

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ**A. Π. Ελεκίδης^{1,2}, F. Corominas³ M. X. Γεωργιάδης^{1,2*}**¹Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 54124 Ελλάδα²Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Θεσσαλονίκη, 57001, Ελλάδα³Procter & Gamble, Temselaan 100, 1853 Strombeek-Bever, Belgium(*mgeorg@auth.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία αυτή εξετάζεται ο βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός παραγωγής μιας πραγματικής βιομηχανικής μονάδας καταναλωτικών αγαθών μεγάλης κλίμακας. Το πρόβλημα επικεντρώνεται στο συνεχές στάδιο της συσκευασίας το οποίο αποτελεί το πιο βραδύ στάδιο παραγωγής της υπό μελέτη βιομηχανίας. Οι πολλαπλές γραμμές συσκευασίας, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα και ο μεγάλος αριθμός τελικών προϊόντων που παράγονται αυξάνουν την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Συνεπώς για τη μελέτη του προβλήματος, προτείνεται η χρήση ενός μοντέλου Μεικτού-Ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP), σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο ο οποίος βασίζεται στη διάσπαση του αρχικού προβλήματος σε μικρότερα υποπροβλήματα (decomposition-based algorithm). Το μοντέλο βασίζεται σε μια σειρά από λογικούς αλλά και τεχνικούς περιορισμούς, αντιπροσωπευτικούς της βιομηχανικής μονάδας. Επιπλέον περιορισμοί, που αφορούν το συνεχές στάδιο παραγωγής των ενδιάμεσων προϊόντων καθώς και περιορισμοί για τους χρόνους παράδοσης των προϊόντων, συμπεριλαμβάνονται στο προαναφερόμενο μοντέλο προκειμένου να διασφαλισθεί η κατασκευή εφικτών προγραμμάτων παραγωγής. Οι κύριες αντικειμενικές συναρτήσεις που μελετώνται αφορούν την ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης της παραγωγής καθώς και την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου μη λειτουργίας των γραμμών συσκευασίας. Εξετάζονται διάφορα σενάρια ζήτησης και κατασκευάζονται προγράμματα παραγωγής για πάνω από 130 τελικά προϊόντα που παράγονται εβδομαδιαίως. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης και το συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο οδηγούν σε σημαντική μείωση του χρόνου παραγωγής και συνεπώς της παραγωγικότητας της μονάδας. Η προτεινόμενη αλγοριθμική προσέγγιση μπορεί να αποτελέσει την βάση για την αντιμετώπιση απρόσμενων γεγονότων της μονάδας μέσω του βέλτιστου επαναπρογραμματισμού παραγωγής.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Λόγω της ραγδαίας αύξησης του ανταγωνισμού, οι βιομηχανίες προσανατολίζονται όλο και περισσότερο στη βέλτιστη λειτουργία τους ώστε να εξασφαλίσουν τη βιωσιμότητά τους. Η βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες για την εύρυθμη λειτουργία μιας βιομηχανικής μονάδας, στοχεύοντας στη βέλτιστη χρήση/κατανομή του μηχανολογικού εξοπλισμού και στην κάλυψη της ζήτησης^[3]. Παρά το εκτενές ερευνητικό έργο σε προβλήματα με σημαντικό αριθμό προϊόντων^[2], λίγες λύσεις έχουν προταθεί για ρεαλιστικά προβλήματα πολύπλοκων βιομηχανικών μονάδων οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλό αριθμό τελικών και ημι-έτοιμων προϊόντων και πλήθος σχεδιαστικών και λειτουργικών περιορισμών. Επιπροσθέτως, η πληθώρα απρόσμενων γεγονότων που λαμβάνει χώρα σε μία βιομηχανική μονάδα, όπως οι ακυρώσεις παραγγελιών, οι πιθανές βλάβες του εξοπλισμού ή ελλείψεις πρώτων υλών, εντάσσουν τις βιομηχανικές μονάδες σε ένα δυναμικό περιβάλλον το οποίο δημιουργεί την ανάγκη για τροποποιήσεις του αρχικού προγράμματος παραγωγής κατά τη διάρκεια της εβδομάδας^[1]. Στην εργασία αυτή εξετάζεται ένα πραγματικό πρόβλημα μιας βιομηχανικής μονάδας παραγωγής συσκευασμένων καταναλωτικών προϊόντων. Προτείνεται η

χρήση ενός μοντέλου Μεικτού-Ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP), σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο ο οποίος βασίζεται στη διάσπαση του αρχικού προβλήματος σε μικρότερα υποπροβλήματα (decomposition-based algorithm).

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Αρχικά προτείνεται ένα νέο μαθηματικό μοντέλο Μεικτού-Ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μιας μονάδας καταναλωτικών αγαθών. Το μαθηματικό μοντέλο επικεντρώνεται στη γραμμή συσκευασίας λαμβάνοντας ταυτόχρονα αποφάσεις και για τα προηγούμενα στάδια παραγωγής. Περισσότερα από 300 διαφορετικά τελικά προϊόντα προγραμματίζονται εβδομαδιαίως σε παράλληλες γραμμές συσκευασίας. Οι χρόνοι μετάβασης μεταξύ των διαφόρων προϊόντων διαφέρουν, ανάλογα με το μέγεθος και το χρώμα της συσκευασίας, την ετικέτα κλπ. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο αποτελείται από μια σειρά μαθηματικών περιορισμών που περιγράφονται στη συνέχεια:

$$\sum_{j \in J_i} Y_{i,j} = 1 \quad \forall i \quad (1)$$

$$\sum_{i', i' \neq i} X_{i',i,j} \leq Y_{i,j} \quad \forall i, j \in J_i \quad (2)$$

$$\sum_{i', i' \neq i} X_{i,i',j} \leq Y_{i,j} \quad \forall i, j \in J_i \quad (3)$$

$$\sum_{i, i \in J_i} \sum_{i', i' \neq i, i' \in J_i} X_{i',i,j} + 1 = \sum_{i, i \in J_i} Y_{i,j} \quad \forall j \quad (4)$$

$$C_{i'} \geq C_i + T_{i'} + X_{i,i',j} \text{changeover}_{i,i'} - \text{Hor}(1 - X_{i,i',j}) \quad \forall i, i' \neq i, j \in (i_j \cap i'_j) \quad (5)$$

$$C_{i'} \leq C_i + T_{i'} + X_{i,i',j} \text{changeover}_{i,i'} - \text{Hor}(1 - X_{i,i',j}) \quad \forall i, i' \neq i, j \in (i_j \cap i'_j) \quad (6)$$

$$\sum_j \sum_{i, i \in J_i} \sum_{\substack{i', i' \neq i, i' \in J_i \\ \text{formula}_i \neq \text{formula}_{i'}}} (XX_{i',i,j}) \leq \text{Limit} \quad (7)$$

$$C_i \leq \text{DDATE}_i \quad (8)$$

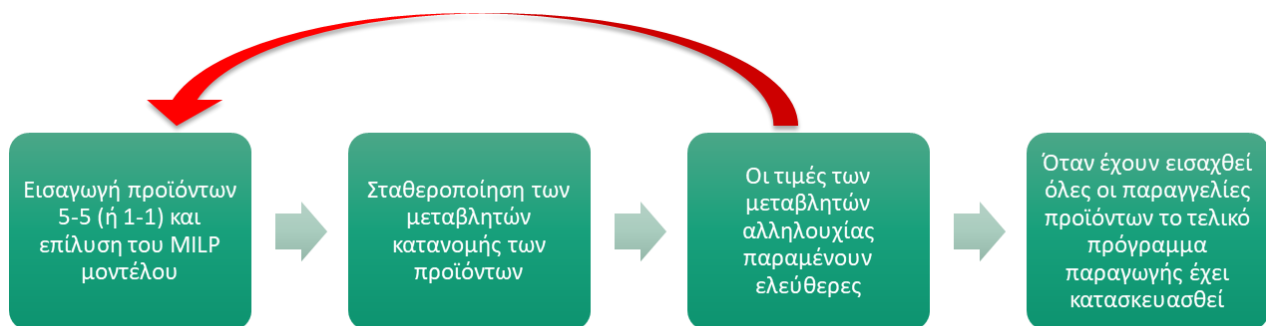
$$\min \sum_j \sum_{i, i \in J_i} \sum_{\substack{i', i' \neq i, i' \in J_i \\ \text{formula}_i \neq \text{formula}_{i'}}} XX_{i,i',j} \text{changeover}_{i,i'} \quad (9)$$

Εισάγεται η δυαδική μεταβλητή $X_{i',i,j}$ για να ορίσουμε την τοπική άμεση αλληλουχία μεταξύ δύο προϊόντων i και i' . Η δυαδική μεταβλητή παίρνει την τιμή 1 εάν το προϊόν $i \in I$ επεξεργάζεται αμέσως μετά το προϊόν $i' \in I$ στη συσκευή $j \in J$. Οι περιορισμοί (2) και (3) διασφαλίζουν ότι εάν το προϊόν $i \in I$ έχει καταναλωθεί στη γραμμή συσκευασίας $j \in J$ το πολύ ένα προϊόν παράγεται πριν και μετά από αυτό. Σε περίπτωση που ένα προϊόν παράγεται πρώτο ή τελευταίο, τότε δεν παράγεται κάποιο προϊόν πριν ή μετά αντιστοίχα. Σύμφωνα με τον περιορισμό (4), ο συνολικός αριθμός των ακολουθιών σε μια συσκευή $j \in J$, πρέπει να είναι ίσος με τον συνολικό αριθμό παραγόμενων εντολών μείον ένα. Οι περιορισμοί (5) και (6) καθορίζουν το χρόνο εκκίνησης της παραγωγής των προϊόντων. Ο χρόνος ολοκλήρωσης $C_{i'}$ μιας παραγγελίας προϊόντος i' πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το χρόνο ολοκλήρωσης του προϊόντος που παράγεται προηγουμένως στην ίδια συσκευή, όπως και από το χρόνο επεξεργασίας $T_{i'}$ και τον αντίστοιχο χρόνο μετάβασης, που εκφράζεται από την παράμετρο $\text{changeover}_{i,i'}$. Οι περιορισμοί (5) και (6) ισχύουν μόνο αν η δυαδική μεταβλητή $X_{i,i',j}$ ισούται με 1. Επιπλέον, όπως περιγράφεται από τον περιορισμό (7), στο στάδιο της παραγωγής των ενδιάμεσων προϊόντων, λόγω του ότι δεν υπάρχουν οι απαραίτητοι

πόροι, ο συνολικός αριθμός των μεταβάσεων δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα ανώτατο όριο, το οποίο εκφράζεται από το όριο *Limit*. Ο περιορισμός (8) αναγκάζει τον χρόνο ολοκλήρωσης μιας παραγγελίας C_i , να είναι μικρότερος ή ίσος από την προθεσμία παράδοσης της, που εκφράζεται από την παράμετρο $DDATE_i$. Η αντικειμενική λειτουργία του μοντέλου περιγράφεται από τον περιορισμό (9), οποίος εκφράζει την ελαχιστοποίηση των χρόνων μετάβασης και του χρόνου που οι συσκευές παραμένουν ανενεργές.

ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

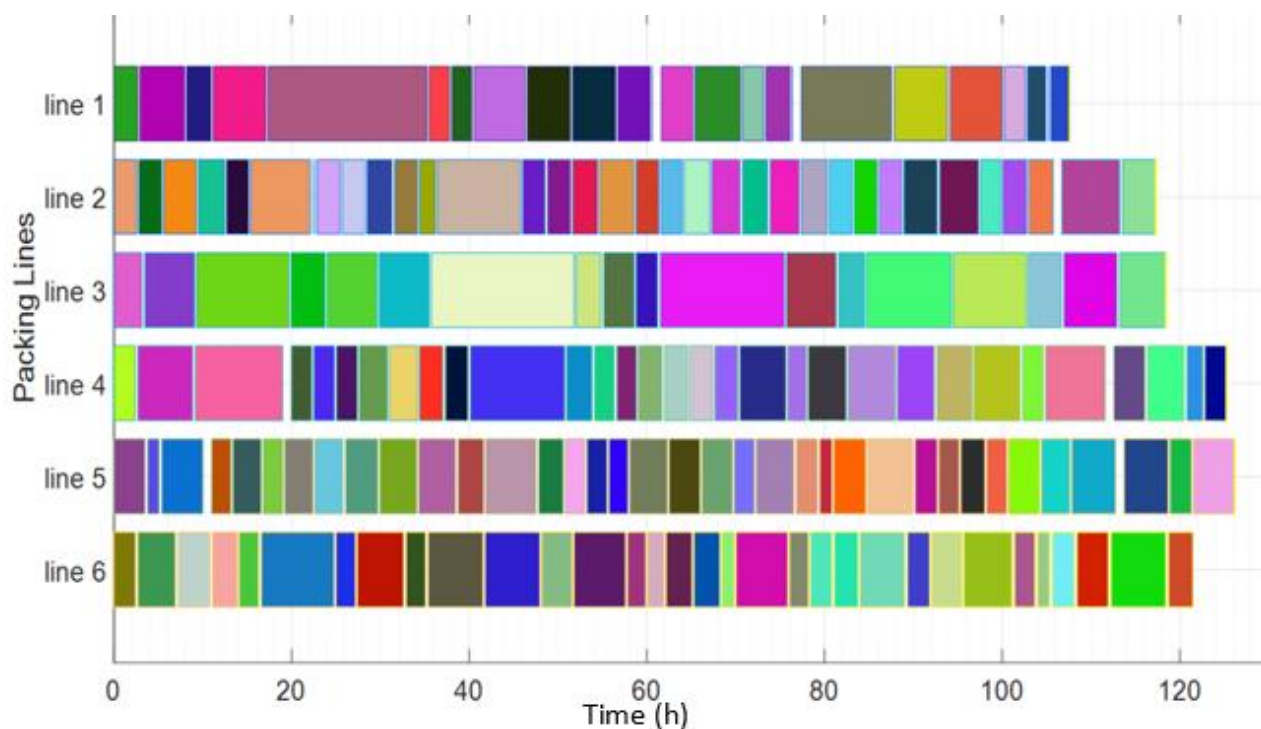
Το αρχικό πρόβλημα μεγάλης κλίμακας διασπάται σε μικρότερα υπο-προβλήματα. Σε κάθε επανάληψη, εισάγεται ένα υποσύνολο των συνολικών παραγγελιών των προϊόντων. Τα μικρότερα υποπροβλήματα είναι πολύ πιο εύκολο να λυθούν, καθώς η πολυπλοκότητα τους είναι σημαντικά μικρότερη από το συνολικό πρόβλημα. Μετά την επίλυση του κάθε υποπροβλήματος, οι τιμές των μεταβλητών κατανομής $Y_{i,j}$, των εισαγόμενων προϊόντων παραμένουν σταθερές. Αντίθετα, οι μεταβλητές C_i και οι δυαδικές μεταβλητές αλληλουχίας $X_{i,i',j}$ παραμένουν ελεύθερες. Συνεπώς για κάθε προϊόν αποφασίζεται η γραμμή παραγωγής που θα παραχθεί αλλά η σειρά αλληλουχίας βετιστοποιείται εκ νέου σε κάθε επανάληψη. Το τελικό πρόγραμμα παραγωγής δημιουργείται όταν έχουν εισαχθεί όλα τα προϊόντα. Σε κάθε επανάληψη, στοχεύεται μια λύση με 0% απόκλιση από τη βέλτιστη. Ωστόσο, οι βιομηχανικές απαιτήσεις επιβάλλουν τη χρήση ενός ανώτατου ορίου στο συνολικό υπολογιστικό χρόνο. Ως εκ τούτου, έχει οριστεί ένα χρονικό όριο 5 λεπτών για τη λύση κάθε υποπροβλήματος^[4]. Οι πιθανές περιόδους συντήρησης των υσκευών του εργοστασίου επίσης λαμβάνονται υπόψη εισάγοντας στο πρόγραμμα παραγωγής παραγγελίες «ψευδο-προϊόντων» με διάρκεια παραγωγής ίση με το χρόνο συντήρησης. Τα συγκεκριμένα «ψευδο-προϊόντα» εισάγονται πρώτα στην επαναληπτική διαδικασία του αλγορίθμου.



Σχήμα 1. Περιγραφή της στρατηγικής επίλυσης του προβλήματος

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για την μελέτη της εφαρμοσιμότητας και της αποδοτικότητας της προτεινόμενης στρατηγικής επίλυσης μελετήθηκε ένα αντιπροσωπευτικό βιομηχανικό πρόβλημα που περιλαμβάνει 132 τελικά προϊόντα και 6 γραμμές συσκευασίας. Τα δεδομένα ζήτησης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσκευών αφορούν μία πραγματική βιομηχανική μονάδα καταναλωτικών αγαθών. Η προτεινόμενη τεχνική επίλυσης εφαρμόστηκε στο εργαλείο βελτιστοποίησης GAMS χρησιμοποιώντας ως μέθοδο επίλυσης την CPLEX 12.0.



Σχήμα 2. Ενδεικτικό διάγραμμα Gantt με τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου επίλυσης

Συγκρίνοντας το πρόγραμμα παραγωγής που προκύπτει από την επίλυση της συγκεκριμένης στρατηγικής παρατηρείται μία μείωση του συνολικού χρόνου μετάβασης στο σύνολο των γραμμών παραγωγής ίση με 21.9%. Αυτή η μείωση μπορεί να μεταφραστεί επιπλέον σε αύξηση της παραγωγικότητας του εργοστασίου κατά 1.47%.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μία στρατηγική επίλυσης για τη μελέτη του προβλήματος του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μίας μονάδας συσκευασμένων καταναλωτικών αγαθών μεγάλης κλίμακας. Η προτεινόμενη στρατηγική βασίζεται στο συνδυασμό ενός μοντέλου Μεικτού-Ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και σε έναν αλγόριθμο διάσπασης του αρχικού προβλήματος σε επιμέρους υποπροβλήματα. Το πρόβλημα επικεντρώνεται στο συνεχές στάδιο της συσκευασίας το οποίο αποτελεί το πιο βραδύ στάδιο παραγωγής της υπό μελέτη βιομηχανίας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να οδηγήσει σε αποτελεσματικές λύσεις, κοντά στη βέλτιστη και να επιφέρει σημαντική μείωση του χρόνου παραγωγής, έως και 1.47%.

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] Aguirre, A., Liu, S. and Papageorgiou, L. (2017). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(19), pp.5636-5651.
- [2] Giannelos, N. and Georgiadis, M. (2002). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(9), pp.2178-2184.
- [3] Méndez, C., Cerdá, J., Grossmann, I., Harjunkoski, I. and Fahl, M. (2006). *Computers & Chemical Engineering*, 30(6-7), pp.913-946.
- [4] G.M. Kopanos, C.A. Méndez, L. Puigjaner, 2010, *European Journal of Operational Research*, 207, 2, 718-735