντέλου στο λογισμικό βελτιστοποίησης GAMS με τη χρήση κατάλληλου επιλυτή, CPLEX.

Το πρόβλημα εξετάστηκε σε εβδομαδιαία βάση. Τα δύο είδη προϊόντων μπορούν να παραχθούν με 5 διαφορετικές συνταγές, δίνοντας συνολικά 12 τελικά προϊόντα. Η ιδιαιτερότητα του προβλήματος έγκειται στο γεγονός ότι η εβδομαδιαία ζήτηση δεν παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, αλλά, πέρα από αστάθμητους παράγοντες, επηρεάζεται από την εποχή. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η βασική ζήτηση μπορεί να είναι έως και 10 φορές μεγαλύτερη για κάποια τελικά προϊόντα από τη ζήτηση τους χειμερινούς. Η επίλυση του μοντέλου στο GAMS επέφερε αύξηση του συνολικού κέρδους στα 103,866 €, ποσό που αντιστοιχεί στο άθροισμα των κερδών από τις 11 εβδομάδες του έτους που βελτιστοποιήθηκαν. Το βέλτιστο αυτό κέρδος επετεύχθη με αύξηση της παραγωγής αξιοποιώντας τις ήδη υπάρχουσες συσκευές, δηλαδή χωρίς αύξηση της δυναμικότητας του εργοστασίου. Είναι κατά 150% μεγαλύτερο από το κέρδος που είχε η επιχείρηση εκείνες τις εβδομάδες από την παραγωγή που υπήρχε χωρίς την αξιοποίηση της μοντελοποίησης και των λογισμικών για βέλτιστο προγραμματισμό των διεργασιών παραγωγής. Παρατηρήθηκε ότι ο προγραμματισμός ανταποκρίνεται στις ιδιαιτερότητες της παραγωγής της συγκεκριμένης βιομηχανίας, όμως θα ήταν επιθυμητό να μην υπάρχουν τόσα changeover (π.χ. συσκευασία πιτών σε χαρτί και τελική συσκευασία) και κενοί χρόνοι μεταξύ ορισμένων διεργασιών που εκτελούνται στην ίδια συσκευή (π.χ. συσκευασία υποβρυχίου). Επίσης, είναι σημαντικό ότι

σχεδόν για όλα τα επιπλέον προϊόντα η περίσσεια αντιστοιχούσε κατά μέσο όρο στις 6 επιπλέον παρτίδες.

Από την εξέταση της περίπτωσης σύμπτυξης της ζήτησης δύο εβδομάδων και του προγραμματισμού τους σε χρονικό ορίζοντα μίας εβδομάδας, προέκυψε μείωση τόσο στον αριθμό των βρασμών που πρέπει να εκκινήσουν, όσο και στις μέρες λειτουργείας του εργοστασίου για την κάλυψη της εν λόγω ζήτησης. Αυτό έγινε λαμβάνοντας ως αντικειμενικό στόχο το κέρδος που προκύπτει από την ελάχιστη παραγωγή που απαιτείται για την κάλυψη της ζήτησης. Τέλος, μία από τις συσκευές θεωρήθηκε ότι αποτελεί σημείο συμφόρησης με βάση τα αποτελέσματα από τις περιπτώσεις των 11 εβδομάδων και διερευνήθηκαν οι αλλαγές που υφίσταται ο χρονοπρογραμματισμός από μία πιθανή αύξηση της δυναμικότητας της. Τα αποτελέσματα δεν ήταν τα αναμενόμενα, με το μέγιστο κέρδος για μεγαλύτερη δυναμικότητα (11,081€) να είναι σχεδόν ίσο με το μέγιστο κέρδος χωρίς αύξηση της δυναμικότητας (10,852 €). Έτσι, εκτιμάται ότι το στάδιο αυτό δεν δημιουργεί συμφόρηση, αλλά η περαιτέρω αύξηση του κέρδους εμποδίζεται από κάποιο από τα προηγούμενα στάδια (π.χ. βρασμός, ανάμιξη, συναρμολόγηση πιτών).

Τα αποτελέσματα, για τις περισσότερες περιπτώσεις που μελετήθηκαν, λήφθηκαν σε εύλογο υπολογιστικό χρόνο λίγων λεπτών και με μικρή απόκλιση από την ολική βέλτιστη λύση, με κάποιες εξαιρέσεις όπου χρειάστηκε χρόνος μεγαλύτερος της μίας ώρας. Αν και θεωρητικά το μοντέλο επιτυγχάνει αύξηση της παραγωγής και των κερδών, δεν είναι βέβαιο ότι ως έχει μπορεί να βρει απευθείας εφαρμογή στην πραγματική βιομηχανία, λόγω των απλοποιήσεων που έγιναν για την ανάπτυξή του και αβέβαιων αστάθμητων παραγόντων που δεν λήφθηκαν υπόψη αλλά επηρεάζουν την οργάνωση της παραγωγής σε πραγματικές συνθήκες.

5.2. Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Στην ενότητα αυτή παρατίθεται κάποιες προτάσεις για επιπλέον διερεύνηση ή επέκταση του προβλήματος για την βελτιστοποίηση της παραγωγής της βιομηχανίας τοπικών προϊόντων. Αυτές οι ιδέες θα μπορούσαν να δημιουργήσουν ένα πληρέστερο μοντέλο με δυνατότητα αξιοποίησης των αποτελεσμάτων του από τη βιομηχανία.

Αρχικά, με βάση της μελέτες περίπτωσης που έγιναν σε αυτή την εργασία, θα ήταν χρήσιμη η διερεύνηση των επιπτώσεων που θα είχε στο κέρδος ανά kg προϊόντος μία πιθανή επένδυση

σε νέες συσκευές και προσωπικό ή εισαγωγή υπερωριών στην εβδομαδιαία λειτουργία του εργοστασίου.

Επίσης, η μοντελοποίηση θα ήταν πιο ρεαλιστική αν λαμβάνονταν υπόψη περισσότερα από τα προϊόντα που παράγει η βιομηχανία, δεδομένα βοηθητικών παροχών και διαθεσιμότητας του εργατικού προσωπικού. Αυτό βέβαια θα αύξανε την πολυπλοκότητα του μοντέλου.

Θα μπορούσε, ακόμα, να γίνει επίλυση του προβλήματος με στόχο την ελαχιστοποίηση των χρόνων παραγωγής και των changeover μεταξύ των διαφορετικών προϊόντων, ίσως και σε έναν μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα, της τάξης του ενός μήνα, βάση στην οποία συνηθίζει να προγραμματίζει την παραγωγή της μία βιομηχανία.

Τέλος, είναι σημαντικό να εξεταστεί η επίδραση αβέβαιων παραμέτρων στον βέλτιστο χρονοπρογραμματισμό παραγωγής. Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε την επίλυση μεγάλων προβλημάτων με επαναπρογραμματισμό παραγωγής και τη διερεύνηση αποτελεσματικών τεχνικών επίλυσής τους (π.χ. τεχνικές διάσπασης του μοντέλου).

6. Βιβλιογραφία

Albornoz, M. V., González-Araya, M., Gripe, M. C. & Rodríguez, S. V., 2015. *A Mixed Integer Linear Program for Operational Planning in a Meat Packing Plant.*. In Proceedings of the International Conference on Operations Research and Enterprise Systems - ICORES: SCITEPRESS (Science and Technology Publications, Lda.).

Angizeh, F., Montero, H., Vedpathak, A. & Parvania, M., 2020. *Optimal production scheduling for smart manufacturers with application to food production planning.*:Computers & Electrical Engineering, 84, 106609. .

Brown, G., Keegan, J., Vigus, B. & Wood, K., 2001. *The Kellogg Company Optimizes Production, Inventory, and Distribution.*. Interfaces, 31, 1-15.

Doganis, P. & Sarimveis, H., 2007. *Optimal production scheduling for the dairy industry.*, Annals of Operations Research, 159(1), 315–331.

Elekidis, A. P., Corominas, F. & Georgiadis, M. C., 2019. *Production Scheduling of Consumer Goods Industries.*. s.l.:Industrial & Engineering Chemistry Research., 58(51), 23261-23275.

Entrup, M. L. και συν., 2005. *Mixed-Integer Linear Programming approaches to shelf-life-integrated planning and scheduling in yoghurt production.*. International Journal of Production Research., 43(23), 5071–5100.

Floudas, C. A. & Lin, X., 2004. *Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review.* Computers & Chemical Engineering., 28(11), 2109–2129.

Fruytier, P.-A. M. & Georgiadis, M. C., 2023. *Optimization of economic production scheduling under sales and operations constraints in consumer goods industries.* International Journal of Management Science and Engineering Management.

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

Georgiadis, G. P. και συν., 2019. *Optimal Production Scheduling in the Dairy Industries*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 58(16), 6537–6550.

Georgiadis, G. P., Mariño Pampín, B., Adrián Cabo, D. & Georgiadis, M. C., 2020. *Optimal production scheduling of food process industries.*: Computers & Chemical Engineering., 134.

Giannelos, N. F. & Georgiadis, M. C., 2003. *Efficient scheduling of consumer goods manufacturing processes in the continuous time domain.*:Computers & Operations Research, 30(9), 1367–1381.

Jonrinaldi, A. A. H. B. & Novira, R., 2019. *Chili sauce production planning model considering raw material availability: An application of Mixed Integer Linear Programming Method.*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 602, 012046.

Khorram Niaki, M., Nonino, F., Komijan, A. & Dehghani, M., 2017. *Food production in batchmanufacturing systems with multiple shared-common resources: a schedulingmodel and its application in the yoghurt industry*. Int. J. Services and Operations Management, 27(3), 345–365.

Kondili, E., Pantelides, C. C. & Sargent, R. W. H., 1993. *A generalalgorithm for short-term scheduling of batch operations. Part 1. MELP formulation.*. Computers and Chemical Engineering., 17, 211–227.

Kopanos, G. M., Kyriakidis, T. S. & Georgiadis, M. C., 2014. *New continuous-time and discrete-time mathematical formulations for resource-constrained project scheduling problems*. Computers & Chemical Engineering, 68, 96–106.

Kopanos, G. M. & Puigjaner, L., 2019. *Solving Large-Scale Production Scheduling and Planning in the Process Industries*. Springer Nature Switzerland AG., 9-70.

Kopanos, G. M., Puigjaner, L. & Georgiadis, M. C., 2011. *Resource-constrained production planning in semicontinuous food industries*. Computers & Chemical Engineering., 35(12), 2929–2944.

- Kopanos, G. M., Puigjaner, L. & Georgiadis, M. C., 2012. *Simultaneous production and logistics operations planning in semicontinuous food industries*. Omega., 40(5), 634–650.
- Marinelli, F., Nenni, M. & Sforza, A., 2007. *Capacitated lot sizing and scheduling with parallel machines and shared buffers: A case study in a packaging company*. Ann Oper Res 150, 177–192.
- Méndez, C. A., Cerdá, J., Grossmann, I. E. & Harjunkski, I., 2006. *State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes*. Computers & Chemical Engineering , 30(6-7), 913–946..
- Murphy, T. και συν., 2016. *Pharmaceutical manufacturing and the quality by design (QBD), process analytical technology (PAT) approach*. 1-7.
- Pantelides, C. C., 1994. *Unified frameworks for optimal process planning and scheduling*. In *Foundations of computer-aided process operations*.. New York: Cache publications., 253–274.
- Pinedo, M., 2012. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. 5th επιμ. New York: Springer.
- Polon, P. E., Gonçalves, C. M. A., de Matos Jorge, L. M. & Paraiso, P. R., 2009. *Optimal Production Scheduling for the Sausage Industry*. 10th International Symposium on Process Systems Engineering: Part A, 717–722.
- Soman, C. A., van Donk, D. P. & Gaalman, G. J. C., 2007. *Capacitated planning and scheduling for combined make-to-order and make-to-stock production in the food industry: An illustrative case study*. International Journal of Production Economics, 108(1-2), 191-199.
- Tirkeş, G., Çelebi, N. & Güray, C., 2021. *Developing a Multi-Stage Production Planning and Scheduling Model for a Small-Size Foodand Beverage Company*. Journal Européen des Systèmes Automatisés., 54(2), 273-281.

Παράρτημα Α

Παράρτημα Α – Δεδομένα ζήτησης παραγωγικής διαδικασίας

Πίνακας Α.1 Βασικά σενάρια ζήτησης για επιλεγμένες εβδομάδες κάθε μήνα (σε kg)

Προϊόν	Εβδομάδα εντός του μήνα											
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡΤ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
ZAX081	-	25	24.	53	-	-	49	32	30	-	-	-
ZAX082	-	25	-	-	18	-	24	-	-	-	-	-
ZAX083	-	-	-	42	25	13	-	104	37	45	-	104
ZAX091	--	25	76	-	49	-	107	77	73	-	-	-
ZAX092	-	-	34	168	80	-	-	-	-	70	102	-
ZAX093	-	30	-	24	41	-	35	-	-	-	-	-
ZAX280	-	-	-	-	-	19	-	52	-	-	-	-
ZAX337	-	-	-	46	-	36	-	-	-	63	-	-
ZAX220	-	-	360	-	-	382	-	370	-	-	375	-
ZAX222	-	-	-	-	351	-	380	370	375	-	-	-
ZAX349	-	360	-	368	1300	742	384	-	-	-	-	-
ZAX351	-	-	-	-	190	-	382	382	-	-	-	-

Πίνακας Α.2 Συνολική βασική ζήτηση για τους μήνες με τις ελάχιστες ζητήσεις (σε kg)

Προϊόν	Μήνας		
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΔΕΚ
ZAX-081	-	25	41
ZAX-082	-	25	-
ZAX-083	-	67	207
ZAX-091	-	25	63
ZAX-092	-	83	-
ZAX-093	-	30	-
ZAX-280	-	-	-
ZAX-337	-	-	-
ZAX-220	-	-	-
ZAX-222	-	-	-
ZAX-349	-	727	-
ZAX-351	-	-	-