

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**Γ. Π. Γεωργιάδης^{1,2}, Μ. Γεωργιάδης^{1,2,*}**¹Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα²Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Θεσσαλονίκη, Ελλάδα(*mgeorg@cperi.certh.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η εργασία αυτή παρουσιάζει μια συστηματική προσέγγιση μαθηματικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανίες τροφίμων. Συγκεκριμένα εξετάζεται η περίπτωση μια πραγματικής ισπανικής κονσερβοποιίας ψαριών. Κύριος στόχος της έρευνας αυτής είναι η ανάπτυξη ενός βέλτιστου προγράμματος παραγωγής, το οποίο ελαχιστοποιεί τον συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης της παραγωγής. Για το λόγο αυτό προτείνεται ένα μοντέλο μεικτού-ακέραιου προγραμματισμού (MILP) για να οριστούν βέλτιστα όλες οι αποφάσεις χρονοπρογραμματισμού. Επιπλέον εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος για τη διάσπαση του αρχικού προβλήματος σε μικρότερα προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού σε υπολογιστικό χρόνο αποδεκτό από τη βιομηχανία. Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της βιομηχανίας, όπως η διαθεσιμότητα ατμού και η διασφάλιση της ποιότητας του τελικού προϊόντος, αλλά και όλοι οι λειτουργικοί και τεχνικοί περιορισμοί της παραγωγής λαμβάνονται υπόψη. Η προτεινόμενη στρατηγική επίλυσης εφαρμόστηκε επιτυχώς σε ένα πραγματικό πρόβλημα, που αντιστοιχεί στην πιο απαιτητική εβδομάδα της βιομηχανίας υπο εξέταση, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των υπερωριών και τη συνολική αύξηση της αποδοτικότητας της μονάδας.

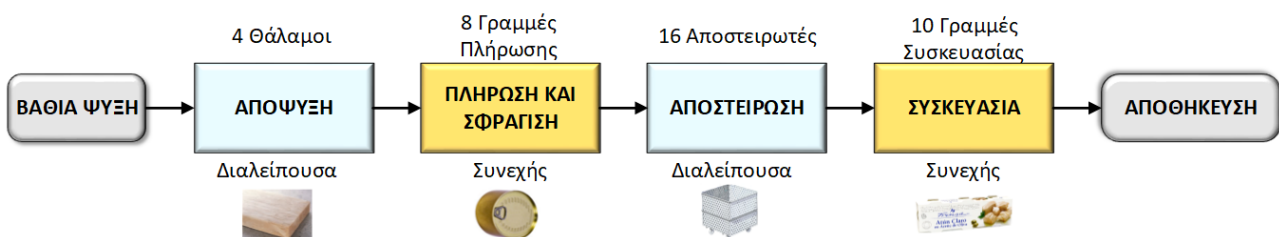
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αυξανόμενος ανταγωνισμός σε συνδυασμό με την παγκοσμιοποίηση των αγορών έχει μειώσει αισθητά τα περιθώρια κέρδους, επομένως οι βιομηχανίες οφείλουν να επενδύουν και να προσανατολίζονται προς τη βέλτιστη δυνατή λειτουργία τους, ώστε να διασφαλίσουν τη βιωσιμότητα τους. Ο βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής οδηγεί στην καλύτερη πάνω στο χρόνο αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων μιας μονάδας παραγωγής, και ως έτσι αποτελεί κύριο παράγοντα για την βελτίωση της αποδοτικότητας μιας βιομηχανίας. Σύμφωνα με την τρέχουσα βιομηχανική πρακτική όλες οι αποφάσεις σχετιζόμενες με τον χρονοπρογραμματισμό παραγωγής λαμβάνονται συνήθως εμπειρικά από τους χειριστές και τους μηχανικούς παραγωγής. Η αξιοποίηση υπολογιστικών εργαλείων θα μπορούσε να υποβοηθήσει το έργο των μηχανικών παραγωγής, οδηγώντας σε συστηματική βελτίωση των αποφάσεων τους και κατ' επέκταση σε αύξηση της παραγωγικότητας, των κερδών και της συνολικής ικανοποίησης των πελατών^[1]. Ιδιαίτερα στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον, ο μεγάλος όγκος παραγωγής σε συνδυασμό με τις σύνθετες εναλλακτικές συνταγές και τον αυξανόμενο αριθμό τελικών προϊόντων δυσχεραίνει σημαντικά το έργο των μηχανικών παραγωγής, οπότε η βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής αποκτά ακόμα σημαντικότερο ρόλο. Αναγνωρίζοντας τη σημασία της βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, η επιστημονική κοινότητα έχει ερευνήσει διεξοδικά το αντικείμενο τα τελευταία 30 χρόνια, προτείνοντας πολλαπλά μαθηματικά μοντέλα^[2]. Ωστόσο, παρά το πλούσιο ερευνητικό έργο, ελάχιστη προσοχή έχει δοθεί στην εφαρμογή υπολογιστικών τεχνικών χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε πραγματικές βιομηχανίες επεξεργασίας και παραγωγής τροφίμων^[3]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα προβλήματα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής λύνονται σε πολυωνυμικό μη ντετερμινιστικό χρόνο (NP). Συνεπώς, ο μεγάλος αριθμός τελικών προϊόντων σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα παραγωγής που συναντάται σε πραγματικά βιομηχανικά προβλήματα, καθιστά συχνά το πρόβλημα μη επιλύσιμο. Η επιστημονική κοινότητα έχει αναγνωρίσει την έλλειψη εφαρμογών σε

προβλήματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού^[3]. Πρόσφατα έχουν γίνει προσπάθειες για τη μείωση του χάσματος ανάμεσα σε θεωρία και βιομηχανική πρακτική. Για παράδειγμα, έχουν μελετηθεί πραγματικά προβλήματα της βιομηχανίας γιαουρτιού^[4], ενώ έχουν προταθεί μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού μεγάλης κλίμακας^[5,6]. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια νέα στρατηγική επίλυσης για το βέλτιστο χρονοπρογραμματισμό παραγωγής σε βιομηχανίες τροφίμων. Συγκεκριμένα, προτείνεται ένα μοντέλο MILP, ενώ χρησιμοποιείται μια μέθοδος αποδόμησης του αρχικού προβλήματος, για την επίλυση του σε χρόνο αποδεκτό από τη βιομηχανία.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στη μελέτη αυτή εξετάζεται η παραγωγή κονσερβοποιημένων θαλασσινών σε μια πραγματική βιομηχανική εγκατάσταση. Συγκεκριμένα, μελετάται η παραγωγή της Frinsa del Noroeste S.A., που βρίσκεται στην Ribeira της Ισπανίας, με χρήση πραγματικών βιομηχανικών δεδομένων παραγωγής. Η υπό εξέταση μονάδα παράγει περισσότερα από 400 τελικά προϊόντα με ημερήσια δυναμικότητα 3-5 εκατομμυρίων κονσερβών, καθιστώντας τη μία από τις μεγαλύτερες κονσερβοποιίες θαλασσινών της Ευρώπης. Η εγκατάσταση αποτελείται από πολλαπλά στάδια παραγωγής, μεικτής διαλείπουσας και συνεχούς λειτουργίας (Σχήμα 1). Οι πρώτες ύλες φθάνουν στην εγκατάσταση σε μορφή κατεψυγμένων μπλοκ ψαριού και ως εκ τούτου πρέπει να αποψυχθούν στους θαλάμους απόψυξης. Στη συνέχεια, τα μπλοκ κόβονται στο κατάλληλο μέγεθος και εισάγονται σε κονσέρβες, μαζί με τα υπόλοιπα συστατικά της συνταγής (άλμη, ελαιόλαδο, χυμός τομάτα κλπ.). Στο επόμενο στάδιο, οι σφραγισμένες κονσέρβες αποστειρώνονται προκειμένου να διασφαλιστεί η μικροβιολογική ποιότητα των τελικών προϊόντων. Τέλος, τα προϊόντα συσκευάζονται στην τελική τους μορφή (6αδες, 12αδες, κουτιά κλπ.) και αποθηκεύονται για να διανεμηθούν αργότερα στην αγορά.



Σχήμα 1. Ισοδύναμο διάγραμμα παραγωγικής διαδικασίας.

Το εξεταζόμενο εργοστάσιο χαρακτηρίζεται ως μια εγκατάσταση πολλαπλών προϊόντων (multiproduct), πολλαπλών βαθμίδων (multistage) με διαλείπουσες (απόψυξη, αποστείρωση) και συνεχείς διεργασίες (πλήρωση και σφράγιση, συσκευασία), όπου σε κάθε μία αξιοποιούνται πολλαπλές παράλληλες μονάδες. Επιπλέον, η μεγάλη ζήτηση παραγωγής και η υψηλή ευελιξία στην παραγωγή αυξάνουν σημαντικά την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης. Το στάδιο απόψυξης έχει υπερβολικά μεγάλη δυναμικότητα συγκριτικά με τα υπόλοιπα στάδια, επομένως δε χρειάζεται να συμπεριληφθεί στη μελέτη αυτή. Δυστυχώς, δεν υπάρχουν σαφή σημεία συμφόρησης και ως εκ τούτου όλα τα υπόλοιπα στάδια επεξεργασίας πρέπει να μοντελοποιηθούν. Ο βραχυπρόθεσμος ορίζοντας προγραμματισμού είναι 5 ημέρες, ενώ όλες οι μονάδες είναι διαθέσιμες 24 ώρες την ημέρα. Προβλέπονται χρόνοι αλλαγών που εξαρτώνται από τη σειρά παραγωγής των προϊόντων (changeover times). Όλοι οι περιορισμοί σχεδιασμού και λειτουργίας της εγκατάστασης, όπως ο περιορισμένος χρόνος αναμονής μεταξύ των σταδίων για να τη διασφάλιση της μικροβιολογικής ακεραιότητας των τελικών προϊόντων, λαμβάνονται υπόψη. Στόχο αποτελεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραγωγής (makespan), εξασφαλίζοντας την πλήρη ικανοποίηση της ζήτησης.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Οι βασικές αποφάσεις χρονοπρογραμματισμού αφορούν: α) τον αριθμό των παρτίδων προϊόντων που απαιτούνται για την ικανοποίηση των εισερχόμενων παραγγελιών, β) την κατανομή των παρτίδων προϊόντων σε μονάδες σε κάθε στάδιο επεξεργασίας, γ) την έναρξη και λήξη της κάθε διεργασίας σε κάθε στάδιο και δ) τη σχετική ακολουθία με την οποία παράγονται τα προϊόντα. Η τυπική βιομηχανική πρακτική στις περισσότερες βιομηχανίες τροφίμων, επιβάλλει τη λειτουργία των ενδιάμεσων διεργασιών διαλείπουσας λειτουργίας στη μέγιστη δυναμικότητά τους. Χρησιμοποιώντας την πλήρη χωρητικότητά των μονάδων των σταδίων διαλείπουσας λειτουργίας (της αποστείρωσης στη μελέτη αυτή), μειώνονται οι εναλλαγές παραγωγής μεταξύ των προϊόντων και παρατηρείται γενική αύξηση της παραγωγικότητας του εργοστασίου. Έτσι, ο αριθμός των παρτίδων κάθε προϊόντος που απαιτούνται για την ικανοποίηση της ζήτησης προκαθορίζεται με βάση τη δεδομένη ζήτηση, τα επίπεδα της αποθήκης και την δυναμικότητα των θαλάμων αποστείρωσης.

Το προτεινόμενο μοντέλο βασίζεται στο μαθηματικό πλαίσιο της γενικής προτεραιότητας (general-precedence framework), στο οποίο ορίζονται μεταβλητές προτεραιότητας για τη βελτιστοποίηση των εναλλαγών σε μια βιομηχανική παραγωγή. Λόγω του περιορισμένου χώρου, παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή του μοντέλου.

$$\sum_{j \in (S_{s,j} \cap PJ_{p,j})} Y_{p,s,j} = 1 \quad \forall p \in I_p^{in} : s \neq 2 \quad (1)$$

$$\sum_{j \in (S_{s,j} \cap PJ_{p,j})} \bar{Y}_{p,b,j} = 1 \quad \forall p \in I_p^{in}, b \in PB_{p,b} : s = 2 \quad (2)$$

$$L_{p,b,s} + \sum_{j \in (S_{s,j} \cap PJ_{p,j})} (proc_{p,b,j} \cdot Y_{p,s,j}) = C_{p,b,s} \quad \forall p \in I_p^{in}, b \in PB_{p,b} : s \neq 1 \quad (3)$$

$$L_{p,b,s} + ster_p = C_{p,b,s} \quad \forall p \in I_p^{in}, b \in PB_{p,b} : s = 2 \quad (4)$$

$$C_{p,b,s} + W_{p,b,s} = L_{p,b,s+1} \quad \forall p \in I_p^{in}, b \in PB_{p,b} : s < 3 \quad (5)$$

$$L_{p',b',s} \geq C_{p,b,s} + ch_{p,p',j}^{time} - M \cdot (1 - X_{p,p',s}) - M \cdot (2 - Y_{p,s,j} - Y_{p',j,s}) \quad (6)$$

$$\forall p \in I_p^{in}, p' \in I_{p'}^{in}, j \in (PPJ_{p,p',j} \cap S_{s,j}) : p < p', s \neq 2$$

$$L_{p',b',s} \geq C_{p,b,s} - M \cdot (1 - X_{p,p',s}) - M \cdot (2 - \bar{Y}_{p,b,j} - \bar{Y}_{p',b',j}), \quad (7)$$

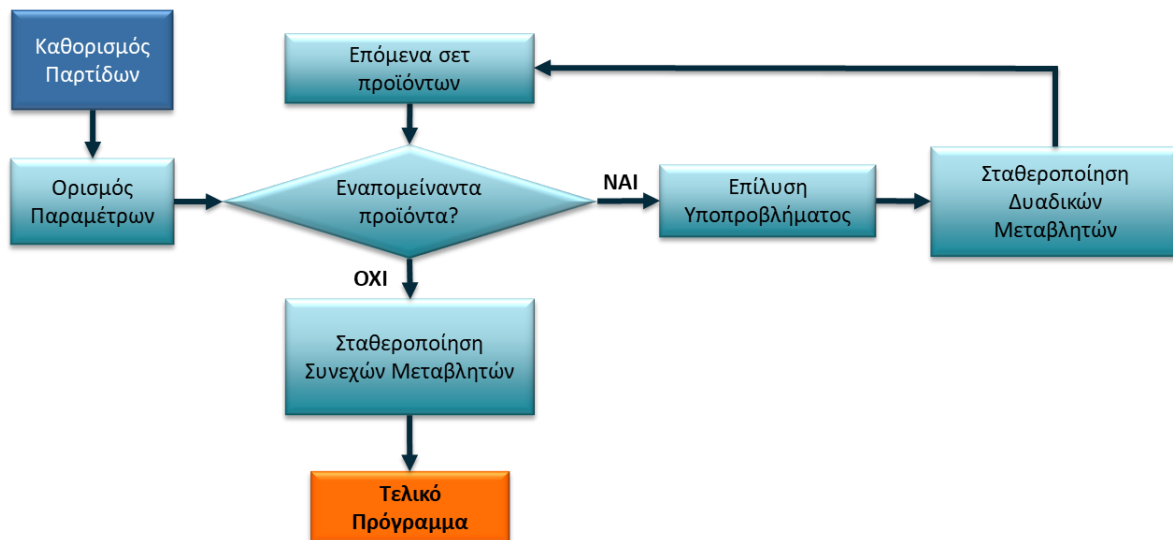
$$\forall p \in I_p^{in}, b \in PB_{p,b}, p' \in I_{p'}^{in}, b' \in PB_{p',b'}, j \in (PPJ_{p,p',j} \cap S_{s,j}) : p < p', s = 2$$

$$C_{p,b,s+1} - L_{p,b,s} \leq Q_p \quad \forall p \in I_p^{in}, b \in PB_{p,b} : s = 1 \quad (8)$$

$$C_{p,b,s} \leq due_p \quad \forall p \in I_p^{in}, b \in PB_{p,b} : s = 3 \quad (9)$$

$$C_{p,b,s}^{max} \geq C_{p,b,s} \quad \forall p \in I_p^{in}, b \in PB_{p,b} : s = 3 \quad (10)$$

Οι περιορισμοί (1) και (2) εγγυώνται ότι όλες οι παρτίδες προϊόντων p, b θα υποστούν επεξεργασία σε ακριβώς μία μονάδα j σε κάθε στάδιο s , χρησιμοποιώντας τις δυαδικές μεταβλητές κατανομής $Y_{p,j,s}$ και $\bar{Y}_{p,b,j}$. Οι περιορισμοί (3) και (4) επιβάλλουν τους περιορισμούς χρονισμού σε όλα τα στάδια παραγωγής. Συγκεκριμένα, δηλώνουν ότι η ολοκλήρωση μιας διεργασίας $C_{p,b,s}$ είναι ίση με την έναρξη της διεργασίας $L_{p,b,s}$ συν τον απαιτούμενο χρόνο επεξεργασίας. Για το συγχρονισμό των σταδίων, χρησιμοποιούνται οι περιορισμοί (5). Η συνεχής μεταβλητή $W_{p,b,s}$ ορίζει τον χρόνο αναμονής μεταξύ κάθε σταδίου. Οι περιορισμοί αλληλουχίας μεταξύ παρτίδων προϊόντων σε κάθε στάδιο απεικονίζονται στους περιορισμούς (6) και (7). Η μεταβλητή προτεραιότητας $X_{p,p',s}$ ενεργοποιείται όταν το προϊόν p παράγεται πριν το προϊόν p' . Συγκεκριμένα, οι περιορισμοί (6) δηλώνουν ότι εάν ένα προϊόν p επεξεργαστεί πριν από το p' και επεξεργάζονται από την ίδια μονάδα j , τότε ο χρόνος έναρξης των p', b' πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το χρόνο ολοκλήρωσης των p, b , συν τον απαιτούμενο χρόνο αλλαγής. Ομοίως, οι περιορισμοί (7) επιβάλλουν τους περιορισμούς αλληλουχίας στο στάδιο της αποστείρωσης. Οι περιορισμοί (8) θέτουν ένα άνω όριο (Q_p) στο μέγιστο χρόνο αναμονής μεταξύ του σταδίου πλήρωσης και σφράγισης και του σταδίου αποστείρωσης. Αυτό το όριο εξασφαλίζει τη μικροβιολογική ακεραιότητα του τελικού προϊόντος. Για να την ικανοποίηση των παραγγελιών χρησιμοποιούνται οι περιορισμοί (9). Ο στόχος του μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραγωγής C_{max} και εκφράζεται με τους περιορισμούς (10).



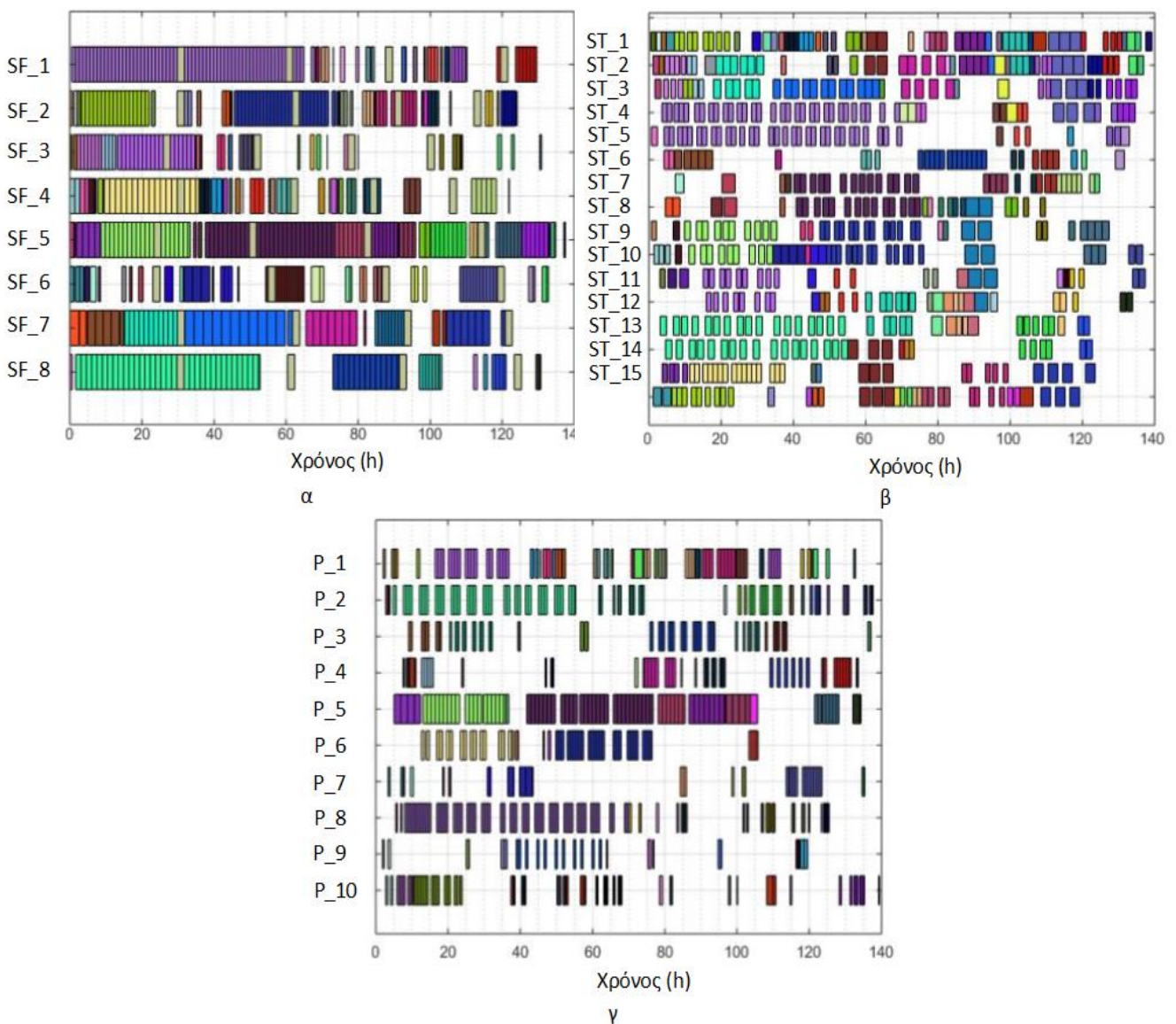
Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης στρατηγική επίλυσης

Η πολυπλοκότητα του εξεταζόμενου φυτού είναι τέτοια που μια ολιστική μέθοδος δεν μπορεί να λύσει το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού σε χρόνο αποδεκτό από τη βιομηχανία. Επομένως, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος αποδόμησης του αρχικού προβλήματος σε υποπροβλήματα μικρότερης υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Ο αλγόριθμος που προτείνεται διασπά το πρόβλημα βάσει των εισερχόμενων παραγγελιών, συγκεκριμένα σε κάθε επανάληψη επιλύεται το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού για έναν συγκεκριμένο αριθμό προϊόντων (π.χ. 10 προϊόντα σε κάθε επανάληψη). Το σχήμα 2 απεικονίζει το διάγραμμα ροής της προτεινόμενης στρατηγικής λύσης. Αρχικά, καθορίζεται ο απαιτούμενος αριθμός των παρτίδων για κάθε παραγγελία. Στη συνέχεια, ορίζονται οι απαιτούμενοι παράμετροι του αλγορίθμου αποδόμησης του προβλήματος, όπως ο αριθμός των προϊόντων που συμπεριλαμβάνεται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε κάθε επανάληψη. Έπειτα, το μοντέλο επιλύεται για την καθορισμένο υποπρόβλημα και σταθεροποιούνται μόνο οι δυαδικές μεταβλητές (κατανομή

μονάδων, ακολουθία). Όταν το πρόγραμμα παραγωγής έχει καθοριστεί για όλα τα προϊόντα σταθεροποιούνται οι συνεχείς μεταβλητές (χρόνοι έναρξης και ολοκλήρωσης) και εξάγεται το βελτιστοποιημένο πλήρες πρόγραμμα.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μελετήθηκε ένα βιομηχανικό πρόβλημα χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα από το εργοστάσιο της Frinsa. Εξετάζεται η παραγωγή 120 τελικών προϊόντων, η οποία αντιστοιχεί σε μια πραγματική εβδομαδιαία ζήτηση από μια περίοδο εντατικής παραγωγής της μονάδας. Για την αντιμετώπιση αυτού του σύνθετου προβλήματος χρονοπρογραμματισμού, εφαρμόστηκε η προτεινόμενη στρατηγική επίλυσης. Σε κάθε επανάληψη, βελτιστοποιείται το πρόγραμμα παραγωγής για 20 παραγγελίες προϊόντων. Το μοντέλο MILP υλοποιήθηκε στο περιβάλλον GAMS 25.1 και λύθηκε σε έναν υπολογιστή με επεξεργαστή Intel Core i7 @ 3.4Gz και μνήμη RAM 16GB, χρησιμοποιώντας τον επιλυτή CPLEX 12.0. Η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται για όλες τις επαναλήψεις της προτεινόμενης στρατηγικής λύσης, ενώ ο συνολικός χρόνος επίλυσης είναι μόλις 15 λεπτά. Το σχήμα 3 απεικονίζει το πλήρες βελτιστοποιημένο πρόγραμμα για όλες τις μονάδες κάθε σταδίου παραγωγής. Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε μια παρτίδα ενός προϊόντος.



Σχήμα 3. Διάγραμμα Gantt για όλα τα στάδια παραγωγής: α) Στάδιο πλήρωσης και σφράγισης, β) Στάδιο αποστείρωσης, γ) Στάδιο συσκευασίας.

Συγκρίνοντας το βελτιστοποιημένο πρόγραμμα παραγωγής με αυτό που προτάθηκε από τους μηχανικούς παραγωγής, μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα. Για την ικανοποίηση της ζήτησης, το πρόγραμμα των μηχανικών παραγωγής της Frinsa επέβαλλε την λειτουργία της εγκατάστασης καθ' όλη της διάρκειας του Σαββατοκύριακου. Εν' αντιθέσει το βελτιστοποιημένο πρόγραμμα που εξήχθη από την προτεινόμενη στρατηγική επίλυσης, μειώνει σημαντικά τις απαιτούμενες βάρδιες, οπότε και το συνολικό κόστος λειτουργίας της μονάδας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αυτό το έργο παρουσιάζει το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μιας βιομηχανίας τροφίμων μεγάλης κλίμακας. Ειδικότερα, βελτιστοποιείται το πρόγραμμα παραγωγής για όλα τα στάδια μιας κονσερβοποιίας. Το εξεταζόμενο βιομηχανικό πρόβλημα παρουσιάζει σημαντική πολυπλοκότητα, λόγω των πολλαπλών σταδίων που χαρακτηρίζονται από μεικτές διεργασίες διαλείπουσας και συνεχούς λειτουργίας και κοινούς πόρους, τον μεγάλο αριθμό των τελικών προϊόντων και τους διάφορους περιορισμούς λειτουργίας, σχεδιασμού και ποιότητας. Αυτή η δομή (μία ή πολλαπλές διαλείπουσες ή συνεχείς διεργασίες ακολουθούμενες από ένα στάδιο συσκευασίας) συναντάται στις περισσότερες βιομηχανίες τροφίμων και καταναλωτικών αγαθών, επομένως η στρατηγική λύσης που παρουσιάζεται μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε πολλά βιομηχανικά προβλήματα. Έχει αποδειχθεί ότι η προτεινόμενη στρατηγική λύσης μπορεί να προγραμματίσει κατά βέλτιστο τρόπο ακόμη και τις πιο απαιτητικές εβδομάδες της εξεταζόμενης βιομηχανίας σε αποδεκτό χρόνο, οδηγώντας σε μείωση των υπερωριών. Η προτεινόμενη στρατηγική μπορεί να αποτελέσει τον πυρήνα ενός εργαλείου προγραμματισμού το οποίο μπορεί να διευκολύνει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τον χρονοπρογραμματισμό της παραγωγής σε βιομηχανίες τροφίμων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Improved energy and resource efficiency by better coordination of production in the process industries [CoPro]» και χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του προγράμματος έρευνας και καινοτομίας Horizon 2020 (συμφωνία επιχορήγησης: 723575).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Harjunoski, I., 2016. Deploying scheduling solutions in an industrial environment. *Comput. Chem. Eng.* 91, 127–135.
- [2] Méndez, C.A., Cerdá, J., Grossmann, I.E., Harjunoski, I., Fahl, M., 2006. State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. *Comput. Chem. Eng.* 30, 913–946.
- [3] Harjunoski, I., Maravelias, C.T., Bongers, P., Castro, P.M., Engell, S., Grossmann, I.E., Hooker, J., Méndez, C., Sand, G., Wassick, J., 2014. Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods. *Comput. Chem. Eng.* 62, 161–193.
- [4] Kopanos, G.M., Puigjaner, L., Georgiadis, M.C., 2010. Optimal Production Scheduling and Lot-Sizing in Dairy Plants : The Yogurt Production Line. *Ind. Eng. Chem. Res.* 49, 701–718.
- [5] Aguirre, A.M., Liu, S., Papageorgiou, L.G., 2017. Mixed Integer Linear Programming Based Approaches for Medium-Term Planning and Scheduling in Multiproduct Multistage Continuous Plants. *Ind. Eng. Chem. Res.* 56, 5636–5651.
- [6] Baumann, P., Trautmann, N., 2014. A hybrid method for large-scale short-term scheduling of make-and-pack production processes. *Eur. J. Oper. Res.* 236, 718–735.