



**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ελαχιστοποίηση συνολικού χρόνου παραγωγής με
αλληλοεξαρτώμενους χρόνους εναλλαγής σε μονάδα πολλαπλών
προϊόντων τροφίμων**

της

Σαββάκη Βασιλείας

Εισηγητής Καθηγητής

Αλέξανδρος Κουλούρης

Θεσσαλονίκη,

Δεκέμβριος 2014

Περίληψη

Μία τυπική βιομηχανία τροφίμων παράγει σε καθημερινή βάση και μέσα από κοινούς παραγωγικούς πόρους ένα εύρος προϊόντων που διαφοροποιούνται ως προς την φύση τους και την συσκευασία τους. Η εναλλαγή των προϊόντων αυτών στην γραμμή παραγωγής συνεπάγεται την ύπαρξη νεκρών χρόνων για τον καθαρισμό ή την ρύθμιση των μηχανών. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, οι χρόνοι εναλλαγής εξαρτώνται από την σειρά εκτέλεσης των προϊόντων, άρα υπάρχει περιθώριο μείωσής τους με κατάλληλη επιλογή της αλληλουχίας παραγωγής των προϊόντων.

Στην παρούσα εργασία μελετάται το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης ακολουθίας εκτέλεσης προϊόντων σε μία μονάδα πολλαπλών προϊόντων μοντέλου συνεχούς ροής (flowshop) με ένα ή πολλαπλά στάδια παραγωγής και στο πλαίσιο του χρονοπρογραμματισμού της παραγωγής. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των νεκρών χρόνων κι επομένως του συνολικού χρόνου παραγωγής.

Το πρόβλημα αποτυπώθηκε μαθηματικά ως πρόβλημα βελτιστοποίησης αντίστοιχο του, δημοφιλούς στην βιβλιογραφία, προβλήματος του Πλανόδιου Πωλητή και επιλύθηκε με την βοήθεια αλγορίθμου γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού. Στην μορφοποίηση του προβλήματος λήφθηκαν υπόψη οι ιδιαιτερότητες της βιομηχανίας τροφίμων όπως η χρονική επικάλυψη των σταδίων παραγωγής και η αδυναμία (για λόγους υγιεινής και ασφάλειας) αποθήκευσης ημικατεργασμένων προϊόντων ανάμεσα στα στάδια. Το μαθηματικό πρόβλημα καταστρώθηκε και επιλύθηκε στην γλώσσα του υπολογιστικού πακέτου MATLAB ενώ οι παραγόμενες λύσεις προσομοιάστηκαν με την βοήθεια του λογισμικού πακέτου προγραμματισμού παραγωγής SchedulePro.

Επιλύθηκαν δύο μελέτες περιπτώσεων με δεδομένα που καταγράφηκαν από πραγματικές βιομηχανίες: μία γραμμή υποσυσκευασίας φυτοφαρμάκων με ένα στάδιο παραγωγής και μία γραμμή εμφιάλωσης προϊόντων γάλακτος με πολλαπλά στάδια. Και στις δύο περιπτώσεις δείχτηκε ότι η εύρεση της βέλτιστης ακολουθίας είναι εφικτή για τον αριθμό των προϊόντων που διαχειρίζεται μία τυπική βιομηχανία, όχι όμως πάντα προφανής. Η επιστημονική προσέγγιση, επομένως, στον χρονοπρογραμματισμό της εκτέλεσης προϊόντων ή παραγγελιών σε μία βιομηχανία μπορεί να συμβάλλει στην μείωση των νεκρών χρόνων και την συστηματική βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας.

Minimization of total production time in a multi-product food facility with sequence-dependent changeover times

Savvaki Vasilia

Alexander Technological Education Institute, Dept. of Food Technology

Abstract

A typical food plant produces, on a daily basis and through the same resources, a variety of products that differ in their type and packing size. Switching products on a line introduces production dead times due to machine cleanings or changeovers. In the majority of the cases, these dead times are sequence-dependent which means that it is possible to reduce them if products are properly ordered for production.

In this thesis, the problem of finding the optimal production sequence in a multi-product flowshop with a single or multiple stages is being investigated in the context of production scheduling. The objective is to minimize dead times and, consequently, the total production makespan.

The problem was depicted mathematically as an optimization problem equivalent to the, popular in literature, Travelling Salesman Problem and was solved with the use of a mixed integer linear programming algorithm. The idiosyncrasies of food production such as the time overlapping between production stages and the inability (due to safety and hygienic reasons) to store semi-ready products between stages were taken into account in formulating the problem. The mathematical problem was coded and solved in the MATLAB mathematical language while the produced optimal schedules were simulated with the use of SchedulePro, a finite-capacity production scheduling software.

The solution process was tested on two real-world industrial case studies: a pesticide packaging line with one production stage and a milk bottling facility with multiple stages. In both cases, it was demonstrated that finding the optimal product sequence is feasible (for a number of products typical for a process industry) but the produced optimal sequence is not always obvious. The adoption of a mathematical approach in scheduling products or customer orders could result in the minimization of dead times and the systematic improvement of the production process.

Ευχαριστίες

Κατά την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω το βαθύ μου ευχαριστώ σε ορισμένους ανθρώπους, η συμβολή των οποίων ήταν ουσιαστική για ό,τι θετικό απέκτησα σε αυτό το Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών.

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Αλέξανδρο Κουλούρη, για την εμπιστοσύνη, τη διάθεση και την υπομονή που μου έδειξε από την αρχή έως σήμερα. Η άρτια καθοδήγησή του και ο προσωπικός χρόνος που μου αφιέρωσε βοήθησε καθοριστικά ώστε να ολοκληρωθεί αυτή η εργασία, αλλά και να κάνω βήματα προς ένα πεδίο, τελείως άγνωστο έως πρότινος, για μένα. Οι συζητήσεις μας, μου μετέδωσαν την εμπειρία του και μου έδωσαν ώθηση για έναν ουσιαστικότερο τρόπο σκέψης.

Ευχαριστώ τον Κο Στέλιο Ραφαηλίδη για την ευκαιρία που μου έδωσε, να συμμετέχω στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα, καθώς και για τη συνεχή του υποστήριξη, καθοδήγηση και παρότρυνση καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους τους καθηγητές μου, για την προσπάθειά που κατέβαλλαν να μεταδώσουν τις γνώσεις τους, και ιδιαιτέρως, τους κο Πετρίδη, κο Σαμαρά, κο Θωμάρεϊ, κο Ριτζούλη και κα Δημητρέλη για την προθυμία που έδειξαν να ενισχύσουν τις γνώσεις μου πάνω στον τομέα της τεχνολογίας τροφίμων.

Ευχαριστώ θερμά την εταιρεία Φάρμα Κουκάκη και τους εργαζόμενους για την βοήθεια που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια της μελέτης μου στις εγκαταστάσεις του εργοστασίου.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω για τη ουσιαστική βοήθεια και υποστήριξη τους συμφοιτητές μου Αποστολίδη Κωνσταντίνο, Παλικρούση Θωμά, Μπάμη Έλενα και Σιγανίδου Ηλέκτρα, για την επιτυχή συνεργασία μας αυτά τα χρόνια και τους εύχομαι καλή σταδιοδρομία.

Ευχαριστώ ακόμη τους φίλους μου Νίκο, Σέβα, Σοφία, Άννα, καθώς και τους Γιάννη και Στέλλα Αραμπατζή που με παρότρυναν θετικά και που προσέφεραν αβίαστα την ψυχολογική και πρακτική τους υποστήριξη, ώστε με αυτή την εργασία να ολοκληρώνω ένα ακόμη όνειρό μου.

Κλείνοντας, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και την αγάπη μου στην οικογένειά μου, η οποία μου συμπαραστάθηκε στο σύνολό της. Τους γονείς μου, για την ώθηση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν ώστε να κάνω αυτό το βήμα και τα αδέρφια μου Σταμάτη, Μαρία, Θανάση, Μιχάλη που με

διευκόλυναν την περίοδο αυτή και που πάντα επικροτούν οτιδήποτε με βελτιώνει σαν άνθρωπο.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	4
Λίστα Πινάκων	8
Λίστα σχημάτων	10
1. Εισαγωγή	11
1.1 Σύγχρονες βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων	11
1.2 Προγραμματισμός παραγωγικής διαδικασίας	13
1.2.1 Χρόνοι εναλλαγής μεταξύ προϊόντων	13
1.3 Μαθηματική Βελτιστοποίηση	16
1.3.1 Βασικές αλγοριθμικές τεχνικές	17
1.3.2 Ευρετικές/ Μεταερευνητικές μέθοδοι.....	19
1.3.3 Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων (Multicriteria Decision Making)	20
1.3.4 Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή	20
1.4 Ιεράρχηση εργασιών ως πρόβλημα βελτιστοποίησης	28
1.4.1 Χρονικός προγραμματισμός μονάδων συνεχούς ροής ως ΠΠΠ	33
1.5 Υπολογιστικά λογισμικά προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του χρονικού προγραμματισμού	37
1.5.1 SchedulePro®.....	37
2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	51
3. ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ..	53
3.1 Μαθηματική αναπαράσταση ως ΠΠΠ	55
3.2 Ιεράρχηση εργασιών κατά ομάδες προϊόντων	55
3.3 Μελέτη περίπτωσης: Γραμμή υποσυσκευασίας φυτοφαρμάκων	56
3.3.1 Περιγραφή της μονάδας.....	56
3.3.2 Προϊόντα και χρόνοι εναλλαγής	57

4. ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ	70
4.1 Μαθηματική αναπαράσταση ως ΠΠΠ	71
4.2 Μελέτη περίπτωσης: Γραμμή παραγωγής γάλακτος	74
4.2.1 Περιγραφή της μονάδας.....	74
4.2.2 Χρόνοι εναλλαγής προϊόντων	75
4.2.3 Ελαχιστοποίηση χρόνου παραγωγής	79
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	83
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	84
Διαδίκτυο	84
Ελληνική Βιβλιογραφία	84
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	85
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	87

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1 Χρόνος καθαρισμού για μετάβαση στο επόμενο χρώμα, (Πηγή: <http://comp.mq.edu.au/units/comp323/lectures/ILP.pdf>)

Πίνακας 2 Συνολικός χρόνος για πιθανές διαδρομές, (Πηγή:<http://comp.mq.edu.au/units/comp323/lectures/ILP.pdf>)

Πίνακας 3 Εμπορικά πακέτα Χρονικού Προγραμματισμού (Παπαντωνίου, 2000)

Πίνακας 4 Χρόνοι πλυσίματος μηχανής (σε min) κατά την αλλαγή από τη μία κατηγορία σκευάσματος στην επόμενη

Πίνακας 5 Απαιτούμενος χρόνος καθαρισμού μηχανής συσκευασίας ανά είδος δραστικής ουσίας

Πίνακας 6 Είδος φιάλης που χρησιμοποιείται για κάθε τελική συσκευασία

Πίνακας 7 Απαιτούμενος χρόνος ρύθμισης μηχανής συσκευασίας ανά είδος φιάλης

Πίνακας 8 Απαιτούμενος χρόνος ρύθμισης μηχανής συσκευασίας ανά είδος συσκευασίας

Πίνακας 9 Τελικά προϊόντα και η αντιστοιχία με το είδος δραστικής και το είδος συσκευασίας

Πίνακας 10 Δυναμικότητα συσκευαστικής ανάλογα με το είδος της συσκευασίας

Πίνακας 11 Υποθετική Παραγωγή 10 προϊόντων

Πίνακας 12 Βέλτιστη ακολουθία εκτέλεσης των 10 προϊόντων

Πίνακας 13 Χρόνοι καθαρισμού της γεμιστικής κατά την αλλαγή προϊόντος

Πίνακας 14 Χρόνοι ρυθμίσεως της γεμιστικής κατά την αλλαγή φιαλών

Πίνακας 15 Απαιτούμενοι χρόνοι ρυθμίσεως για το μηχάνημα της ετικέτας

Πίνακας 16 Χρόνοι καθαρισμού της γεμιστικής κατά την αλλαγή προϊόντος -
Σενάριο 2

Λίστα σχημάτων

Σχήμα 1 Κατηγοριοποίηση μεθόδων επίλυσης προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού

Σχήμα 2 Δυνατές διαδρομές

Σχήμα 3 Βέλτιστη διαδρομή με TSP

Σχήμα 4 Διεπιφάνεια Schedule Pro

Σχήμα 5 Γράφημα Gantt από το λογισμικό πρόγραμμα Schedule Pro

Σχήμα 6 Διάγραμμα απασχόλησης εξοπλισμού/ προσωπικού (Equipment/ Staff Occurancy Profile)

Σχήμα 7 Διάγραμμα χρήσης εξοπλισμού (Capacity Usage of Equipment)

Σχήμα 8 Gantt Chart για την υποθετική Παραγωγή του Πίνακα 11

Σχήμα 9 Πρόγραμμα Παραγωγής για τα προϊόντα του Πίνακα 12

Σχήμα 10 Πρόγραμμα Παραγωγής με ομαδοποίηση ομοειδών EC προϊόντων

Σχήμα 11 Πρόγραμμα Παραγωγής με βάση την ακολουθία Prod2→Prod10→Prod6→Prod11

Σχήμα 12 Εναλλακτικά σενάρια για τη μετάβαση ανάμεσα σε προϊόντα Β της ίδιας οικογενείας και Δ και Ε διαφορετικής

Σχήμα 13 Ενδεικτική εργασία τριών σταδίων με επικαλυπτόμενους χρόνους εκτέλεσης

Σχήμα 14 Ενδεικτική εργασία τριών σταδίων χωρίς επικαλύψεις

Σχήμα 15 Γράφημα Gantt της παραγωγής για την βέλτιστη αλληλουχία-Σενάριο 1

Σχήμα 16 Γράφημα Gantt της παραγωγής για την βέλτιστη αλληλουχία-Σενάριο 2

1. Εισαγωγή

1.1 Σύγχρονες βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων

Καθώς οι βιομηχανίες παραγωγής εκσυγχρονίζονται με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας, θα περίμενε κανείς, η ζωή των διευθυντών παραγωγής να γίνεται ολοένα και ευκολότερη. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει, εξαιτίας, από τη μία πλευρά, της αυξανόμενης ζήτησης νέων προϊόντων και από την άλλη, της ανάγκης για ελαχιστοποίηση του κόστους.

Οι υπεύθυνοι των εργοστασίων έρχονται αντιμέτωποι με πληθώρα προκλήσεων. Αυτές αφορούν τόσο στην αύξηση του ανταγωνισμού, η οποία απαιτεί μείωση του κόστους με ταυτόχρονη διατήρηση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων και των παρεχόμενων υπηρεσιών (π.χ. αξιοπιστία για τους χρόνους παράδοσης Κ.Ο.), όσο και στη διατήρηση της βιωσιμότητάς τους, που επιβάλλει μελετημένες κινήσεις για την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω κακής χρήσης των πόρων (Dysko, 2013).

Από τον κανόνα αυτό, δεν εξαιρούνται οι βιομηχανίες τροφίμων, οι οποίες βρίσκονται υπό καθεστώς συνεχούς εξέλιξης. Οι απαιτήσεις για κάλυψη των βασικών αναγκών του πληθυσμού του πλανήτη σε προϊόντα διατροφής διαρκώς αυξάνονται- ιδιαίτερα στις υποανάπτυκτες χώρες, καθώς επίσης αυξάνεται και η ανάγκη παραγωγής νέων, βελτιωμένων, ποιοτικά ανώτερων και ασφαλών από υγιεινής άποψης τροφίμων- ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Οι βασικοί παράγοντες που συντελούν στη διαμόρφωση των σύγχρονων τάσεων της αγοράς στα προϊόντα επεξεργασμένων τροφίμων είναι οι εξής:

- **Επιστημονικές εξελίξεις:** Η πρόοδος που συντελείται τις τελευταίες δεκαετίες στον Τομέα της Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων και τα νέα επιστημονικά δεδομένα που προκύπτουν διαρκώς μέσω της

έρευνας ή της στατιστικής μελέτης για την κατανόηση της επίδρασης των διάφορων τροφών ή συστατικών τους στον ανθρώπινο οργανισμό εδραιώνουν νέες προδιαγραφές στα προϊόντα επεξεργασμένων τροφίμων.

- **Τεχνολογικές εξελίξεις.** Η εξέλιξη των τεχνολογικών συστημάτων προσφέρει νέες λύσεις για τυποποίηση, νέες βελτιωμένες και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες ή παραγωγικές διαδικασίες επεξεργασίας τροφίμων για την αύξηση της απόδοσης, τη βελτιστοποίηση της ποιότητας και την παράλληλη συγκράτηση του κόστους στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα.
- **Νομοθεσία.** Η νομοθεσία των τροφίμων καθορίζει τις συνθήκες παραγωγής και διακίνησης των τροφίμων όπως και όρια / προδιαγραφές για τους παράγοντες ποιότητας και ασφάλειας αυτών.
- **«Μόδα».** Η διεθνοποίηση του εμπορίου, η αντιμετώπιση του ανταγωνισμού, η ανάγκη για κάλυψη εξειδικευμένων αναγκών συγκεκριμένων πληθυσμών καταναλωτών, αλλά και η δημιουργία αναγκών στους καταναλωτές με σκοπό το κέρδος, συμβάλουν στην εισαγωγή νέων τάσεων στον τομέα της βιομηχανίας τροφίμων.

Όλα τα παραπάνω καθιστούν ανεδαφικό το να έχει μια εταιρία έναν απλό στόχο, όπως πχ τη μείωση του κόστους ή την υψηλή ποιότητα, αλλά επιβάλλεται να ακολουθήσει ένα σύνθετο στόχο που θα προσπαθεί να επιτύχει σε διάφορους βαθμούς, την υψηλή ποιότητα, τη μείωση του κόστους, τους καλούς, και προπάντων συνεπείς χρόνους παράδοσης και το σύντομο χρόνο ανάπτυξης και διοχέτευσης νέων προϊόντων στην αγορά. Σε μία έρευνα ανάμεσα στις πιο επιτυχημένες εταιρίες παγκοσμίως διαπιστώθηκε πως η επιτυχία βασίζεται στο τρίπτυχο "ποιότητα, τιμή και χρόνος", ενώ πολλές αναφέρουν και το σχετιζόμενο με την επιχείρηση "πρωτοπορία, ευκινησία και ικανότητα μάθησης". Επίσης η τάση της αγοράς για μετατόπιση από την ομοιογένεια στην ποικιλία δεν επιτρέπει στην επιχείρηση να ακολουθεί μια ενιαία στρατηγική όσον αφορά τα προϊόντα που παράγει και έτσι πρέπει να έχει μια γκάμα διαφορετικών ακόμα και αντικρουόμενων, στρατηγικών για να επιτύχει στην αγορά. (Παπαντωνίου, 2000)

1.2 Προγραμματισμός παραγωγικής διαδικασίας

Όσα αναφέρθηκαν ήδη στην παράγραφο 1.1. κάνουν επιτακτική την ανάγκη ενός αποτελεσματικού χρονικού προγραμματισμού σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Τα στάδια αυτά περιλαμβάνουν σχεδόν όλα τα τμήματα ενός εργοστασίου, όπως το τμήμα προμηθειών πρώτων υλών και υλικών συσκευασίας, το τμήμα παραλαβών, τα τμήματα marketing και πωλήσεων, το τμήμα παραγωγής και τέλος τις αποθήκες παραμονής των προϊόντων πριν την τελική τους διανομή.

Το τμήμα παραγωγής περιλαμβάνει όλα εκείνα τα μηχανήματα και τους ανθρώπινους πόρους που παίρνουν μέρος στην ολοκλήρωση της κατασκευής ενός προϊόντος. Ο χρόνος ολοκλήρωσης της παραγωγής του προϊόντος εξαρτάται από τη δυναμικότητα της γραμμής, είτε αυτή αφορά συσκευές, είτε αφορά εργατικό δυναμικό. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό μία βιομηχανία να μπορεί να χρησιμοποιεί στο μέγιστο τους διαθέσιμους πόρους της, προκειμένου να επιτυγχάνει τη μέγιστη παραγωγικότητα στον ελάχιστο χρόνο, και άρα τη μεγιστοποίηση των κερδών της.

1.2.1 Χρόνοι εναλλαγής μεταξύ προϊόντων

Οι περισσότερες εταιρείες, που παράγουν περισσότερα από ένα προϊόντα, επιλέγουν να αγοράσουν μία ευέλικτη και αποτελεσματική συσκευή, η οποία θα είναι ικανή να επεξεργαστεί πολλά προϊόντα, από το να αγοράσουν πολλές συσκευές για αποκλειστική χρήση σε διαφορετικά προϊόντα. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται αφενός το κόστος αγοράς πρόσθετου εξοπλισμού, και αφετέρου το κόστος για τη διατήρηση επιπλέον χώρου για την τοποθέτησή τους.

Αυτού του είδους οι ευέλικτες μηχανές έχουν πεπερασμένη δυναμικότητα και είναι ικανές για την επεξεργασία ενός μόνο προϊόντος τη φορά, απαιτώντας κάποιο χρόνο αλλαγής κάθε φορά που ένα προϊόν προγραμματίζεται για

επεξεργασία ακολουθώντας κάποιο άλλο. Αυτός ο χρόνος μπορεί να είναι σταθερός ή, τις περισσότερες φορές, να εξαρτάται από την αλληλουχία των προϊόντων.

Ακόμη κι αν οι μηχανές αυτές λειτουργούσαν στο μέγιστο της δυναμικότητας τους, θα υπάρχουν χαμένοι χρόνοι, καθώς στις γραμμές όπου φιλοξενούνται πάνω από ένα προϊόντα απαιτούνται μηχανικές και λειτουργικές ρυθμίσεις ανάμεσα στην παρασκευή δύο διαδοχικών προϊόντων. Οι χρόνοι ρύθμισης των συσκευών αποτελούν αυτό που αναφέρεται ως *setup time*. Επιπλέον, η αλλαγή από μία κατηγορία προϊόντων σε μία άλλη, συνεπάγεται τον εντατικό καθαρισμό της συσκευής, ο οποίος στη βιομηχανία τροφίμων αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την υγιεινή των προϊόντων και την ασφάλεια του καταναλωτή. Στην περίπτωση ωστόσο που η κατηγορία των προϊόντων παραμένει ίδια τότε πιθανώς να μην απαιτείται χρόνος καθαρισμού και ο μόνος χρόνος αλλαγής να είναι αυτός της ρύθμισης της συσκευής.

Οι χρόνοι που απαιτούνται για όλες εκείνες τις διαδικασίες που επιτρέπουν τη μετάβαση από το ένα προϊόν στο επόμενο καλείται *changeover*. Άλλοι συγγραφείς ορίζουν το *changeover* ως το χρονικό διάστημα μεταξύ του τελευταίου «καλού» κομματιού ενός είδους προϊόντος και του πρώτου «καλού» κομματιού του επόμενου είδους προϊόντος (Dysko, 2013). Αν ο νεκρός αυτός χρόνος είναι σταθερός, θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί ως ένα «αναγκαίο κακό» για το οποίο δεν υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης. Αυτό που κάνει τον χρόνο εναλλαγής αντικείμενο μελέτης με σκοπό της μείωσή του είναι το γεγονός ότι εξαρτάται από την αλληλουχία των προϊόντων πάνω στην γραμμή, με άλλα λόγια, εξαρτάται από το ποιο προϊόν προηγείται και ποιο έπεται. Στην βιομηχανία τροφίμων, όπου τα ενδιάμεσα πλυσίματα είναι απαραίτητα, το χρόνος πλυσίματος εξαρτάται από την «συγγένεια» των προϊόντων στην παραγωγική αλληλουχία. Για παράδειγμα, ο χρόνος πλυσίματος μίας γραμμής εμφιάλωσης γάλακτος είναι σημαντικά μεγαλύτερος αν η παραγωγή σοκολατούχου γάλακτος προηγείται της παραγωγής του λευκού απ' ό, τι το αντίθετο. Με την κατάλληλη ιεράρχηση των εργασιών επομένως πάνω στις κοινές συσκευές είναι δυνατόν να μειωθεί ο συνολικός νεκρός χρόνος που ξοδεύεται στη εναλλαγή των προϊόντων.

1.2.2 Ιεράρχηση εργασιών

Το πρόβλημα του προγραμματισμού εργασιών σε έναν επεξεργαστή είναι πολύπλοκο ακόμα κι αν μόνο η αλληλουχία των προϊόντων είναι το ζητούμενο, δηλαδή ακόμη κι αν υποθεθεί ότι υπάρχουν δεδομένου μεγέθους παραγγελίες/παρτίδες που πρέπει να εκτελεστούν και η μόνη απόφαση είναι η σειρά εκτέλεσής τους. Εάν απαιτείται να προγραμματιστεί η εκτέλεση n διαφορετικών εργασιών, οι πιθανοί τρόποι να μπουν σε σειρά είναι $n!$. Για παράδειγμα εάν υπάρχουν προς επεξεργασία 10 προϊόντα, υπάρχουν $10! = 1 \times 2 \times 3 \times \dots \times 10 = 3628800$ συνδυασμοί. Σε θεωρητικό επίπεδο δηλαδή, ο υπεύθυνος παραγωγής έχει να επιλέξει ανάμεσα σε αυτό τον υπερβολικά μεγάλο αριθμό συνδυασμών το καλύτερο πρόγραμμα παραγωγής με σκοπό την εγκαίριότερη ικανοποίηση της ζήτησης.

Μεταξύ άλλων περιπτώσεων, η σειρά εκτέλεσης των εργασιών είναι σημαντική, όταν οι παραγγελίες έχουν διαφορετικό χρόνο παράδοσης ή όταν υπάρχει χρόνος εναλλαγής προϊόντων ο οποίος εξαρτάται από την αλληλουχία (ποιο προηγείται, ποιο έπεται). Τα προβλήματα αυτά έχουν διαφορετική διατύπωση και οδηγούν σε διαφορετικές μεθοδολογίες επίλυσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για δεδομένες παραγγελίες ή εντολές παραγωγής προϊόντων, οι πραγματικοί χρόνοι παραγωγής είναι δεδομένοι με βάση τις απαιτήσεις της παραγωγικής συνταγής ή την δυναμικότητα των συσκευών. Επομένως, οι χρόνοι αυτοί δεν είναι δυνατόν να αλλάξουν. Οποιαδήποτε μείωση στον συνολικό χρόνο παραγωγής μπορεί να επέλθει από την επιλογή της βέλτιστης σειράς εκτέλεσης των εργασιών ώστε να ελαχιστοποιείται ο συνολικός χρόνος εναλλαγών.

Το πρόβλημα αυτό τίθεται στο πλαίσιο του ευρύτερου ζητήματος του χρονικού προγραμματισμού της παραγωγής το οποίο έχει να αντιμετωπίσει σε πολλαπλά επίπεδα η διοίκηση μιας μονάδας παραγωγής.

1.3 Μαθηματική Βελτιστοποίηση

Η βελτιστοποίηση, ως μαθηματικό πρόβλημα, αποσκοπεί στην εύρεση της βέλτιστης λύσης ανάμεσα σε όλες τις πιθανές και εφικτές λύσεις. Η 'λύση' κάθε φορά διαμορφώνεται από την επιλογή τιμών για μία σειρά από μεταβλητές που ονομάζονται σχεδιαστικές ή μεταβλητές απόφασης (decision variables). Μία σειρά από περιορισμούς (constraints) με την μορφή εξισώσεων ή ανισοτήτων μεταξύ των σχεδιαστικών μεταβλητών διαμορφώνουν την περιοχή εφικτών λύσεων (feasible region) μέσα στην οποία αναζητείται η βέλτιστη η οποία δίνει την ελάχιστη ή μέγιστη τιμή στην συνάρτηση βελτιστοποίησης που λέγεται αντικειμενική συνάρτηση (objective function). Πολλά προβλήματα της επιστήμης, της βιομηχανίας ή και της καθημερινής ζωής μπορούν να τεθούν και να επιλυθούν ως προβλήματα βελτιστοποίησης. Τα προβλήματα αυτά αναγνωρίζονται από το γεγονός ότι έχουν πολλαπλές δυνατές λύσεις και ο σκοπός επίλυσής τους είναι η επιλογή της καλύτερης και όχι απλά μίας εφικτής λύσης. Παραδείγματα τέτοιων προβλημάτων είναι τα ακόλουθα:

- Προγραμματισμός παραγωγής: Ποιο πρόγραμμα δίνει την καλύτερη απόδοση;
- Δομή πρωτεϊνών στον τρισδιάστατο χώρο: Ποια έχει τη μικρότερη δυνατή ενέργεια;
- Ωρολόγιο πρόγραμμα σχολείου: Πως μπορούμε να ικανοποιήσουμε όλους τους περιορισμούς;

Ο προγραμματισμός είναι η κατάστρωση ενός σχεδίου λήψης αποφάσεων προς την επίτευξη ενός βέλτιστου αποτελέσματος, το οποίο είναι το καλύτερο δυνατό μεταξύ όλων των εναλλακτικών επιλογών που υπάρχουν. Για το λόγο αυτό, η βελτιστοποίηση μπορεί να εκληφθεί και ως μία διαδικασία εύρεσης και λήψης βέλτιστων αποφάσεων (decision making).

Πολλά από τα γνωστά προβλήματα βελτιστοποίησης εμφανίζουν σημαντικές δυσκολίες στην επίλυσή τους. Μερικά από τα κλασσικά προβλήματα βελτιστοποίησης που ταλανίζουν ακόμα και σήμερα τους ερευνητές είναι το

πρόβλημα του περιπλανώμενου πωλητή (travelling salesman problem), το δίλημμα τον κρατουμένου (prisoner's dilemma), το πρόβλημα των κυτίων συσκευασίας (bin packing problem), το πρόβλημα του σάκου (knapsack problem), το πρόβλημα του Κινέζου ταχυδρόμου και το πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων (vehicle routing problem). Οι μέθοδοι που προτείνονται γενικότερα για τα προβλήματα βελτιστοποίησης ποικίλλουν ανάλογα με τις μαθηματικές ιδιαιτερότητες, τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς του κάθε προβλήματος.

Μαθηματικός Προγραμματισμός

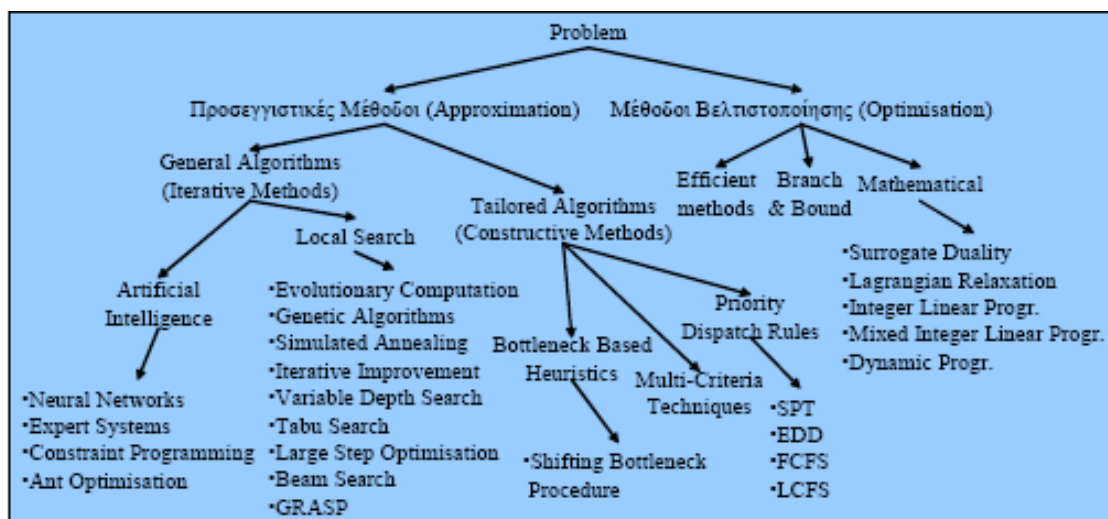
Μαθηματικός προγραμματισμός είναι ένα μαθηματικό μοντέλο στο οποίο επιχειρείται η βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) μιας ή περισσότερων γραμμικών ή μη- γραμμικών συναρτήσεων (κριτήρια βελτιστοποίησης) αγνώστων πραγματικών μεταβλητών των οποίων το πεδίο τιμών οριοθετείται έμμεσα από γραμμικούς ή μη-γραμμικούς περιορισμούς (ανισοεξισώσεις) συναρτήσεις των μεταβλητών αυτών. Οι άγνωστες μεταβλητές προσδιορίζουν (μοντελοποιούν) το αντικείμενο απόφασης του προβλήματος και ονομάζονται για το σκοπό αυτό μεταβλητές απόφασης.

Ο μαθηματικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται από τους επιχειρησιακούς ερευνητές ή τους αναλυτές προβλημάτων απόφασης για την προσέγγιση προβλημάτων κατανομής περιορισμένων πόρων ή μέσων σε εναλλακτικές και ανταγωνιστικές μεταξύ τους δραστηριότητες κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

1.3.1 Βασικές αλγοριθμικές τεχνικές

Στην έρευνα και την πρακτική, υπάρχει μία ευρεία γκάμα μαθηματικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται για τη βέλτιστη επίλυση προβλημάτων κατανομής πόρων σε διάφορες δραστηριότητες. Τα προβλήματα αυτά προκύπτουν όταν οι διαθέσιμοι πόροι (κεφάλαια, πρώτες ύλες, μηχανολογικός εξοπλισμός κλπ.) είναι περιορισμένοι. Με τις τεχνικές του

μαθηματικού προγραμματισμού, οι διαθέσιμοι πόροι κατανέμονται σε μία σειρά από δραστηριότητες με τρόπο που να προκύπτει η μέγιστη ωφέλεια. Στις τεχνικές αυτές περιλαμβάνονται ο Γραμμικός Προγραμματισμός (γραμμικές σχέσεις μεταβλητών), ο Τετραγωνικός Προγραμματισμός (οι μεταβλητές εμφανίζονται με τα τετράγωνα τους στις σχέσεις που τις συνδέουν), ο Ακέραιος Προγραμματισμός (οι μεταβλητές πρέπει, όλες ή μερικές από αυτές, να παίρνουν ακέραιες τιμές), και ο Στοχαστικός Προγραμματισμός (για προβλήματα όπου οι σχέσεις των μεταβλητών είναι πιθανολογικές). Εκτός από τις ακριβείς μεθόδους που εγγυημένα βρίσκουν την βέλτιστη λύση, υπάρχουν και ευρετικές ή εμπειρικές μέθοδοι οι οποίες επιχειρούν να προσεγγίσουν όσο γίνεται περισσότερο την βέλτιστη με κέρδος τον μικρότερο χρόνο εκτέλεσης. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το σύνολο των μεθόδων επίλυσης που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού (Παπαδόπουλος, 2009).



Σχ. 1 Κατηγοριοποίηση μεθόδων επίλυσης προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού (Παπαδόπουλος, 2009)

Γραμμικός προγραμματισμός

Ο γραμμικός προγραμματισμός (linear programming) περιλαμβάνει όλα τα προβλήματα για τα οποία τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και όλοι οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις (οι μεταβλητές εμφανίζονται μόνο στην πρώτη δύναμη και δεν υπάρχουν υψηλότερες δυνάμεις, ρίζες, γινόμενα μεταβλητών, κτλ.).

Όλα τα προβλήματα για τα οποία δεν ισχύει αυτό ανήκουν στα προβλήματα **μη γραμμικού προγραμματισμού** (nonlinear programming). Η πιο απλή κατηγορία προβλημάτων μη-γραμμικού προγραμματισμού είναι ο **Τετραγωνικός προγραμματισμός** (quadratic programming) ο οποίος αναφέρεται σε προβλήματα με γραμμικούς περιορισμούς αλλά με τετραγωνική αντικειμενική συνάρτηση.

Ακέραιος προγραμματισμός

Ο ακέραιος προγραμματισμός (integer programming) περιλαμβάνει όλα τα προβλήματα στα οποία οι μεταβλητές απόφασης μπορούν να πάρουν μόνο ακέραιες τιμές. Ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού μπορεί κατ'επέκταση να είναι γραμμικό ή μη γραμμικό.

Σε περίπτωση που κάποιες από τις μεταβλητές ενός προβλήματος περιορίζονται σε ακέραιες τιμές και κάποιες όχι, έχουμε ένα πρόβλημα **μεικτού ακέραιου προγραμματισμού** (mixed integer programming).

Όταν όλες περιορίζονται σε ακέραιες τιμές, έχουμε ένα πρόβλημα **αμιγώς ακέραιου προγραμματισμού** (pure integer programming).

Ο **δυναδικός ακέραιος προγραμματισμός** (binary integer programming) είναι μία ειδική κατηγορία προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού, όπου οι μεταβλητές απόφασης μπορούν να πάρουν μόνο τιμές 0 ή 1.

1.3.2 Ευρετικές/ Μεταευρετικές μέθοδοι

Πρόκειται για μεθόδους που εφαρμόζονται ειδικά για την επίλυση σύνθετων και δύσκολων προβλημάτων των οποίων η αντιμετώπιση να είναι είτε αδύνατη είτε ασύμφορη με άλλες προσεγγίσεις. Με τις ευρετικές προσεγγίσεις προσδιορίζονται ικανοποιητικές αλλά υποβέλτιστες λύσεις. Η εύρεση μιας τέτοιας μεθόδου εξαρτάται από την εμπειρία και την ικανότητα του αναλυτή, ο οποίος αξιοποιεί τα ειδικά χαρακτηριστικά του προβλήματος, ώστε η λύση να

προκύπτει σύντομα και να αποτελεί βελτίωση σε σχέση με τυχόν αποτελέσματα που ήδη υπάρχουν από προηγούμενες προσεγγίσεις. (Πάππης, 2008)

1.3.3 Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων (Multicriteria Decision Making)

Η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται σε προβλήματα όπου η λύση πρέπει να βασιστεί σε ένα σύνολο κριτηρίων (multicriteria decision making) ή να διαθέτει ένα σύνολο ιδιοτήτων (multiattribute decision making) ή να εξασφαλίζει την κάλυψη ενός συνόλου στόχων (multiobjective decision making) που εκφράζονται ποιοτικά ή/και ποσοτικά. Κάθε εναλλακτική λύση ικανοποιεί κάθε κριτήριο (ή διαθέτει κάθε ιδιότητα ή καλύπτει κάθε στόχο) σε διαφορετικό βαθμό. Η αξιολόγηση των λύσεων γίνεται με τη βοήθεια μιας συνάρτησης με την οποία σε κάθε κριτήριο (ή ιδιότητα) ή στόχο αποδίδεται ένας αντίστοιχος συντελεστής βαρύτητας και γίνεται σύνθεση ώστε να προκύψει η βέλτιστη λύση.

1.3.4 Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή

Ένα από τα πιο γνωστά προβλήματα μαθηματικής βελτιστοποίησης αφορά την εύρεση της ελάχιστης διαδρομής που δύναται να ενώσει ένα αριθμό πόλεων που πρέπει να επισκεφθεί ο πωλητής με σκοπό να πουλήσει τα προϊόντα του. Αν ένας πωλητής, ξεκινάει από την πόλη του και θέλει να επισκεφθεί ακριβώς μία φορά κάθε πόλη από μια δοθείσα λίστα πόλεων και να επιστρέψει πάλι στην πόλη του, είναι λογικό για αυτόν να επιλέξει την σειρά με την οποία θα επισκεφθεί τις πόλεις, έτσι ώστε η συνολική απόσταση την οποία θα διανύσει κατά την περιοδεία του να είναι όσο το δυνατόν συντομότερη.

Εάν γνωρίζει, για κάθε ζεύγος πόλεων, την απόσταση μεταξύ τους, τότε έχει όλα τα δεδομένα που του χρειάζονται για να βρει την ελάχιστη διαδρομή,

χωρίς να είναι εμφανές πώς θα τα χρησιμοποιήσει για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Το προαναφερθέν πρόβλημα ονομάζεται Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή (ΠΠΠ) (Traveling Salesman Problem – TSP). Υπάρχουν δύο στοιχεία που κάνουν το πρόβλημα ιδιαίτερα δημοφιλές στην διεθνή βιβλιογραφία. Το πρώτο είναι η πολυπλοκότητά του – είναι γνωστό ότι ανήκει στην κατηγορία των NP-hard προβλημάτων βελτιστοποίησης, δηλαδή η επίλυσή του δεν μπορεί να επιτευχθεί σε πολυωνυμικό χρόνο σε σχέση με τον αριθμό των πόλεων. Με άλλα λόγια, η δυσκολία επίλυσης αυξάνει εκθετικά όσο μεγαλώνει ο αριθμός των πόλεων. Ο δεύτερος και σημαντικότερος λόγος για την δημοφιλία του είναι ότι πολλά πρακτικά προβλήματα βελτιστοποίησης σε διάφορους τομείς ανάγονται σε ΠΠΠ, δηλαδή έχουν μαθηματική διατύπωση (κι επομένως και επίλυση) αντίστοιχη με το ΠΠΠ. Για παράδειγμα, όπως θα δειχθεί αργότερα, το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης σειράς εκτέλεσης μίας ομάδας προϊόντων με χρόνους εναλλαγής μπορεί να διατυπωθεί και να επιλυθεί ως ΠΠΠ. Επομένως, οποιαδήποτε αλγοριθμική βελτίωση στις μεθόδους επίλυσης του ΠΠΠ, θα σημάνει την δυνατότητα αντίστοιχης βελτίωσης στην επίλυση μίας σειράς άλλων πρακτικών προβλημάτων.

Ιστορική αναδρομή για την εξέλιξη του ΠΠΠ

Σε ό, τι έχει να κάνει με τη χρονική εξέλιξη του TSP, υπάρχουν πλήθος αναφορών στην παγκόσμια βιβλιογραφία. Οι απαρχές του προβλήματος του πλανόδιου πωλητή δεν είναι ιδιαίτερα σαφείς. Ένα σημειωματάριο για πλανόδιους πωλητές που χρονολογείται στο 1832, αναφέρεται στο πρόβλημα και περιλαμβάνει παραδείγματα διαδρομών εντός της Γερμανίας και της Αυστρίας, χωρίς να αντιμετωπίζεται όμως με κάποια μαθηματική μέθοδο.

Ο προσδιορισμός του προβλήματος χρεώνεται στον σπουδαίο Ιρλανδό μαθηματικό Sir William Rowan Hamilton (1805-1865) και στον Βρετανό Thomas Penyngton Kirkman (1806-1895). Ο πρώτος ήταν ο δημιουργός του «Δωδεκάεδρου του Ταξιδιώτη», ενός μαθηματικού παιχνιδιού του οποίου ο σκοπός ήταν αρκετά κοντά (έστω και σε πρώιμο στάδιο) με το πρόβλημα που μελετάται σε αυτό το κεφάλαιο. Η γενική μορφή του ΠΠΠ φαίνεται ότι

μελετήθηκε αρχικώς τον προηγούμενο αιώνα (δεκαετία του '30) από μαθηματικούς στο Πανεπιστήμιο της Βιέννης, όπως ο Karl Menger (1902-1985) και στο Χάρβαρντ. Ο Αμερικάνος Hassler Whitney (1907-1989) του Πανεπιστημίου Princeton εισήγαγε το όνομα Travelling Salesman Problem λίγο αργότερα.

Τις επόμενες δεκαετίες το πρόβλημα απέσπασε την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας ευρύτατα στην Ευρώπη και στην Αμερική. Σπουδαία συνεισφορά στις μελέτες του προβλήματος προσέφεραν οι George Dantzig, Delbert Ray Fulkerson και Selmer M. Johnson, ενώ εργαζόντουσαν για τις αμερικανικές στρατιωτικές δυνάμεις. Οι συγκεκριμένοι, το αντιμετώπισαν ως πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και ανέπτυξαν την μέθοδο Cutting Planes για την επίλυσή του. Με αυτόν τον τρόπο επέλυσαν ένα πρόβλημα 49 πόλεων (1953) βρίσκοντας την βέλτιστη διαδρομή.

Με την πάροδο των χρόνων, υπήρχε και αντίστοιχη πρόοδος στην αντιμετώπιση του ΠΠΠ. Στις δεκαετίες του '70 και του '80 πολλοί μαθηματικοί, με χρήση μεθόδων όπως Branch and Bound και Cutting Planes κατάφεραν να επιλύουν προβλήματα μερικών χιλιάδων πόλεων (2.392 πόλεις από τους M. Padberg και G. Rinaldi). Την δεκαετία του '90 δημιουργήθηκε ο Concorde TSP Solver από τους David Applegate, Robert E. Bixby, Vasek Chvatal και William J. Cook. Με το πρόγραμμα αυτό, διαδοχικά, επιλύθηκαν ακόμη μεγαλύτερα προβλήματα. Οι παραπάνω επιστήμονες, μαζί με τον Keld Helsgaun, κατάφεραν τον Μάιο του 2004 και βρήκαν την βέλτιστη διαδρομή ανάμεσα στις 24.978 πόλεις που βρίσκονται στην Σουηδία. Δύο χρόνια μετά, το 2006, βρέθηκε η βέλτιστη διαδρομή 85.900 «πόλεων», αυτή τη φορά σε μία VLSI (Very Large Scale Integration) εφαρμογή. Ουσιαστικά, κατάφεραν να ελαχιστοποιήσουν τον χρόνο που έκανε ένα laser να περάσει και να «κόψει» κάποιους κόμβους κατά την δημιουργία ενός κυκλώματος. Αυτή είναι και η δυσκολότερη περίπτωση που έχει επιλυθεί μέχρι και σήμερα.

Επίλυση του ΠΠΠ

Το αντικείμενο του προβλήματος, είναι, δεδομένου κάποιου αριθμού πόλεων και του κόστους ταξιδιού μεταξύ τους, να βρεθεί η διαδρομή με το μικρότερο κόστος ώστε να επισκεφτεί ο πωλητής όλες τις πόλεις μία φορά και να επιστρέψει στην αφετηρία του. Πρακτικά, αν οι πόλεις είναι n , τότε έχουμε $n-1$ επιλογές για το ποια θα είναι η δεύτερη πόλη, $n-2$ για την τρίτη κ.ο.κ.. Πολλαπλασιάζοντας τις επιλογές αυτές βρίσκουμε το σύνολο των διαδρομών $(n-1)!$. Αν τα κόστη είναι συμμετρικά, δηλαδή το ίδιο κόστος απαιτείται για το ταξίδι από την πόλη A στην πόλη B και το αντίθετο, διαιρούμε το παραπάνω αποτέλεσμα με το 2, άρα υπάρχουν $(n-1)!/2$ διαδρομές, οπότε αθροίζοντας τα κόστη επιλέγουμε το ελάχιστο.

Όσο απλή κι αν φαίνεται η περιγραφή του προβλήματος, στην ουσία θεωρείται από τα πλέον δυσεπίλυτα προβλήματα που αντιμετωπίζουν μαθηματικοί και πάσης φύσεως επιστήμονες. Το πρόβλημα κατατάσσεται στα NP – Hard Problems (Non-deterministic Polynomial-time hard) από την Θεωρία Πολυπλοκότητας της Επιστήμης Υπολογιστών. Παρ' όλη τη δυσκολία της μαθηματικής επίλυσης του προβλήματος του περιπλανώμενου πωλητή, πληθώρα ευρετικών (heuristic) και άλλων ακριβών μεθόδων είναι γνωστές, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η επίλυση ενός προβλήματος με χιλιάδες πόλεις.

Ακριβείς μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος

Το πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή μπορεί να επιλυθεί με τη βοήθεια του γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού αλλά και άλλων μεθόδων.

Γραμμικός Ακέραιος Προγραμματισμός (ILP)

Η μαθηματική μοντελοποίηση στην περίπτωση n πόλεων είναι η εξής:

Ορισμός μεταβλητών:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν πάμε από την πόλη } i \text{ στην πόλη } j \\ 0, & \text{σε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

Αν θεωρήσουμε ως d_{ij} την απόσταση μεταξύ των πόλεων i, j τότε:

Αντικειμενική Συνάρτηση:

$$\min \sum_i \sum_j x_{i,j} d_{i,j}$$

Περιορισμοί:

$$x_{i,j} = 0 \text{ ή } 1 \quad (1)$$

$$\sum_i x_{i,j} = 1 \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_j x_{i,j} = 1 \quad \forall i \quad (3)$$

Η λύση θα πρέπει να είναι 'διαδρομή' η οποία περνάει από όλες τις πόλεις μία φορά (4)

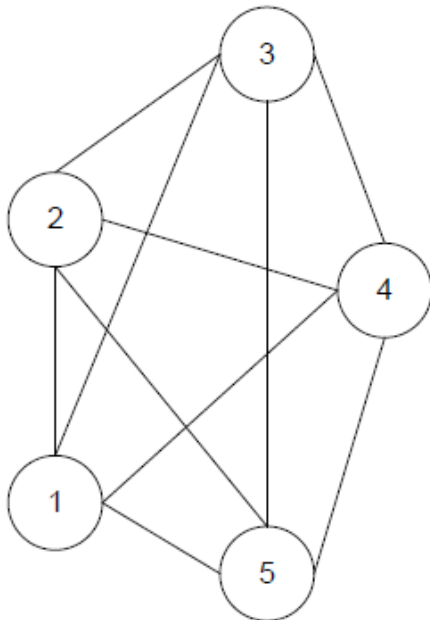
Ο δεύτερος περιορισμός σημαίνει ότι για κάθε πόλη άφιξης υπάρχει μόνο μία από τις υπόλοιπες η οποία αποτελεί την αφετηρία της. Αντίστοιχα, ο περιορισμός (3) επιβάλλει από κάθε πόλη αφετηρίας να υπάρχει μόνο ένας προορισμός. Ο τέταρτος περιορισμός παρουσιάζεται περιγραφικά επειδή υπάρχουν διάφοροι τρόποι να εκφραστεί μαθηματικά. Η σημασία του περιορισμού είναι ότι δεν θα πρέπει να υπάρχουν ασύνδετες μεταξύ τους ομάδες πόλεων, η λύση θα πρέπει επομένως να είναι αυτό που μαθηματικά ονομάζεται 'διαδρομή' (tour). Αν V είναι το σύνολο των πόλεων στο πρόβλημα και S είναι ένα οποιοδήποτε υποσύνολο, τότε ένας τρόπος να εκφραστεί μαθηματικά αυτός ο περιορισμός είναι ο ακόλουθος:

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in V-S} x_{i,j} \geq 1 \quad \forall S \subset V \quad (5)$$

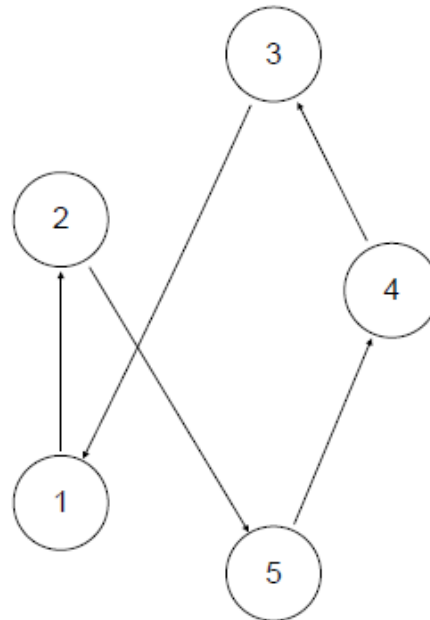
Με άλλα λόγια, με οποιονδήποτε τρόπο κι αν χωριστεί το σύνολο των πόλεων σε δύο υποσύνολα S και $V-S$ θα πρέπει πάντα να υπάρχει σε κάθε υποψήφια λύση τουλάχιστον μία μετάβαση που να τα ενώνει.

Το Σχήμα 2 παρουσιάζει ενδεικτικά ένα ΠΠΠ 5 πόλεων. Το Σχήμα 3 περιλαμβάνει λύση μίας διαδρομής του προβλήματος.

Παρόμοια με το ΠΠΠ μοντελοποιείται και το πρόβλημα ανάθεσης (assignment problem), με εξαίρεση τον τελευταίο περιορισμό, όπου στα προβλήματα ανάθεσης δεν είναι απαραίτητος (δύο ξεχωριστές διαδρομές σαν λύση είναι αποδεκτές).



Σχ. 2 Δυνατές διαδρομές



Σχ. 3 Βέλτιστη διαδρομή με TSP

Ακριβείς λύσεις ενός TSP προβλήματος, προκύπτουν με την χρήση των μεθόδων Branch and Bound και Cutting Planes.

- Αλγόριθμος διακλάδωσης και φράγματος- Branch and Bound (BB)

Η μέθοδος διακλάδωσης και φράγματος εφαρμόζεται σε πολλούς τύπους συνδυαστικών προβλημάτων. Η τεχνική BB αποτελεί μια μεθοδολογία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης με την πραγματοποίηση μίας μερικής μόνο απαρίθμησης (partial enumeration). Η ιδέα της διακλάδωσης είναι η αντιμετώπιση του προβλήματος ως δέντρο αποφάσεων. Κάθε κόμβος του δέντρου αντιστοιχεί σε μία σειρά ειλημμένων αποφάσεων. Από κάθε κόμβο αναφύονται νέα κλαδιά που αντιστοιχούν σε απλές αποφάσεις, και οδηγούν σε κόμβους που αντιστοιχούν σε πιο πλήρεις σειρές αποφάσεων. Η απαρίθμηση όλων των κόμβων θα ισοδυναμούσε με την εξέταση όλων των δυνατών αποφάσεων και αυτό θα είχε μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Εάν ο συνολικός αριθμός των ενδεχόμενων λύσεων του προβλήματος είναι μικρός θα μπορούσε κανείς να υπολογίσει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την κάθε μία ξεχωριστά και να διαλέξει τη βέλτιστη λύση συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ τους. Αυτή η προσέγγιση λέγεται ολική ή εξαντλητική απαρίθμηση (total or exhaustive enumeration).

- *Cutting Planes*

Η συγκεκριμένη μέθοδος ονομάζεται «Cutting Plane» και πρόκειται για διαδικασία, κατά την οποία γίνεται προσπάθεια εύρεσης γραμμικών ανισοτήτων, οι οποίες έχουν σκοπό να περιορίσουν την εφικτή περιοχή του γραμμικού προβλήματος όσο το δυνατόν περισσότερο χωρίς να αφαιρεθούν τυχόν ακέραιες λύσεις. Η διαδικασία η οποία ακολουθείται μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά στα εξής επόμενα βήματα.

Αρχικά το υπό εξέταση πρόβλημα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού αντιμετωπίζεται σαν γραμμικό πρόβλημα αγνοώντας τους περιορισμούς που αφορούν τις ακέραιες μεταβλητές. Το νέο υπό εξέταση πρόβλημα ονομάζεται 'χαλαρωμένο' πρόβλημα. Στην εφικτή περιοχή του νέου αυτού προβλήματος συμπεριλαμβάνονται υποσύνολα μη ακέραιων λύσεων που προφανώς δεν ενδιαφέρουν την επίλυση του αρχικού προβλήματος. Το χαλαρωμένο πρόβλημα επιλύεται και στην περίπτωση που δεν βρεθεί η βέλτιστη ακέραια λύση χρησιμοποιείται η μέθοδος Cutting Plane, η οποία με την εισαγωγή των κατάλληλων γραμμικών εξισώσεων στο χαλαρωμένο

πρόβλημα επιδιώκει να εξαιρέσει τμήματα του αρχικού εφικτού χώρου που δεν περιλαμβάνουν τη βέλτιστη λύση.

- *Εξελικτικοί αλγόριθμοι (Evolutionary algorithms)*

Οι μέθοδοι αυτές ξεκινούν με μία ή περισσότερες αρχικές λύσεις και εφαρμόζοντας ερευνητικές στρατηγικές προσεγγίζουν το τοπικό βέλτιστο. Το πλεονέκτημα των ερευνητικών αλγορίθμων είναι ότι μας παρέχουν υψηλές ποιοτικά λύσεις. Ωστόσο, αρκετά συχνά, απαιτούν σημαντικό συντονισμό των παραμέτρων και επίσης εμφανίζουν σημαντικό υπολογιστικό κόστος.

Συχνά ωστόσο, ο χρόνος που απαιτείται για την επίλυσή του, ανάλογα με το μέγεθός του, μπορεί να είναι τεράστιος. Γι' αυτόν τον λόγο, σε πολλές περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται ευρετικές μέθοδοι (heuristics) για την εύρεση μίας λύσης.

Ευρετικοί αλγόριθμοι (heuristic algorithms)

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται δύο ευρετικές μέθοδοι: αυτή του «Κοντινότερου Γείτονα» (Nearest Neighbor) και της «Εναλλαγής Διαδρομών» (Subtour Reversal). Η πρώτη μέθοδος είναι ιδιαίτερα εύκολη, ενώ η δεύτερη απαιτεί περισσότερους υπολογισμούς. Γενικά, η τελευταία μάς δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Εν τέλει, οι δύο μέθοδοι συνδυάζονται, χρησιμοποιώντας πρώτα τον Κοντινότερο Γείτονα και το αποτέλεσμα αυτού χρησιμοποιείται στην εφαρμογή της Εναλλαγής Διαδρομών.

- *Ο αλγόριθμος Nearest Neighbor*

Όπως ίσως υποψιαζόμαστε, μία καλή λύση του ΠΠΠ προβλήματος μπορεί να βρεθεί επιλέγοντας ως αφετηρία μας μία πόλη και κατόπιν, να πηγαίνουμε σε αυτή με το μικρότερο κόστος κάθε φορά.

- *Ο αλγόριθμος Subtour Reversal*

Σε αυτή την μέθοδο, έχοντας ένα ΠΠΠ πρόβλημα πόλεων και μία αρχική εφικτή λύση, καταλήγουμε σε μία καλύτερη, εναλλάσσοντας μερικές διαδρομές, αρχικά δύο πόλεων, έπειτα τριών κ.ο.κ. μέχρι να φτάσουμε σε διαδρομές $n-1$ πόλεων.

1.4 Ιεράρχηση εργασιών ως πρόβλημα βελτιστοποίησης

Όπως προαναφέρθηκε, προγραμματισμός είναι το σχέδιο εκτέλεσης ενός πλήθους δραστηριοτήτων οι οποίες δεσμεύουν πόρους (χρήμα, χρόνο, μηχανές, συστήματα μεταφοράς, ανθρώπινο δυναμικό κλπ.). Στα συστήματα παραγωγής οι δραστηριότητες περιλαμβάνουν μεταφορά προϊόντων σε διάφορα στάδια παραγωγής, κατεργασίες που εκτελούνται από μηχανές, συσκευές και εργαζόμενους, προετοιμασία μηχανών (αλλαγές εργαλείων κοπής, φόρτωση/εκφόρτωση κομματιών, πλύση και καθαρισμός συσκευών κλπ.). Στόχος του προγράμματος παραγωγής είναι ο συνδυασμός των ακόλουθων:

- α) αύξηση παραγωγικότητας
- β) ικανοποίηση πελατών (έγκαιρη παράδοση προϊόντων- ποιότητα)
- γ) ελαχιστοποίηση κόστους παραγωγής
- δ) πλήρης αξιοποίηση των πόρων (μηχανές κλπ)
- ε) ελαχιστοποίηση αποθεμάτων (Work in Progress, WIP)
- στ) Ελαχιστοποίηση των χρόνων εξάρμωσης (Παπαντωνίου & Μαρμαράς, 2005).

Το πρόβλημα του χρονικού προγραμματισμού περιπλέκεται λόγω του πλήθους περιορισμών οι οποίοι συνδέουν πόρους και δραστηριότητες. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν τον κανόνα σε πραγματικά συστήματα και η επίλυση του προβλήματος παρουσιάζει αξεπέραστες μαθηματικές δυσκολίες (Κουϊόγλου, 2007).

Για την επίλυση ενός προβλήματος χρονικού προγραμματισμού, απαιτούνται κατ' αρχήν πληροφορίες σχετικά με τις απαιτήσεις για παραγωγή προϊόντων, όπως προκύπτουν από τις προβλέψεις ή/ και τις παραγγελίες των πελατών.

Το πρόβλημα του χρονικού προγραμματισμού παραγωγής πρέπει να λυθεί χωρίς να αγνοηθούν οι περιορισμοί του συστήματος, που αφορούν τη δυναμικότητα (διαθέσιμος παραγωγικός εξοπλισμός), την ακολουθία των δραστηριοτήτων που ορίζει η υπάρχουσα τεχνολογία, τις απαιτήσεις για συντήρηση των μηχανών, και τα δεδομένα του συγκεντρωτικού προγράμματος παραγωγής για το συνολικό επίπεδο παραγωγής, του ανθρώπινου δυναμικού και των αποθεμάτων (Γιάππη, 2006)

Πολλοί συγγραφείς πιστεύουν πως το πρόβλημα του χρονικού προγραμματισμού δεν μπορεί ή μάλλον δεν πρέπει να αυτοματοποιηθεί πλήρως. Από την άλλη πλευρά από τη στιγμή που ο ερευνητικός χώρος για την εξεύρεση τη λύσης είναι συνήθως τεράστιος, η ανθρώπινη έρευνα θα μπορούσε να οδηγήσει το σύστημα επίλυσης σε ενδεχομένως καλύτερες λύσεις που ο υπολογιστής ίσως να μην μπορούσε μόνος του να τις εντοπίσει. Γι' αυτό υπάρχουν συστήματα που απαιτούν μεγάλο βαθμό συμμετοχής από τον άνθρωπο, επιτρέποντας στο χρήστη τουλάχιστον να ρυθμίζει χειροκίνητα την τελική εκροή (λύση) του συστήματος. Τα συστήματα αυτά καλούνται ημιαυτόματα (interactive), σε αντίθεση με τα υπόλοιπα που καλούνται αυτόματα (batch) συστήματα.

Το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης αλληλουχίας εκτέλεσης μίας σειράς προϊόντων πάνω στην ίδια μηχανή (ή γραμμή παραγωγής) αποτελεί ένα υποπρόβλημα χρονοπρογραμματισμού της παραγωγής το οποίο απαντάται πολύ συχνά στην πράξη (πχ. σε μονάδες υποσυσκευασίας προϊόντων). Για το πρόβλημα αυτό υπάρχει εκτενέστατη βιβλιογραφία που αφορά ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Ο Laguna (1999) περιγράφει το πρόβλημα που προκύπτει σε μία βιομηχανία που παράγει αναλώσιμα για φωτοτυπικά και εκτυπωτές λέιζερ, όπου η παραγωγή διαφόρων τύπων μελανιών γίνεται σε μία γραμμή παραγωγής. Η αλλαγή της γραμμής από τον ένα τύπο μελανιού στον άλλο συνεπάγεται

μεγάλους χρόνους εναλλαγής, συνήθως της τάξης ημερών. Το πρόβλημα εστιάζεται στο να βρεθεί ένα κύριο πρόγραμμα παραγωγής που να ελαχιστοποιεί το χρόνο υπερωριών, αλλά και το κόστος διατήρησης των αποθεμάτων. Για τη λύση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Μεικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (Mixed integer programming). Συγκεκριμένα, το πρόβλημα υποδιαιρέθηκε σε υποπροβλήματα, τα οποία προσεγγίστηκαν με διαφορετικές λύσεις βελτιστοποίησης, όπως αυτή του Γραμμικού Προγραμματισμού και του Αλγορίθμου του Πλανόδιου Πωλητή.

Οι Kentli et al (2013) μελέτησαν το πρόβλημα του χρονικού προγραμματισμού μία βιομηχανία ενδυμάτων και παρουσιάζουν μία ευρετική μέθοδο για να ελαχιστοποιούν το συνολικό χρόνο ρύθμισης των συσκευών (setup time), που υπόκειται στο χρόνο μετάβασης (changeover time), για τις παραγγελίες των μοντέλων. Η προσέγγιση στη λύση του προβλήματος αναπτύχθηκε υποδιαιρώντας το συνολικό πρόβλημα σε δύο υποπροβλήματα. Σε αυτή τη διαδικασία, αναπτύχθηκε μια αρχική ευρετική μέθοδος λύσης του πρώτου προβλήματος, ενώ το δεύτερο μέρος διατυπώθηκε ως ένα ανοικτό και ασύμμετρο πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή. Αυτό το δεύτερο πρόβλημα λύθηκε με Γενετικό Αλγόριθμο (Genetic Algorithm) και με τον Αλγόριθμο Προσομοιωμένης Ανόπτωσης (Simulated Annealing algorithm).

Ο Ciavotta et al (2013) επικεντρώθηκαν στην επίλυση του προβλήματος του χρόνου setup εξαρτώμενου από την αλληλουχία των προϊόντων, θεωρώντας το ένα από τα σημαντικότερα που αντιμετωπίζει η βιομηχανία. Έτσι λοιπόν προτείνουν έναν απλό, αλλά δυναμικό αλγόριθμο, μια μέθοδος που ονομάζεται Επανεκκινούμενα, Επαναλαμβανόμενα Pareto (Restarted Iterated Pareto Greedy or RIPG), που αποτελεί μια επέκταση του ήδη προτεινόμενου Iterated Greedy Algorithm. Ολοκληρωμένες υπολογιστικές και στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν, με σκοπό να αποδείξουν ότι η μεθοδός τους υπερτερεί σαφώς έναντι όλων των αλγορίθμων που έχουν έως τώρα προταθεί.

Ο Eren (2007) χρησιμοποιεί το μοντέλο του Ακέραιου Προγραμματισμού (integer programming model), το οποίο όμως είναι αποτελεσματικό όταν ο

αριθμός των εργασιών προς εκτέλεση είναι μικρότερος από 12. Για την επίλυση προβλημάτων μεγέθους έως και 1000 εργασιών χρησιμοποιούνται ευρετικές μέθοδοι, όπως η τυχαία αναζήτηση (random search) και η ταμπού αναζήτηση (tabu search) με βάση τις μεθόδους heuristics. Σύμφωνα μάλιστα με τα αποτελέσματα, η tabu αναζήτηση για όλες τις τιμές είναι πιο αποτελεσματικές από άλλες.

Οι Javanmard και Kianehkandi (2011), προτείνουν το μεικτό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό (Mixed Integer Linear Programming, MILP) για τη βελτιστοποίηση του χρονικού προγραμματισμού της παραγωγής σε μία βιομηχανία γάλακτος. Το μοντέλο τους λαμβάνει υπ' όψιν όλους του περιορισμούς που συναντώνται στον προγραμματισμό της παραγωγής. Η αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιείται λαμβάνει υπ' όψιν όλες τις κύριες πηγές μεταβλητού κόστους που εξαρτώνται από τον προγραμματισμού της παραγωγής, δηλαδή το κόστος μετάβασης, το κόστος διατήρησης των αποθεμάτων, καθώς και το εργατικό κόστος.

Από την άλλη μεριά, οι Subbiah και Engell (2010) μελέτησαν την εφαρμογή του Παροδικού Αυτόματου Μοντέλου (TA - Timed Automata models). Οι αριθμητικές μελέτες έδειξαν ότι η προσέγγιση TA είναι αποτελεσματική υπό την έννοια ότι οι βέλτιστες λύσεις, βρέθηκαν μέσα σε περιορισμένο χρόνο υπολογισμού παρόμοιο με ή μικρότερο από εκείνον που απαιτείται από τις καθιερωμένες τεχνικές MILP. Τα αποτελέσματα σχετικά με την εφαρμογή της προσέγγισης για την περίπτωση που μελέτησαν δείχνουν ότι ευρετικές λύσεις μπορεί να εφαρμοστούν εύκολα και ότι η προσέγγιση είναι εφαρμόσιμη σε πρακτικά προβλήματα μεγάλης κλίμακας.

Οι Nezhad και Darian (2010) χρησιμοποίησαν το μοντέλο του Μεικτού Ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού για να επιλύσουν το πρόβλημα σε μία βιομηχανία παραγωγής χυμών, που διαθέτει 5 διαφορετικές γραμμές παραγωγής και 4 διαφορετικές συσκευαστικές μηχανές. Έλαβαν υπ' όψιν τους τόσο το κόστος εγκατάστασης, όσο τους χρόνους εγκατάστασης, αλλά και τη σειρά διαδοχής των προϊόντων. Επιπλέον, το διευθυντή παραγωγής βοήθησε και ένα σύστημα λήψης αποφάσεων (decision support system).

Στο εγχειρίδιο Industry Handbook for safe Processing of Nuts (2010) προτείνεται ένας εμπειρικός τρόπος σχεδιασμού του προγραμματισμού παραγωγής των διαφορετικών προϊόντων. Αυτό συμβαίνει, διότι τα συγκεκριμένα είδη περιέχουν πληθώρα αλλεργιογόνων, πράγμα που απαιτεί πολύ σχολαστικούς καθαρισμούς. Έτσι, για να μειωθεί το ολικό ρίσκο στα ποιοτικά χαρακτηριστικά, αναφέρουν την ανάγκη για προγραμματισμό μεγάλων παρτίδων από ομάδες προϊόντων που περιέχουν ίδιου τύπου αλλεργιογόνα.

Οι Ozgur et al (2010) αναδεικνύουν την ευρετική μέθοδο της ιεραρχικής σύνθεσης (Hierarchical Composition Heuristic - HICOM), που χρησιμοποιεί στοιχεία και έναν ιεραρχικό μηχανισμό σύνθεσης ομάδων, παρόμοιο με αυτά της σύνθεσης των διαδρομών στη μέθοδο του ΠΠΠ. Οι ομάδες συντίθενται με βάση το κριτήριο της ομοιότητας των ρυθμίσεων που απαιτούνται μεταξύ των αντικειμένων/ομάδων αντικειμένων. Έτσι, όσο πιο διακριτές είναι οι ομάδες, τόσο μεγαλύτερη είναι η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας. Ο στόχος της διαδικασίας της ιεράρχησης είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εγκατάστασης όλων των ειδών που παράγονται για μια δεδομένη χρονική περίοδο. Η διαδικασία αποτελείται από δύο φάσεις και απαιτεί τη γνώση ή την εκτίμηση του χρόνου εγκατάστασης μεταξύ όλων των ζευγών των αντικειμένων.

Ο Shah (2014) περιγράφει τους προβληματισμούς που προέκυψαν σε φαρμακοβιομηχανία εξαιτίας των διακοπών λόγω βλαβών του εξοπλισμού. Προσπάθησαν να επιλύσουν το πρόβλημα εφαρμόζοντας Total Productive Maintenance (TPM) program, προκειμένου να χρησιμοποιήσουν τη μέγιστη δυνατότητα των συσκευαστικών μηχανών, θεωρώντας πως αυτό θα ελάττωνε και τη συχνότητα των βλαβών του εξοπλισμού. Αποφάσισαν να εφαρμόσουν μια τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της μεταποίησης, αυτήν της SMED (Single Minute Exchange of Dies), για να διατηρήσουν μια βελτιωμένη διαδικασία μετάβασης από προϊόν σε προϊόν. Σε αυτό τους

βοήθησε η καταγραφή των καλύτερων πρακτικών μετάβασης, ώστε σταδιακά να μεταβούν στη νέα μέθοδο εναλλαγής των προϊόντων.

1.4.1 Χρονικός προγραμματισμός μονάδων συνεχούς ροής ως ΠΠΠ

Πολλές παραγωγικές μονάδες (ιδιαίτερα στον χώρο των τροφίμων) ανήκουν στο λεγόμενο μοντέλο συνεχούς ροής (flowshop) όπου ένας αριθμός προϊόντων παράγεται πάνω στην ίδια γραμμή ακολουθώντας την ίδια αλληλουχία σταδίων (και αντίστοιχων μηχανών). Υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία παραγωγικών μοντέλων που ανήκουν στην κατηγορία flowshop ανάλογα με την δυνατότητα ή μη ενδιάμεσης αποθήκευσης των ημικατεργασμένων προϊόντων ανάμεσα στα στάδια παραγωγής, την ύπαρξη μίας ή πολλαπλών μηχανών ανά στάδιο κλπ.

Σε κάθε περίπτωση, το πρόβλημα είναι η εύρεση της βέλτιστης πολιτικής στην εκτέλεση της παραγωγής ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος και ο συνολικός χρόνος παραγωγής ή να γίνει έγκαιρα η παράδοση των προϊόντων. Οι αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ο υπολογισμός της ποσότητας ανά προϊόν που θα παραχθεί κάθε φορά και η σειρά εκτέλεσης των προϊόντων.

Τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να διατυπωθούν και να επιλυθούν ως το ΠΠΠ. Οι Bagchi *et al.* (2006) κάνουν εκτενή αναφορά σε όλα τα προβλήματα χρονοπρογραμματισμού σε flowshop τα οποία μπορούν να προσεγγιστούν ως ΠΠΠ. Όπως οι ίδιοι αναφέρουν, στην επιχειρησιακή έρευνα και στην επιστήμη γενικότερα, ένας αλγόριθμος που επιλύει ένα πρόβλημα, μπορεί να εφαρμοστεί για να λύσει ένα άλλο πρόβλημα, εάν γίνει ο αντίστοιχος μετασχηματισμός ή αν επιτευχθεί η αντιστοιχία μεταξύ των δύο προβλημάτων. Τέτοια είναι η αντιστοιχία μεταξύ ορισμένων προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού εργασιών τύπου flowshop και του ασύμμετρου προβλήματος του πλανόδιου πωλητή (ATSP). Στην περίπτωση του ΠΠΠ, το «κόστος» μετάβασης από μία πόλη στην άλλη αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ των δύο πόλεων. Στην περίπτωση του χρονοπρογραμματισμού σε flowshop, το «κόστος» της μετάβασης από ένα προϊόν στο επόμενο

αντιστοιχεί στον νεκρό χρόνο που απαιτείται για την εναλλαγή (changeover) της μηχανής από το ένα προϊόν στο άλλο. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από την σειρά μετάβασης ακόμα και ανάμεσα στα ίδια προϊόντα (η μετάβαση $A \rightarrow B$ έχει διαφορετικό χρόνο από την μετάβαση $B \rightarrow A$), γι' αυτό και η αντιστοίχιση γίνεται με το Ασύμμετρο ΠΠΠ.

Συχνά σε διάφορων τύπων βιομηχανίες (όπως στην τροφίμων) υπάρχει ο περιορισμός του να μην επιτρέπεται η αναμονή των προϊόντων ανάμεσα σε δύο παραγωγικά στάδια (*no-wait flowshops*). Ορισμένα χαρακτηριστικά του προϊόντος, όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία ή το ιξώδες του, απαιτούν η κάθε επεξεργασία να ακολουθεί την αμέσως προηγούμενή της. Στη βιομηχανία τροφίμων κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο για λόγους διασφάλισης ποιότητας. Για παράδειγμα η κονσερβοποίηση πρέπει να ακολουθεί τη διαδικασία της παραγωγής, προκειμένου να διασφαλιστεί η φρεσκάδα του προϊόντος και η αποφυγή επιμόλυνσής του κατά την αναμονή. Προβλήματα μη-αναμονής συναντώνται συχνά σε βιομηχανίες παραγωγής μετάλλων και πλαστικών, χημικές και φαρμακευτικές βιομηχανίες, ακόμη και στον κλάδο της παροχής υπηρεσιών, όπου η αναμονή του πελάτη είναι απαγορευτικά υψηλού κόστους! (Bagchi *et al.*, 2006).

Για την επίλυση του χρονοπρογραμματισμού flowshop ως ΠΠΠ μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι παραπάνω μέθοδοι (ακριβείς και εμπειρικές) που προαναφέρθηκαν για το ΠΠΠ. Μία παραλλαγή εμπειρικής μεθόδου είναι ο ευρετικός αλγόριθμος του ελάχιστου χρόνου αλλαγής (shortest setup heuristic ή SST) ο οποίος όμως αποτελεί έναν «μυωπικό» τρόπο ανάπτυξης και επίλυσης του προβλήματος. Κατά την διαμόρφωση του προγράμματος η επίλυση ξεκινά επιλέγοντας αυθαίρετα μια εργασία (προϊόν). Η επόμενη που θα επιλεγεί είναι αυτή για την οποία απαιτείται ο ελάχιστος χρόνος αλλαγής σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις εργασίες μέχρι να εξαντληθούν όλες οι τιμές. Όμως η «τοπική» (κατά περίπτωση) επιλογή του μικρότερου χρόνου αλλαγής δεν συνεπάγεται απαραίτητα ότι το πρόγραμμα που θα προκύψει είναι συνολικά το βέλτιστο. Επιπλέον η αυθαίρετη επιλογή της πρώτης εργασίας προβληματίζει σχετικά με την ύπαρξη μιας καλύτερης λύσης αν η αρχική επιλογή ήταν διαφορετική.

Παράδειγμα Εφαρμογής ΠΠΠ σε βιομηχανία χρωμάτων

Το ακόλουθο παράδειγμα (<http://comp.mq.edu.au/units/comp323/lectures/ILP.pdf>, 2014) χρησιμοποιείται για να δείξει την συσχέτιση ανάμεσα στο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού και του ΠΠΠ. Η εταιρεία χρωμάτων Rainbow παράγει τέσσερα χρώματα, λευκό (white - W), κίτρινο (yellow - Y), κόκκινο (red - R) και μαύρο (black - B). Η εταιρεία χρησιμοποιεί τα ίδια μηχανήματα για την παρασκευή των χρωμάτων, οπότε είναι απαραίτητος ο καθαρισμός τους μετά από κάθε παρτίδα. Ο Πίνακας 1 που ακολουθεί, μας δείχνει τον χρόνο που απαιτείται για τον καθαρισμό μετά από την παρασκευή του κάθε χρώματος. Δεν είναι δυνατό να παραχθεί το ίδιο χρώμα διαδοχικά. Ο σκοπός μας είναι να βρούμε την καλύτερη δυνατή ακολουθία, που θα ελαχιστοποιεί τον συνολικό χρόνο καθαρισμού.

Χρώμα	Χρόνος καθαρισμού για το επόμενο χρώμα (min)			
	Λευκό	Κίτρινο	Μαύρο	Κόκκινο
Λευκό	∞	10	17	15
Κίτρινο	20	∞	19	18
Μαύρο	50	44	∞	25
Κόκκινο	45	40	20	∞

Πίνακας 1 Χρόνος καθαρισμού για μετάβαση στο επόμενο χρώμα, (Πηγή: <http://comp.mq.edu.au/units/comp323/lectures/ILP.pdf>)

Θεωρούμε το κάθε χρώμα ως τις πόλεις που θα επισκεπτόταν ο πλανόδιος πωλητής και οι χρόνοι καθαρισμού έχουν τον ρόλο των αποστάσεων των πόλεων. Λόγω του μεγέθους του προβλήματος, μπορούμε να το επιλύσουμε βρίσκοντας τις 6 πιθανές «διαδρομές», για $n=4$, τότε υπάρχουν $(n-1)! = 6$ λύσεις. Μάλιστα, σε αυτήν την περίπτωση τα κόστη δεν είναι συμμετρικά, και έτσι δε διαιρούμε στο τέλος με το 2. Υπολογίζεται ο χρόνος στην κάθε μία περίπτωση και κατόπιν επιλέγεται αυτή με τον ελάχιστο συνολικό χρόνο. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει όλες τις πιθανές διαδρομές και τα αντίστοιχα κόστη.

Διαδρομή	Κόστος
$W \rightarrow Y \rightarrow B \rightarrow R \rightarrow W$	$10+19+25+45=99$
$W \rightarrow Y \rightarrow R \rightarrow B \rightarrow W$	$10+18+20+50=98$
$W \rightarrow B \rightarrow Y \rightarrow R \rightarrow W$	$17+44+18+45=124$
$W \rightarrow B \rightarrow R \rightarrow Y \rightarrow W$	$17+25+40+20=102$
$W \rightarrow R \rightarrow B \rightarrow Y \rightarrow W$	$15+20+44+20=99$
$W \rightarrow R \rightarrow Y \rightarrow B \rightarrow W$	$15+40+19+50=124$

Πίνακας 2 Συνολικός χρόνος για πιθανές διαδρομές, (Πηγή:<http://comp.mq.edu.au/units/comp323/lectures/ILP.pdf>)

Είναι προφανές ότι η βέλτιστη διαδρομή είναι η $W \rightarrow Y \rightarrow R \rightarrow B \rightarrow W$.

Αυτός ο τρόπος επίλυσης όμως, όπως προαναφέρθηκε, δεν είναι ο κατάλληλος, αν αναλογιστούμε τι θα γινόταν αν η εταιρεία παρασκεύαζε 10άδες χρώματα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που $n=10$, θα είχαμε $(n-1)! = 3.628.800$ διαδρομές!

1.5 Υπολογιστικά λογισμικά προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του χρονικού προγραμματισμού

Στον Πίνακα 3 παρατίθενται μερικά λογισμικά προγράμματα που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος του χρονικού προγραμματισμού. Κάποια από τα λογισμικά αυτά χρησιμοποιούν αλγορίθμους μαθηματικής βελτιστοποίησης για την παραγωγή αυτοματοποιημένων λύσεων, άλλα λογισμικά επιτρέπουν μέσω προσομοίωσης της παραγωγικής διαδικασίας την ανάπτυξη των λύσεων συνεργιστικά με τον χρήστη. Στην τελευταία κατηγορία ανήκει και το λογισμικό SchedulePro® το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ως προσομοιωτής των λύσεων που θα αναπτυχθούν και το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω.

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΕΤΑΙΡΙΑ	ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ
MS Project	Microsoft	Προγραμματισμός Έργων
Primavera	Primavera Systems	Προγραμματισμός Έργων
Provisa	AT&T Iste	Job shop scheduling
Rhythm	I2 Technologies	Job shop scheduling
TESS	Taylor Industrial Software	Job shop scheduling
MIMI	Cheesepeak Decision Sc.	Μέσο-&Βραχυ- πρόθεσμος Προγρ.
NAK	Tayson & Multimedia Imaging	Timetabling
Schedule Soft	ScheduleSoft Corp.	Sch. Εργατικού Δυναμικού
TeleCenter System	TCS Management Group	Sch. Εργατικού Δυναμικού
Totalview	IEX Corp.	Sch.ΕργατικούΔυναμικού
SchedulePro	Intelligen	Προγρ. Πεπερασμένης Δυναμικότητας

Πίνακας 3. Εμπορικά Πακέτα Χρονικού Προγραμματισμού (Παπαντωνίου , 2000)

1.5.1 SchedulePro®

Το SchedulePro® είναι λογισμικό εργαλείο προσομοίωσης της παραγωγικής διαδικασίας μονάδων ασυνεχούς ή ημί-συνεχούς λειτουργίας με έμφαση στον

χρονικό προγραμματισμό. Μερικές χαρακτηριστικές εφαρμογές του SchedulePro® περιλαμβάνουν:

- Βραχυπρόθεσμος/μακροπρόθεσμος προγραμματισμός παράγωγης
- Ανάλυση ικανότητας παραγωγής
- Ταυτοποίηση και εξάλειψη περιοριστικών διεργασιών/πόρων (debottlenecking)
- Μείωση του χρόνου κύκλου παράγωγης

Το SchedulePro® χρησιμοποιεί την έννοια της συνταγής για την απεικόνιση της διαδικασίας της παραγωγής κάθε προϊόντος της μονάδος. Για την εκτέλεση κάθε συνταγής το SchedulePro® αναγνωρίζει και παρακολουθεί την χρήση πόρων όπως συσκευών, προσωπικού, πρώτων υλών και βοηθητικών παροχών, αποθηκευτικών χώρων κλπ. Ο χρονικός προγραμματισμός της παραγωγής επιτυγχάνεται με την ανάθεση των διαθέσιμων πόρων στις συνταγές που εκτελούνται ανά πάσα στιγμή στην μονάδα. Στην διαθεσιμότητα των πόρων συνυπολογίζονται και διακοπές λόγω αργιών ή προγραμματισμένης συντήρησης. Η ανάθεση των πόρων γίνεται αυτόματα από το SchedulePro® με βάση την σειρά προτεραιότητας των παρτίδων χωρίς να μεσολαβεί κάποιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να διαμορφώσει το τελικό πρόγραμμα παράγωγης εισάγοντας όλες τις επιθυμητές αλλαγές και παρακάμπτοντας την προτεινόμενη από το πρόγραμμα λύση (Intelligen Inc., 2007).

Συνοπτικά το SchedulePro® (Σχήμα 4) είναι ένα εργαλείο το οποίο μπορεί να βοηθήσει στην οργάνωση της καθημερινής παράγωγης και να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας της. Στη διαμόρφωση του προγράμματος παράγωγης, η συμβολή ατόμων που είναι υπεύθυνα στην μονάδα για την παραγωγή μπορεί να είναι πολύ ουσιαστική με το να υποδείξουν προβλήματα που έχουν εντοπίσει ή ιδέες που έχουν επεξεργαστεί για την επίλυση αυτών των προβλημάτων.

Recipe	Description	Main Product	Batch Size	Batch Time
HALLOUMI CHEESE 0,200 Kg	This kind of traditional cheese is pr	BLEND MLK	8000.00 L	5.57 h
HALLOUMI CHEESE 0,225 Kg	This kind of traditional cheese is pr	BLEND MLK	8000.00 L	5.35 h
HALLOUMI CHEESE LIGHT 12% 0,200 Kg	This kind of traditional cheese is pr	BLEND MLK light	6000.00 L	3.67 h
HALLOUMI CHEESE LIGHT 12% 0,2	This kind of traditional cheese is pr	BLEND MLK light	6000.00 L	3.75 h
HALLOUMI CHEESE LIGHT 16% 0,2	This kind of traditional cheese is pr	BLEND MLK light	8000.00 L	4.50 h
HALLOUMI CHEESE LIGHT 16% 0,2	This kind of traditional cheese is pr	BLEND MLK light	8000.00 L	4.45 h
HALLOUMI CYPRUS TRADITIONAL	This kind of traditional cheese is pr	sheep milk	3000.00 L	3.80 h
HALLOUMI ORIGINAL 0,200 Kg	This kind haloumi cheese is produc	sheep milk	6000.00 L	5.08 h
HALLOUMI ORIGINAL 0,225 Kg	This kind haloumi cheese is produc	sheep milk	6000.00 L	4.93 h

Σχ. 4 Διεπιφάνεια προγράμματος SchedulePro®

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Η ένταξη ενός προβλήματος προγραμματισμού στο SchedulePro® περιλαμβάνει την δήλωση των διαθέσιμων πόρων, τις εκτελούμενες συνταγές, και ένα σχέδιο /πρόγραμμα για το ποιες καμπάνιες πρέπει να εκτελεστούν στη μονάδα στο επιθυμητό χρονικό διάστημα με βάση τις παραγγελίες προϊόντων.

Πόροι (Resources):

Ο όρος Πόρος (Resource) περιλαμβάνει το ανθρώπινο δυναμικό, τα υλικά, το κεφάλαιο, τον εξοπλισμό, την ενέργεια και την τεχνογνωσία που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε ένα σύστημα παραγωγής ως εισροές (input). Οι εισροές μπορούν να διακριθούν στις κύριες εισροές, δηλαδή σε εκείνες που θα μετασχηματιστούν μέσω μιας παραγωγικής διαδικασίας, και σε εκείνες που βοηθούν στο μετασχηματισμό των κύριων εισροών, δηλαδή το ανθρώπινο δυναμικό, τα μηχανήματα κ.λ.π. Οι εισροές μετατρέπονται μέσω της παραγωγικής διαδικασίας σε εκροές (output). (Αυλωνίτης, 2006)

Οι πόροι χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση συνταγών (Recipes) προϊόντων. Οι διαθέσιμοι πόροι ανήκουν σε μία ή περισσότερες εγκαταστάσεις. μονάδες παραγωγής (Facilities). Κάθε μονάδα ή δηλούμενος πόρος προς μέσα σε αυτήν διαθέτει ημερολόγιο όπου μπορούν να καταγραφούν τα χρονικά διαστήματα προγραμματισμένης διακοπής λειτουργίας.

Συνταγή (Recipes):

Το SchedulePro® είναι ειδικά σχεδιασμένο για τον χειρισμό παραγωγής που εκτελείται σε παρτίδες. Ο χρονικός προγραμματισμός μονάδων, που λειτουργούν κατά παρτίδες, διαφοροποιείται από το γενικότερο πρόβλημα χρονικού προγραμματισμού σε δύο βασικά σημεία:

α) η παραγωγική διαδικασία είναι κυκλικά επαναλαμβανόμενη. Για την παραγωγή μίας καμπάνιας μπορεί να απαιτούνται πολλές παρτίδες ώστε η διαδικασία παραγωγής να επαναλαμβάνεται ξανά και ξανά.

β) Η συνταγή παραγωγής περιλαμβάνει πολλά στάδια των οποίων ο χρόνος ολοκλήρωσης μπορεί να είναι ανεξάρτητος απ' τον αριθμό των διαθέσιμων πόρων. Μία διεργασία με χημική αντίδραση, για παράδειγμα, θα έχει την ίδια χρονική διάρκεια για τη διεκπεραίωσή της, είτε υπάρχουν δύο είτε τέσσερις χειριστές στο μηχάνημα.

Το SchedulePro® χρησιμοποιεί την έννοια της συνταγής που αντιπροσωπεύει το πρότυπο ή την περιγραφή του πώς φτιάχνεται (δημιουργείται) μια παρτίδα ενός προϊόντος.

Οι συνταγές αποτελούνται από κλάδους (Branches) και τμήματα (sections) σε συμφωνία με το συγγενές πρόγραμμα προσομοίωσης παραγωγής SuperPro Designer®. Τα τμήματα της συνταγής έχουν ως σκοπό να προσομοιάζουν διακριτά και αναγνωρίσιμα κομμάτια μιας διαδικασίας όπως π.χ. ένα τμήμα εμφιάλωσης ή ένα τμήμα συσκευασίας.

Τα τμήματα αποτελούνται από διαδικασίες (Unit procedures). Ως διαδικασία νοείται κάθε αυτοτελές τμήμα της παραγωγικής διεργασίας που επιτελείται εξ ολοκλήρου σε μία συσκευή πρωτογενούς εξοπλισμού καθ' όλη τη διάρκειά της. Μια διαδικασία μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε ενέργειες (operations).

Οι ενέργειες περιγράφουν διακριτά επιμέρους βήματα τα οποία εκτελούνται διαδοχικά στην ίδια συσκευή και διαφέρουν ως προς τη λειτουργία τους και τα φυσικοχημικά τους χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, μία διαδικασία σε έναν αντιδραστήρα μπορεί να περιλαμβάνει τις ακόλουθες ενέργειες: φόρτωμα του υλικού στον αντιδραστήρα, ανάμιξη, θέρμανση, αντίδραση και άδειασμα του αντιδραστήρα. Πέρα από τη χρήση της πρωτεύουσας συσκευής, οι ενέργειες μπορούν να απαιτούν για την εκτέλεσή τους και άλλους πόρους, όπως εργατικό δυναμικό (labor), υλικά (materials), βοηθητικές παροχές (utilities), βοηθητικό εξοπλισμό (auxiliary equipment) και εξειδικευμένο προσωπικό (staff).

Ως προς τη χρονική διάρκεια εκτέλεσής τους, οι ενέργειες ανήκουν σε μία απ' τις παρακάτω κατηγορίες:

Σταθερού χρόνου (fixed duration): Η χρονική διάρκεια των ενεργειών (operations) είναι δεδομένη και εισάγεται από το χρήστη.

Σταθερού ρυθμού (Rate based duration): Η διεργασία εκτελείται με συγκεκριμένο ρυθμό και επομένως η διάρκειά της εξαρτάται από την ποσότητα του υλικού προς επεξεργασία. Για παράδειγμα η διάρκεια φόρτωσης μιας δεξαμενής με υλικό είναι ανάλογη του ποσού του υλικού προς φόρτωση. Ο ρυθμός με τον οποίο επιτελείται μια τέτοια διεργασία μπορεί να είναι σταθερός ή να εξαρτάται από τη συσκευή στην οποία πραγματοποιείται.

Εξαρτημένης διάρκειας (Dependent Duration): Η διάρκεια είναι ίση με μίας άλλης ενέργειας ή μίας σειράς εργασιών.

Ως προς το χρόνο έναρξης της εκτέλεσης μιας ενέργειας μπορούμε να αναγνωρίσουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Ταυτόχρονη έναρξη με την έναρξη της παρτίδας
- Ταυτόχρονη έναρξη με την έναρξη μιας άλλης ενέργειας
- Έναρξη ταυτόχρονη με το τέλος μιας άλλης ενέργειας
- Λήξη ταυτόχρονη με το τέλος μιας άλλης ενέργειας

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις υπάρχει η δυνατότητα χρονικής μετατόπισης (Time shift) της ενέργειας σε σχέση με το σημείο αναφοράς της

(π. χ την έναρξη μιας άλλης ενέργειας). Η μετατόπιση αυτή μπορεί να είναι σταθερή (fixed) οπότε εφαρμόζεται πάντα, ή ευέλικτη (flexible) στην οποία περίπτωση χρησιμοποιείται μόνο εφόσον υπάρχει ανάγκη να καθυστερήσει η ενέργεια αυτή, αν οι πόροι που απαιτεί δεν είναι διαθέσιμοι. Για παράδειγμα, μια ενέργεια καθαρισμού CIP μπορεί να δηλωθεί ότι έχει ευέλικτη μετατόπιση 6 ώρες. Αυτό σημαίνει ότι αν κατά τον προγραμματισμό της ενέργειας αυτής η συσκευή CIP που απαιτείται δεν είναι διαθέσιμη, η ενέργεια μπορεί να καθυστερήσει μέχρι 6 ώρες το ανώτερο, ως ότου η συσκευή απελευθερωθεί από τις άλλες ενέργειες που προηγήθηκαν και τη χρησιμοποιούν. Φυσικά, αν η συσκευή είναι άμεσα διαθέσιμη, τότε η ενέργεια μπορεί να εκτελεστεί χωρίς καθυστέρηση σε σχέση με το σημείο αναφοράς της. Η δυνατότητα χρήσης οποιασδήποτε ενδιάμεσης τιμής καθυστέρησης ανάμεσα στο μηδέν και τη μέγιστη δηλωθείσα τιμή είναι που χαρακτηρίζει αυτή την καθυστέρηση ως "ευέλικτη". Πέρα από τους πόρους που η διαδικασία χρησιμοποιεί, η κάθε ενέργεια μέσα στη διαδικασία μπορεί να απαιτήσει κάποιους από τους ακόλουθους πόρους:

- Βοηθητικό εξοπλισμό (auxiliary equipment)
- Υλικά (Materials) (εισερχόμενα –πρώτες ύλες- ή εξερχόμενα –προϊόντα ή απόβλητα-)
- Βοηθητικές παροχές (Utilities) (θέρμανση / ψύξη, ενέργεια)
- Εργατικό δυναμικό ανά ειδικότητα (Labor)
- Εργάτες/προσωπικό (Staff) (για τον προγραμματισμό εργασίας ατόμων)
- Αποθηκευτικούς χώρους (Storage Units)

Οι Πόροι των Συνταγών (Recipe Resources):

Οι πόροι στο SchedulePro® αντιπροσωπεύουν τα φυσικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση μιας συνταγής και την παραγωγή μιας παρτίδας προϊόντος. Τα είδη των πόρων που αναγνωρίζει το SchedulePro® είναι τα ακόλουθα:

Μηχανολογικός εξοπλισμός (Equipment):

Αντιπροσωπεύει το σύνολο των βασικών ή βοηθητικών συσκευών/ μηχανών (π.χ. δεξαμενή, συσκευαστική μηχανή, συσκευή CIP) της μονάδας με τη βοήθεια των οποίων εκτελούνται οι διεργασίες. Από άποψη σχεδιασμού, ένα στοιχείο εξοπλισμού είναι ένας μη αναλώσιμος επαναχρησιμοποιούμενος πόρος.

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε διαδικασία εξ ορισμού απαιτεί μια συσκευή για την εκτέλεσή της ενώ, προαιρετικά, κάθε ενέργεια μπορεί να απαιτήσει μία πρόσθετη μονάδα βοηθητικού εξοπλισμού. Κάθε συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σαν κύριος είτε σαν βοηθητικός εξοπλισμός. Για κάθε διαδικασία ή ενέργεια που απαιτεί μηχανολογικό εξοπλισμό μπορεί να δηλωθεί μια ταξινομημένη λίστα (pool) από εναλλακτικές συσκευές που θα μπορούσαν ισοδύναμα να χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεσή της. Κατά το χρονικό προγραμματισμό της διεργασίας, το SchedulePro® θα επιλέξει την πρώτη διαθέσιμη συσκευή για κάθε διαδικασία/ ενέργεια, διατρέχοντας τη λίστα των υποψηφίων συσκευών από πάνω προς τα κάτω. Η δυναμικότητα/μέγεθος κάθε συσκευής και / ή ο αριθμός λειτουργίας της μπορούν προαιρετικά να δηλωθούν στο SchedulePro®. Η πληροφορία για τη δυναμικότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξαιρεθούν από τη λίστα των υποψηφίων συσκευών αυτές που λόγω μεγέθους είναι ακατάλληλες. Η πληροφορία για το ρυθμό λειτουργίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η χρονική διάρκεια εκτέλεσης ενεργειών που έχουν δηλωθεί σε σταθερού ρυθμού. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να οριστεί μια συσκευή ως "πολλαπλών χρήσεων" υποδηλώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ικανότητά της να εκτελεί πολλές ταυτόχρονες λειτουργίες στα πλαίσια της ίδιας ή διαφορετικών συνταγών. Για παράδειγμα, ένας καταψύκτης μπορεί να ψύχει ταυτόχρονα πολλά καρότσια διαφορετικών προϊόντων από διαφορετικές παρτίδες. Για καλύτερη οργάνωση, ο μηχανολογικός εξοπλισμός, όπως και υπόλοιποι πόροι (εκτός υλικών) ομαδοποιούνται σε εγκαταστάσεις / μονάδες (Facilities).

Χώροι εργασίας (Work Area):

Οι χώροι εργασίας είναι χώροι (π. χ. εργαστήρια) που δεσμεύονται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης μια διαδικασίας με σκοπό την εκτέλεση παράλληλων

εργασιών (π. χ. εργαστηριακών μετρήσεων). Όπως και με τις συσκευές, οι χώροι εργασίας μπορεί να δηλωθούν σαν "πολλαπλών χρήσεων" οπότε υπάρχει η δυνατότητα παράλληλης χρήσης τους από πολλές διαδικασίες. Ο ορισμός χώρων εργασίας για κάθε διαδικασία είναι προαιρετικός.

Υλικά (Materials):

Τα υλικά στο SchedulePro® είναι ένας μη επαναχρησιμοποιήσιμος πόρος. Διακρίνονται δύο είδη υλικών: Αυτά που μετρούν χύδην (κατά μάζα ή όγκο) και αυτά που μετρούνται σε αριθμό μεμονωμένων οντοτήτων/ μονάδων.

Τα υλικά χρησιμοποιούνται για τον ορισμό ρευμάτων που εισέρχονται ή εξέρχονται από μία συσκευή σαν αποτέλεσμα της εκτέλεσης μιας λειτουργίας. Τα ρεύματα μπορούν να συσχετιστούν με δεξαμενές ή μονάδες αποθήκευσης (Storage Units) από τις οποίες προέρχονται ή στις οποίες καταλήγουν. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η παρακολούθηση και απογραφή των υλικών που υπάρχουν στις δεξαμενές/ αποθήκες, ώστε να προγραμματίζεται κατάλληλα η πλήρωση ή το άδειασμά τους. Μέγιστα όρια μπορούν επίσης να οριστούν στο ρυθμό διάθεσης/ απόθεσης κάποιου υλικού από τις δεξαμενές ή αποθήκες. Τα όρια αυτά δρουν σαν περιορισμοί στο χρονικό προγραμματισμό των διεργασιών της μονάδας.

Εργατικό δυναμικό κατά ειδικότητα (Labor):

Ένας από τους τρόπους που μπορεί να δηλωθεί το εργατικό δυναμικό στο SchedulePro® είναι κατά ειδικότητα (ο άλλος τρόπος είναι κατά άτομο, όπως φαίνεται πιο κάτω). Για κάθε τύπο ειδικότητας, ο χρήστης μπορεί να ορίσει τον μέγιστο αριθμό ατόμων της ειδικότητας αυτής που είναι διαθέσιμα στη μονάδα. Μέσα από το ημερολόγιο της κάθε ειδικότητας μπορούν να οριστούν αποκλίσεις από τη δηλωθείσα τιμή, όπως, για παράδειγμα, διαφοροποιήσεις στη διαθεσιμότητα ανά βάρδια. Στο χρήστη δίνεται η δυνατότητα να δηλώσει πόσα άτομα απαιτούνται ανά ειδικότητα για την εκτέλεση κάθε ενέργειας.

Εργάτες/ Προσωπικό (Staff) :

Εδώ το εργατικό δυναμικό της μονάδας δηλώνεται κατά άτομο. Για κάθε ενέργεια, ο χρήστης μπορεί να ορίσει μια ταξινομημένη λίστα (Pool) ατόμων

στην οποία θα μπορούσε να ανατεθεί όπως και τον αριθμό των ατόμων που απαιτούνται. Όταν γίνεται ο χρονικός προγραμματισμός της μονάδας, το SchedulePro® επιλέγει από τη λίστα τον αντίστοιχο αριθμό διαθέσιμων ατόμων που μπορούν να εκτελέσουν την εργασία.

Βοηθητικές Παροχές (Utilities):

Βοηθητικές παροχές στο SchedulePro® είναι μη επαναχρησιμοποιήσιμοι πόροι που δε μπορούν να αποθηκευτούν ή να απογραφούν. Στις βοηθητικές παροχές περιλαμβάνονται τα θερμαντικά/ψυκτικά μέσα (π. χ. νερό ψύξης, ατμός) και η ηλεκτρική ενέργεια. Σε κάθε ενέργεια μπορεί να δηλωθεί ο αριθμός κατανάλωσης όλων των βοηθητικών παροχών που απαιτούνται για την εκτέλεσή της. Όπως και με το εργατικό δυναμικό υπάρχει η δυνατότητα ορισμού ενός μέγιστου ρυθμού διάθεσης μιας βοηθητικής παροχής στη μονάδα.

Χρονικός Προγραμματισμός (Scheduling):

Μετά τον ορισμό των συνταγών που εκτελούνται στη μονάδα για την παραγωγή προϊόντων και των πόρων που είναι διαθέσιμοι για την εκτέλεσή τους, ο χρήστης είναι έτοιμος να προχωρήσει στο χρονικό προγραμματισμό της λειτουργίας της μονάδας με βάση τις παραγγελίες προϊόντων.

Το SchedulePro® χρησιμοποιεί τις ακόλουθες έννοιες για τον καθορισμό του προγράμματος παραγωγής:

Καμπάνιες (Campaigns):

Μια καμπάνια είναι μια σειρά από παρτίδες για συγκεκριμένο προϊόν (κι επομένως συγκεκριμένης συνταγής). Για τον ορισμό μια καμπάνιας, επομένως, απαιτείται η επιλογή της συνταγής, ο απαιτούμενος αριθμός των παρτίδων (με βάση το μέγεθος της παραγγελίας) και πληροφορία για το χρονικό σημείο εκτέλεσης της καμπάνιας. Για το τελευταίο, το SchedulePro® παρέχει μια σειρά από επιλογές, οι οποίες είναι:

- καθορισμός ακριβούς χρόνου έναρξης.
- καθαρισμός ακριβούς χρόνου λήξης.

- καθορισμός χρόνου έναρξης σε σχέση με την έναρξη ή λήξη μια άλλης καμπάνιας.

Προαιρετικά, για κάθε καμπάνια μπορούν να οριστούν διεργασίες που προηγούνται της έναρξης ή που έπονται της λήξης της. Παράδειγμα τέτοιων διεργασιών είναι ο καθαρισμός της γραμμής παραγωγής πριν την αλλαγή προϊόντος.

Παρτίδες (Batches):

Μια παρτίδα αντιπροσωπεύει την εκτέλεση μιας συνταγής σε συγκεκριμένο χρόνο και με τη χρήση συγκεκριμένων πόρων. Σε πλήρη αντιστοιχία προς τη συνταγή από την οποία πηγάζει, μια παρτίδα έχει καταχωρήσεις για κάθε διαδικασία και ενέργεια που περιλαμβάνει η συνταγή με καθορισμένους, όμως, χρόνους έναρξης και λήξης και καθορισμένους πόρους. Η ουσία, επομένως, του προβλήματος του χρονικού προγραμματισμού είναι ο πλήρης καθορισμός των παρτίδων με βάση τις δηλωμένες καμπάνιες, χωρίς να υπάρχουν επικαλύψεις στη χρήση των πόρων.

Αυτόματος χρονικός προγραμματισμός (Automatic Scheduling)

Κατά τη δημιουργία ενός πλάνου παραγωγής, το SchedulePro® προγραμματίζει κάθε καμπάνια χωριστά και σύμφωνα με τη σειρά που έχουν εισαχθεί στη λίστα από το χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, η υψηλή θέση μιας καμπάνιας στη λίστα ερμηνεύεται σαν "υψηλή προτεραιότητα" και επομένως οι διαθέσιμοι πόροι πρέπει να της δοθούν κατά προτεραιότητα.

Ο χρόνος έναρξης μιας καμπάνιας προσδιορίζεται με βάση την αντίστοιχη επιλογή του χρήστη. Οι παρτίδες μέσα στην καμπάνια προγραμματίζονται κατ' αλληλουχία. για τον προγραμματισμό των παρτίδων, μια σημαντική παράμετρος είναι αυτή του χρόνου κύκλου παραγωγής (cycle time) που μετρά τη χρονική απόσταση μεταξύ της έναρξης δύο διαδοχικών παρτίδων. Είναι επιθυμητό ο χρόνος κύκλου να είναι όσο το δυνατό μικρότερος ούτως ώστε η συνολική διάρκεια εκτέλεσης της καμπάνιας να είναι η μικρότερη δυνατή. Το SchedulePro® κάνει μια εκτίμηση του ελάχιστου χρόνου κύκλου παραγωγής

με βάση τους χρόνους εκτέλεσης των διαδικασιών της συνταγής και τις διαθέσιμες συσκευές ή μηχανήματα. Όσο περισσότερες συσκευές είναι διαθέσιμες για μία καμπάνια, τόσο μειώνεται ο χρόνος κύκλου αφού οι παρτίδες μπορούν να αυτονομηθούν μεταξύ τους αξιοποιώντας όλο το εύρος των διαθέσιμων συσκευών. Η χρονική έναρξη της κάθε παρτίδας στο SchedulePro® τοποθετείται με βάση τον εκτιμώμενο ελάχιστο χρόνο κύκλου. Όλες οι διαδικασίες και ενέργειες που περιλαμβάνονται στην συνταγή που αντιστοιχεί στην παρτίδα προγραμματίζονται σε σχέση με το χρόνο έναρξης της παρτίδας και χρησιμοποιούν τους προεπιλεγμένους πόρους που είναι απαραίτητοι για την εκτέλεσή τους. Είναι πιθανόν όμως οι πόροι αυτοί να μην είναι διαθέσιμη την αντίστοιχη χρονική περίοδο, είτε γιατί χρησιμοποιούνται από κάποιες άλλες παρτίδες υψηλής προτεραιότητας, είτε γιατί η χρήση τους, για το συγκεκριμένο διάστημα είναι απαγορευτική, λόγω συντήρησης, αργίας, κλπ. Σε αυτές τις περιπτώσεις το SchedulePro® προσπαθεί να επιλύσει τη διαφορά χρησιμοποιώντας έναν από τους κάτωθι μηχανισμούς:

- επιλογή από τη λίστα των συμβατών πόρων, εναλλακτικού πόρου, που είναι διαθέσιμος.
- χρονική μετάθεση της διαδικασίας/ ενέργειας που έχει το πρόβλημα, χρησιμοποιώντας την ευέλικτη μετατόπιση (flexible shift) αν είναι διαθέσιμη.
- χρονική μετάθεση όλης της παρτίδας στο πλησιέστερο χρονικό σημείο στο οποίο όλοι οι απαιτούμενοι πόροι είναι διαθέσιμοι.

Χρονικός Προγραμματισμός από το Χρήστη (User Scheduling)

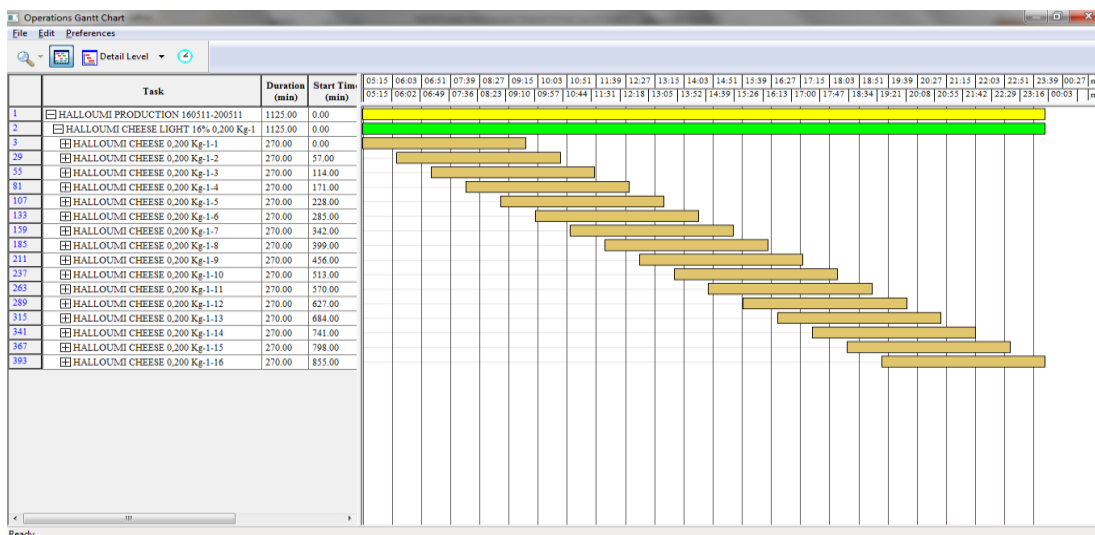
Το προτεινόμενο από το SchedulePro® πρόγραμμα παραγωγής είναι η βάση για τη δημιουργία του τελικού προγράμματος από το χρήστη. Ο χρήστης μπορεί να κληθεί να επιλύσει παραβιάσεις περιορισμών που δεν ήταν δυνατόν να επιλυθούν από το σχεδιαστικό αλγόριθμο και να εισάγει τις δικές του προτιμήσεις στην επιλογή πόρων και τη χρονική έναρξη των παρτίδων. Ακόμη πιο σημαντική μπορεί να είναι η συμβολή του στην επικαιροποίηση του προγράμματος παραγωγής, καθ' όλη τη διάρκεια της εξέλιξής του. Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης, παρακολουθώντας την πραγματική παραγωγή στη μονάδα, μπορεί να διαπιστώσει αποκλίσεις από το σχεδιασμένο πρόγραμμα

(μεγαλύτεροι χρόνοι εκτέλεσης για κάποιες διεργασίες, καθυστερήσεις στην έναρξη παρτίδων, μη διαθεσιμότητα κάποιας συσκευής λόγω μηχανικού προβλήματος), να τις εισάγει στο SchedulePro® και να ζητήσει την ανανέωση του μελλοντικού προγράμματος παραγωγής με βάση τα νέα δεδομένα. Με αυτό τον τρόπο, ο χρήστης γίνεται ένα ενεργό μέλος στη δημιουργία ενός εφικτού και επικαιροποιημένου προγράμματος παραγωγής και όχι ένας παθητικός αποδέκτης λύσεων που παράχθηκαν αυτόματα από κάποιο "έξυπνο" αλγόριθμο.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ

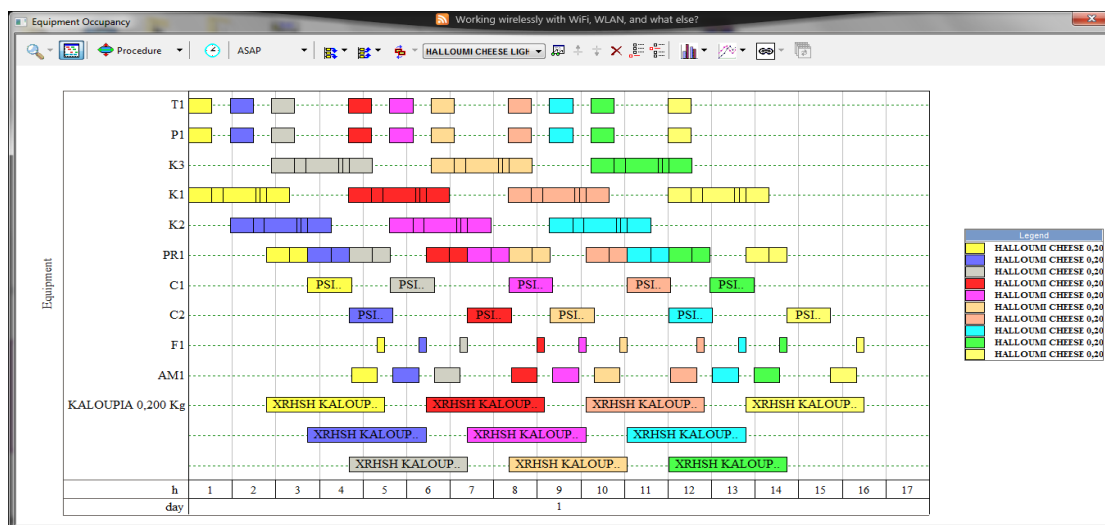
Για την καλύτερη παρακολούθηση του χρονικού προγραμματισμού, το SchedulePro® δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης των αποτελεσμάτων σε μία σειρά από γραφήματα. Πιο συγκεκριμένα, το SchedulePro® παρέχει τους ακόλουθους τύπους διαγραμμάτων:

- Γράφημα Gantt (Operation Gantt Chart) - (Σχήμα 5) απεικονίζει γραφικά τη χρονική εξέλιξη των διαδικασιών για την ολοκλήρωση της παραγωγής μιας συνταγής ή σχεδιασμένων παρτίδων.



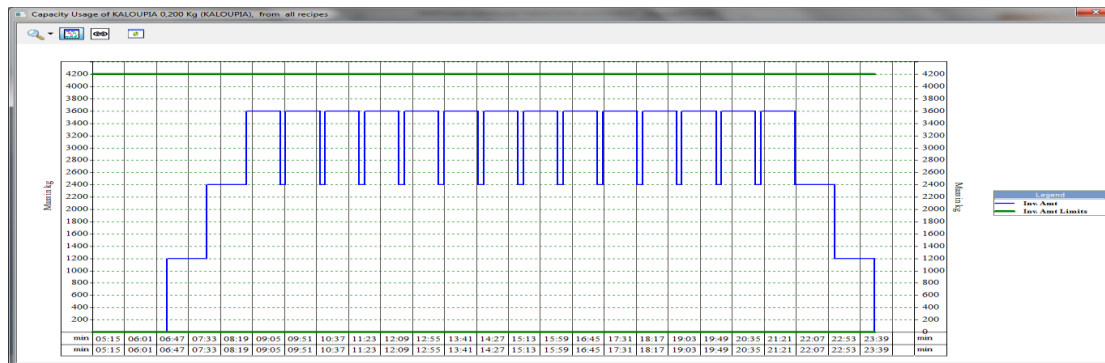
Σχ. 5. Γράφημα Gantt από το λογισμικό πρόγραμμα SchedulePro®

- Διάγραμμα Απασχόλησης Εξοπλισμού/ Προσωπικού (Equipment/ Staff Occurance Profile)- εμφανίζει τις χρονικές περιόδους (Σχήμα 6) κατά τις οποίες, οι συσκευές, χώροι εργασίας, και το προσωπικό εκτελούν κάποιες λειτουργίες, στα πλαίσια της εκτέλεσης των παρτίδων. Οποιαδήποτε παραβίαση περιορισμού (π.χ. χρονική επικάλυψη λειτουργιών) σε σχέση με τους παραπάνω πόρους αυτούς, θα φανεί στο διάγραμμα αυτό. Με αυτόν τον τρόπο, το διάγραμμα απασχόλησης εξοπλισμού/ προσωπικού μπορεί να γίνει η βάση για την επίλυση προβλημάτων όπως και τη διαρκή ανανέωση του πλάνου παραγωγής.



Σχ. 6. Διάγραμμα Απασχόλησης Εξοπλισμού/ Προσωπικού (Equipment/ Staff Occurance Profile)

- Διαγράμματα χρήσης εξοπλισμού (Capacity Usage of Equipment) Σχήμα 7 εμφανίζει σε σχέση με τη χρονική διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας τη χρήση του εξοπλισμού της μονάδας. Με τη χρήση του διαγράμματος αυτού μπορεί να ελεγχθεί κατά πόσο η μονάδα χρησιμοποιεί όλη τη δυναμικότητα του εξοπλισμού της, καθώς επίσης και αν η μονάδα έχει περισσότερη δυναμικότητα σε εξοπλισμό απ' ό, τι απαιτείται ή το αντίθετο, εάν η δυναμικότητα της μονάδας δεν είναι αρκετή.



Σχήμα 7. Διάγραμμα χρήσης εξοπλισμού (Capacity Usage of Equipment)

Το SchedulePro® παρέχει επίσης διάφορους τύπους αναφορών (reports) για την υποβολή παρουσιάσεων των αποτελεσμάτων του χρονικού προγραμματισμού.

Όλες οι αναφορές παράγονται σε μορφή αρχείων HTML (Intelligen Inc. 2007).

2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη του χρονικού προγραμματισμού σε μονάδα τύπου flowshop παραγωγής πολλαπλών προϊόντων με διαφορετικούς χρόνους εναλλαγής που εξαρτώνται από την αλληλουχία των προϊόντων. Απώτερος στόχος είναι η εξαγωγή της ακολουθίας τοποθέτησης των προϊόντων προς εκτέλεση που ελαχιστοποιεί τον συνολικό χρόνο παραγωγής. Οι ποσότητες των προς παραγωγή προϊόντων θα θεωρηθούν γνωστές και θα υποθεθεί ότι το κάθε προϊόν παράγεται στην αλληλουχία μόνο μία φορά.

Το πρόβλημα της τοποθέτησης των προϊόντων θα αντιμετωπιστεί χωριστά για την περίπτωση του ενός σταδίου και των πολλαπλών σταδίων. Σε κάθε περίπτωση θα θεωρηθεί ότι υπάρχει μόνο ένας επεξεργαστής (μηχανή) διαθέσιμος ανά στάδιο.

Η μαθηματική αποτύπωση του προβλήματος θα γίνει ως το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή. Ιδιαίτερη έμφαση στην διαμόρφωση του προβλήματος θα δοθεί στις ακόλουθες ιδιαιτερότητες της βιομηχανίας τροφίμων:

- Υπάρχουν πολλαπλοί χρόνοι εναλλαγής προϊόντων που σχετίζονται με διαφορετικά χαρακτηριστικά τους (είδος προϊόντος, μέγεθος συσκευασίας κλπ.)
- Η πρακτική της ομαδοποίησης των προϊόντων σε κατηγορίες με κοινά χαρακτηριστικά
- Η απουσία χρόνων αναμονής στην εκτέλεση διαδοχικών σταδίων
- Η επικάλυψη των χρόνων εκτέλεσης διαδοχικών σταδίων (πχ. κατά την μεταφορά του προϊόντος από μία δεξαμενή σε άλλη).

Η μαθηματική προσέγγιση θα συνοδεύεται και από την ανάλυση μελετών περιπτώσεων από πραγματικές βιομηχανίες με πραγματικά δεδομένα. Για την επίλυση των προβλημάτων στις μελέτες περιπτώσεων θα χρησιμοποιηθεί κώδικας που αναπτύχθηκε στο υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB ενώ για

την προσομοίωση και οπτική αποτύπωση των λύσεων θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό SchedulePro.

3. ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΟΣ ΣΤΑΔΙΟΥ

Το πρόβλημα της χρονικής ιεράρχησης των εργασιών μελετάται αρχικά στην πιο απλή μορφή του για διεργασίες ενός σταδίου πάνω σε μοναδικό επεξεργαστή (μηχανή, συσκευή ή μονάδα). Χαρακτηριστικό παράδειγμα διεργασιών αυτού του τύπου είναι οι μονάδες συσκευασίας οι οποίες συσκευάζουν διαφορετικά προϊόντα (πχ. χυμούς διάφορων φρούτων) σε περιέκτες διαφορετικού μεγέθους (πχ. φιάλες 1 λίτρου, 330 ml κλπ.). Ως «επεξεργαστής» στην περίπτωση αυτή νοείται είτε η εμφιαλωτική μηχανή είτε ολόκληρη η συσκευαστική μονάδα εφόσον περιέχει περισσότερες συσκευές (πριν ή μετά την εμφιάλωση) οι οποίες όμως συνολικά λειτουργούν ως μία ενιαία μονάδα συνεχούς λειτουργίας.

Εάν η εναλλαγή των προϊόντων ή συσκευασιών συνοδεύεται από νεκρούς χρόνους καθαρισμού ή μονταρίσματος του κοινού επεξεργαστή και οι χρόνοι αυτοί εξαρτώνται από την αλληλουχία των προϊόντων (ποιο προϊόν προηγείται και ποιο έπεται), τότε ο συνολικός χρόνος παραγωγής μίας δεδομένης λίστας προϊόντων εξαρτάται από την σειρά με την οποία θα εκτελεστούν και άρα είναι αντικείμενο βελτιστοποίησης με σκοπό την ελαχιστοποίησή του.

Έστω ότι μία μονάδα ενός επεξεργαστή έχει να εκτελέσει n εργασίες $\{J_j | 1 \leq j \leq n\}$. Κάθε «εργασία» μπορεί να νοηθεί ως διακριτή παραγγελία ή εντολή παραγωγής ενός προϊόντος. Ο χρόνος εκτέλεσης p_j κάθε εργασίας j στον επεξεργαστή είναι δεδομένος οπότε αν και συνεισφέρει στον συνολικό χρόνο παραγωγής, δεν τον επηρεάζει. Αυτό που διαφοροποιεί τον χρόνο παραγωγής είναι οι χρόνοι εναλλαγής (για πλύσιμο, εξάρμωση μηχανής κλπ.) από το ένα προϊόν στο άλλο. Ο απαιτούμενος χρόνος εναλλαγής από την εργασία i στην εργασία j $\{d_{ij} | 1 \leq i, j \leq n, i \neq j\}$ είναι δυνατόν επομένως να ερμηνευθεί ως η «απόσταση» ανάμεσα στις «πόλεις» i και j στο ΠΠΠ. Αν b_{ij} είναι μία δυαδική μεταβλητή η οποία παίρνει την τιμή 1 αν η εργασία i ακολουθείται στην αλληλουχία από την εργασία j (αλλιώς έχει τιμή 0), τότε η

ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραγωγής μπορεί να αποδοθεί από την ακόλουθη αντικειμενική συνάρτηση:

$$\min \sum_i \sum_j b_{i,j} d_{i,j}$$

η οποία είναι ανάλογη του ΠΠΠ. Επομένως, το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης αλληλουχίας εργασιών μπορεί να εκφραστεί και να επιλυθεί ως το πρόβλημα του περιπλανώμενου πωλητή (ΠΠΠ). Σε σχέση με το αυθεντικό ΠΠΠ, η επίλυση του προβλήματος της ιεράρχησης των προς εκτέλεση προϊόντων παρουσιάζει τις ακόλουθες δύο διαφορές:

α. Στο αυθεντικό ΠΠΠ ο πίνακας είναι d_{ij} συμμετρικός καθώς η απόσταση μεταξύ των πόλεων i και j είναι η ίδια ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της μετάβασης. Σε ένα παραγωγικό σύστημα όμως οι χρόνοι εναλλαγής δεν είναι απαραίτητα συμμετρικοί (για παράδειγμα ο χρόνος πλυσίματος μίας γαλακτοπαραγωγικής μονάδας είναι σημαντικά μεγαλύτερος αν γίνει μετάβαση από σοκολατούχο γάλα σε λευκό απ' ότι για την αντίθετη μετάβαση). Η μη συμμετρικότητα του πίνακα χρόνων εναλλαγής δεν επηρεάζει την μαθηματική περιγραφή του προβλήματος.

β. Στο ΠΠΠ επιδιώκεται η εύρεση μίας «κυκλικής» λύσης (κατά την οποία ο πωλητής επιστρέφει, αφού επισκεφθεί όλες τις πόλεις, στην πόλη από την οποία ξεκίνησε) ενώ στο πρόβλημα του προγραμματισμού της παραγωγής κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο. Για τον σκοπό αυτό, στο πρόβλημα της αλληλούχισης των εργασιών προστίθεται μία επιπλέον εικονική εργασία με μηδενικό χρόνο εκτέλεσης και μηδενικούς χρόνους εναλλαγής ώστε να αποτελέσει την αρχική και τελική εργασία προς εκτέλεση. Η προσθήκη της εργασίας αυτής δεν επηρεάζει τους χρόνους και μπορεί να αγνοηθεί στην βέλτιστη λύση.

3.1 Μαθηματική αναπαράσταση ως ΠΠΠ

Με βάση τα παραπάνω, το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης σειράς εκτέλεσης εργασιών σε έναν επεξεργαστή μπορεί να διατυπωθεί και να λυθεί ως πρόβλημα ΠΠΠ, ως ακολούθως. Αν $V = \{J_j | 1 \leq j \leq n\}$ είναι το σύνολο των εργασιών (με την τελευταία όπως προαναφέρθηκε να είναι εικονική), $\{d_{ij} | 1 \leq i, j \leq n, i \neq j\}$ είναι ένας πίνακας που καταγράφει τους χρόνους εναλλαγής από την εργασία i στην εργασία j , και b_{ij} είναι μία δυαδική μεταβλητή η οποία παίρνει την τιμή 1 αν η εργασία i ακολουθείται στην αλληλουχία από την εργασία j (αλλιώς έχει τιμή 0), το πρόβλημα βελτιστοποίησης που θα πρέπει να λυθεί είναι:

$$\min \sum_i \sum_j b_{i,j} d_{i,j}$$

με τους περιορισμούς:

$$\sum_i b_{i,j} = 1 \forall j$$

$$\sum_j b_{i,j} = 1 \forall i$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in V-S} b_{i,j} \geq 1 \forall S \subset V$$

Μαθηματικά, το παραπάνω πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού και μπορεί να επιλυθεί με τις αντίστοιχες διαθέσιμες μεθόδους.

3.2 Ιεράρχηση εργασιών κατά ομάδες προϊόντων

Στην προηγούμενη θεώρηση, δεν υποτέθηκε κάποια «συγγένεια» στα προς παραγωγή προϊόντα κι επομένως οι μεταξύ τους χρόνοι εναλλαγής είναι τυχαίοι. Στην πράξη όμως είναι πολύ συχνό τα προϊόντα να ομαδοποιούνται

σε συγγενείς κατηγορίες είτε ως προς την φύση τους (είδος προϊόντος) είτε ως προς το μέγεθος συσκευασίας. Οι πίνακες με τους χρόνους εναλλαγής μπορεί να είναι εκφρασμένοι με βάση τις ομάδες προϊόντων και όχι για κάθε προϊόν χωριστά. Συνήθως οι χρόνοι εναλλαγής είναι μικροί ή ακόμα και μηδενικοί για παρόμοια προϊόντα που ανήκουν στην ίδια ομάδα και σημαντικά μεγαλύτεροι ανάμεσα σε προϊόντα διαφορετικών ομάδων.

Είναι επομένως συνηθισμένο στην βιομηχανική πρακτική να εκτελούνται ομαδοποιημένα σε σειρά προϊόντα της ίδιας κατηγορίας με σκοπό την εκμετάλλευση του μικρού ή μηδενικού χρόνου εναλλαγής μεταξύ τους. Όπως θα φανεί όμως και με την μελέτη περίπτωσης που ακολουθεί, η στρατηγική αυτή δεν οδηγεί πάντα στο βέλτιστο σενάριο ελαχιστοποίησης του συνολικού χρόνου παραγωγής. Επιπλέον, η ομαδοποίηση των προϊόντων είναι διαφορετική ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, άλλη ομαδοποίηση προκύπτει αν χρησιμοποιηθεί η φύση του προϊόντος ως κριτήριο και άλλη αν χρησιμοποιηθεί το μέγεθος της τελικής συσκευασίας. Για τις εναλλαγές ανάμεσα σε κάθε είδος ομάδας απαιτείται είτε χρόνος καθαρισμού ή ρύθμισης, οπότε προκύπτει και το δίλημμα για το αν είναι προτιμότερη η ιεράρχηση στην παραγωγή των προϊόντων με βάση το προϊόν ή με βάση το μέγεθος της συσκευασίας.

3.3 Μελέτη περίπτωσης: Γραμμή υποσυσκευασίας φυτοφαρμάκων

3.3.1 Περιγραφή της μονάδας

Η περίπτωση που πρόκειται να μελετηθεί αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μονάδας υποσυσκευασίας προϊόντων από χύμα μορφή σε διάφορες μικρότερες συσκευασίες που απευθύνονται στον καταναλωτή. Οι πρώτες ύλες είναι προϊόντα φυτοπροστασίας σε υγρή μορφή τα οποία έρχονται στο εργοστάσιο στην τελική τους σύνθεση, χωρίς να χρειάζονται κάποια επιπλέον χημική διεργασία και συσκευάζονται σε αυτόματες γεμιστικές μηχανές. Η ανάγκη για τη δημιουργία ενός προγράμματος παραγωγής

προκύπτει από το μεγάλο πλήθος (>40) των κωδικών των προϊόντων, τις συγκεκριμένες διαθέσιμες ώρες λειτουργίας της μονάδας (5 ημέρες την εβδομάδα, 7½ ώρες την μέρα), από τον περιορισμένο αριθμό γραμμών συσκευασίας και εργατικού δυναμικού καθώς και από το γεγονός ότι τα προϊόντα συσκευάζονται ανά παρτίδες με συνεχή εναλλαγή από το ένα στο επόμενο στις διαθέσιμες γραμμές συσκευασίας. Επιπλέον το υψηλό κόστος των προϊόντων (με δεδομένες τις απώλειες που υπάρχουν κάθε φορά που πρέπει να εφαρμοστεί ο καθαρισμός της μηχανής) και η αναγκαιότητα για περιορισμένη έκθεση του προσωπικού κατά την αλλαγή των προϊόντων (εξαιτίας της επικινδυνότητας των προϊόντων) δίνει στο σύστημα την τάση να αποφεύγονται οι διασκορπισμένες παραγωγές του ίδιου προϊόντος και στα πλαίσια του ενός μήνα προγραμματίζεται μόνο μια φορά η παραγωγή από κάθε δραστική ουσία.

Κάποια από τα κοινά χαρακτηριστικά της μονάδας αυτής με μια μονάδα παραγωγής τροφίμων είναι η φύση των προϊόντων (υγρά σε χύμα κατάσταση) και η ανάγκη εντατικού καθαρισμού της γραμμής συσκευασίας κατά το πέρασμα από το ένα προϊόν στο επόμενο για την αποφυγή επιμόλυνσης (cross contamination). Επιπλέον το γεγονός ότι τα προϊόντα έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής και εποχικότητα ως προς την χρήση τους, περιορίζει τον προγραμματισμό παραγωγής ως προς την διάθεση στην αγορά με όμοιο τρόπο όπως και στα τρόφιμα. Για τους λόγους αυτούς αποτελεί και ένα ενδιαφέρον παράδειγμα μελέτης περίπτωσης σχεδιασμού και οργάνωσης παραγωγής με εφαρμογές και στη βιομηχανία των τροφίμων.

3.3.2 Προϊόντα και χρόνοι εναλλαγής

Η μονάδα διαθέτει μηχανή συσκευασίας με δυνατότητα επεξεργασίας από συσκευασίες των 10ml έως αυτές των 1000ml και μπορεί να συσκευάσει εύφλεκτα και μη εύφλεκτα προϊόντα. Τα προϊόντα κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες: τα εύφλεκτα (EC) τα οποία περιέχουν οργανικό διαλύτη, και τα μη εύφλεκτα (SC) τα οποία είναι διαλυμένα σε νερό. Οι πρώτες ύλες (χύμα προϊόν) είναι δυνατό να έρθουν στην εγκατάσταση είτε συσκευασμένες σε

βαρέλια 200lt είτε σε δεξαμενές 1000lt. Η συσκευαστική τροφοδοτείται είτε από την δεξαμενή της είτε απευθείας από τις αρχικές συσκευασίες των προϊόντων.

Στην γενική περίπτωση, κάθε εναλλαγή προϊόντων προαπαιτεί α) το πλύσιμο της γραμμής παραγωγής και την σύνδεσή της με την πηγή της πρώτης ύλης, και β) την επαναρρύθμισή της για να δεχτεί την νέα συσκευασία. Επομένως, ο συνολικά απαιτούμενος χρόνος για την αλλαγή των προϊόντων (changeover time) στη συσκευαστική είναι το άθροισμα των δύο παραπάνω χρόνων. Ο χρόνος πλυσίματος επηρεάζεται εκτός από το είδος του προϊόντος (διαλύτης οργανικός ή νερό), και από τον τρόπο με τον οποίο έρχεται συσκευασμένη στο εργοστάσιο η πρώτη ύλη. Στην περίπτωση που η πρώτη ύλη έρχεται συσκευασμένη σε δεξαμενή ο χρόνος πλυσίματος σύμφωνα με παρατηρήσεις μειώνεται κατά 30% σε σχέση με την περίπτωση που η πρώτη ύλη έρχεται σε βαρέλια. Ο λόγος για αυτή τη μείωση στο χρόνο πλυσίματος είναι ότι στην περίπτωση που η πρώτη ύλη είναι σε δεξαμενή 1000lt τότε αυτή δεν αδειάζει στην δεξαμενή της συσκευαστικής αλλά το προϊόν αντλείται απευθείας από την αρχική του συσκευασία και τροφοδοτεί την μηχανή. Σαν αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή δεν είναι απαραίτητο να ακολουθήσει καθαρισμός της δεξαμενής της συσκευαστικής. Στον Πίνακα 4 φαίνονται αναλυτικά κάποιοι ενδεικτικοί (αλλά όχι απαραίτητα αντιπροσωπευτικοί της πρακτικής της μονάδας) χρόνοι πλυσίματος (σε min) από το ένα είδος σκευάσματος στο επόμενο.

		ΠΡΟΪΟΝ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΕΙ	
		EC	SC
ΠΡΟΙΟΝ ΠΟΥ ΠΡΟΗΓΕΙΤΑΙ	EC(σε βαρέλι)	90	120
	EC(σε δεξαμενή)	63	84
	SC(σε βαρέλι)	150	120
	SC(σε δεξαμενή)	105	84

Πίνακας 4. Χρόνοι πλυσίματος μηχανής (σε min) κατά την αλλαγή από τη μια κατηγορία σκευάσματος στην επόμενη.

		EC BAR	EC TAN	SC BAR	EC TAN	SC TAN	EC TAN	SC TAN	SC BAR	EC BAR	EC BAR	SC BAR	SC BAR	SC TAN	EC TAN	EC BAR
		PROD1	PROD2	PROD3	PROD4	PROD5	PROD6	PROD7	PROD8	PROD9	PROD10	PROD11	PROD12	PROD13	PROD14	PROD15
PRO D1	EC BAR	0	90	120	150	120	90	120	120	90	90	120	120	120	90	90
PRO D2	EC TAN	63	0	84	123	84	63	84	84	63	63	84	84	84	63	63
PRO D3	SC BAR	150	150	0	210	120	150	120	120	150	150	120	120	120	150	150
PRO D4	EC TAN	123	123	144	0	144	123	144	144	123	123	144	144	144	123	123
PRO D5	SC TAN	105	105	84	165	0	105	84	84	105	105	84	84	84	105	105
PRO D6	EC TAN	63	63	84	123	84	0	84	84	63	63	84	84	84	63	63
PRO D7	SC TAN	105	105	84	165	84	105	0	84	105	105	84	84	84	105	105
PRO D8	SC BAR	150	150	120	210	120	150	120	0	150	150	120	120	120	150	150
PRO D9	EC BAR	90	90	120	150	120	90	120	120	0	90	120	120	120	90	90
PRO D10	EC BAR	90	90	120	150	120	90	120	120	90	0	120	120	120	90	90
PRO D11	SC BAR	150	150	120	210	120	150	120	120	150	150	0	120	120	150	150
PRO D12	SC BAR	150	150	120	210	120	150	120	120	150	150	120	0	120	150	150
PRO D13	SC TAN	105	105	84	165	84	105	84	84	105	105	84	84	0	105	105
PRO D14	EC TAN	63	63	84	123	84	63	84	84	63	63	84	84	84	0	63
PRO D15	EC BAR	90	90	120	150	120	90	120	120	90	90	120	120	120	90	0

Πίνακας 5. Απαιτούμενος χρόνος καθαρισμού μηχανής συσκευασίας ανά είδος δραστικής ουσίας

Δεδομένου ότι η μονάδα επεξεργάζεται 15 διαφορετικές δραστικές ουσίες (οι οποίες θα αναφέρονται ως PROD1 έως PROD15) και με βάση την κατηγοριοποίηση της κάθε ουσίας ως EC ή SC και ως «Σε δεξαμενή» ή «Σε Βαρέλι», μπορεί να εξαχθεί για τα προϊόντα ο Πίνακας 5 στον οποίο παρουσιάζεται ο απαιτούμενος χρόνος πλυσίματος ανάλογα με το είδος της δραστικής ουσίας.

Ο χρόνος αλλαγής συσκευασίας εξαρτάται ουσιαστικά από το μέγεθος της φιάλης που θα χρησιμοποιηθεί και όχι από την ποσότητα γεμίσματος. Στον Πίνακα 6 καταγράφεται το είδος φιάλης που χρησιμοποιείται για κάθε τελική συσκευασία προϊόντος.

ΦΙΑΛΗ	ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ(cc)
25	10
25	25
50	40
50	50
125	80
125	100
125	125
250	150
250	200
250	250
500	400
500	500
1000	700
1000	1000

Πίνακας 6. Είδος φιάλης που χρησιμοποιείται για κάθε τελική συσκευασία

Μετά από μελέτη του παραγωγικού συστήματος και καταγραφή του χρόνου αλλαγής της μηχανής, διαμορφώθηκε ο Πίνακας 7 στον οποίο καταγράφεται ο απαιτούμενος χρόνος για την εναλλαγή από το ένα είδος φιάλης στο επόμενο. Οι παραδοχές που έπρεπε να ληφθούν υπόψη για τη συμπλήρωση αυτού του πίνακα σχετίζονται κυρίως με το γεγονός ότι υπάρχουν δυο κατηγορίες φιαλών: οι μεγαλύτερες φιάλες (1000, 500 και 250cc) και οι πιο μικρές φιάλες (125, 50 και 25cc). Παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Η αλλαγή από τη μια κατηγορία στην άλλη επιβαρύνει κατά 120min
- Η αλλαγή μέσα σε κάθε κατηγορία (πχ από 500 σε 1000) επιβαρύνει για τις μεν μικρές φιάλες κατά 120min και για τις μεγάλες φιάλες κατά 90min
- Στην περίπτωση που το είδος της φιάλης παραμένει το ίδιο και το είδος της συσκευασίας παραμένει και αυτό το ίδιο (για παράδειγμα από 10cc σε 10cc διαφορετικού προϊόντος) χρόνος αλλαγής υπολογίζεται ότι είναι περίπου 20min.

- Στην περίπτωση όμως που το είδος της φιάλης παραμένει το ίδιο αλλά το είδος της συσκευασίας μεταβάλλεται (για παράδειγμα από 50 στα 40cc) τότε ο χρόνος αλλαγής υπολογίζεται στα 60min.

ΕΙΔΟΣ ΦΙΑΛΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΗΓΕΙΤΑΙ	ΕΙΔΟΣ ΦΙΑΛΗΣ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΕΙ						
		25	50	125	250	500	1000
	25	20/60	120	120	120	120	120
	50	120	20/60	120	120	120	120
	125	120	120	20/60	120	120	120
	250	120	120	120	20/60	90	90
	500	120	120	120	90	20/60	90
	1000	120	120	120	90	90	20/60

Πίνακας 7. Απαιτούμενος χρόνος ρύθμισης μηχανής συσκευασίας ανά είδος φιάλης

Συνδυάζοντας τα δεδομένα του Πίνακα 6 και του Πίνακα 7 προκύπτει ο Πίνακας 8 στον οποίο σε πλήρη ανάπτυξη καταγράφεται ο απαιτούμενος χρόνος ανά είδος τελικής συσκευασίας.

ΣΥΣΚΕΥΣΙΑ ΠΟΥ ΠΡΟΗΓΕΙΤΑΙ	ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΕΙ														
		10	25	40	50	80	100	125	150	200	250	400	500	700	1000
	10	20	60	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	25	60	20	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	40	120	120	20	60	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	50	120	120	60	20	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	80	120	120	120	120	20	60	60	120	120	120	120	120	120	120
	100	120	120	120	120	60	20	60	120	120	120	120	120	120	120
	125	120	120	120	120	60	60	20	120	120	120	120	120	120	120
	150	120	120	120	120	120	120	120	20	60	60	90	90	90	90
	200	120	120	120	120	120	120	120	60	20	60	90	90	90	90
	250	120	120	120	120	120	120	120	60	60	20	90	90	90	90
	400	120	120	120	120	120	120	120	90	90	90	20	60	90	90
	500	120	120	120	120	120	120	120	90	90	90	60	20	90	90
	700	120	120	120	120	120	120	120	90	90	90	90	90	20	60
	1000	120	120	120	120	120	120	120	90	90	90	90	90	60	20

Πίνακας 8. Απαιτούμενος χρόνος ρύθμισης μηχανής συσκευασίας ανά είδος συσκευασίας

Τα τελικά προϊόντα τα οποία η μηχανή έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί είναι 42 και παρουσιάζονται στον Πίνακα 9. Με τον όρο «τελικό προϊόν» ή «κωδικός» (SKU) νοείται το προϊόν που προκύπτει από τον συνδυασμό της δραστικής ουσίας και το μέγεθος της συσκευασίας.

Τελικό Προϊόν	Είδος Δραστικής Ουσίας	Είδος Συσκευασίας (ml)
PROD1_200	PROD1	200
PROD1_250	"	250
PROD1_1000	"	1000
PROD2_1000	PROD2	1000
PROD3_100	PROD3	100
PROD4_250	PROD4	250
PROD4_1000	"	1000
PROD5_80	PROD5	80
PROD5_100	"	100
PROD5_250	"	250
PROD5_400	"	400
PROD5_500	"	500
PROD6_40	PROD6	40
PROD6_200	"	200
PROD6_400	"	400
PROD7_50	PROD7	50
PROD8_50	PROD8	50
PROD9_400	PROD9	400
PROD9_1000	"	1000
PROD10_25	PROD10	25
PROD10_50	"	50
PROD10_125	"	125
PROD10_200	"	200
PROD11_50	PROD11	50
PROD11_250	"	250
PROD11_1000	"	1000
PROD12_25	PROD12	25
PROD12_100	"	100
PROD12_250	"	250
PROD12_400	"	400
PROD12_1000	"	1000
PROD13_40	PROD13	40
PROD13_100	"	100
PROD13_200	"	200
PROD14_10	PROD14	10
PROD14_100	"	100
PROD14_250	"	250
PROD14_500	"	500
PROD14_1000	"	1000
PROD15_10	PROD15	10
PROD15_200	"	200
PROD15_1000	"	1000

Πίνακας 9. Τελικά προϊόντα και η αντιστοιχία με το είδος δραστικής και το είδος συσκευασίας

Η πλήρης αποτύπωση των χρόνων εναλλαγής ανάμεσα στα 42 αυτά προϊόντα θα απαιτούσε την κατασκευή ενός πίνακα με $42 \times 42 = 1764$ στοιχεία κάτι που από μόνο του κάνει εμφανή την πολυπλοκότητα του συστήματος ακόμα και ως προς τον υπολογισμό των απαιτούμενων χρόνων.

Η δυναμικότητα της συσκευαστικής εξαρτάται από το μέγεθος της συσκευασίας που επεξεργάζεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 10.

Είδος συσκευασίας (cc)	lt/7,5hr	lt/hr
10	62,4	8.32
25	168	22.40
40	240	32.00
50	288	38.40
80	460	61.33
100	580	77.33
125	720	96.00
150	748	99.73
200	1000	133.33
250	1550	206.67
300	1800	240
400	2250	300.00
500	2800	373.33
700	3300	440,00
1000	4000	533.33

Πίνακας 10. Δυναμικότητα συσκευαστικής ανάλογα με το είδος της συσκευασίας

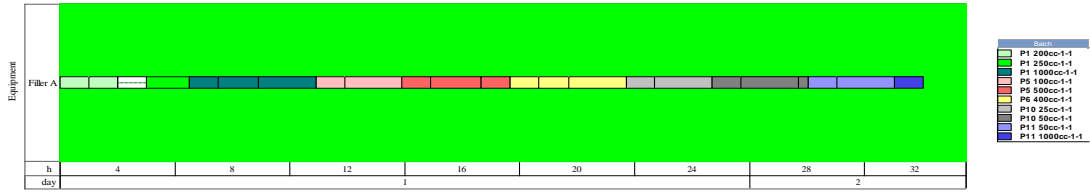
Η μονάδα σε ημερήσια βάση παράγει ένα μόνο υποσύνολο των παραπάνω προϊόντων. Με δεδομένο, επομένως, το σύνολο των προϊόντων που πρέπει να παραχθούν, το ζητούμενο είναι να βρεθεί η βέλτιστη ακολουθία που ελαχιστοποιεί τους νεκρούς χρόνους (δηλαδή τους χρόνους εναλλαγής της συσκευαστικής). Το πρόβλημα αποτυπώθηκε μαθηματικά (όπως περιγράφηκε παραπάνω) στο περιβάλλον και την γλώσσα του μαθηματικού πακέτου MATLAB και για την επίλυσή του χρησιμοποιήθηκε η ρουτίνα ανοιχτού κώδικα IpSolve (<http://sourceforge.net/projects/lpsolve/>). Ο κώδικας MATLAB που αναπτύχθηκε για την λύση του παραδείγματος παρουσιάζεται στο Παράρτημα της εργασίας. Οι λύσεις μοντελοποιήθηκαν στο λογισμικό SchedulePro ώστε να είναι εφικτή η οπτική αποτύπωση του προγράμματος παραγωγής με την βοήθεια διαγραμμάτων Gantt.

Για την διευκόλυνση των δοκιμών αναπτύχθηκε μία εφαρμογή μέσω MATLAB η οποία, μέσω κατάλληλα διαμορφωμένης διεπιφάνειας, επέτρεπε την επιλογή των προϊόντων προς παραγωγή και την εξαγωγή της βέλτιστης λύσης. Για κάθε δοκιμή, επιλέγονταν τυχαία 10 διαφορετικά προϊόντα προς παραγωγή και υπολογίζονταν η βέλτιστη αλληλουχία η οποία αποτυπώνονταν στο SchedulePro. Ο Πίνακας 11 παρουσιάζει μία υποθετική παραγωγή και τις αντίστοιχες ποσότητες ανά προϊόν.

Προϊόν	Ποσότητα (L)
Prod1-200	200,00
Prod1-250	206,67
Prod1-1000	533,33
Prod5-100	77,33
Prod5-500	373,33
Prod6-400	300,00
Prod10-25	22,40
Prod10-50	38,40
Prod11-50	38,40
Prod11-1000	533,33

Πίνακας 11: Υποθετική Παραγωγή 10 προϊόντων

Στο Σχήμα 8 εμφανίζεται το πρόγραμμα παραγωγής με βάση την παραπάνω ακολουθία. Η διάρκεια εκτέλεσης όλης της παραγωγής είναι 30,04 ώρες. Τα χρώματα στο γράφημα αντιστοιχούν στα διαφορετικά προϊόντα. Ομοειδή χρώματα αντιστοιχούν σε προϊόντα με την ίδια δραστική ουσία (πχ. αποχρώσεις του πράσινου αντιστοιχούν στα προϊόντα Prod1). Η εκτέλεση παραγωγής κάθε προϊόντος περιλαμβάνει το στάδιο της συσκευασίας, το πλύσιμο της συσκευής (αν απαιτείται λόγω αλλαγής δραστικής) και το μοντάρισμα της μηχανής (αν απαιτείται λόγω αλλαγής μεγέθους συσκευασίας). Για τον λόγο αυτό σε κάθε καμπάνια προϊόντος αντιστοιχούν στο διάγραμμα Gantt μέχρι 3 ομοιόχρωμες μπάρες που αντιπροσωπεύουν τα 3 αυτά στάδια.



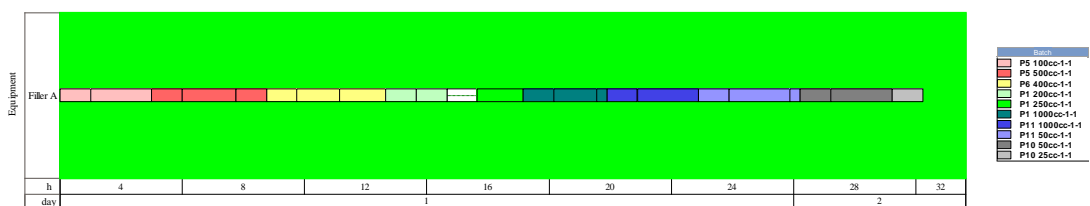
Σχήμα 8: Gantt Chart για την υποθετική Παραγωγή του Πίνακα 11

Ο Πίνακας 12 παρουσιάζει την βέλτιστη ακολουθία εκτέλεσης των προϊόντων με συνολικό χρόνο εκτέλεσης τις 28,22 ώρες.

Προϊόν
Prod5-100
Prod5-500
Prod6-400
Prod1-200
Prod1-250
Prod1-1000
Prod11-1000
Prod11-50
Prod10-50
Prod10-25

Πίνακας 12: Βέλτιστη ακολουθία εκτέλεσης των 10 προϊόντων

Στο Σχήμα 9 φαίνεται το αντίστοιχο πρόγραμμα παραγωγής.

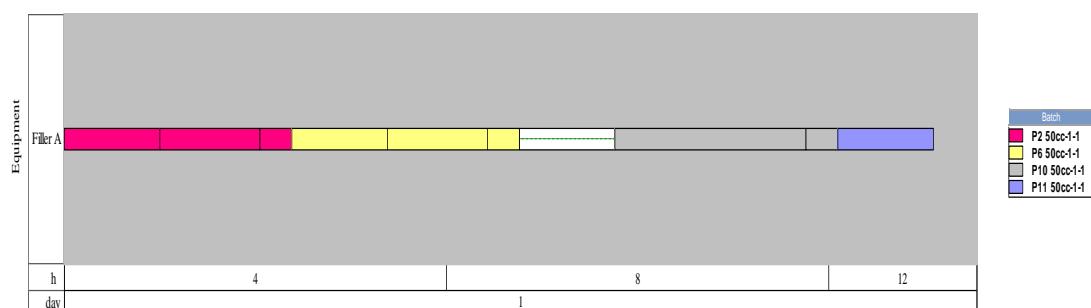


Σχήμα 9. Πρόγραμμα Παραγωγής για τα προϊόντα του Πίνακα 12

Είναι εμφανές ότι η βέλτιστη λύση διατηρεί την ομαδοποίηση των προϊόντων ανά δραστική ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ενδιάμεσες πλύσεις. Με κατάλληλη όμως διαμόρφωση της αλληλουχίας ώστε ίδιες ή παρόμοιες

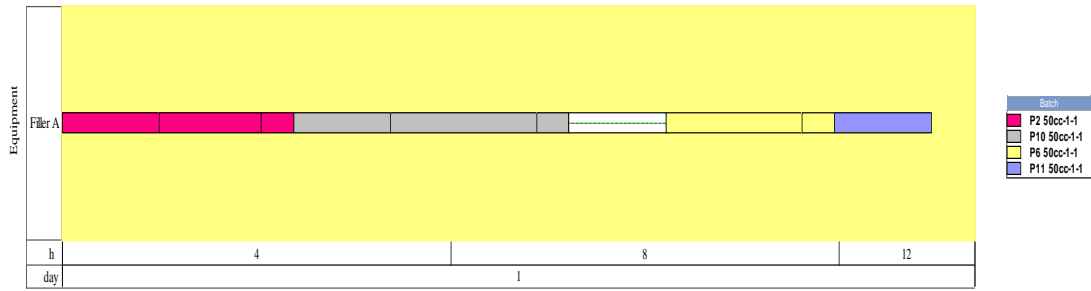
συσκευασίες να εκτελούνται σε σειρά, είναι δυνατόν να μειωθούν και οι χρόνοι μονταρίσματος της συσκευαστικής.

Αν και η βέλτιστη λύση ομαδοποιεί τα ίδια προϊόντα, δεν ομαδοποιεί υποχρεωτικά και τα προϊόντα που ανήκουν στην ίδια οικογένεια. Για παράδειγμα τα προϊόντα Prod1 και Prod10, σύμφωνα με τον Πίνακα 4, ανήκουν στην ίδια οικογένεια των EC Bar προϊόντων. Παρ' όλα αυτά, στην βέλτιστη ακολουθία δεν παράγονται κατ' αλληλουχία με το Prod11 (της οικογένειας SC Bar) να μεσολαβεί ανάμεσά τους. Αυτό μπορεί να δειχθεί πιο εύκολα με ένα απλό παράδειγμα με 4 προϊόντα Prod2, Prod6, Prod10 και Prod11, τα οποία ανήκουν στις οικογένειες EC Tan, EC Tan, EC Bar και SC Bar αντίστοιχα. Για την απαλοιφή της εξάρτησης του συνολικού χρόνου παραγωγής από τους χρόνους εναλλαγής λόγω συσκευασίας, για τα παραπάνω προϊόντα θεωρήθηκε το ίδιο μέγεθος συσκευασίας των 50ml. Το Σχήμα 10 παρουσιάζει το πρόγραμμα παραγωγής για τα 4 προϊόντα με την παραπάνω ακολουθία όπου τα ομοειδή EC Tan παράγονται μαζί. Ο συνολικός χρόνος παραγωγής είναι 546 λεπτά.



Σχήμα 10. Πρόγραμμα παραγωγής με ομαδοποίηση ομοειδών EC προϊόντων

Το Σχήμα 11 παρουσιάζει το πρόγραμμα παραγωγής με βάση την ακολουθία Prod2→Prod10→Prod6→Prod11 (EC Tan→EC Bar→EC Tan→SC Bar) όπου τα προϊόντα της οικογένειας EC Tan παράγονται χωριστά. Ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης αυτή την φορά είναι 537 λεπτά, κατά λίγα λεπτά μικρότερος από προηγουμένως.

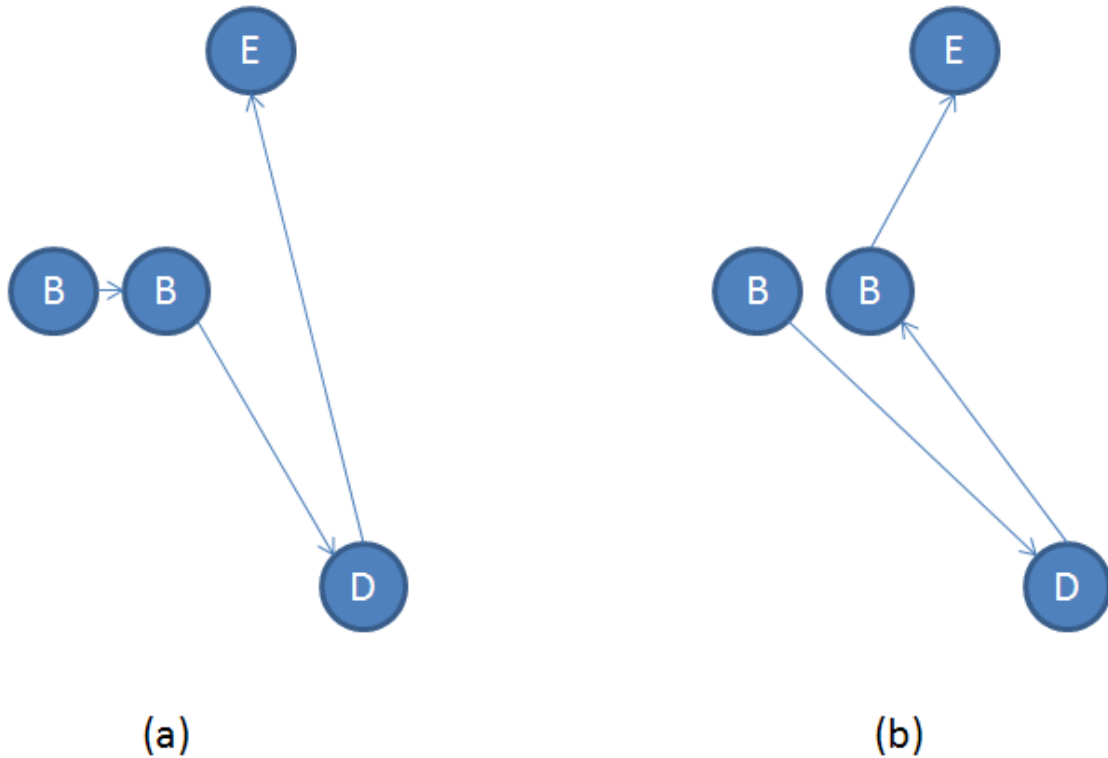


Σχήμα 11. Πρόγραμμα Παραγωγής με βάση την ακολουθία Prod2→Prod10→Prod6→Prod11 (EC Tan→EC Bar→EC Tan→SC Bar)

Μαθηματικά, η περίπτωση αυτή μπορεί να αποδοθεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 12, όπου παρουσιάζονται δύο εναλλακτικά σενάρια για μετάβαση ανάμεσα σε προϊόντα Β της ίδιας οικογένειας και Δ και Ε διαφορετικής. Για να διαπιστωθεί ποιο είναι το πιο συμφέρον σενάριο θα πρέπει να ελεγχθεί η σχέση:

$$d_{BB} + d_{DE} < d_{DB} + d_{BE}$$

Αν ισχύει, συμφέρει να γίνει η μετάβαση ανάμεσα στα όμοια προϊόντα της ίδιας οικογένειας (περίπτωση (α) στο Σχήμα 12) με απευθείας μετάβαση από το D στο E. Διαφορετικά, τα προϊόντα Β συμφέρει να αποτελέσουν ενδιάμεσους σταθμούς στην πορεία από το D στο E (περίπτωση (β) στο Σχήμα 12).



Σχήμα 12. Εναλλακτικά σενάρια για μετάβαση ανάμεσα σε προϊόντα B της ίδιας οικογένειας και Δ και E διαφορετικής

Συμπεραίνεται επομένως ότι η ομαδοποίηση στην αλληλουχία παραγωγής ομοειδών προϊόντων που ανήκουν στην ίδια οικογένεια δεν οδηγεί υποχρεωτικά στην βέλτιστη λύση ως προς την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εκτέλεσης. Δεδομένου ότι η κατά οικογένεια ομαδοποίηση των προϊόντων αποτελεί συνήθη πρακτική στην βιομηχανία, η παραπάνω ανάλυση δείχνει ότι η αποτελεσματικότητα αυτής της πρακτικής θα πρέπει να εξετάζεται κατά περίπτωση.

4. ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί το ζήτημα της ιεράρχησης εργασιών (πχ. παραγγελιών διαφορετικών προϊόντων) σε μονάδα συνεχούς ροής (flowshop) όπου, σε αντίθεση με την προηγούμενη ανάλυση, υπάρχουν πολλαπλά (αλλά κοινά για όλα τα προϊόντα) στάδια επεξεργασίας. Σκοπός είναι η εύρεση της βέλτιστης ακολουθίας εργασιών ώστε να ελαχιστοποιείται ο συνολικός χρόνος παραγωγής (make-span). Στην ορολογία του χρονικού προγραμματισμού το πρόβλημα αυτό αναφέρεται (Bagchi *et al.*, 2006) ως $F_m|no-wait|C_{max}$ όπου το σύμβολο F χρησιμοποιείται για να δηλώσει ότι το πρόβλημα αφορά flowshop μοντέλο ροής (ίδια στάδια παραγωγής με την ίδια σειρά εκτέλεσης για όλα τα προϊόντα), m είναι ο αριθμός των σταδίων, η συνθήκη $|no-wait|$ υποδηλώνει ότι δεν μπορεί να υπάρξει χρόνος αναμονής ανάμεσα στα στάδια (η ολοκλήρωση του ενός σταδίου συνεπάγεται την υποχρεωτική έναρξη του επόμενου) και το σύμβολο C_{max} αντιπροσωπεύει το κριτήριο βελτιστοποίησης που είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης των εργασιών. Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται συχνά στην βιομηχανία τροφίμων δεδομένου ότι οι περισσότερες μονάδες είναι τύπου flow-shop με πολλά προϊόντα να παράγονται στην ίδια γραμμή ενώ, σε πολλές περιπτώσεις, δεν υπάρχει η δυνατότητα ενδιάμεσης αποθήκευσης και παραμονής του προϊόντος ή η δυνατότητα αυτή αποτελεί μέρος της «συνταγής» παραγωγής (πχ. παραμονή για ωρίμανση, επώαση κλπ.) κι επομένως εκτελείται ως ένα από τα στάδια παραγωγής με συγκεκριμένους χρόνους ολοκλήρωσης της επεξεργασίας.

Όπως αναφέρεται από τους Bagchi *et al.* (2006), το πρόβλημα $F_m|no-wait|C_{max}$ μπορεί να διαμορφωθεί και να επιλυθεί ως ΠΠΠ. Εδώ θα αναπαρασταθεί το πρόβλημα αυτό ως ΠΠΠ με δύο διαφορές ως προς την αρχική διατύπωσή του:

1. Τα στάδια παραγωγής μπορεί να επικαλύπτονται χρονικά.
2. Θα συμπεριληφθούν στους χρόνους εκτέλεσης του κάθε σταδίου και χρόνοι εναλλαγής προϊόντων οι οποίοι θα διαφοροποιούνται ανάλογα με την ακολουθία των προϊόντων.

Η διαμόρφωση των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού παραγωγής είναι ιδιαίτερα επηρεασμένη (ή ίσως προκατειλημμένη) από τις ανάγκες του κατασκευαστικού/μεταποιητικού κλάδου διακριτών προϊόντων (discrete manufacturing) στον οποίο η παραγωγική διαδικασία εξελίσσεται μέσα από διακριτά, μη επικαλυπτόμενα στάδια. Στην βιομηχανία των διεργασιών όμως η οποία επεξεργάζεται κυρίως ρευστά προϊόντα, τα παραγωγικά στάδια επικαλύπτονται υποχρεωτικά καθώς απαιτούνται χρόνοι για την μεταφορά του υλικού από το ένα στάδιο (συσκευή) στο επόμενο οι οποίοι επιβαρύνουν χρονικά και τα δύο στάδια. Γι' αυτό και απαιτείται η επαναδιατύπωση του παραπάνω προβλήματος προγραμματισμού με επικαλυπτόμενους χρόνους σταδίων.

4.1 Μαθηματική αναπαράσταση ως ΠΠΠ

Έστω μία παραγωγική μονάδα τύπου flowshop η οποία καλείται να εκτελέσει n εργασίες $\{J_j | 1 \leq j \leq n\}$ με m στάδια παραγωγής η καθεμία. Όπως προαναφέρθηκε, κάθε «εργασία» μπορεί να νοηθεί ως διακριτή παραγγελία ή εντολή παραγωγής ενός προϊόντος. Ο χρόνος εκτέλεσης του σταδίου i της εργασίας j είναι $p_{i,j}$. Αν τα στάδια δεν επικαλύπτονται χρονικά τότε το ξεκίνημα της κάθε εργασίας καθορίζεται από τον συνολικό χρόνο παραγωγής των προηγούμενων. Στην περίπτωση των επικαλυπτόμενων σταδίων απαιτεί και η γνώση του χρονικού διαστήματος επικάλυψης δύο διαδοχικών σταδίων. Αυτός ο χρόνος προέρχεται από την «συνταγή» εκτέλεσης του προϊόντος, είναι επομένως γνωστός. Έστω $c_{i \rightarrow i+1, j}$ ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα στην έναρξη δύο διαδοχικών σταδίων i και $i+1$ στην εργασία j . Τότε, ο χρόνος έναρξης $s_{i,j}$ κάθε σταδίου i της εργασίας j δίνεται από τον τύπο:

$$s_{i,j} = \sum_{k < i} c_{k \rightarrow k+1, j}$$

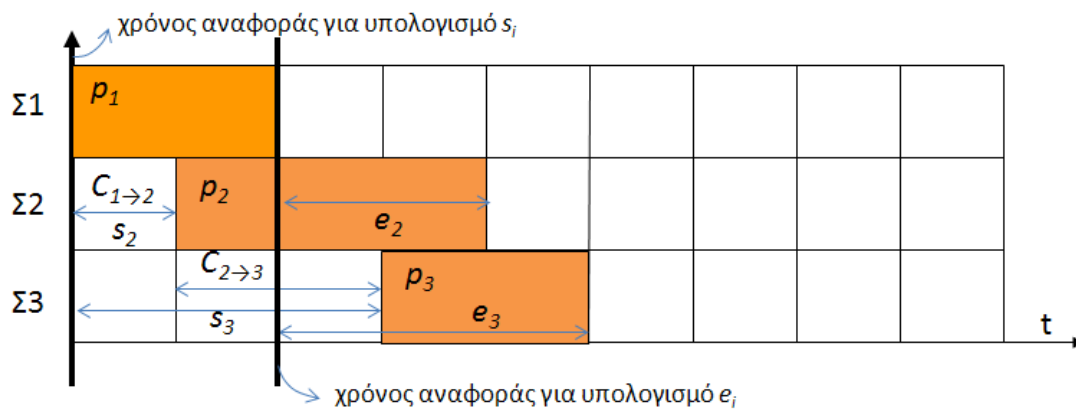
Στην παραπάνω ανάλυση κάποιο στάδιο έχει οριστεί ως στάδιο αναφοράς i_{ref} με μηδενικό χρόνο έναρξης. Αυτό το στάδιο είναι λογικό να είναι το πρώτο

χρονικά μιας και σηματοδοτεί την έναρξη εκτέλεσης συνολικά της εργασίας, αυτό όμως δεν είναι και απαραίτητο.

Σε σχέση με τον χρόνο λήξης του σταδίου αναφοράς (που θεωρείται και πάλι μηδέν), ο χρόνος λήξης $e_{i,j}$ κάθε άλλου σταδίου i της εργασίας j δίνεται από τον τύπο:

$$e_{i,j} = s_{i,j} + p_{i,j} - p_{i_{ref},j}$$

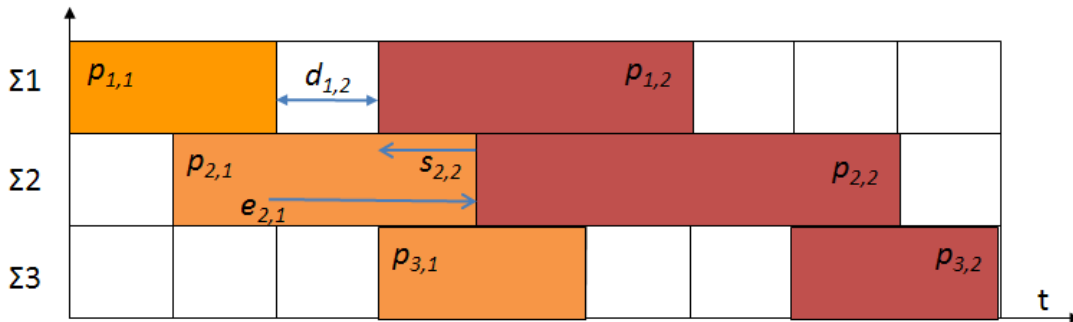
Τα παραπάνω επαληθεύονται εύκολα με την βοήθεια του Σχήματος 13 όπου παρουσιάζεται μία ενδεικτική εργασία τριών σταδίων με επικαλυπτόμενους χρόνους εκτέλεσης. Στο σχήμα, το πρώτο στάδιο έχει επιλεγεί ως στάδιο αναφοράς. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι χρόνοι έναρξης $s_{i,j}$ και λήξης $e_{i,j}$ έχουν διαφορετικό χρονικό σημείο αναφοράς.



Σχήμα 13: Ενδεικτική εργασία τριών σταδίων με επικαλυπτόμενους χρόνους εκτέλεσης.

Το σημαντικό στην ανάλυση αυτή είναι ότι οι παραπάνω χρόνοι καθορίζονται από την ίδια διαδικασία παραγωγής και μπορούν να υπολογιστούν εκ των προτέρων. Ακολουθώντας την φιλοσοφία του ΠΠΠ, το «κόστος» μετάβασης από μία εργασία j σε μία άλλη εργασία $j+1$ είναι η χρονική καθυστέρηση στην έναρξη της επόμενης εργασίας λόγω χρήσης των επεξεργαστών (μηχανών) από την προηγούμενη. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 14, η καθυστέρηση αυτή για κάθε ζευγάρι εργασιών αποδίδεται σε ένα στάδιο την φορά. Γραφικά, αυτό είναι το στάδιο της επόμενης εργασίας το οποίο θα «κολλήσει» πρώτα στο αντίστοιχο της προηγούμενης αν νοητά η επόμενη εργασία «κυλήσει» προς τα πίσω στον άξονα του χρόνου. Στο Σχήμα αυτό, το περιοριστικό στάδιο είναι το

Σ2 το οποίο δεν επιτρέπει την νωρίτερο έναρξη της δεύτερης εργασίας λόγω επικάλυψης με την πρώτη εργασία.



Σχήμα 14: Ενδεικτική εργασία τριών σταδίων χωρίς αλληλεπικαλύψεις.

Χρησιμοποιώντας το ίδιο στάδιο αναφοράς για όλες τις εργασίες, η επόμενη εργασία θα μπορούσε θεωρητικά να ξεκινήσει με την ολοκλήρωση του σταδίου αναφοράς της προηγούμενης εργασίας. Αυτό όμως θα μπορούσε να προκαλέσει επικαλύψεις σε επόμενα στάδια εφόσον ο χρόνος ολοκλήρωσης ενός σταδίου στην προηγούμενη εργασία είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο έναρξης του ίδιου σταδίου στην επόμενη. Επομένως, η μέγιστη καθυστέρηση (σε σχέση με το στάδιο αναφοράς) που μπορεί να προκύψει για την εναλλαγή από εργασία j σε μία άλλη εργασία $j+1$ είναι:

$$d_{j,j+1} = \max \left\{ 0, \max_k (e_{k,j} - s_{k,j+1}) \right\}$$

Αυτοί οι χρόνοι καθυστέρησης έχουν υπολογιστεί με βάση το επιλεγμένο στάδιο αναφοράς. Δεδομένου ότι για το στάδιο αναφοράς οι χρόνοι εκτέλεσης για κάθε εργασία είναι δεδομένοι, ο χρόνος ολοκλήρωσης όλων των εργασιών στον αντίστοιχο επεξεργαστή εξαρτάται από τους χρόνους καθυστέρησης μετάβασης από την μία εργασία στην άλλη. Επομένως, η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραγωγής που είναι το ζητούμενο συμπίπτει με την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων μετάβασης από μία εργασία στη επόμενη. Η καθυστέρηση αυτή $d_{j,j+1}$ αντιστοιχεί στην απόσταση μετάβασης από την πόλη j στην πόλη $j+1$, κι επομένως το πρόβλημα Fm|no-wait|C_{max} με επικαλυπτόμενους χρόνους σταδίων μπορεί να διαμορφωθεί και να επιλυθεί ως ΠΠΠ.

Απαραίτητη προϋπόθεση γι' αυτό είναι να υπολογιστούν οι χρόνοι $d_{j,j+1}$ για κάθε ζευγάρι εργασιών. Εφόσον υπάρχουν χρόνοι εναλλαγής (πλύσιμο, μοντάρισμα κλπ.) τότε αυτοί οι χρόνοι θα πρέπει να ενσωματωθούν κατά περίπτωση (ανά ζεύγος εργασιών ή προϊόντων) στον υπολογισμό των χρόνων έναρξης και ολοκλήρωσης κάθε σταδίου και κάθε εργασίας με δεδομένη την εργασία που προηγείται ή έπεται.

Όπως προαναφέρθηκε, στις προς εκτέλεση εργασίες προστίθεται και μία εικονική εργασία '0' με μηδενικούς χρόνους εκτέλεσης ανά στάδιο η οποία στο ΠΠΠ παίζει τον ρόλο της αρχικής «πόλης» στην οποία καταλήγει και η διαδρομή. Για κάθε εργασία, ο χρόνος μετάβασης από την εικονική εργασία στην εργασία αυτή είναι ίσος με τον ελάχιστο χρόνο έναρξης όλων των σταδίων. Ισχύει επομένως:

$$d_{0,j} = \min_k (s_{k,j})$$

Αντίστοιχα, ο χρόνος μετάβασης από κάθε εργασία στην εικονική είναι ίσος με τον μέγιστο χρόνο λήξης :

$$d_{j,0} = \max_k (e_{k,j})$$

4.2 Μελέτη περίπτωσης: Γραμμή παραγωγής γάλακτος

4.2.1 Περιγραφή της μονάδας

Η περίπτωση που μελετάται εδώ αφορά την γραμμή παραγωγής παστεριωμένου γάλακτος ελληνικής γαλακτοβιομηχανίας. Η εταιρία, μεταξύ άλλων, παράγει τα εξής προϊόντα στην εξεταζόμενη γραμμή παραγωγής:

- Γάλα λευκό πλήρες και ημι-αποβουτυρωμένο (low fat)
- Γάλα σοκολατούχο πλήρες και ημι-αποβουτυρωμένο (low fat)
- Γάλα τύπου Κεφίρ
- Γάλα τύπου Αριάνη.

Τα παραπάνω προϊόντα συσκευάζονται σε διαφορετικά μεγέθη φιαλών: 2L, 0,5L ή 0,33L.

Η παραγωγική διαδικασία είναι η ακόλουθη: από τις δεξαμενές αποθήκευσης, το προϊόν φτάνει έως το γεμιστικό μηχάνημα, στη συνέχεια τοποθετείται το πώμα, η ετικέτα, η ώρα και ημερομηνία παραγωγής, η διάρκεια μέχρι τη λήξη, και τέλος οι φιάλες συσκευάζονται σε πλαστική συσκευασία με το μηχάνημα της θερμοκόλλησης.

Τα στάδια αυτά επιτελούνται σε 4 μηχανές που λειτουργούν σε σειρά: γεμιστική, πωματέζα, ετικετέζα και θερμοσυρρίκνωση. Σε κάθε αλλαγή προϊόντος, κάθε μηχανή απαιτεί ρυθμίσεις οι οποίες σε κάποιες μηχανές εξαρτώνται από τον τύπο του προϊόντος που συσκευάζεται, ενώ σε άλλες από το μέγεθος της συσκευασίας του προϊόντος. Επιπλέον των ρυθμίσεων, η εναλλαγή παραγωγής των διαφορετικών τύπων προϊόντων, απαιτεί εντατικό καθάρισμα του μηχανήματος πλήρωσης των φιαλών, για την αποφυγή των μολύνσεων αφενός, αλλά και της αλλοίωσης των γεύσεων των προϊόντων αφετέρου. Επομένως, κάθε αλλαγή προϊόντος απαιτεί την ανάλωση μη παραγωγικού χρόνου για την εκτέλεση σειράς πλυσιμάτων και αλλαγών σε κάθε μηχανή χωριστά. Είναι επομένως επιθυμητό να ακολουθείται η βέλτιστη σειρά εκτέλεσης των προϊόντων για την ελαχιστοποίηση των νεκρών χρόνων.

Παρά την τάση για αποφυγή της διασκορπισμένης παραγωγής του ίδιου προϊόντος στα πλαίσια της εβδομάδας, τα προϊόντα με σύντομη διάρκεια ζωής πρέπει να συσκευάζονται καθημερινά για να διατηρούνται φρέσκα μέχρι τον καταναλωτή, ώστε και να προτιμώνται από αυτόν.

Τα προϊόντα με παρατεταμένη χρονική διάρκεια ζωής παρασκευάζονται μία ή δύο φορές την εβδομάδα, σε συγκεκριμένες ημέρες και συνήθως διαμοιράζονται αμέσως στους εμπόρους. Γενικώς υπάρχει η τάση να αποφεύγεται το make-to-stock.

4.2.2 Χρόνοι εναλλαγής προϊόντων

Παρακάτω, γίνεται η αναλυτική περιγραφή των μηχανών της μελετώμενης γραμμής και των απαιτούμενων χρόνων εναλλαγής.

Τα προϊόντα φθάνουν μέχρι τη μηχανή πλήρωσης (γεμιστική) μέσω σωληνώσεων από τις δεξαμενές προσωρινής αποθήκευσης ή επεξεργασίας. Αυτός ο επεξεργαστής είναι πολυδύναμος και μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να συσκευάζει ευρεία γκάμα μεγεθών. Τα προϊόντα που πληρώνονται εδώ, έχουν μέγεθος από 330ml έως και 2 λίτρα. Επομένως στον τύπο αυτό επεξεργαστή παίζει ρόλο το μέγεθος της φιάλης του προϊόντος, ώστε να γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις ύψους και εύρους των οδηγών τροφοδοσίας των φιαλών. Στην γεμιστική, σημαντικός παράγοντας είναι και το είδος του προϊόντος, καθώς σε κάθε εναλλαγή, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ο απόλυτος καθαρισμός των becks, πριν το ξεκίνημα της πλήρωσης του επόμενου προϊόντος, για να μην υπάρξει υποβάθμιση στην ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Έτσι, σε κάθε εναλλαγή, ανάλογα με την απόκλιση μεταξύ των προϊόντων και με βάση κανόνες υγιεινής και διασφάλισης ποιότητας, απαιτείται ένας διαφορετικός χρόνος καθαρισμού που μπορεί να φτάνει τα 30 λεπτά. Σημειώνεται εδώ, ότι ο χρόνος αυτός είναι πρόσθετος του χρόνου που απαιτείται για τις ρυθμίσεις της συσκευής, μια και οι δύο αυτές εργασίες δε μπορούν να γίνουν παράλληλα.

Στον Πίνακα 13 καταγράφονται οι χρόνοι καθαρισμού για αλλαγή προϊόντος στην γεμιστική. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο πίνακας δεν είναι συμμετρικός με τον χρόνο πλυσίματος να εξαρτάται τόσο από το ποια προϊόντα είναι συνεχόμενα όσο και από την σειρά τους (για παράδειγμα, η μετάβαση από λευκό σε σοκολατούχο απαιτεί 5 λεπτά πλυσίματος ενώ για την αντίστροφη μετάβαση απαιτούνται 30 λεπτά).

	CLEANING TIME						
	Γεμιστική	ΠΡΟΪΟΝ ΠΟΥ ΕΠΕΤΑΙ					
ΠΡΟΪΟΝ ΠΟΥ ΠΡΟΗΓΕΙΤΑΙ	Διάρκεια (min)	Λευκό Πλήρες	Λευκό Low Fat	Σοκολατ.	Σοκολατ. Low Fat	Kefir	Ariani
	Λευκό Πλήρες	0	5	5	5	5	5
	Λευκό Low Fat	5	0	5	5	5	51
	Σοκολατούχο	30	30	0	5	30	30
	Σοκολατούχο Low Fat	30	30	5	0	30	30
	Κεφίρ	30	30	30	30	0	30
	Αριάνη	30	30	30	30	30	0

Πίνακας 13. Χρόνοι καθαρισμού της γεμιστικής κατά την αλλαγή προϊόντος

Στον Πίνακα 14 εμφανίζονται οι χρόνοι εναλλαγής της γεμιστικής όταν αλλάζει το μέγεθος της συσκευασίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι φιάλες των διαφορετικών προϊόντων είναι διαφορετικές σε σχήμα ακόμα κι αν έχουν την ίδια χωρητικότητα οπότε θα πρέπει στον πίνακα χρόνων εναλλαγής να αντιμετωπίζονται ως διαφορετικές περιπτώσεις.

SET UP											
Γεμιστική ή	ΠΡΟΪΟΝ ΠΟΥ ΕΠΕΤΑΙ										
Duration (min)	Λευκός 2L	Λευκός LF 2L	Λευκός 0,5L	Λευκός LF 0,5L	Σοκολάδα 0,5L	Σοκολάδα 0,33L	Σοκολάδα LF 0,33L	Κεφίρ 0,33L	Αριάνη 0,5L	Αριάνη 0,33L	
Λευκό 2L	0	0	4	4	4	4	4	5	5	5	
Λευκό LF 2L	0	0	4	4	4	4	4	5	5	5	
Λευκό 0,5L	4	4	0	0	0	4	4	5	2	5	
Λευκό LF 0,5L	4	4	0	0	0	4	4	5	2	5	
Σοκολάδα 0,5L	4	4	0	0	0	4	4	5	2	5	
Σοκολάδα 0,33L	4	4	4	4	4	0	0	2	5	2	
Σοκολάδα LF 0,33L	4	4	4	4	4	0	0	2	5	2	
Κεφίρ 0,33L	4	4	4	4	4	2	2	0	5	2	
Αριάνη 0,5L	4	4	2	2	2	4	4	4	0	4	
Αριάνη 0,33L	4	4	4	4	4	2	2	2	4	0	

Πίνακας 14 Χρόνοι ρυθμίσεων της γεμιστικής κατά την αλλαγή φιαλών

Όσον αφορά των πωματισμό των φιαλών, τα πώματα διαφοροποιούνται με το προϊόν και όχι με τον μέγεθος της φιάλης. Απαιτείται 3 λεπτά χρόνος εναλλαγής όταν αλλάζει ο τύπος του προϊόντος. Κανένας τακτικός καθαρισμός δεν απαιτείται στο μηχάνημα πωματισμού.

Η ετικέτα που φέρει κάθε φιάλη διαφέρει τόσο με τον τύπο του προϊόντος όσο και με το μέγεθος της συσκευασίας. Ο χρόνος ποικίλει από 3 λεπτό αν πρόκειται για αλλαγή απλά στον τύπο της ετικέτας έως 7 λεπτά αν χρειάζεται επιπλέον τροποποίηση στον οδηγό για διαφορετικό μέγεθος ετικέτας. Ο Πίνακας 15 καταγράφει τους απαιτούμενους χρόνους.

SET UP											
Ετικετέζα		ΠΡΟΪΟΝ ΠΟΥ ΕΠΕΤΑΙ									
ΠΡΟΪΟΝ ΠΟΥ ΠΡΟΗΓΕΙΤΑΙ	Duration (min)	Λευκ ό 2L	Λευκ ό LF 2L	Λευκ ό 0,5L	Λευκ ό LF 0,5L	Σοκολ . 0,5L	Σοκολ . 0,33L	Σοκολ . LF 0,33L	Κεφί ρ 0,33L	Αριάν η 0,5L	Αριάν η 0,33L
	Λευκό 2L	0	3	7	7	7	7	7	7	7	7
	Λευκό LF 2L	3	0	7	7	7	7	7	7	7	7
	Λευκό 0,5L	7	7	0	3	3	5	5	5	5	5
	Λευκό LF 0,5L	7	7	3	0	3	5	5	5	5	5
	Σοκολ. 0,5L	7	7	3	3	0	5	5	5	5	5
	Σοκολ. 0,33L	7	7	5	5	5	0	3	3	5	3
	Σοκολ. LF 0,33L	7	7	5	5	5	3	0	5	5	5
	Κεφίρ 0,33L	7	7	5	5	5	3	3	0	5	3
	Αριάνη 0,5L	7	7	3	3	3	5	5	5	0	5
	Αριάνη 0,33L	7	7	5	5	5	3	3	3	5	3

Πίνακας 15 Απαιτούμενοι χρόνοι ρυθμίσεων για το μηχάνημα της ετικέτας

Ο laser εκτυπωτής που τυπώνει την ώρα και ημερομηνία παραγωγής, ρυθμίζεται σε διάστημα δευτερολέπτων, γι' αυτό και δεν έχει συνυπολογιστεί.

Τέλος, το μηχάνημα της θερμοσυρρίκνωσης απαιτεί ρύθμιση όταν αλλάζει το μέγεθος της συσκευασίας γιατί διαφοροποιείται και η ομαδοποίηση (οι φιάλες των 2 λίτρων συσκευάζονται ανά 6άδες, οι φιάλες των 500ml ανά 12άδες και των 330ml ανά 20άδες. Ο χρόνος εναλλαγής εκτιμήθηκε ως σταθερός στα 10 λεπτά για κάθε αλλαγή στην συσκευασία.

Όπως προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση κάθε μηχάνημα έχει διαφορετικούς χρόνους εναλλαγής με βάση διαφορετικά κριτήρια κι επομένως το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης σειράς εκτέλεσης προϊόντων θα πρέπει να αντιμετωπιστεί ως ένα πρόβλημα πολλαπλών επεξεργασιών (τεσσάρων στην συγκεκριμένη περίπτωση) με διαφορετικά ο καθένας changeover.

4.2.3 Ελαχιστοποίηση χρόνου παραγωγής

Κάθε ημέρα παράγεται στην μονάδα ένα υποσύνολο των παραπάνω προϊόντων. Για την δοκιμή του παραπάνω αλγορίθμου θεωρήθηκε μία μέρα στην οποία η παραγωγή περιελάμβανε τα ακόλουθα 8 προϊόντα: Λευκό πλήρες 2L, Λευκό Low Fat 2L, Λευκό πλήρες 0,5L, Λευκό Low Fat 0,5L, Σοκολατούχο 0,5L, Σοκολατούχο 0,33L, Σοκολατούχο Low Fat 0,33L και Κεφίρ 0,33L. Οι χρόνοι παραγωγής των παραπάνω είναι ανεξάρτητοι από την αλληλουχία οπότε οι ποσότητες παραγωγής για κάθε προϊόν δεν έχουν σημασία. Αυτό που αλλάζει τον συνολικό χρόνο παραγωγής είναι η σειρά εκτέλεσης.

Για την εύρεση της βέλτιστης ακολουθίας εκτελέστηκαν τα ακόλουθα βήματα:

1. Για κάθε μηχανή της γραμμής χωριστά διαμορφώθηκε ο πίνακας χρόνων εναλλαγής ανάμεσα σε όλα τα προς παραγωγή προϊόντα. Οι χρόνοι αυτοί περιελάμβαναν αθροιστικά όλους τους χρόνους πλυσίματος/μονταρίσματος που απαιτούνται με βάση την φύση του προϊόντος και το μέγεθος της συσκευασίας.
2. Για κάθε προϊόν και κάθε στάδιο υπολογίστηκαν οι χρόνοι έναρξης και λήξης. Για κάθε δυάδα προϊόντων, στους χρόνους αυτούς προστέθηκαν οι παραπάνω χρόνοι εναλλαγής και, με βάση την μαθηματική ανάλυση της παραγράφου 4.1, διαμορφώθηκε ο συνολικός πίνακας "κόστους" για μετάβαση από το ένα προϊόν στο άλλο.
3. Με βάση τον παραπάνω πίνακα, το πρόβλημα διαμορφώθηκε και επιλύθηκε ως ΠΠΠ στο περιβάλλον MATLAB με την βοήθεια του πακέτου IpSolve.

Για την εκτέλεση του δεύτερου βήματος έγινε καταμέτρηση στην μονάδα όλων των απαραίτητων χρόνων, δηλαδή των χρόνων παραγωγής ανά στάδιο $p_{i,j}$ όπως και των διαστημάτων $c_{i \rightarrow i+1,j}$ που μεσολαβούν ανάμεσα στην έναρξη δύο διαδοχικών σταδίων. Με βάση αυτούς τους χρόνους υπολογίστηκαν οι χρόνοι έναρξης $s_{i,j}$ και λήξης $e_{i,j}$ κάθε σταδίου σε σχέση με το ξεκίνημα της παραγωγής του κάθε προϊόντος στην γεμιστική.

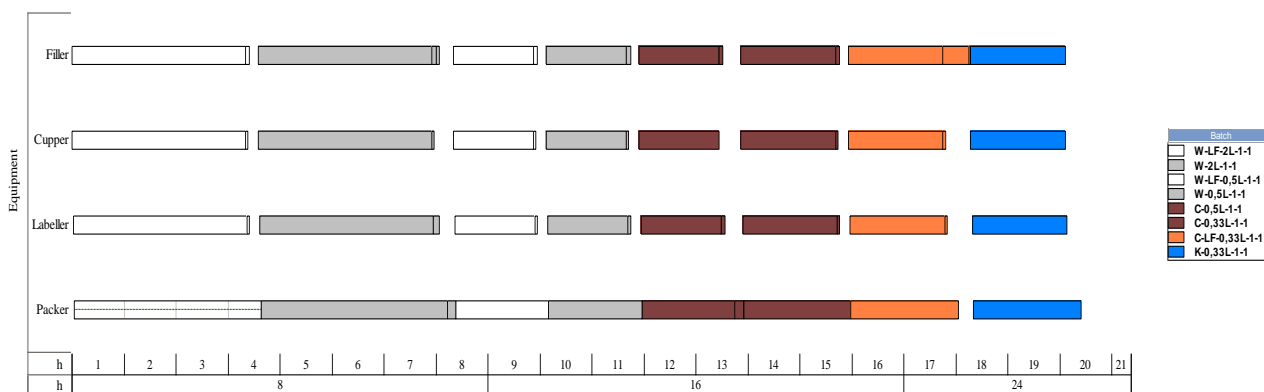
Παράλληλα με την επίλυση του προβλήματος στο MATLAB, διαμορφώθηκε και το μοντέλο της παραγωγικής διαδικασίας στο SchedulePro ώστε να είναι εφικτή η προσομοίωση της παραγωγής και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων του προγραμματισμού με την βοήθεια διαγραμμάτων Gantt.

Από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, προέκυψε για την παραπάνω ομάδα προϊόντων ως βέλτιστη λύση η παρακάτω ακολουθία:

1. Λευκό Low Fat 2L
2. Λευκό πλήρες 2L
3. Λευκό Low Fat 0,5L
4. Λευκό πλήρες 0,5L
5. Σοκολατούχο 0,5L
6. Σοκολατούχο 0,33L
7. Σοκολατούχο Low Fat 0,33L
8. Κεφίρ 0,33L

Όπως αναμενόταν, η βέλτιστη σειρά εκτέλεσης εκμεταλλεύεται τους μικρούς χρόνους πλυσιμάτων από λευκό σε σοκολατούχο αποφεύγοντας παράλληλα την αντίστροφη πορεία. Ταυτόχρονα, ελαχιστοποιεί τους χρόνους εναλλαγής που σχετίζονται με το μέγεθος της συσκευασίας εκτελώντας τις μεταβάσεις σε άλλο προϊόν με το ίδιο όμως μέγεθος συσκευασίας (πχ. η αλλαγή 4→5 από λευκό σε σοκολατούχο γίνεται για συσκευασία 0,5L και για τα δύο προϊόντα και παρομοίως η αλλαγή 7→8 από σοκολατούχο σε Κεφίρ γίνεται για συσκευασία 0,33L). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αλλαγή φιάλης στα λευκά γάλατα από 2L σε 0,5L δεν σχετίζεται με το είδος (πλήρες ή Low Fat) του γάλακτος (οι χρόνοι εναλλαγής είναι οι ίδιοι) οπότε η λύση θα ήταν ισοδύναμη αν στη θέση 3 ήταν το Πλήρες και στην θέση 4 Low Fat.

Το Σχήμα 15 παρουσιάζει το γράφημα Gantt της παραγωγής για την βέλτιστη αλληλουχία.



Σχήμα 15 Γράφημα Gantt της παραγωγής για την βέλτιστη αλληλουχία-Σενάριο 1

Η βέλτιστη αλληλουχία στην παραπάνω περίπτωση είναι αναμενόμενη, αυτό όμως δεν ισχύει πάντα. Στον Πίνακα 16 παρουσιάζεται ένα εναλλακτικό σενάριο χρόνων πλυσίματος της γεμιστικής όπου οι χρόνοι μετάβασης από λευκό σε σοκολατούχο είναι οι ίδιοι ανεξάρτητα από την φορά μετάβασης.

	CLEANING TIME						
	Γεμιστική	ΠΡΟΪΟΝ ΠΟΥ ΕΠΕΤΑΙ					
ΠΡΟΪΟΝ ΠΟΥ ΠΡΟΗΓΕΙΤΑΙ	Διάρκεια (min)	Λευκό Πλήρες	Λευκό Low Fat	Σοκολατ.	Σοκολατ. Low Fat	Kefir	Ariani
	Λευκό Πλήρες	0	5	30	30	5	5
	Λευκό Low Fat	5	0	30	30	5	5
	Σοκολατούχο	30	30	0	5	30	30
	Σοκολατούχο Low Fat	30	30	5	0	30	30
	Κεφίρ	30	30	30	30	0	30
	Αριάνη	30	30	30	30	30	0

Πίνακας 16. Χρόνοι καθαρισμού της γεμιστικής κατά την αλλαγή προϊόντος -Σενάριο 2

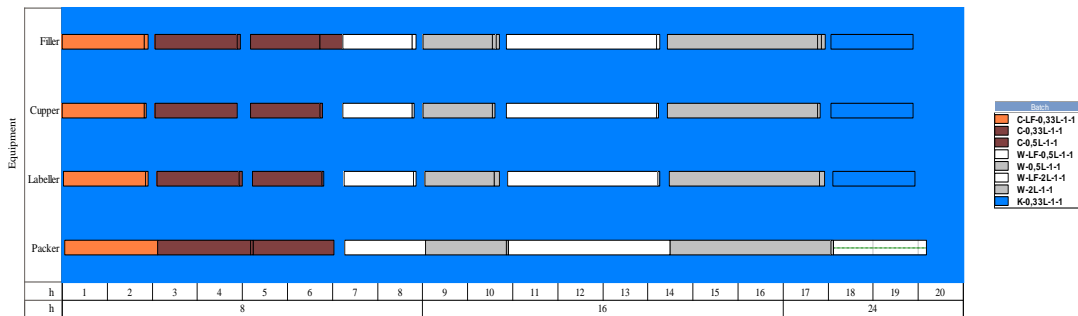
Το βέλτιστο σενάριο που προκύπτει από την επίλυση με τους νέους χρόνους είναι τελείως διαφορετικό από πριν:

1. Σοκολατούχο Low Fat 0,33L
2. Σοκολατούχο 0,33L
3. Σοκολατούχο 0,5L
4. Λευκό Low Fat 0,5L
5. Λευκό πλήρες 0,5L
6. Λευκό πλήρες 2L

7. Λευκό Low Fat 2L

8. Κεφίρ 0,33L

Το Σχήμα 16 παρουσιάζει το γράφημα Gantt της νέας βέλτιστης αλληλουχίας παραγωγής.



Σχήμα 16 Γράφημα Gantt της νέας βέλτιστης αλληλουχίας παραγωγής- Σενάριο 2

Η βέλτιστη ακολουθία επομένως δεν είναι πάντα προφανής και εξαρτάται και από τα προϊόντα που είναι να παρασκευαστούν σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (ημέρα, εβδομάδα). Δεδομένου ότι σε κάθε διάστημα προγραμματισμού της παραγωγής μία μονάδα μπορεί να παράγει διαφορετικά προϊόντα, η βέλτιστη αλληλουχία θα πρέπει να αναζητείται κάθε φορά για το υποσύνολο των προς παραγωγή προϊόντων.

Ως προς τον χρόνο επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης, η επίλυση για τα 8 προϊόντα του παραπάνω παραδείγματος γίνεται σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο σε έναν τυπικό υπολογιστή γραφείου. Όσο όμως αυξάνει ο αριθμός των προϊόντων, ο χρόνος επίλυσης αυξάνει εκθετικά. Τα 15 προϊόντα, για παράδειγμα, επιλύονται στον ίδιο υπολογιστή σε 30 περίπου δευτερόλεπτα. Αν και οι απόλυτες τιμές των χρόνων επίλυσης δεν έχουν ιδιαίτερη σημασία δεδομένου ότι ο αλγόριθμος επίλυσης δεν είναι βελτιστοποιημένος και ο χρόνος επίλυσης δεν μετρήθηκε με επιστημονικό τρόπο, εντούτοις η σχετική αναλογία των χρόνων επίλυσης για τα δύο προβλήματα διαφορετικού μεγέθους είναι ενδεικτική της εκθετικής πολυπλοκότητας του προβλήματος της βελτιστοποίησης.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης ακολουθίας εκτέλεσης προϊόντων σε μία μονάδα πολλαπλών προϊόντων τύπου flowshop με ένα ή πολλαπλά στάδια παραγωγής. Στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση του χρόνου παραγωγής όταν η εναλλαγή των προϊόντων συνεπάγεται την ύπαρξη νεκρών χρόνων καθαρισμού ή μονταρίσματος των συσκευών και η διάρκεια αυτών των χρόνων εξαρτάται από την σειρά εκτέλεσης των προϊόντων.

Το πρόβλημα μελετήθηκε μαθηματικά ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, αποτυπώθηκε ως το Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή και επιλύθηκε ως πρόβλημα γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού. Στην περίπτωση των πολλαπλών σταδίων, το πρόβλημα (σε σχέση με τις γνωστές του διατυπώσεις στην βιβλιογραφία) έπρεπε να μορφοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη ότι τα στάδια παραγωγής στην βιομηχανία των διεργασιών και ειδικότερα των τροφίμων είναι χρονικά επικαλυπτόμενα.

Η μαθηματική αποτύπωση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση δύο μελετών περιπτώσεων για πραγματικές βιομηχανίες: μία γραμμή υποσυσκευασίας φυτοφαρμάκων με ένα στάδιο παραγωγής και μία γραμμή εμφιάλωσης προϊόντων γάλακτος με πολλαπλά στάδια. Και στις δύο περιπτώσεις δείχτηκε ότι η εύρεση της βέλτιστης ακολουθίας είναι εφικτή για τον αριθμό των προϊόντων που διαχειρίζεται μία τυπική βιομηχανία, όχι όμως πάντα προφανής. Για παράδειγμα, σε μία απλή περίπτωση δείχτηκε ότι η "προφανής" ομαδοποίηση προς παραγωγή ομοειδών προϊόντων δεν οδηγεί πάντα στην βέλτιστη χρονικά λύση. Η εφαρμογή, επομένως, μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης στην σειρά εκτέλεσης των προϊόντων ή παραγγελιών σε μία βιομηχανία μπορεί να βοηθήσει στην εξάλειψη καθιερωμένων, αλλά όχι απαραίτητα αποτελεσματικών, εμπειρικών πρακτικών και την αντικατάστασή τους με μία επιστημονική προσέγγιση η οποία θα παράγει την κατά περίπτωση βέλτιστη λύση.

Η χρησιμότητα της μεθόδου θα μπορούσε να ενισχυθεί εφόσον επεκτεινόταν σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν περισσότερες από μία μηχανές ανά στάδιο

παραγωγής (πχ. πολλαπλές συσκευαστικές μηχανές) ή για τις περιπτώσεις όπου η παραγωγή κάποιων προϊόντων δεν απαιτεί την εκτέλεση όλων των κοινών σταδίων (χωρίς όμως να αλλάζει η σειρά εκτέλεσης των σταδίων). Οι παραπάνω περιπτώσεις προτείνονται ως επεκτάσεις του αντικειμένου της διατριβής σε μελλοντικές εργασίες.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διαδίκτυο

- 1) <http://www.worksinprogress.com/>
- 2) <http://comp.mq.edu.au/units/comp323/lectures/ILP.pdf>

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αυλωνίτης (2006), "Σχεδιασμός της Παραγωγικής Διαδικασίας", στο "Οργάνωση και Διοίκηση Παραγωγής", Εκδόσεις Έλλην, Αθήνα

Κουϊόγλου Β. (2007), «Προβλήματα Παραγωγής», «ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ», ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Παπαδόπουλος Γ. (2009) «Συστήματα Στήριξης Αποφάσεων Προγραμματισμού Παραγωγής σε Συνεργασία με Ολοκληρωμένο Πληροφοριακό Σύστημα», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Παπαντωνίου Β. (2000), «Ελαχιστοποίηση του Χρόνου Set-up στο Πλαίσιο Προγραμματισμού Παραγωγής ERP Συστήματος», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Παπαντωνίου Β. & Μαρμαράς Ν. (2005), «Ενιαίο Γνωστικό Σύστημα: Μια Υβριδική Προσέγγιση στον Καταρτισμό του Βραχυπρόθεσμου Προγράμματος Παραγωγής», Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Πάππης Κ. (2006), « Ολοκληρωμένα Συστήματα Διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας», «Χρονικός Προγραμματισμός» In: «ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ», Β' Έκδοση, Εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα.

Πάππης Κ. (2008), «Θεωρία Συστημάτων και λήψη αποφάσεων», «Σχεδιασμός Μεθόδου Παραγωγής», «Μέτρηση Εργασίας», In: «ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ», Β' Έκδοση Αναθεωρημένη, Εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα

Ξενογλωσση Βιβλιογραφία

Bagchi T.P., Gupta J.N.T., Sriskandarajah C. (2006), "A review of TSP based approaches for flowshop scheduling", *European Journal of Operational Research*, 169, 816-854.

Ciavotta, M., Minella, G., Ruiz, R. (2013), "Multi-objective sequence dependent setup times flowshop scheduling: a new algorithm and a comprehensive study", *European Journal of Operation Research*, 227, 301-313

Dysko, D., (2013), "Optimization of equipment's changeover and its importance for overall equipment efficiency and flexibility of whole system", *The 16th International Scientific Conference Trends and Innovative Approaches in Business Processes "2013"*

Eren, T., (2007) "A Multicriteria Scheduling with Sequence-Dependent Setup Times", *Journal of Applied Mathematical Sciences*, 186, 60-65

GMA (2010), *Industry Handbook for Safe Processing of Nuts*, Nut Safety Task Force, Washington, Grosser Manufacturers Assosiation

Intelligen, Inc. (2007), «Getting Started», In: «SchedulePro: A Finite Capacity Scheduling Tool for Batch and Semi-Continuous Process

Manufacturing User's Guide", p. 12-16, New Jersey, USA

Javanmard, H., Kianehkandi (2011), "Optimal Scheduling in a Milk Production Line Based on Mixed Integer Linear Programming", International Proceedings of Economics Development & Research; 2011, Vol. 13, p318

Kentli, A., Dal, V. & Alkaya, A. F. (2013). Minimizing Machine Changeover Time In Product Line In An Apparel Industry. Journal of Textile & Apparel. Sayı 2. Cilt 23 sf 159-167

Laguna M. (1999), "A heuristic for production scheduling and inventory control in the presence of sequence-dependent setup times," IIE Transactions, 31, 125-134

Nezhad S.S., Darian S.B., (2010), "Production Scheduling for Products on Different Machines with Setup Costs and Times", International Journal of Engineering and Technology, 2 (6), 410-418

Ozgun, C., Dunning, K., Bai, L., (2008) "Hierarchical Composition Heuristic for Sequence Dependent Scheduling Problems", Annual Decision Sciences Institute Meeting, Baltimore, MD, pp.11-16.

Shah A. N. (2004) "Speeding Changeover in Pharmaceutical Packaging", MSc Thesis, Dept. of Industrial Engineering, North Carolina State University, USA

Subbiah S., Engell S., (2010), "Short-Term Scheduling of Multi-Product Batch Plants with Sequence-Dependent Changeovers Using Timed Automata Models", 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20, Technische Universität Dortmund,44227, Dortmund, Germany

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας MATLAB για την επίλυση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού ως ΠΠΠ με την βοήθεια της ρουτίνας lpSolve.

```
function [optseq, hours] = tspCO(O)

% read type-based changeover
typeCO = importdata('typeCO.dat');
% read size-based changeover
sizeCO = importdata('sizeCO.dat');

%read the product name, type index and size index
P = importdata('products.dat');
names = P.textdata;
typeIndex = P.data(:,1);
sizeIndex = P.data(:,2);

n = length(O);

for i=1:n
index(i)=getProductIndex( names, O{i} );
end

index;

CO = zeros(n);
for i=1:n
for j=1:n
if index(i)==index(j)    %same product
CO(i,j) = 0;
else
CO(i,j)=typeCO(typeIndex(index(i)),typeIndex(index(j)))+sizeCO(sizeIndex(index(i)),sizeIndex(index(j)));
end
end
end

[cost, optord, result] = tsp_milp(CO);

if result == 1
for i=1:n
optseq{i}=O{optord(i)};
end

optseq;
hours=cost/60;
else
optseq='failed to solve';
hours = 0;
end

function [cost, ord, out] = tsp_milp(CO);

[n,m]=size(CO);
[a,b,e]=create_tsp_matrix(n);
```

```

% objective function
f=[];
for i=1:n
f=[f,CO(i,:)];
end

xint=1:n^2;

[obj,x,duals,result] = my_lp_solve(f,a,b,e,[],[],xint);
if result == 0 | result == 1 | result == 11 | result == 12
for i=1:n
x1=x((i-1)*n+1:(i-1)*n+n)';
ordmat(i,:)=x1;
ordmat(i,i)=0; % diagonal elements should be zero
end

ordmat;

ord=find(ordmat(1,)==1);
for i=1:n-1
k=ord(length(ord));
ord=[ord,find(ordmat(k,)==1)];
end

cost=obj;
out = 1;
else
cost = 0;
ord=0;
out = 0;
end

end

function [a,b,e]=create_tsp_matrix(n)

a=[];

a1=ones(1,n);
for i=1:n
a2=a1;
a2(i)=0;
a=blkdiag(a,a2);
end

a3=zeros(n,n^2);
for i=1:n
for j=1:n
if i~=j
a3(i,(j-1)*n+i)=1;
end
end
end

a=[a;a3];
b=ones(1,2*n);
e=zeros(1,2*n);

for j=1:n-1

```



```

a5=create_k_zero_matrix(n,j);

a=[a;a5];
[n5,m5]=size(a5);
b=[b,ones(1,n5)];
e=[e,ones(1,n5)];
clear a5;
end

function a=create_k_zero_matrix(n,k)

% creates a matrix with n columns with all possible combinations of
% positioning k zeros in all possible positions (otherwise the value
is 1)
a1=ones(1,n);
if k==0
return;
end

for j=1:k
a1=expand_zero(a1);
end

[n1,m1]=size(a1);
for i=1:n1
kind=find(a1(i,:)==0);
for k=1:length(kind);
a(i,(kind(k)-1)*n+1:(kind(k)-1)*n+n)=a1(i,:);
end
end

function a1=expand_zero(a)

[n,m]=size(a);

nn=1;
for i=1:n
k=last_zero_pos(a(i,:));
for j=k+1:m
a1(nn,:)=a(i,:);
a1(nn,j)=0;
nn=nn+1;
end
end

function a1=insert_zero_col(a,k)

[n,m]=size(a);

if k==1
a1=[zeros(n,1),a];
elseif k==m+1
a1=[a, zeros(n,1)];
else
a1=[a(:,1:k-1), zeros(n,1), a(:,k:m)];
end

```

```

%LP_SOLVE  Solves mixed integer linear programming problems.
%
%          SYNOPSIS:          [obj,x,duals,stat]          =
lp_solve(f,a,b,e,vlb,vub,xint,scalemode,keep)
%
%    solves the MILP problem
%
%          max v = f'*x
%          a*x <> b
%          vlb <= x <= vub
%          x(int) are integer
%
% ARGUMENTS: The first four arguments are required:
%
%          f: n vector of coefficients for a linear objective
function.
%          a: m by n matrix representing linear constraints.
%          b: m vector of right sides for the inequality
constraints.
%          e: m vector that determines the sense of the
inequalities:
%          e(i) = -1 ==> Less Than
%          e(i) =  0 ==> Equals
%          e(i) =  1 ==> Greater Than
%          vlb: n vector of lower bounds. If empty or omitted,
%              then the lower bounds are set to zero.
%          vub: n vector of upper bounds. May be omitted or empty.
%          xint: vector of integer variables. May be omitted or empty.
%          scalemode: scale flag. Off when 0 or omitted.
%          keep: Flag for keeping the lp problem after it's been
solved.
%              If omitted, the lp will be deleted when solved.
%
% OUTPUT: A nonempty output is returned if a solution is found:
%
%          obj: Optimal value of the objective function.
%          x: Optimal value of the decision variables.
%          duals: solution of the dual problem.

function [obj, x, duals, stat] = lp_solve(f, a, b, e, vlb, vub, xint,
scalemode, keep)

if nargin == 0
help lp_solve;
return;
end

[m,n] = size(a);
lp = mxlpsolve('make_lp', m, n);
mxlpsolve('set_verbos', lp, 3);
mxlpsolve('set_mat', lp, a);
mxlpsolve('set_rh_vec', lp, b);
mxlpsolve('set_obj_fn', lp, f);
%mxlpsolve('set_maxim', lp); % default is solving minimum lp.

for i = 1:length(e)
if e(i) < 0
con_type = 1;
elseif e(i) == 0
con_type = 3;
else

```

```

con_type = 2;
end
mxlpsolve('set_constr_type', lp, i, con_type);
end

if nargin > 4
for i = 1:length(vlb)
mxlpsolve('set_lowbo', lp, i, vlb(i));
end
end

if nargin > 5
for i = 1:length(vub)
mxlpsolve('set_upbo', lp, i, vub(i));
end
end

if nargin > 6
for i = 1:length(xint)
mxlpsolve('set_binary', lp, xint(i), 1);
%mxlpsolve('set_binary', lp, i, xint(i));
end
end

if nargin > 7
if scalemode ~= 0
mxlpsolve('set_scaling', lp, scalemode);
end
end

%mxlpsolve('set_presolve', lp, 0 );

result=mxlpsolve('solve', lp)
if result == 0 | result == 1 | result == 11 | result == 12
% [obj, x, duals, stat] = mxlpsolve('get_solution', lp), result;
[obj, x, duals] = mxlpsolve('get_solution', lp);
stat = result;
else
obj = [];
x = [];
duals = [];
stat = result;
end

%mxlpsolve('get_Ncolumns', lp)

if nargin < 9
mxlpsolve('delete_lp', lp);
end

```