



ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ &  
ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ



**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μελέτη Βέλτιστης Διαχείρισης Δεξαμενών σε Μονάδα  
Παραγωγής και Εμφιάλωσης Πολλαπλών Προϊόντων**

**του Κωνσταντίνου Κοκονά**

**Εισηγητής Καθηγητής  
Αλέξανδρος Κουλούρης**

**Θεσσαλονίκη  
Απρίλιος 2016**



## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και των υποχρεώσεών μου για το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους που τα τελευταία χρόνια με βοήθησαν να οδηγηθώ με επιτυχία στο σημείο αυτό.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας τον κο Αλέξανδρο Κουλούρη για την ουσιαστική καθοδήγηση όλο το χρονικό διάστημα που ασχολούμαι με την διπλωματική μου και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την πρώτη στιγμή. Τον ευχαριστώ για την εμπειρία που μου μετέδωσε μέσα από τις επαναλαμβανόμενες συζητήσεις και προβληματισμούς πάνω στο αντικείμενο και τον διαφορετικό τρόπο σκέψης που μου δίδαξε σε έναν τομέα τελείως καινούριο για εμένα.

Ευχαριστώ τον Διευθυντή του Μεταπτυχιακού κο Στέλιο Ραφαηλίδη για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετέχω στο πρόγραμμα καθώς επίσης όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού για την προσπάθεια που κατέβαλλαν και την κατανόηση που επέδειξαν για την επιτυχή ολοκλήρωση των σπουδών μας.

Τέλος αλλά κυρίως, ευχαριστώ τους ιδιοκτήτες της εταιρίας όπου εργάζομαι κ.κ. Μαβίδη Πολυχρόνη και Μαβίδη Παναγιώτη για την διευκόλυνση που μου παρείχαν σε ένα εξαιρετικά απαιτητικό ωράριο μαθημάτων και συναντήσεων καθώς και για την παροχή των απαραίτητων στοιχείων για την έρευνα της διπλωματικής μου. Με αυτή την αφορμή θα ήθελα να εκφράσω και στους δυο την ικανοποίησή μου για όλα τα χρόνια τις άψογης συνεργασίας μας.

## Περίληψη

*Αέξεις κλειδιά:* Χρονικός Προγραμματισμός, *Tank Farm Management*, Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός, *SchedulePro®*

Η ανάγκη για την δημιουργία ενός προγράμματος παραγωγής σε μια μονάδα παραγωγής και εμφιάλωσης με περιορισμένο αριθμό δεξαμενών και με μεγάλο πλήθος κωδικών τελικών προϊόντων είναι ένα συνηθισμένο πρόβλημα σε πολλές βιομηχανίες τροφίμων. Η καλύτερη δυνατή ανάθεση προϊόντων σε «δεσμευμένες» δεξαμενές και ο καλύτερος δυνατός **χρονικός προγραμματισμός** της παραγωγικής διαδικασίας ελαχιστοποιούν τους χρόνους αναμονής, τις διακοπές λειτουργίας κάποιων εκ των διεργασιών και επομένως τον συνολικό χρόνο παραγωγής. Οι κύριες αποφάσεις σε αυτό το πρόβλημα είναι οι αναθέσεις δεξαμενών-προϊόντων καθώς και ο χρονικός προγραμματισμός των εντολών παραγωγής. Συνολικά, αυτό το πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει στην γενικότερη κατηγορία των προβλημάτων ***Tank Farm Management*** ή ***Tank Farm Operation Problems (TFOP)***.

Για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόστηκε μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης **μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού**. Λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς που καθορίζονται από την παραγωγική διαδικασία και τον ποιοτικό έλεγχο διαμορφώθηκαν αντικειμενικές συναρτήσεις και αναζητήθηκαν οι βέλτιστες λύσεις μέσω του εμπορικού λογισμικού πακέτου Matlab. Ως κριτήρια για τις βέλτιστες λύσεις χρησιμοποιήθηκαν η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου εκτέλεσης της παραγωγής, η ελαχιστοποίηση του αριθμού των χαρμανιών και παρτίδων αποθήκευσης που εκτελούνται, η ελαχιστοποίηση της χρησιμοποιούμενης χωρητικότητας των δεξαμενών καθώς και ο συνδυασμός των παραπάνω.

Το μαθηματικό μοντέλο εφαρμόστηκε σε μία μονάδα παραγωγής σαλτσών και αρτυμάτων. Μοντελοποιήθηκαν δύο διαφορετικές ημέρες παραγωγής και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με την παραγωγική διαδικασία που χρησιμοποιεί η μονάδα με εμπειρικό τρόπο, η οποία προσομοιάστηκε μέσω του λογισμικού εργαλείου προσομοίωσης **SchedulePro®**. Η χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης που συνδυαστικά ελαχιστοποιεί τον αριθμό των παρτίδων και τον χρόνο παραγωγής, κρίθηκε, από την συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, ότι παράγει αποτελέσματα τα οποία είναι πολύ κοντά στην εμπειρική πρακτική της μονάδας. Το πλεονέκτημα της μαθηματικής διαμόρφωσης είναι ότι αποτελεί ένα επεκτάσιμο εργαλείο το οποίο με γρήγορο τρόπο και χωρίς την χρήση πολύπλοκων μαθηματικών

υπολογισμών επιτρέπει ανά πάσα στιγμή να σχεδιαστεί ένα βέλτιστο πρόγραμμα παραγωγής. Τέλος προτάθηκε, σε μελλοντική έρευνα, να ληφθεί επιπρόσθετα υπόψη ως κριτήριο το εργατικό κόστος εισάγοντας πλέον και οικονομικά κριτήρια που δεν σχετίζονται αποκλειστικά με την χρήση του μηχανολογικού εξοπλισμού.

## Summary

*Λέξεις κλειδιά: Scheduling, Tank Farm Management, Mixed Integer Linear Programming (MILP), SchedulePro®*

The need for formulating a production schedule in a make-and-fill plant with a large number of final products and limited number of preparation and storage tanks is a very common problem in the food industry. Through the best possible assignment of tanks to products and optimal production **scheduling**, it is possible to minimize wait times and idle process times and, therefore, the total production makespan. In this setup, the major decisions involve the commitment of tanks to products and scheduling of production orders. Overall, this problem can be considered as belonging to the general category of *Tank Farm Management* or *Tank Farm Operation Problems (TFOP)*.

The problem was formulated as a **Mixed-Integer Linear Programming (MILP)** mathematical model and solved through MATLAB. Taking into account constraints that arise from the production process and quality control, different objective functions were formulated and the relevant optimal solutions were generated. Optimization criteria used were the minimization of total makespan, the minimization of the number of batches, the minimization of tank capacity used and combinations of the above.

A plant producing dressings and condiments was used as a case study for the implementation of the mathematical model. Two production days were modeled and the results were compared with the actual production process used empirically in the plant; the actual production was modeled through the scheduling software **SchedulePro®**. It was concluded that the objective function that simultaneously minimizes the number of batches and the makespan, produces schedules which are very close to those empirically derived and implemented in the plant. The advantage of an optimal mathematical formulation is that it constitutes a scalable tool that can be used at any time to produce optimal schedules in a fast way and without the need to

make complex mathematical calculations. It was proposed, as future work, to expand the model by incorporating labor availability and cost, introducing, in this way, financial criteria in addition to equipment usage criteria used in the current formulation.

## Περιεχόμενα

1. Προγραμματισμός Παραγωγής και Βιομηχανία Τροφίμων.....	12
1.1 Πεδία έρευνας για τον Προγραμματισμό Παραγωγής .....	12
1.1.1 Επιχειρησιακή Έρευνα.....	12
1.1.2 Τεχνητή Νοημοσύνη.....	12
1.1.3 Γνωστικές Επιστήμες .....	13
1.1.4 Συνδυαστική Προσέγγιση.....	13
1.2 Βιομηχανία Τροφίμων.....	14
1.2.1. Ειδικά Χαρακτηριστικά.....	14
1.3 Εφαρμογή Προγραμματισμού Παραγωγής στην Βιομηχανία Τροφίμων .....	18
2. Tank Farm Management .....	22
3. Μαθηματική αναπαράσταση προβλημάτων βελτιστοποίησης .....	24
3.1 Γραμμικός Προγραμματισμός.....	26
3.2 Ακέραιος προγραμματισμός .....	28
3.3 Μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός.....	29
4. Περιγραφή Λογισμικού Schedule Pro® .....	31
4.1 Βασικές Αρχές.....	31
4.2 Λειτουργικότητα.....	39
5. Σκοπός της Εργασίας .....	43
6. Περιγραφή Μονάδας Παραγωγής και Εμφιάλωσης Αρτυμάτων .....	45
6.1 Γενικά.....	45
6.2 Χαρακτηριστικά του συστήματος παραγωγής.....	45
7. Μοντελοποίηση της Παραγωγικής Διαδικασίας.....	54
7.1 Μαθηματική Περιγραφή .....	56
8. Αποτελέσματα .....	63
8.1 Μελέτη Περίπτωσης 1.....	63
8.2 Μελέτη Περίπτωσης 2.....	74
9. Συμπεράσματα .....	79
10. Βιβλιογραφία.....	81
11. Παράρτημα-Κώδικας MATLAB .....	84

## Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1: Τυπική διαδικασία παραγωγής δυο φάσεων στην βιομηχανία τροφίμων (Akkerman R. and van Don D.P., 2009).....	14
Σχήμα 2: Διάγραμμα Ροής Tank Farm (Terrazas-Moreno <i>et al.</i> , 2011).....	23
Σχήμα 3: Γράφημα Gant ..... 40	40
Σχήμα 4: Γράφημα Απασχόλησης Εξοπλισμού ..... 41	41
Σχήμα 5: Διάγραμμα Κατανάλωσης Πόρων ..... 41	41
Σχήμα 6: Διάγραμμα Απογραφής Αποθεματικών Πόρων..... 42	42
Σχήμα 7: Διάγραμμα Χρήσης Εξοπλισμού ..... 42	42
Σχήμα 8: Διάγραμμα Ροής Παραγωγικής Διαδικασίας..... 46	46
Σχήμα 9: Απλοποιημένο Διάγραμμα Ροής μέσω του Schedule Pro® ..... 47	47
Σχήμα 10: Διάγραμμα τύπου Gantt θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραγωγής ..... 65	65
Σχήμα 11: Διάγραμμα τύπου Gantt θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση χρήσης χωρητικότητας αναδευτήρων και δεξαμενών ..... 67	67
Σχήμα 12: Διάγραμμα τύπου Gantt θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση αριθμού παρτίδων ..... 69	69
Σχήμα 13: Διάγραμμα τύπου Gantt θέτοντας πολυκριτηριακή αντικειμενική συνάρτηση ... 71	71
Σχήμα 14: Διάγραμμα Gantt όπως παράχθηκε από το Schedule Pro® για την πρώτη ημέρα παραγωγής σε πραγματικές συνθήκες ..... 73	73
Σχήμα 15: Διάγραμμα τύπου Gantt θέτοντας πολυκριτηριακή αντικειμενική συνάρτηση για την δεύτερη ημέρα παραγωγής..... 76	76
Σχήμα 16: Διάγραμμα Gantt όπως παράχθηκε από το Schedule Pro® για την δεύτερη ημέρα παραγωγής σε πραγματικές συνθήκες ..... 77	77



## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Συνδυασμός παραγόντων και χαρακτηριστικών των βιομηχανιών τροφίμων (Akkerman R. and van Don D.P., 2009) .....	17
Πίνακας 2: Ομαδοποίηση Τελικών Προϊόντων .....	45
Πίνακας 3: Διαθέσιμοι Αναδευτήρες και χωρητικότητες (σε lt).....	47
Πίνακας 4: Ωριαία ταχύτητα εμφιαλωτικών μηχανών .....	48
Πίνακας 5: Αλληλοσυσχέτιση Αρχικών και Τελικών SKU's μέσω του Schedule Pro® .....	48
Πίνακας 6: Περιορισμοί που διέπουν τελικά προϊόντα και εμφιαλωτικές. ....	49
Πίνακας 7: Απαιτούμενοι χρόνοι (min) για την προετοιμασία της εμφιαλωτικής 1.....	51
Πίνακας 8: Απαιτούμενοι χρόνοι (min) για την προετοιμασία της εμφιαλωτικής 2.....	52
Πίνακας 9: Απαιτούμενοι χρόνοι (min) για την προετοιμασία της εμφιαλωτικής 3.....	53
Πίνακας 10: Παράμετροι του προβλήματος .....	63
Πίνακας 11: Ημερήσια παραγωγή πρώτης ημέρας .....	63
Πίνακας 12: Απλοποιημένη ημερήσια παραγωγή πρώτης ημέρας για τις ανάγκες της εφαρμογής του αλγορίθμου .....	64
Πίνακας 13: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραγωγής.....	65
Πίνακας 14: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση χρήσης χωρητικότητας αναδευτήρων και δεξαμενών.....	68
Πίνακας 15: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση αριθμού παρτίδων.....	69
Πίνακας 16: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες θέτοντας πολυκριτηριακή αντικειμενική συνάρτηση .....	71
Πίνακας 17: Ημερήσια παραγωγή πρώτης ημέρας .....	72

Πίνακας 18: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες που χρησιμοποιήθηκαν από την επιχείρηση σε πραγματικές συνθήκες για την πρώτη ημέρα παραγωγής.....	73
Πίνακας 19: Ημερήσια παραγωγή δεύτερης ημέρας .....	75
Πίνακας 20: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες θέτοντας πολυκριτηριακή αντικειμενική συνάρτηση για την δεύτερη ημέρα παραγωγής .....	76
Πίνακας 21: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες που χρησιμοποιήθηκαν από την επιχείρηση σε πραγματικές συνθήκες για την δεύτερη ημέρα παραγωγής.....	78



## 1. Προγραμματισμός Παραγωγής και Βιομηχανία Τροφίμων

Ο σχεδιασμός και ο προγραμματισμός αποτελούν κοινές δράσεις σε διάφορα περιβάλλοντα (Claassen, 1991). Προγραμματισμός γενικά ορίζεται ως η κατανομή πόρων σε σχέση με τον χρόνο για την εκτέλεση ενός συνόλου διεργασιών (Baker, 1974). Ο χρονικός προγραμματισμός της παραγωγής έχει μελετηθεί ευρέως με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλος αριθμός μεθόδων, μοντελοποιήσεων και προσεγγίσεων στη βιβλιογραφία. Ωστόσο η διείσδυση αυτών των μεθόδων σε πραγματικές εφαρμογές φαίνεται να είναι σχετικά μικρή (Akkerman R. and van Donk D.P., 2009).

### 1.1 Πεδία έρευνας για τον Προγραμματισμό Παραγωγής

#### 1.1.1 Επιχειρησιακή Έρευνα

Ένα από τα κύρια πεδία στην έρευνα για τον προγραμματισμό είναι η Επιχειρησιακή Έρευνα (Operation Research-OR) που οδήγησε σε ένα πλήθος ευρετικών τεχνικών και αλγορίθμων που λόγω της αλματώδους εξέλιξης της επιστήμης των υπολογιστών βρήκαν εφαρμογή σε εμπορικά λογισμικά πακέτα. Ωστόσο οι ευρετικές μέθοδοι στις περισσότερες περιπτώσεις μπορούν να δώσουν εφικτές λύσεις αν διαμορφωθούν με μαθηματικό τρόπο. Τα αποτελέσματα είναι ισχυρά αλλά μόνον εάν πρόκειται για δομημένα και σαφώς ορισμένα ή απλοποιημένα προβλήματα προγραμματισμού. Το κύριο μειονέκτημα όμως είναι ότι αρκετά συχνά η πραγματικότητα στην παραγωγή δεν μπορεί εύκολα να αποτυπωθεί και να μορφοποιηθεί ως ένα μαθηματικό πρόβλημα προγραμματισμού (Akkerman R. and van Donk D.P., 2009).

#### 1.1.2 Τεχνητή Νοημοσύνη

Μια άλλη προσέγγιση για τον προγραμματισμό είναι η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence-AI) που προέρχεται από τις γνωστικές επιστήμες. Σε αυτή την περίπτωση η έρευνα επικεντρώνεται στο έργο των προγραμματιστών (**schedulers**) ως γνωστική διαδικασία κατανόησης και αναγνώρισης καταστάσεων καθώς και των επιλογών τους για τα κατάλληλα μέτρα. Σε αυτό το πεδίο δίνεται έμφαση στην παρατήρηση και στην περιγραφή των διαδικασιών λήψης αποφάσεων. Με την πάροδο του χρόνου, η αρχική σύνδεση της TN με τις ανθρώπινες γνωσιακές διαδικασίες έχει εξαλειφθεί. Κατά συνέπεια η TN μοιάζει πολύ με την ΕΕ και φαίνεται να έχουν το ίδιο μειονέκτημα του χάσματος μεταξύ θεωρίας και πραγματικότητας (Akkerman R. and van Donk D.P., 2009).

### 1.1.3 Γνωστικές Επιστήμες

Λόγω της έλλειψης πρακτικής χρήσης των δύο προηγούμενων τεχνικών, εμφανίστηκε ένα νέο πεδίο, αυτό των Γνωστικών Επιστημών (Cognitive Science-CS) όπου επιστρέφει στην αρχική προσέγγιση της TN και εστιάζει στο έργο του προγραμματιστή. Η βασική ιδέα είναι ότι η υποστήριξη της λήψης αποφάσεων πρέπει να βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο ο προγραμματιστής (**scheduler**) αναθέτει τις οντότητες (εξοπλισμός, παραγγελίες, χειριστές κλπ) αντί της απλής ανάθεσης προβλημάτων στις οντότητες. Ένα μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης (**task-oriented approach**) είναι ότι επικεντρώνεται στην ανάλυση, μοντελοποίηση και υποστήριξη των υφιστάμενων εργασιών προγραμματισμού όπως έχουν εκτελεστεί από τον προγραμματιστή (**scheduler**) αλλά λιγότερο στην προσαρμογή και βελτίωση του προγραμματισμού. Ένα ακόμα ενδιαφέρον αλλά άλυτο ζήτημα είναι ποιο τμήμα της εργασίας είναι κατάλληλο για να αυτοματοποιηθεί μέσω υπολογιστή και ποιο πρέπει να αφεθεί στον ανθρώπινο έλεγχο (Akkerman R. and van Donk D.P., 2009).

### 1.1.4 Συνδυαστική Προσέγγιση

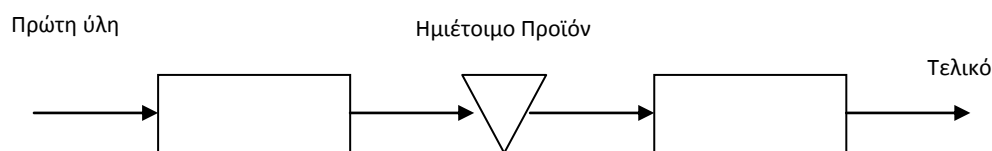
Συμπερασματικά, η OR και AI μέθοδοι επικεντρώνονται σε απλουστευμένες καταστάσεις του συνολικού προβλήματος προγραμματισμού και αυτό οδηγεί σε τεχνικές που συχνά δεν χρησιμοποιούνται στην πράξη. Επιπλέον οι OR και AI προσεγγίσεις ως επί το πλείστον δεν λαμβάνουν υπόψη κατά τον προγραμματισμό τον ανθρώπινο παράγοντα. Αντίθετα η έρευνα στο πεδίο του CS επικεντρώνεται στην διαδικασία λήψης αποφάσεων και εργασιών του προγραμματιστή και λιγότερο στα χαρακτηριστικά της παραγωγικής διαδικασίας. Επομένως και οι δύο προσεγγίσεις φαίνονται να είναι πολύ γενικές ώστε να είναι πολύτιμες για την βελτίωση των σύνθετων προβλημάτων προγραμματισμού σε πραγματικές συνθήκες, όπως συμβαίνει στην βιομηχανία τροφίμων. Ίσως ο συνδυασμός αυτών των δύο προσεγγίσεων να είναι το κλειδί για μια επιτυχημένη προσέγγιση στην μεθοδολογία ενός πετυχημένου προγραμματισμού (Akkerman R. and van Donk D.P., 2009).

Μια τέτοια προσέγγιση προτάθηκε από τους Akkerman και van Donk (2009) η εφαρμογή της οποίας σε πραγματικές συνθήκες σε βιομηχανίες τροφίμων έδειξε διορατικότητα στα προβλήματα προγραμματισμού. Επιπλέον φαίνεται να είναι δυνατόν να γίνει καλύτερη χρήση της υφιστάμενης τεχνογνωσίας και να αξιολογήσει την οργάνωση και την δομή των πληροφοριών γύρω από τα προβλήματα. Καθώς όμως διαπιστώθηκαν αρκετοί περιορισμοί, θα πρέπει να γίνει μεγαλύτερη εφαρμογή

σε διαφορετικές συνθήκες αλλά και να σχετιστούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά των βιομηχανιών τροφίμων.

## 1.2 Βιομηχανία Τροφίμων

Η βιομηχανία τροφίμων μπορεί να οριστεί ως κομμάτι της βιομηχανίας που ορίζεται ως «εταιρίες που προσθέτουν αξία σε προϊόντα μέσω διεργασιών όπως ανάμιξη, διαχωρισμό, μορφοποίηση ή χημικών αντιδράσεων» (Cox and Blackstone, 2002). Στην βιομηχανία τροφίμων αυτές οι διεργασίες εκτελούνται σε πρώτες ύλες που προέρχονται από τον αγροτικό και κτηνοτροφικό τομέα με τελικό σκοπό την δημιουργία τροφίμων. Η επεξεργασία των πρώτων υλών μπορεί να γίνεται είτε με συνεχόμενη ροή είτε ανά παρτίδες. Γενικότερα η διαδικασία παραγωγής μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις: στην επεξεργασία των πρώτων υλών για την δημιουργία ημιτέτοιμου προϊόντος και στην συσκευασία του ημιτέτοιμου για το τελικό προϊόν (Σχήμα 1) (Akkerman R. and van Donk D.P., 2009).



Σχήμα 1: Τυπική διαδικασία παραγωγής δυο φάσεων στην βιομηχανία τροφίμων (Akkerman R. and van Donk D.P., 2009)

Η απόδοση μιας επιχείρησης στον τομέα της βιομηχανίας των τροφίμων εξαρτάται ολοένα και περισσότερο από την απόδοση του τομέα επεξεργασίας και παραγωγής. Στελέχη που λαμβάνουν ορθές και χρονικά ακριβείς αποφάσεις, χωρίς την βοήθεια **υπολογιστικά βοηθούμενων** σχεδιαστικών εργαλείων είναι δύσκολο να μπορούν να αντιληφθούν τις συνέπειες των αποφάσεων σε πλήρη κλίμακα (Jakerman C.M., 1994).

### 1.2.1. Ειδικά Χαρακτηριστικά

Η βιομηχανία τροφίμων εμπεριέχει ειδικά χαρακτηριστικά που οδηγούν σε εξειδικευμένα και πολύπλοκα προβλήματα προγραμματισμού όπου δεν αρκεί η εφαρμογή αλγορίθμων και η ανάλυση πληροφοριών. (Akkerman R. and van Donk D.P., 2009). Παρόλα αυτά όμως παραμένει σημαντικό θέμα. Η μικρή εφαρμογή στην πράξη, σύμφωνα με τους McKay et al. (2002) έχει να κάνει με την μυωπική φύση των ερευνών. Στις περισσότερες περιπτώσεις επικεντρώνονται είτε σε απλοποιημένες, είτε σε αποσπασματικές καταστάσεις. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τους Crawford et al.

(1999), ο χρονικός προγραμματισμός είναι δύσκολος να μελετηθεί γιατί μπορεί να εξεταστεί μόνο στο περιβάλλον στο οποίο εξελίσσεται: σε μια πολύπλοκη και δυναμική παραγωγική διαδικασία. Αυτό άλλωστε υπογραμμίζει την ανάγκη της βιομηχανίας τροφίμων για ειδικά μέσα προγραμματισμού. Κατά την άποψη των Akkerman and Pieter van Donk, η πολυπλοκότητα οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι ο προγραμματισμός είναι συχνά ένα μη δομημένο θέμα όπου τα βασικά προβλήματα σχετίζονται γύρω από οργανωτικές αρμοδιότητες και τη ροή πληροφοριών ενώ επιπρόσθετα, αφορά ένα πολυσύνθετο περιβάλλον που το επηρεάζουν πολλοί παράμετροι όπως οι διαφοροποιήσεις σε συνταγές και οι σταδιακές αλλαγές κατά την παραγωγική διαδικασία (Akkerman R. and van Donk D.P., 2009).

Η βιομηχανία τροφίμων έχει να αντιμετωπίσει ολοένα και περισσότερες προκλήσεις και αλλαγές (Jakerman C.M., 1994). Για πολλά χρόνια η βιομηχανία τροφίμων είχε συνηθίσει να παράγει μεγάλες παρτίδες ώστε να κρατήσει χαμηλά τα κόστη και να περιορίσει τις απαραίτητες αλλαγές και επαναπρογραμματισμούς που απαιτούνται κατά την μετάβαση από την μια παρτίδα στην επόμενη. Τα τελευταία χρόνια αυτό άρχισε να αλλάζει. (van Donk D.P., 2001). Σημαντικός αριθμός μελετών έδειξαν την αυξανόμενη ανάγκη για ευελιξία λόγω των αναπτυσσόμενων αναγκών αποθήκευσης και διακίνησης ως αποτέλεσμα των αλλαγών που επιτελούνται στις συνθήκες αγοράς (Akkerman R. and van Donk D.P., 2009). Οι καταναλωτές αναζητούν χαμηλότερες τιμές χωρίς εκπτώσεις στην ποιότητα. Οι λιανέμποροι επιπρόσθετα απαιτούν γρηγορότερες αποκρίσεις (Jakerman C.M., 1994). Υπάρχουν παραδείγματα μείωσης του χρόνου παράδοσης από 120 ώρες σε 48 σήμερα και αναμένεται να μειωθεί περαιτέρω στο μέλλον (van Donk D.P., 2001). Οι βιομηχανίες έχουν να διαχειριστούν μεγαλύτερη ποικιλία προϊόντων με μικρότερους χρόνους παράδοσης (Jakerman C.M., 1994), διατηρώντας τα κόστη στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα. Άλλες αλλαγές στην αγορά είναι η γενικότερη τάση προς μεγαλύτερη ποικιλομορφία και η ανάπτυξη μοναδικών προϊόντων για ορισμένους πελάτες (προϊόντα ιδιωτικής ετικέτας). Επίσης οι ειδικές προσφορές (π.χ. 10% επιπλέον ποσότητα, διαφορετική συσκευασία) και οι παραγγελίες εξαγωγών με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που αφορούν την χώρα προορισμού. Ορισμένα προϊόντα απαιτούνται σε περιορισμένες ποσότητες ή με μεγάλα κενά μεταξύ διαδοχικών παραγγελιών (Akkerman R. and van Donk D.P., 2009) Αυτές οι αλλαγές δείχνουν από μόνες τους ότι απαιτείται νέος τρόπος εργασίας

με έμφαση στον προγραμματισμό (Jakerman C.M., 1994) ώστε να υπάρξει γρήγορη και αποτελεσματική ανταπόκριση (Akkerman R. and van Don D.P., 2009).

Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός «υψηλής ποιότητας» πλάνων παραγωγής σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα είναι ζωτικής σημασίας, λόγω των αυστηρών απαιτήσεων που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων προϊόντων, την έκταση και την ποικιλία των παραγγελιών, καθώς και των άλλων ειδικών αναγκών που απαιτεί η αγορά. Η αύξηση της ευελιξίας των γραμμών συσκευασίας πρέπει να είναι υψηλής προτεραιότητας προκειμένου να καλυφθούν οι χρονικοί περιορισμοί των παραγγελιών, να μεγιστοποιηθεί η αξιοποίηση των πόρων, να ελαχιστοποιηθούν το κόστος μετατροπών και αλλαγών κλπ. (Claassen G.D.H, 1991)

Σε καθημερινή βάση, όσοι ασχολούνται με τον χρονικό προγραμματισμό παραγωγής θα πρέπει να είναι ικανοί να χειριστούν καταστάσεις που συνεχόμενα αλλάζουν και να μπορούν να ανταποκρίνονται σε βραχυπρόθεσμες μεταβολές που μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Παραγγελίες
- Διαθεσιμότητα εξοπλισμού
- Πρώτες ύλες και παραδόσεις
- Κόστη επεξεργασίας και αποδόσεις

Σε μακροχρόνια βάση, οι μονάδες παραγωγής θα πρέπει να εξελίσσονται ώστε να προλαβαίνουν τις αλλαγές που πραγματοποιούνται στις αγορές. Έτσι θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και να εντάσσουν στον μακροχρόνιο προγραμματισμό τους:

- Σχεδιασμό νέων προϊόντων
- Αλλαγές και τροποποιήσεις συνταγών
- Μετατροπές σε συσκευασίες και τρόπους αποθήκευσης (Jakerman C.M., 1994)

Κατά την δημιουργία ενός προγράμματος παραγωγής, όσοι σχετίζονται με αυτόν θα πρέπει να ισορροπήσουν την μέγιστη απόδοση με το ελάχιστο κόστος, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να τηρούνται οι διορίες και να αποφεύγονται πρακτικές που προκαλούν συμβιβασμούς στην ποιότητα. Η βασική αποστολή όμως είναι η αποφυγή



καθυστερήσεων που προκύπτει λόγω των πεπερασμένων πόρων μιας μονάδας.

Τέτοιοι πόροι είναι:

- Ο μηχανολογικός εξοπλισμός (δεξαμενές, συσκευαστικές, δίκτυα σωληνώσεων, συστήματα καθαρισμού κλπ)
- Το προσωπικό
- Τα δίκτυα (ατμού, ενέργειας, νερού κλπ)

Το εργατικό και άλλα λειτουργικά κόστη ελαχιστοποιούνται όταν μεγιστοποιείται η παραγωγή και οδηγεί σε συντομότερους χρόνους κατά την παραγωγική διαδικασία. Τέλος, σημαντικοί πόροι μπορούν να εξασφαλιστούν από την αποφυγή παραγωγής μεγαλύτερης ποσότητας ενδιάμεσων προϊόντων από αυτό που πραγματικά απαιτείται. Αυτό συμβαίνει συχνά καθώς κάποιες φορές είναι δύσκολο να υπολογιστεί η ακριβής ποσότητα που απαιτείται αλλά και για να υπάρχει περιθώριο για λάθη που προκαλούνται από τον εσφαλμένο σχεδιασμό. (Jakerman C.M., 1994)

Στον Πίνακα 1 ομαδοποιούνται και αναφέρονται χαρακτηριστικά και παράγοντες που αντιμετωπίζει η βιομηχανία τροφίμων καθώς και ο αριθμός εμφανίσεων σε ένα σύνολο 17 περιπτώσεις που μελετήθηκαν από εταιρία συμβούλων επιχειρήσεων (Moret Ernst & Young Management Consultants, 1997)

Πίνακας 1: Συνδυασμός παραγόντων και χαρακτηριστικών των βιομηχανιών τροφίμων (Akkerman R. and van Don D.P., 2009)

Χρόνοι σεταρισματος	>x5
Συνδεσιμότητα (καθόλου ή περιορισμένη ενδιάμεση αποθήκευση)	
Απόκλισεις στην δομή των προϊόντων	
Αλλοιώσεις προϊόντων	
Κοινόχρηστοι πόροι	
Μεταβλητές απαιτήσεις για τα τελικά προϊόντα	x5
Περιορισμένη δυναμικότητα	
Εργατικό	
Μεταβλητές απαιτήσεις σε αποδόσεις κατά την επεξεργασία	x4
Διαφορετικότητα σημείου αποσύνδεσης μιας παραγγελίας από το σύνολο της παραγωγής	
Βλάβες	x3
Μια γραμμή για μια διεργασία	
Ρυθμός παραγωγής οριζόμενος από την δυναμικότητα	
Σχεδιασμός με βάση την συγκέντρωση συστατικού ή χαρακτηριστικού	

Διαφορετικότητα τιμής/ποσότητας/τιμής παραγγελίας	
Συνδυασμός συνεχούς και ασυνεχούς διαδικασίας	x2
Διακύμανση χρόνου διεργασιών μεταξύ λεπτών έως και ημερών	
Πολλές διεργασίες	x1
Υψηλής ποιότητας απαιτήσεις	
Μερικώς ομογενοποιημένα προϊόντα	
Παραγωγή παραπροϊόντων	
Αυξανόμενη καινοτομία	

Κάθε παράγοντας του Πίνακα 1 πολλές φορές προκαλεί ένα πρόβλημα σχεδιασμού από μόνο του. Αλληλεπιδράσεις των παραγόντων περιπλέκουν ακόμα περισσότερο το πρόβλημα. Η ίδια μελέτη έδειξε ότι όσοι σχετίζονται με τον χρονικό προγραμματισμό έχουν κατά μέσο όρο να αντιμετωπίσουν ταυτόχρονα 5 διαφορετικούς παράγοντες και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (Akkerman R. and van Donk D.P., 2009).

Είναι αρκετά δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν τα πλεονεκτήματα του *υπολογιστικά υποβοηθούμενου* χρονικού προγραμματισμού καθώς η προηγούμενη κατάσταση συνήθως είναι δύσκολο να εκτιμηθεί σε βάθος και επομένως δεν μπορεί να γίνει αντικειμενική σύγκριση. Αυτός ο απλός λόγος είναι και η αιτία που δημιουργούνται διαφωνίες και συζητήσεις για το κατά πόσο ωφελεί πραγματικά. «Αν δεν γνωρίζεις πόσο καλά το κάνεις, πώς μπορείς να βελτιώσεις την απόδοσή σου;». (Jakerman C.M., 1994)

### 1.3 Εφαρμογή Προγραμματισμού Παραγωγής στην Βιομηχανία Τροφίμων

Η βιβλιογραφία πάνω στον προγραμματισμό της παραγωγής παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν στις μονάδες τέτοιου τύπου. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα προβλήματα που εμφανίζονται στη βιομηχανία των τροφίμων είναι ένα κομμάτι της γενικότερης κατηγορίας προβλημάτων σχεδιασμού της παραγωγής. Σαν αποτέλεσμα πολλές φορές οι λύσεις που προτείνονται στην βιβλιογραφία βρίσκουν πρακτική εφαρμογή σε διαφορετικούς κλάδους της βιομηχανίας καθώς τα παραγωγικά αυτά συστήματα συνήθως έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ τους.

Οι C.A. Soman *et al.*(2007) αναφέρονται σε περίπτωση σχεδιασμού παραγωγής μιας μονάδας παραγωγής τροφίμων. Τα τελικά προϊόντα ανέρχονται σε 230 και χαρακτηρίζονται από ποικιλία συνταγών, μεγέθους και συσκευασίας. Η ανάγκη για

να καλυφθούν ανάγκες παραγωγής σε απόθεμα (MTS) σε συνδυασμό με παραγωγή από παραγγελίες (MTO) οδηγούν στον βραχυπρόθεσμο σχεδιασμό παρτίδων μέσω ενός ευρετικού αλγόριθμου.

Η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός πιλοτικού συστήματος υποστήριξης αποφάσεων με την χρήση μοντέλου μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming - MILP) από τους Claasen και van Beek σε μια *bottleneck packaging facilities* γαλακτοκομική βιομηχανία έδειξε σημαντικά οφέλη στην γραμμή συσκευασίας. Το τελικό χρονοδιάγραμμα αποδείχθηκε ότι είναι πιο αποδοτικό και πιο αποτελεσματικό από οποιαδήποτε λύση δινόταν με το χέρι και εν τέλει πιο ποιοτικό. Η αποδοτικότητα επιτρέπει αυτούς που προχωρούν στις λήψεις αποφάσεων να βελτιστοποιούν την δική τους απόδοση σε σχέση με την υποχρέωση τους για τον προγραμματισμό της παραγωγής (Classen G.D.H. and van Beek P., 1993)

Στην βιομηχανία ντομάτας οι αβεβαιότητες που αντιμετωπίζουν όσοι λαμβάνουν αποφάσεις για τον προγραμματισμό της παραγωγής είναι δύο τύπων . Ένας τύπος αβεβαιότητας που αντιμετωπίζεται από την κλασική θεωρία των πιθανοτήτων έχει να κάνει με την ζήτηση στην αγορά, τις καιρικές συνθήκες και την διαθεσιμότητα του εργατικού δυναμικού. Ο δεύτερος τύπος αβεβαιότητας μπορεί να αποδοθεί στην ανθρώπινη αντίληψη των γεγονότων (π.χ η ταχύτητα της συσκευαστικής και των ταινιόδρομων, η ποιότητα των φρέσκων προϊόντων). Αυτή η αβεβαιότητα χαρακτηρίζεται ως «ασαφή» (Fuzzy). Οι Miller *et al.* παρουσίασαν δυο μαθηματικά μοντέλα για συσκευαστήριο ντομάτας, το ένα βασισμένο σε ένα παραδοσιακού τύπου μοντέλο παραγωγής γραμμικού προγραμματισμού (linear programming) ενώ το δεύτερο βασισμένο στον ασαφή προγραμματισμό (fuzzy programming). Έδειξαν ότι παρόλα τα σύνθετα μαθηματικά μοντέλα που πρέπει να λυθούν, η μοντελοποίηση με βάση την ανθρώπινη συμπεριφορά μπορεί να αποδώσει σημαντικό οικονομικό κέρδος σε σχέση με την χρήση παραδοσιακών μοντέλων (Miller *et al*, 1997).

Και ενώ σε πολλές περιπτώσεις ένα πλάνο παραγωγής βασίζεται σε πρόβλεψη της ζήτησης, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η τυχαιότητα ή περιοδικότητα της πρώτης ύλης που λαμβάνεται προκαλεί δυσκολίες στην λήψη αποφάσεων όπως για παράδειγμα συμβαίνει στην βιομηχανία ιχθυρών. Σε αυτές τις περιπτώσεις κάθε μέρα είναι μια και μοναδική κατάσταση στην οποία τα πρόσωπα που λαμβάνουν αποφάσεις θα πρέπει να προσαρμοστούν και να δράσουν με βάση την πρώτη ύλη που λαμβάνουν .Ο

Jensson ανέπτυξε ένα γραμμικό μοντέλο προγραμματισμού μεγιστοποίησης του κέρδους της επιχείρησης σε πλάνο άνω των πέντε ημερών. Απώτερος στόχος είναι να αναπτυχθεί ένα εύκολο στη χρήση σύστημα υποστήριξης αποφάσεων το οποίο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθημερινά. Η τυχαιότητα της πρώτης ύλης, η δεδομένη δυναμικότητα των μονάδων παραγωγής, η διακύμανση των τιμών καθώς και η ταχύτητα αλλοίωσης και υποβάθμισης της ποιότητας της πρώτης ύλης μετατρέπουν τον ημερήσιο προγραμματισμό σε ένα ενδιαφέρον πρόβλημα οικονομικής διαχείρισης. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής ήταν πολύ ελπιδοφόρα και έδειξαν ότι ένα σύστημα διαχείρισης αποφάσεων βασισμένο σε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης και εφοδιασμένο με το κατάλληλο user interface μπορεί να γίνει αναπόσπαστο και πολύτιμο εργαλείο των διευθυντών παραγωγής. (Jensson P., 1988)

Η παραγωγή γιαουρτιού, μια τυπική παραγωγική διαδικασία δύο φάσεων, έχει ειδικό ενδιαφέρον γιατί συνδυάζει μεγάλη ποικιλία προϊόντων με πολύ σφιχτά χρονοδιαγράμματα και αυστηρές προθεσμίες. Σε πολλές περιπτώσεις οι παραγγελίες από τους πελάτες τροποποιούνται ακόμα και όταν έχει ήδη αρχίσει η παραγωγή. Ο Jakerman μελέτησε την εγκατάσταση ενός συστήματος διαχείρισης της παραγωγής (Production Management System – PMS) σε μια γαλακτοκομική εταιρία παραγωγής γιαουρτιού και διαπιστώθηκαν βελτιώσεις σε μια σειρά παραμέτρων. Στην απόδοση παραγωγής, ενώ ο χειροκίνητος προγραμματισμός δεν παρείχε πληροφορίες σχετικά με τις περιοριστικές διεργασίες (*bottleneck*) και τις αναμονές, το PMS παρείχε γραφήματα υποδεικνύοντας διάφορες καθυστερήσεις. Συνεχής επαναπρογραμματισμός οδηγούσε στην τήρηση των διοριών την ώρα που το αντίθετο θα οδηγούσε σε σημαντικά πρόστιμα. Ο χειροκίνητος προγραμματισμός, όπως και πριν, επίσης δεν φανέρωνε την ολοκλήρωση παραγγελιών εντός των χρονοδιαγραμμάτων. Σημαντικά οφέλη σημειώθηκαν επίσης και στην απόκριση της παραγωγής στις παραγγελίες ή τις τροποποιήσεις αυτών την τελευταία στιγμή (Jakerman C.M., 1994).

Σε βιομηχανία που ειδικεύεται στην παραγωγή λιπών, μαργαρινών και ελαίων αναγνωρίστηκαν τα παρακάτω προβλήματα κατά τον χειροκίνητο προγραμματισμό των γραμμών συσκευασίας:

- Ο προγραμματισμός αποτυγχάνει να λάβει υπόψη όλους τους περιορισμούς, οπότε και γίνεται ανέφικτος

- Ακόμα και μικρές αλλαγές είναι δύσκολο και υπερβολικά χρονοβόρες να πραγματοποιηθούν
- Τα προγράμματα παρουσιάζουν συχνά ανεπαρκή και υπερβολικού κόστους χρήση του εργατικού δυναμικού καθώς και του μηχανολογικού εξοπλισμού
- Αποτυχία στην αναγνώριση των εβδομαδιαίων στόχων παραγωγής για όλους τους κωδικούς
- Δεν υπάρχουν μέσα ώστε να εκτιμηθεί η ποιότητα του προγραμματισμού.

Η ανάπτυξη και εφαρμογή μιας υπολογιστικά υποβοηθούμενης διαδικασίας προγραμματισμού με την χρήση ευερετικού αλγόριθμου για τις γραμμές συσκευασίας της εν λόγω βιομηχανίας μελετήθηκε από τους Lagodimos *et al.* Για να εκτιμηθεί η ποιότητα της προτεινόμενης διαδικασίας προγραμματισμού, ορίστηκαν δύο δείκτες:

- Δείκτης Παραγωγικότητας Εργασίας (Labour Productivity Index)
- Δείκτης Αποδοτικότητας Προγράμματος (Schedule Efficiency Index)

Σε σύγκριση με την προηγούμενη κατάσταση, τα στελέχη της εταιρίας διαπίστωσαν ότι η ποιότητα του προγραμματισμού έχει βελτιωθεί αισθητά αφού ενώ οι παραπάνω δείκτες κυμάνθηκαν στα ίδια, και ελαφρά χαμηλότερα, επίπεδα (από 99% σε 95%), αυτό επετεύχθη με μείωση ως και 35% του κόστους υπερωριών χωρίς μεταβολές στον όγκο παραγωγής. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι αρκετά γενικός με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την λύση παρόμοιων προβλημάτων προγραμματισμού εφόσον ενσωματωθούν τα απαραίτητα κριτήρια (Lagodimos *et al.*, 1996).

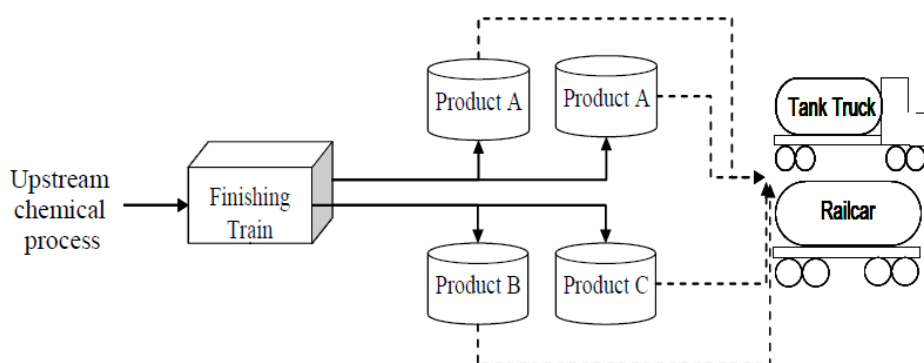
## 2. Tank Farm Management

Η χημική βιομηχανία και κυρίως τα διυλιστήρια μεταφέρουν τα τελικά τους προϊόντα χρησιμοποιώντας διαφορετικά μέσα μεταφοράς όπως τρένα, βυτιοφόρα και αγωγούς. Αυτά τα διαφορετικά μέσα μεταφοράς συνήθως φορτώνονται, ή συνδέονται απευθείας, με δεξαμενές αποθήκευσης. Συνεπώς, όλη η παραγωγική διαδικασία και τα προϊόντα της καταλήγουν στο να τροφοδοτήσουν αυτές τις δεξαμενές πριν γίνει η μεταφορά προς τον πελάτη. Αυτός ο τύπος λειτουργίας επιβάλλει την ανάγκη για την διαθεσιμότητα χώρου στις δεξαμενές κάθε στιγμή ώστε να αποφεύγονται περιττές διακοπές λειτουργίας στην ανάντι διεργασία (*upstream process*). Όταν αυτές οι διακοπές συμβαίνουν, τότε επι της ουσίας οι δεξαμενές αποθήκευσης εμποδίζουν την παραγωγική διαδικασία. Αν η παραγωγική διαδικασία παράγει διάφορα προϊόντα που το καθένα απαιτεί αποκλειστική χρήση μιας δεξαμενής, η ανάθεση δεξαμενής σε κάθε προϊόν καθώς και ο χρονικός προγραμματισμός της παραγωγής προσδιορίζουν πόσο αποτελεσματικά χρησιμοποιείται ο συνολικός αποθηκευτικός χώρος. Αναποτελεσματικότητα ανάθεσης δεξαμενών ή του χρονικού προγραμματισμού μπορεί να οδηγήσει σε διακοπές παραγωγής συγκεκριμένων προϊόντων ακόμα και αν υπάρχει επαρκής αποθηκευτικός χώρος σε άλλες δεξαμενές, οι οποίες όμως έχουν ανατεθεί σε άλλα προϊόντα.

Η ανάθεση μιας δεξαμενής σε ένα προϊόν συνεπάγεται ότι η δεξαμενή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλο προϊόν. Αυτό συχνά καλείται «δέσμευση» της δεξαμενής στο συγκεκριμένο προϊόν. Η καλύτερη δυνατή ανάθεση προϊόντων σε δεσμευμένες δεξαμενές και ο καλύτερος δυνατός προγραμματισμός της παραγωγικής διαδικασίας ελαχιστοποιούν την παραγωγή αδιάθετης ποσότητας που μπορεί να οδηγήσει σε μπλοκάρισμα και κατ' επέκταση σε διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας.

Για λόγους προγραμματισμού, υπάρχει ένα σύνολο εντολών παραγωγής που απαιτεί την επεξεργασία συγκεκριμένης ποσότητας. Αυτές οι εντολές παραγωγής έχουν συγκεκριμένο χρονικό περιθώριο για την αποδέσμευση τους. Ως αποδέσμευση θεωρείται η στιγμή που συγκεκριμένη ποσότητα ημίετοιμου προϊόντος γίνεται διαθέσιμη προς επεξεργασία στην παραγωγική διαδικασία και επομένως άμεσα τροφοδοτούνται οι δεξαμενές αποθήκευσης ή καθυστερεί η αποδέσμευση μέχρι να υπάρχει διαθέσιμη δεξαμενή. Οι κύριες αποφάσεις σε αυτό το πρόβλημα είναι οι

αναθέσεις δεξαμενών-προϊόντων καθώς και ο χρονικός προγραμματισμός των εντολών παραγωγής. Συνολικά, αυτό το πρόβλημα είναι γνωστό ως **Tank Farm Management** ή **Tank Farm Operation Problem (TFOP)**.



Σχήμα 2: Διάγραμμα Ροής Tank Farm (Terrazas-Moreno *et al.*, 2011)

Οι προσεγγίσεις σε αυτού του είδους τα προβλήματα είναι συνήθως δύο ειδών, ενώ σύμφωνα με κάποιους ερευνητές, πολλές φορές μπορούν να δρουν και υποστηρικτικά. Η μια προσέγγιση χρησιμοποιεί μαθηματικά μοντέλα και εστιάζει στον προσδιορισμό της καλύτερης δυνατής κατανομής δεξαμενών και/ή του χρονικού προσδιορισμού σε καθορισμένο χώρο. Εναλλακτικά, ή υποστηρικτικά σε δεύτερο στάδιο, χρησιμοποιούνται εργαλεία προσομοίωσης που όμως εν αντιθέσει με την προηγούμενη προσέγγιση απαιτούν να είναι καθορισμένα η κατανομή και ο χρονικός προγραμματισμός. Τα εργαλεία προσομοίωσης βασίζονται στην παραγωγή τυχαίων λύσεων για δεδομένο πλάνο παραγωγής και έπειτα στην αποτίμηση των λύσεων αυτών. Η χρήση μαθηματικών μοντέλων έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά επιτυχημένα παρόλο το μειονέκτημα ότι περιορισμοί που σχετίζονται με την λειτουργία της μονάδας θα πρέπει να εκφραστούν ως αλγεβρικές εξισώσεις. Επιπρόσθετα, ο αριθμός των μεταβλητών, η πολυπλοκότητα της παραγωγικής διαδικασίας αλλά και η στοχαστική φύση των διαδικασιών που σχετίζονται με το **Tank Farm Management** πολλές φορές μπορεί να οδηγήσει είτε σε υπεραπλουστευμένα, είτε στην πολύπλοκα και δύσχηρστα μαθηματικά μοντέλα (Terrazas *et al.*, 2011).

### 3. Μαθηματική αναπαράσταση προβλημάτων βελτιστοποίησης

Τα μοντέλα προγραμματισμού, ή αλλιώς μοντέλα βελτιστοποίησης, είναι ισχυρά εργαλεία που χρησιμοποιούνται τόσο στο βιομηχανικό όσο και στον επιστημονικό/ερευνητικό κόσμο. Τα οφέλη που μπορούν να προσφέρουν στη βιομηχανία είναι πολλαπλά, αφού αυτά τα μοντέλα σχεδιάζονται αντιπροσωπεύοντας τις αποφάσεις που πρέπει να λάβουν τα στελέχη της επιχείρησης και να δώσουν πληροφορίες ώστε να ληφθούν οι σωστές αποφάσεις από αυτούς, με τελικό σκοπό την αύξηση των κερδών ή την ελαχιστοποίηση των εξόδων της επιχείρησης (Burke, 2006).

Στη μαθηματική γλώσσα, τα μοντέλα βελτιστοποίησης είναι μαθηματικά μοντέλα με τα οποία 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 (Σαββάκη, 2014),

Στα προβλήματα βελτιστοποίησης, τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για την εύρεση βέλτιστων λύσεων που να ικανοποιούν παράλληλα κάποιους στόχους και περιορισμούς. Πολλές φορές τα προβλήματα αυτά είναι υπερβολικά περίπλοκα, λαμβάνοντας υπόψη τους μεγάλο αριθμό σχεδιαστικών μεταβλητών. Τα προβλήματα αυτά έχουν μεγάλο αριθμό πιθανών λύσεων. Για το λόγο αυτό, επιλέγονται κριτήρια αξιολόγησης των αποτελεσμάτων (εξίσωση αξιολόγησης ή αντικειμενική συνάρτηση). Συνήθως, οι χρήστες δεν μπορούν να επιλέξουν ελεύθερα μία λύση από τις διαθέσιμες εναλλακτικές, διότι υπάρχουν περιορισμοί που πρέπει να τηρούνται. Τέτοιοι περιορισμοί μπορεί να τίθενται από τη νομοθεσία ή μπορεί να είναι περιορισμοί τεχνικής φύσης, τεχνικών προδιαγραφών, κ.λ.π.. Τα κύρια χαρακτηριστικά των προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι:

- Πολλαπλές διαθέσιμες τελικές λύσεις
- Περιορισμοί περιορίζουν τον αριθμό των διαθέσιμων λύσεων



- Κάθε εναλλακτική λύση μπορεί να έχει διαφορετική επίπτωση στο κριτήριο αξιολόγησης
- Η εξίσωση αξιολόγησης, που καθορίζεται από τις σχεδιαστικές μεταβλητές, περιγράφει κάθε φορά, το αποτέλεσμα των διαφορετικών εναλλακτικών λύσεων.

Στα προβλήματα βελτιστοποίησης, η εναλλακτική λύση θα πρέπει να επιλεγεί με βάση την ικανοποίηση όλων των περιορισμών και εφόσον μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Η διαδικασία που ακολουθείται για τη δημιουργία και επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης χωρίζεται στα παρακάτω στάδια:

- Αναγνώριση του προβλήματος
- Ορισμός του προβλήματος
- Δημιουργία του μοντέλου επίλυσης του προβλήματος
- Επίλυση του προβλήματος
- Επαλήθευση των διαθέσιμων λύσεων
- Εφαρμογή μίας λύσης (Rothlauf, 2011)

Για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού στις οποίες περιλαμβάνονται:

- Γραμμικός προγραμματισμός (Linear Programming, LP)
- Ακέραιος προγραμματισμός (Integer Programming, IP)
- Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (Mixed Integer Linear Programming, MILP)
- Μη Γραμμικός προγραμματισμός (Non Linear Programming, NLP)

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.) (Σαββάκη, 2014). Τα μοντέλα Integer Programming είναι μοντέλα όπου όλες οι μεταβλητές δίνονται από ακέραιους αριθμούς. Η επίλυση αυτών των μοντέλων ακολουθεί γραμμικό ή μη γραμμικό προγραμματισμό, ανάλογα με το είδος των εξισώσεων. Στα μοντέλα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, MILP, μέρος ή και όλες οι μεταβλητές δίνονται από ακέραιους αριθμούς και η αντικειμενική εξίσωση, όπως και οι περιορισμοί δίνονται από γραμμικές εξισώσεις. Τέλος, τα μοντέλα μη γραμμικού προγραμματισμού, NLP, είναι τα πιο πολύπλοκα μοντέλα με μεγάλο βαθμό δυσκολίας στην επίλυση τους, καθώς αυτά αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο αριθμό των εφαρμογών. Στα συγκεκριμένα προβλήματα, κάποιες από τις εξισώσεις που δημιουργούνται δίνονται σε μη γραμμική μορφή (Λαμπρίδη, 2014)

### 3.1 Γραμμικός Προγραμματισμός

Ο γραμμικός προγραμματισμός (linear programming) αποτελεί αναμφίβολα το δημοφιλέστερο μοντέλο στο χώρο της επιχειρησιακής έρευνας αλλά και της διοικητικής επιστήμης γενικότερα. Η μεγάλη επιτυχία που είχαν σε εφαρμογές του σε προβλήματα λήψης αποφάσεων των ιδιωτικών και δημόσιων επιχειρήσεων και οργανισμών αποδίδεται, από τη μια πλευρά στα επιτεύγματα της έρευνας μαθηματικών και οικονομολόγων σε θεωρητικό επίπεδο και από την άλλη πλευρά στην επαναστατική ανέλιξη της πληροφορικής επιστήμης και τεχνολογίας. Κυριαρχεί σήμερα η αντίληψη ότι, τρεις στις τέσσερις εφαρμογές μοντέλων επιχειρησιακής έρευνας σε πραγματικά προβλήματα διοίκησης παραπέμπουν στο γραμμικό προγραμματισμό. Ο Γ.Π. χρησιμοποιείται από τους επιχειρησιακούς ερευνητές ή τους αναλυτές προβλημάτων απόφασης για τη προσέγγιση προβλημάτων κατανομής περιορισμένων πόρων ή μέσων σε εναλλακτικές και ανταγωνιστικές μεταξύ τους δραστηριότητες κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Πρόκειται για το γνωστό πρόβλημα κατανομής της “πίτας” (resource allocation problem). Προβλήματα απόφασης αυτής της μορφής είναι, για παράδειγμα, η κατανομή εργατικού δυναμικού, τεχνολογικού εξοπλισμού και πρώτων υλών σε διάφορες παραγωγικές διαδικασίες, η κατανομή κεφαλαίου σε διάφορα επενδυτικά προγράμματα, η ανάθεση σε περιορισμένο προσωπικό διαφόρων υπηρεσιών, η κατανομή καλλιεργήσιμης γης σε διάφορες αγροτικές δραστηριότητες, κ.λπ. Επιδιωκόμενο αποτέλεσμα αυτών των αποφάσεων (κριτήρια απόφασης) μπορεί να αφορά τη μεγιστοποίηση του συνολικού

κέρδους από πωλήσεις, την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής, τη μεγιστοποίηση της απασχόλησης, την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον, κλπ. (math.ntua.gr)

Τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού (LP) ορίζονται ως τα προβλήματα μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης μίας γραμμικής συνάρτησης, η οποία υπόκειται σε γραμμικούς περιορισμούς. Σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού δεδομένων  $n$  μεταβλητών και  $m$  γραμμικών εξισώσεων ή ανισοτήτων, ζητούνται οι μη αρνητικές τιμές αυτών των μεταβλητών οι οποίες ικανοποιούν αυτές τις εξισώσεις και ανισώσεις και βελτιστοποιούν (μεγιστοποιούν) κάποια γραμμική συνάρτηση αυτών των μεταβλητών. Δηλαδή ζητείται η μεγιστοποίηση μιας γραμμικής συνάρτησης

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

με την προϋπόθεση να ικανοποιούνται οι γραμμικοί περιορισμοί

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq \beta_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

και

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Έτσι τώρα μπορούμε να διαμορφώσουμε το μαθηματικό μοντέλο ενός γενικού προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού. Με το μοντέλο αυτό επιλέγουμε τις τιμές των  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , έτσι ώστε:

$$\max z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n$$

με περιορισμούς:

$$\alpha_{11} x_1 + \alpha_{12} x_2 + \dots + \alpha_{1n} x_n \leq \beta_1$$

$$\alpha_{21} x_1 + \alpha_{22} x_2 + \dots + \alpha_{2n} x_n \leq \beta_2$$

.....

$$\alpha_{m1} x_1 + \alpha_{m2} x_2 + \dots + \alpha_{mn} x_n \leq \beta_m$$

και

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$$

Αυτή είναι η τυποποιημένη μορφή του γενικού προβλήματος του γραμμικού προγραμματισμού. Κάθε πρόβλημα του οποίου το μαθηματικό μοντέλο ταιριάζει με το παραπάνω μοντέλο είναι ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού.

Ορισμοί:

- Η συνάρτηση που θέλουμε να μεγιστοποιηθεί ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση (objective function).
- Οι περιοριστικές σχέσεις (2) και (3) ονομάζονται περιορισμοί (constraints). Οι πρώτοι  $m$  περιορισμοί ονομάζονται λειτουργικοί περιορισμοί (functional constraints) και οι  $x_j \geq 0$  περιορισμοί μη αρνητικότητας (non-negativity constraints).
- Οι μεταβλητές  $x_j$  ονομάζονται σχεδιαστικές μεταβλητές (decision variables), όπως είδαμε και πιο πάνω, ενώ οι σταθερές  $a_{ij}$ ,  $\beta_i$ , και  $c_j$  είναι οι παράμετροι (parameters) του μοντέλου.

Το πιο πάνω μοντέλο δεν είναι κατάλληλο για όλα τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού. Μπορούν όμως ισοδύναμα να γραφούν με τέτοιο τρόπο ώστε να προσαρμόζονται στο παραπάνω μοντέλο. Αυτό σημαίνει ότι κάθε πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού μπορεί να διατυπωθεί με την τυποποιημένη μορφή (math.aegean.gr)

### 3.2 Ακέραιος προγραμματισμός

Ο ακέραιος προγραμματισμός (integer programming - IP) 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 **μικτού 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. (Σαββάκη, 2014)

### 3.3 Μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός

Ο ακέραιος προγραμματισμός ασχολείται με προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού στα οποία μερικές ή όλες οι μεταβλητές είναι ακέραιες. Ένα γενικό πρόβλημα θα έχει την εξής μορφή:

$$\max (\min) z = c_1x + c_2u$$

με περιορισμούς

$$A_1x + A_2u \geq (\leq, =)b$$

$$u \geq 0 \text{ και ακέραιο } x \geq 0$$

Όπου  $A_1$  είναι ένας  $m \times n_1$  πίνακας και  $A_2$  ένας  $m \times n_2$  πίνακας. Όταν  $n_1 = 0$  τότε το πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, ενώ αν  $n_2 = 0$  τότε το πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα ακεραίου προγραμματισμού. Τέλος αν  $n_1 \neq 0$  και  $n_2 \neq 0$  τότε το πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα **μικτού ακεραίου προγραμματισμού**.

Αν και αρκετοί αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί για προβλήματα ακεραίου προγραμματισμού, καμία από αυτές τις μεθόδους δεν είναι αξιόπιστη από υπολογιστική άποψη, ειδικότερα όταν ο αριθμός των μεταβλητών αυξάνει, σε αντίθεση με τον γραμμικό προγραμματισμό όπου προβλήματα με εκατοντάδες μεταβλητές και εκατοντάδες περιορισμούς μπορούν να λυθούν σε λογικό χρονικό διάστημα.

Η υπολογιστική αυτή δυσκολία που παρατηρείται στους αλγορίθμους επίλυσης προβλημάτων ακεραίου προγραμματισμού έχει οδηγήσει τους χρήστες να βρουν άλλες μεθόδους επίλυσης τέτοιων προβλημάτων. Μια τέτοια προσέγγιση είναι να λυθεί το πρόβλημα σαν ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού και στη συνέχεια να στρογγυλοποιηθεί η βέλτιστη λύση στις κοντινότερες ακέραιες τιμές. Πάντως, δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι η στρογγυλοποιημένη λύση θα ικανοποιεί τους

περιορισμούς, ειδικότερα στην περίπτωση που υπάρχει ένας ή περισσότεροι περιορισμοί - ισότητες.

Από τη θεωρία του γραμμικού προγραμματισμού, μία στρογγυλοποιημένη λύση δεν μπορεί να είναι εφικτή αφού αυτό θα σήμαινε ότι μία βάση (με όλες τις μη βασικές μεταβλητές μηδέν) οδηγεί σε δύο διαφορετικές λύσεις. Η μη εφικτότητα που δημιουργείται από την στρογγυλοποίηση μπορεί να είναι ανεκτή εφόσον οι παράμετροι του προβλήματος δεν είναι σαφείς. Αλλά, συνήθως σε ένα πρόβλημα ακεραίου προγραμματισμού υπάρχουν χαρακτηριστικοί τυπικοί περιορισμοί - ισότητες στις οποίες οι παράμετροι είναι σαφείς. Ένας τέτοιος περιορισμός είναι ο  $x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1$ , με  $x_j = 0$  ή  $1$  για  $j = 1, 2, \dots, n$ . Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις, η στρογγυλοποίηση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και τότε ένας αλγόριθμος επίλυσης προβλημάτων ακεραίου προγραμματισμού είναι απαραίτητος.

Επί πλέον στην ακαταλληλότητα της στρογγυλοποίησης δίνει έμφαση το γεγονός ότι αν και οι ακέραιες μεταβλητές θεωρούνται κοινώς ως αναπαράσταση ενός διακριτού αριθμού αντικειμένων (μηχανών, ανθρώπων, κ.τ.λ.) ([math.aegean.gr](http://math.aegean.gr))

## 4. Περιγραφή Λογισμικού Schedule Pro®

Το SchedulePro® είναι ένα λογισμικό εργαλείο προσομοίωσης της παραγωγικής διαδικασίας μονάδων ασυνεχούς ή ημι-συνεχούς λειτουργίας με έμφαση στον χρονικό προγραμματισμό. Μερικές χαρακτηριστικές εφαρμογές του SchedulePro® περιλαμβάνουν:

1. Βραχυπρόθεσμος/μακροπρόθεσμος προγραμματισμός παραγωγής
2. Ανάλυση ικανότητας παραγωγής
3. Ταυτοποίηση και εξάλειψη περιοριστικών διεργασιών/πόρων (debottlenecking)
4. Μείωση του κύκλου χρόνου παραγωγής.

Το SchedulePro® χρησιμοποιεί την έννοια της “**συνταγής**” για την απεικόνιση της διαδικασίας παραγωγής κάθε προϊόντος της μονάδας. Για την εκτέλεση κάθε συνταγής, 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 χωρίς να μεσολαβεί κάποιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να διαμορφώσει το τελικό πρόγραμμα παραγωγής εισάγοντας όλες τις επιθυμητές αλλαγές και παρακάμπτοντας την προτεινόμενη από το πρόγραμμα λύση.

### 4.1 Βασικές Αρχές

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

#### **Πόροι (Resources):**

Ο όρος *Πόρος (resources)* περιλαμβάνει το ανθρώπινο δυναμικό, τα υλικά, το κεφάλαιο, τον εξοπλισμό και την ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε ένα σύστημα παραγωγής ως *εισροές (input)*. Οι εισροές μπορούν να διακριθούν στις κύριες εισροές, δηλαδή σε εκείνες που θα μετασχηματισθούν μέσω μιας παραγωγικής διαδικασίας, και σε εκείνες που βοηθούν στο μετασχηματισμό, των κύριων εισροών ,

δηλαδή το ανθρώπινο δυναμικό, τα μηχανήματα κλπ. Οι εισροές μετατρέπονται μέσω της παραγωγικής διαδικασίας σε εκροές (*output*).

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 μέσα σε αυτήν διαθέτει ημερολόγιο όπου μπορούν να καταγραφούν τα χρονικά διαστήματα προγραμματισμένης διακοπής λειτουργίας.

### **Συνταγή (Recipes) :**

Το SchedulePro® είναι ειδικά σχεδιασμένο για το 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 μιας 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 από τον αριθμό των διαθέσιμων πόρων. Μια διεργασία με χημική αντίδραση, για παράδειγμα, θα έχει την ίδια χρονική διάρκεια για την διεκπεραίωση της, είτε υπάρχουν δύο είτε τέσσερις χειριστές στο μηχανήμα.

### **Οργάνωση των Συνταγών (Recipe Organization):**

Το SchedulePro® χρησιμοποιεί την έννοια της συνταγής που αντιπροσωπεύει το πρότυπο ή την περιγραφή του πώς φτιάχνεται (δημιουργείται) μία 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 πχ 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 την διάρκειά της. Μια διαδικασία μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε *λειτουργίες ή ενέργειες (operations)*. Οι ενέργειες



περιγράφουν διακριτά επιμέρους βήματα τα οποία εκτελούνται διαδοχικά στην ίδια συσκευή και διαφέρουν ως προς την λειτουργία τους και τα φυσικοχημικά τους χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, μια διαδικασία σε έναν αντιδραστήρα μπορεί να περιλαμβάνει τις ακόλουθες ενέργειες: φόρτωση του υλικού στον αντιδραστήρα, ανάμειξη, θέρμανση, αντίδραση και άδειασμα του αντιδραστήρα. Πέρα από την χρήση της πρωτεύουσας συσκευής, οι ενέργειες μπορεί να απαιτούν για την εκτέλεσή τους και άλλους πόρους, όπως *εργατικό δυναμικό (labor)*, *υλικά (materials)*, *βοηθητικές παροχές (utilities)*, *βοηθητικό εξοπλισμό (auxiliary equipment)* και *συγκεκριμένο προσωπικό (staff)*. Ως προς την χρονική διάρκεια εκτέλεσής τους, οι ενέργειες ανήκουν σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες:

*Σταθερού χρόνου (προεπιλογή) (Fixed duration)*: Η χρονική διάρκεια των ενεργειών (*operations*) είναι δεδομένη και εισάγεται από τον χρήστη.

*Σταθερού ρυθμού (Rate-based duration)*: Η διεργασία εκτελείται με συγκεκριμένο ρυθμό κι 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 την συσκευή στην οποία επιτελείται.

*Εξαρτημένης διάρκειας (Dependent duration)*: Η διάρκεια είναι ίση με μιας άλλης ενέργεια ή μια σειράς ενεργειών

Ως προς τον 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 την έναρξη 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 ωστόσο η συσκευή απελευθερωθεί από τις άλλες ενέργειες που προηγήθηκαν και την 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 την μέγιστη δηλωθείσα τιμή είναι που χαρακτηρίζει αυτή την καθυστέρηση ως “ευέλικτη”.

Πέρα από τους πόρους που η διαδικασία χρησιμοποιεί, η κάθε ενέργεια μέσα στην 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 (*StorageUnits*)

#### **Οι Πόροι των Συνταγών (*RecipeResources*):**

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/μηχανημάτων (πχ, δεξαμενή, συσκευαστική μηχανή, συσκευή CIP) της μονάδας με την βοήθεια των οποίων εκτελούνται οι διεργασίες. Από άποψη σχεδιασμού, ένα στοιχείο εξοπλισμού είναι ένας μη αναλώσιμος επαναχρησιμοποιήσιμος πόρος.

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε διαδικασία εξ ορισμού απαιτεί μία συσκευή για την εκτέλεσή της ενώ, προαιρετικά, κάθε ενέργεια μπορεί να απαιτήσει μια 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 τον χρονικό προγραμματισμό της διεργασίας, το SchedulePro® θα επιλέξει την πρώτη διαθέσιμη συσκευή για κάθε διαδικασία/ενέργεια διατρέχοντας την λίστα των υποψήφιων συσκευών από πάνω προς τα κάτω.

Η δυναμικότητα/μέγεθος κάθε συσκευής και/ή ο ρυθμός λειτουργίας της μπορούν προαιρετικά να δηλωθούν στο SchedulePro®. Η πληροφορία για την δυναμικότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξαιρεθούν από την λίστα υποψήφιων συσκευών αυτές που λόγω μεγέθους είναι ακατάλληλες. Η πληροφορία για τον ρυθμό λειτουργίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η χρονική διάρκεια εκτέλεσης ενεργειών που έχουν δηλωθεί σαν 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 οι υπόλοιποι πόροι (εκτός υλικών) ομαδοποιούνται σε εγκαταστάσεις/μονάδες (*facilities*).

#### **Χώροι εργασίας (*WorkArea*):**

Οι χώροι εργασίας είναι χώροι (πχ, εργαστήρια) που δεσμεύονται κατά την διάρκεια εκτέλεσης μιας διαδικασίας με σκοπό την εκτέλεση παράλληλων εργασιών (πχ, 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 μετρούνται 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 μια 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 άδειασμα τους. Μέγιστα όρια μπορούν επίσης να οριστούν στον ρυθμό διάθεσης/απόθεσης κάποιου υλικού από τις δεξαμενές ή αποθήκες. Τα όρια αυτά δρουν σαν περιορισμοί στον 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 στην μονάδα. Μέσα από το ημερολόγιο της κάθε ειδικότητας μπορούν να οριστούν αποκλίσεις από την δηλωθείσα τιμή όπως, για παράδειγμα, διαφοροποιήσεις στην διαθεσιμότητα ανά βάρδια. Στον 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 άτομα. Για κάθε ενέργεια ο χρήστης μπορεί να ορίσει μια ταξινομημένη λίστα (*pool*) ατόμων στα οποία θα μπορούσε να ανατεθεί όπως και τον αριθμό των ατόμων που απαιτούνται. Όταν γίνεται ο χρονικός προγραμματισμός της μονάδας, το *SchedulePro*® επιλέγει από την λίστα τον αντίστοιχο αριθμό διαθέσιμων ατόμων που μπορούν να εκτελέσουν την εργασία.

#### **Βοηθητικές Παροχές (*Utilities*):**

Βοηθητικές παροχές στο *SchedulePro*® είναι μη επαναχρησιμοποιήσιμοι πόροι που δεν μπορούν να αποθηκευτούν ή να απογραφούν. Στις βοηθητικές παροχές περιλαμβάνονται τα θερμαντικά/ψυκτικά μέσα (πχ, ατμός, νερό ψύξης) και η ηλεκτρική ενέργεια. Σε κάθε ενέργεια μπορεί να δηλωθεί ο ρυθμός 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 στην 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 στον 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 μιας 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
- καθορισμός ακριβούς χρόνου λήξης
- καθορισμός χρόνου έναρξης σε σχέση με την έναρξη ή λήξη μιας άλλης καμπάνιας
- καθορισμός χρόνου έναρξης με βάση την κατάσταση του αποθέματος επιλεγμένου υλικού (πρώτης ύλης ή ενδιάμεσου προϊόντος).

Προαιρετικά, για κάθε καμπάνια μπορούν να οριστούν διεργασίες που προηγούνται της έναρξης ή 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 την χρήση συγκεκριμένων πόρων. Σε πλήρη αντιστοιχία προς την 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 στην χρήση των πόρων.

### **Αυτόματος Χρονικός Προγραμματισμός (*Automatic Scheduling*):**

Κατά την δημιουργία ενός πλάνου παραγωγής, το SchedulePro® προγραμματίζει κάθε καμπάνια χωριστά και σύμφωνα με την σειρά που έχουν εισαχθεί στη λίστα από τον χρήστη. Με αυτό τον τρόπο, η υψηλή θέση μιας καμπάνιας στην λίστα ερμηνεύεται σαν «υψηλή προτεραιότητα» κι επομένως οι διαθέσιμοι πόροι πρέπει να τις 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 την χρονική απόσταση μεταξύ της έναρξης δύο διαδοχικών παρτίδων. Είναι επιθυμητό ο κύκλος χρόνου να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος ούτως ώστε η συνολική διάρκεια εκτέλεσης της καμπάνιας να είναι η μικρότερη δυνατή. Το SchedulePro® κάνει μια εκτίμηση του ελάχιστου κύκλου χρόνου παραγωγής με βάση τους χρόνους εκτέλεσης των διαδικασιών της συνταγής και τις διαθέσιμες συσκευές ή μηχανήματα. Όσο περισσότερες συσκευές είναι διαθέσιμες για μια καμπάνια τόσο μειώνεται ο κύκλος χρόνου 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 κύκλο χρόνου παραγωγής. Όλες οι διαδικασίες και ενέργειες που περιλαμβάνονται στην συνταγή που αντιστοιχεί στην παρτίδα προγραμματίζονται σε σχέση με τον 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 διαθέσιμοι την αντίστοιχη χρονική περίοδο είτε γιατί χρησιμοποιούνται από κάποιες άλλες παρτίδες υψηλότερης 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 την διαφορά χρησιμοποιώντας έναν από τους κάτωθι μηχανισμούς:

- επιλογή, από την λίστα των συμβατών πόρων, εναλλακτικού πόρου που να 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.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, το *SchedulePro*® καταλήγει σε ένα προτεινόμενο πρόγραμμα παραγωγής για τις εισαχθείσες καμπάνιες. Να σημειωθεί ότι το είδος των διαφορών που θα κληθεί το *SchedulePro*® να επιλύσει εξαρτάται από τις επιλογές του χρήστη. Εξ ορισμού, το *SchedulePro*® θεωρεί ως παραβιάσεις τις επικαλύψεις στην χρήση συσκευών και προσωπικού όπως και τις επικαλύψεις με ‘νεκρούς χρόνους’ λειτουργίας. Συμπληρωματικά, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει σαν περιορισμούς που πρέπει να τηρηθούν τα ανώτατα όρια στην χρήση εργατικού δυναμικού κατά ειδικότητα, βοηθητικών παροχών, αποθηκευτικής ικανότητας κλπ. Στην φάση του αυτόματου προγραμματισμού, το *SchedulePro*® προσπαθεί να δημιουργήσει ένα εφικτό και κατά το δυνατόν βέλτιστο πρόγραμμα παραγωγής ικανοποιώντας όλους τους αποδεκτούς περιορισμούς.

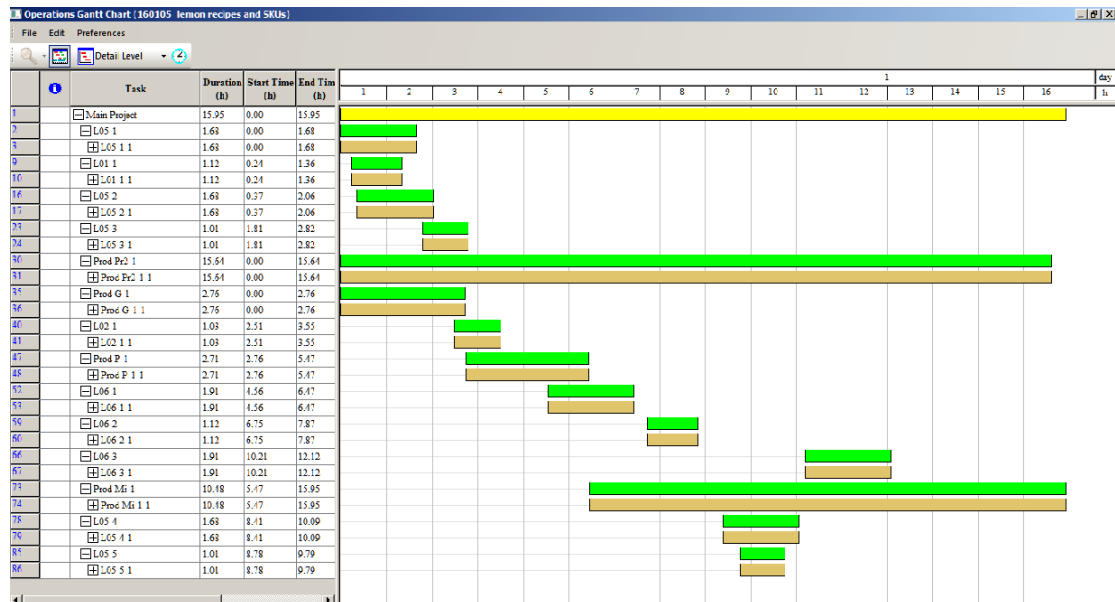
#### **Χρονικός Προγραμματισμός από τον Χρήστη (*Manual Scheduling*):**

Το προτεινόμενο από το *SchedulePro*® πρόγραμμα παραγωγής είναι η βάση για την δημιουργία του τελικού προγράμματος από τον χρήστη. Ο χρήστης μπορεί να κληθεί να επιλύσει επικαλύψεις στην χρήση των πόρων που δεν ήταν δυνατόν να επιλυθούν από τον σχεδιαστικό αλγόριθμο και να εισάγει τις δικές του προτιμήσεις στην επιλογή πόρων και την χρονική έναρξη των παρτίδων. Ακόμα πιο σημαντική μπορεί να είναι η συμβολή του στην επικαιροποίηση του προγράμματος παραγωγής καθ’ όλη την διάρκεια της εξέλιξης του. Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης, παρακολουθώντας την πραγματική παραγωγή στην μονάδα, μπορεί να διαπιστώσει αποκλίσεις από το σχεδιασμένο πρόγραμμα (πχ, 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 στην δημιουργία ενός εφικτού και επικαιροποιημένου προγράμματος παραγωγής και όχι ένας παθητικός αποδέκτης λύσεων που παραρίχθηκαν αυτόματα από κάποιο ‘έξυπνο’ αλγόριθμο.

#### **4.2 Λειτουργικότητα**

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

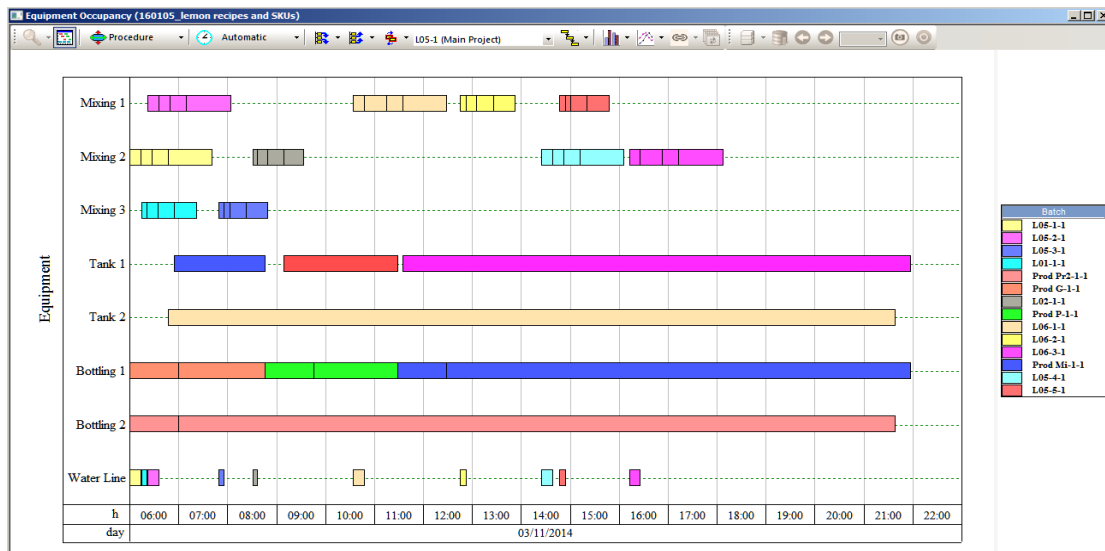
• **Γράφημα Gantt (Operation Gantt Chart)** απεικονίζει γραφικά την χρονική εξέλιξη των διαδικασιών για την ολοκλήρωση της παραγωγής μιας συνταγής ή σχεδιασμένων παρτίδων



Σχήμα 3: Γράφημα Gant

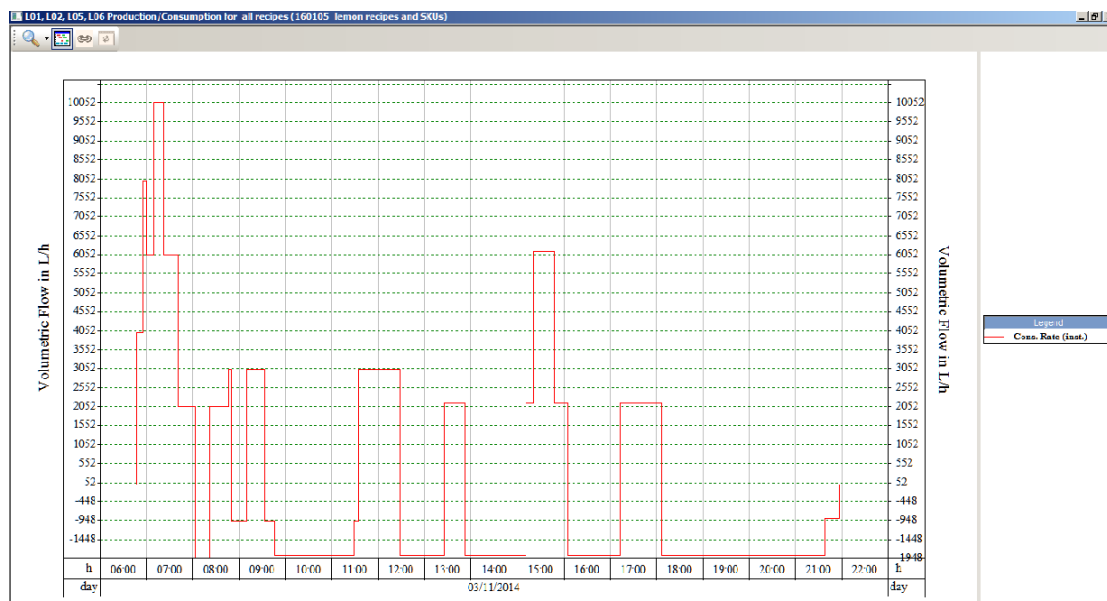
**Διάγραμμα Απασχόλησης Εξοπλισμού/ Προσωπικού (Equipment/Staff Occurance Profile)** εμφανίζει τις χρονικές περιόδους κατά τις οποίες οι συσκευές, χώροι εργασίας και το προσωπικό εκτελούν κάποιες λειτουργίες στα πλαίσια της εκτέλεσης των παρτίδων. Οποιαδήποτε παραβίαση περιορισμού (πχ, χρονική επικάλυψη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





Σχήμα 4: Γράφημα Απασχόλησης Εξοπλισμού

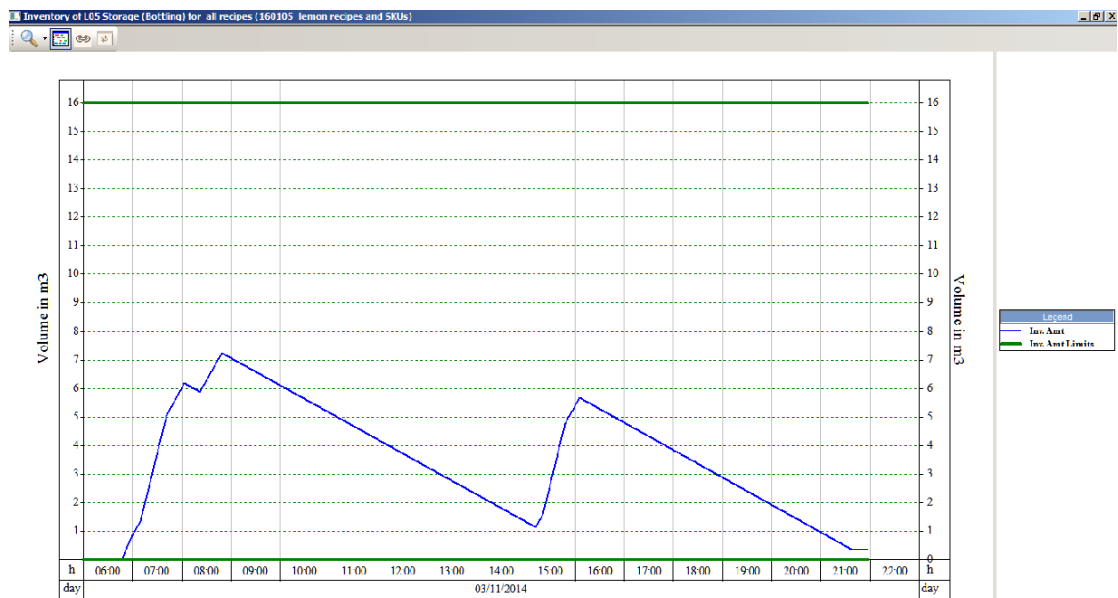
**Διαγράμματα Κατανάλωσης Πόρων (Resource Charts)** στα διαγράμματα αυτά γίνεται καταγραφή των ποσοτήτων μη επαναχρησιμοποιούμενων πόρων που καταναλώνονται ή παράγονται σαν αποτέλεσμα της εκτέλεσης του πλάνου παραγωγής. Οι ακόλουθοι πόροι μπορούν να απεικονιστούν μέσα από αυτά τα διαγράμματα: εργατοώρες ανά ειδικότητα, βοηθητικές παροχές και ενέργεια, πρώτες ύλες, προϊόντα και απόβλητα.



Σχήμα 5: Διάγραμμα Κατανάλωσης Πόρων

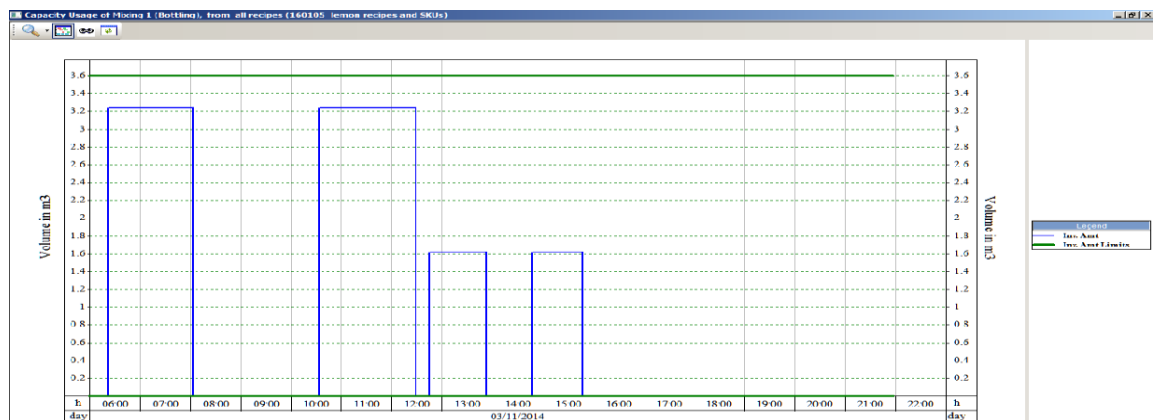
**Διαγράμματα Απογραφής Αποθεματικών Πόρων (Inventory Profiles /Inventory Charts):** μέσα από αυτά τα διαγράμματα, γίνεται η γραφική απεικόνιση του επιπέδου

πληρότητας αποθηκών/δεξαμενών (*storage units*) σαν αποτέλεσμα της κατανάλωσης/παραγωγής των αντίστοιχων αποθηκευμένων πόρων από την παραγωγή. Τα διαγράμματα αυτά μπορούν να αποτελέσουν την βάση για να ελεγχθεί αν η ακολουθούμενη πολιτική ανεφοδιασμού των αποθηκευτικών χώρων αυτών είναι επαρκής ή χρειάζεται να αλλάξει ώστε να εγγυάται τον ομαλό εφοδιασμό της παραγωγικής διαδικασίας.



Σχήμα 6: Διάγραμμα Απογραφής Αποθεματικών Πόρων

**Διαγράμματα Χρήσης Εξοπλισμού (Capacity Usage of Equipment)** εμφανίζει σε σχέση με τη χρονική διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας την χρήση του εξοπλισμού της μονάδας. Με την χρήση του διαγράμματος αυτού μπορεί να ελεγχθεί κατά πόσο η μονάδα χρησιμοποιεί όλη την δυναμικότητα του εξοπλισμού της καθώς και αν η μονάδα έχει περισσότερη δυναμικότητα σε εξοπλισμό από ότι απαιτείται ή το αντίθετο. Εάν δηλαδή η δυναμικότητα της μονάδας δεν είναι αρκετή.



Σχήμα 7: Διάγραμμα Χρήσης Εξοπλισμού

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)

## 5. Σκοπός της Εργασίας

Στην εργασία αυτή διερευνάται η δυνατότητα βέλτιστου προγραμματισμού της χρήσης των διαθέσιμων δεξαμενών σε μονάδα εμφιάλωσης πολλαπλών προϊόντων και η οποία χρησιμοποιεί περιορισμένο αριθμό δεξαμενών τόσο για την προετοιμασία των μιγμάτων όσο και για την τροφοδότηση των εμφιαλωτικών μηχανών. Το πρόβλημα αυτό στην γενική μορφή του απαντάται σε πολλές περιπτώσεις στην βιομηχανία τροφίμων.

Σκοπός είναι η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ως ένα MILP πρόβλημα βελτιστοποίησης και η αξιολόγηση των βέλτιστων λύσεων που προκύπτουν μέσα από διαφορετικές διατυπώσεις της αντικειμενικής συνάρτησης.

Ως μελέτη περίπτωσης μελετήθηκε μονάδα εμφιάλωσης προϊόντων ιδιωτικής ετικέτας αλλά και με brand της εταιρίας με τρόπο λειτουργίας, *made-to-order* για τα προϊόντα ιδιωτικής ετικέτας και *made-to-stock* για τα επώνυμα προϊόντα της μονάδας.

Η δύσκολη οικονομική κατάσταση καθώς και οι περιορισμένες δυνατότητες ρευστότητας μιας ΜΜΕ σήμερα καθιστούν αναγκαία την όσο πιο δυνατό βέλτιστη παραγωγή που να λαμβάνει υπόψη:

1. Τις ομαλές παραδόσεις των παραγγελιών από τους πελάτες ιδιωτικής ετικέτας
2. Το ελάχιστο δυνατό στοκάρισμα τελικού προϊόντος, πρώτων υλών και υλικών συσκευασίας, με δεδομένο ότι η μονάδα εμφιαλώνει πολύ μεγάλο πλήθος κωδικών προϊόντων (>90).

Επιπρόσθετα, η ανάγκη για την δημιουργία ενός προγράμματος παραγωγής προκύπτει, πέρα από τα ανωτέρω, από τον περιορισμένο αριθμό δεξαμενών διατήρησης & τροφοδοσίας των εμφιαλωτικών καθώς και από το γεγονός ότι τα για

διαφορετικούς κωδικούς απαιτείται τροποποίηση των εμφιαλωτικών για την υποδοχή των αντίστοιχων προϊόντων. Επίσης η εναλλαγή σε διαφορετικούς κωδικούς που διαφοροποιούνται πλέον της συσκευασίας και στο περιεχόμενο δημιουργεί επιπρόσθετες ανάγκες καθαρισμού της γραμμής εμφιάλωσης. Για τους λόγους αυτούς αποτελεί και ένα ενδιαφέρον παράδειγμα μελέτης περίπτωσης σχεδιασμού και οργάνωσης παραγωγής.

## 6. Περιγραφή Μονάδας Παραγωγής και Εμφιάλωσης Αρτυμάτων

### 6.1 Γενικά

Ο σχεδιασμός της παραγωγής χωρίζεται σε τρία επίπεδα. Δημιουργείται ένα πλάνο φορτώσεων για τις εξαγωγές, που εκδίδεται σε μηνιαία βάση λαμβάνοντας υπόψη και τα δρομολόγια των ναυτιλιακών εταιριών με τις οποίες συνεργάζεται η εταιρία. Σε αυτό προστίθενται οι παραγγελίες των πελατών ιδιωτικής ετικέτας οι οποίες συνήθως έχουν ορίζοντα μιας ή δύο εβδομάδων αναλόγως των υπογεγραμμένων συμβολαίων που έχει η εταιρία με τον εκάστοτε πελάτη. Τέλος, προστίθενται οι παραγγελίες των επώνυμων κωδικών της εταιρίας. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει ένα μηνιαίο πλάνο για τις ανάγκες της παραγωγής. Οι εντολές παραγωγής προκύπτουν σε ημερήσια βάση προσπαθώντας να τηρηθούν οι συμβατικές υποχρεώσεις της εταιρίας απέναντι στους πελάτες ιδιωτικής ετικέτας και ταυτόχρονα να παραχθούν ικανές ποσότητες κωδικών της εταιρίας ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες των πελατών της.

Τα προβλήματα που προκύπτουν από μια τέτοιου είδους αντιμετώπιση σχετίζονται με την εκτέλεση των παραγγελιών την τελευταία κυριολεκτικά στιγμή με αποτέλεσμα σημαντικός αριθμός παραγγελιών να παραδίδεται με καθυστέρηση. Πρόσθετες καθυστερήσεις μπορεί να προκληθούν από έκτακτες καταστάσεις (π.χ. βλάβες) που μπορεί να προκύψουν. Μη έχοντας περιθώρια χρόνου αντίδρασης, υποχρεωτικά, καθυστερεί η εκτέλεση της εντολής παραγωγής και κατ' επέκταση η έγκαιρη παράδοση. Σημαντικό ρόλο στην αποφυγή έκτακτων καταστάσεων που σχετίζονται με τον μηχανολογικό εξοπλισμό, έχει η προγραμματισμένη προληπτική συντήρηση. Με την πίεση του χρόνου που σχεδόν κατά κανόνα επικρατεί, αυτή είτε εκτελείται πλημμελώς είτε μετατίθεται σε μεταγενέστερο χρόνο με ότι μπορεί να συνεπάγεται αυτό στην ομαλότητα της παραγωγικής διαδικασίας.

### 6.2 Χαρακτηριστικά του συστήματος παραγωγής

Η επιχείρηση παράγει και εμφιαλώνει τρεις διαφορετικούς τύπους προϊόντων (τρία διαφορετικά διαγράμματα ροής) έχοντας έναν συνολικό κατάλογο 98 τελικών προϊόντων (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Ομαδοποίηση Τελικών Προϊόντων

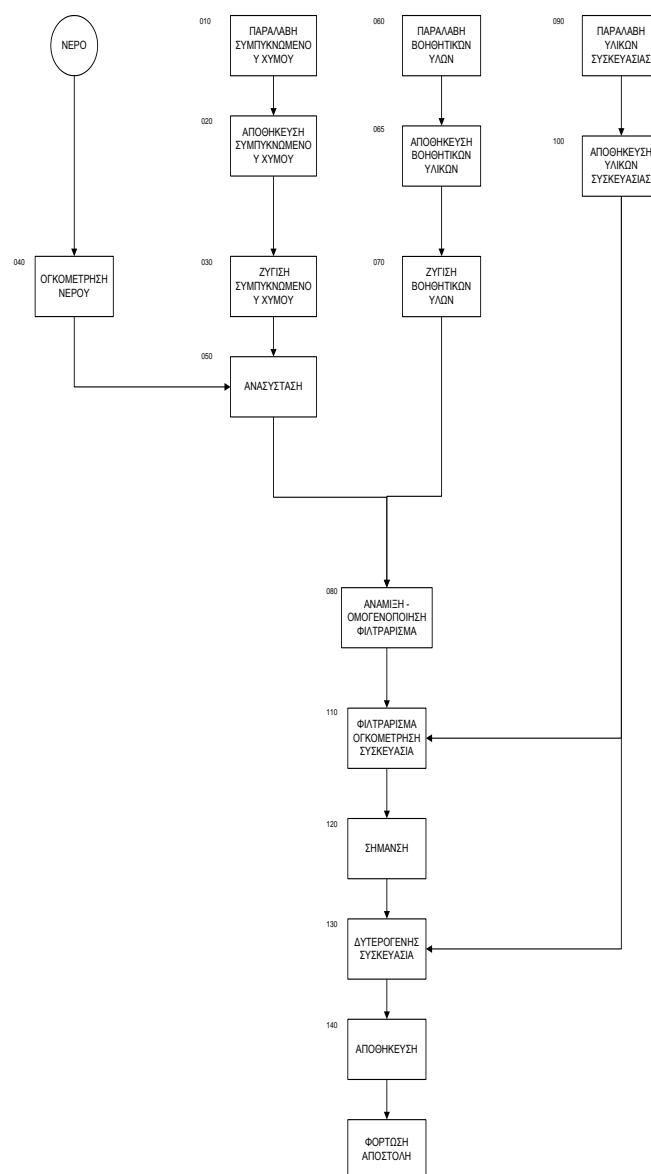
Ομάδα Προϊόντων A	46 SKU's
Ομάδα Προϊόντων B	30 SKU's

Η διαφοροποίηση των τελικών προϊόντων εντός μιας Ομάδας αφορά είτε διαφορετική συνταγή (διαφορετική σύσταση), είτε διαφορετική συσκευασία (πρωτογενή ή/και δευτερογενή), είτε συνδυασμό των δύο προηγούμενων περιπτώσεων.

Η παραγωγική διαδικασία που ακολουθείται για την παραγωγή της ομάδας των προϊόντων (Α) που θα μελετηθεί πιο διεξοδικά παρουσιάζεται στο σχήμα 8 .

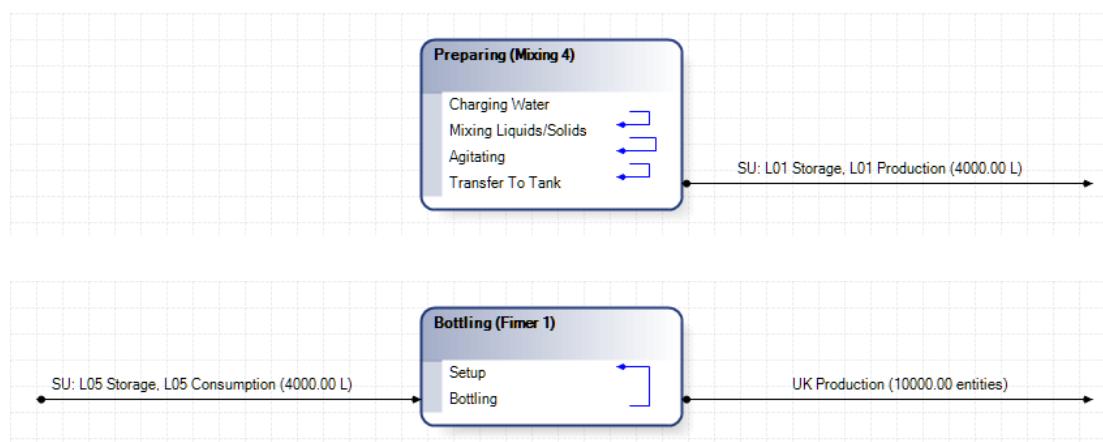
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ LEMON DRESSING , LEMON JUICE

FLC-01



Σχήμα 8: Διάγραμμα Ροής Παραγωγικής Διαδικασίας

Για τις ανάγκες της εργασίας και προσομοιώνοντας το διάγραμμα ροής στις συνθήκες του Schedule Pro® η συγκεκριμένη περιγραφή απλοποιείται σύμφωνα με την Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Απλοποιημένο Διάγραμμα Ροής μέσω του Schedule Pro®

Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγική διαδικασία χωρίζεται σε δύο στάδια, αυτό της παραγωγής του προϊόντος και σε αυτό της εμφιάλωσης του. Ένα τρίτο στάδιο μπορεί να θεωρηθεί η διατήρηση του ενδιάμεσου προϊόντος στις δεξαμενές αποθήκευσης μέχρι την ολοκλήρωση της τροφοδοσίας των εμφιαλωτικών μηχανών. Η προετοιμασία και εκτέλεση της παραγωγής ενός “χαρμανιού” μπορεί να γίνει σε μία από τις τέσσερις δεξαμενές ανάδευσης (αναδευτήρες) που διαθέτει η μονάδα (Πίνακας 3)

Πίνακας 3: Διαθέσιμοι Αναδευτήρες και χωρητικότητες (σε lt)

Εξοπλισμός	Ονομαστική Χωρητικότητα	Πραγματική χωρητικότητα
Αναδευτήρας 1	4000 lt	3600lt
Αναδευτήρας 2	4000 lt	3600lt
Αναδευτήρας 3	2100 lt	2000lt
Αναδευτήρας 1	1100 lt	1000lt

Με την ολοκλήρωση της παραγωγής της απαιτούμενης ποσότητας “χαρμανιών”, αυτά οδηγούνται σε μια από τις δύο δεξαμενές αποθήκευσης χωρητικότητας 6000 lt και 10000lt όπου και πλέον αποκτούν την έννοια της “παρτίδας”. Αυτό συνεπάγεται ότι μια παρτίδα μπορεί να αποτελείται από περισσότερα από ένα χαρμάνια. Ο περιορισμένος αριθμός δεξαμενών αποθήκευσης που διαθέτει η μονάδα, σε

συνδυασμό με την ανάγκη για την παραγωγή και εμφιάλωση πολλών διαφορετικών παρτίδων εντείνει το πρόβλημα του σχεδιασμού του προγράμματος παραγωγής καθώς σημαντικοί περιορισμοί που θα αναλυθούν περαιτέρω στο κεφάλαιο της Περιγραφής του Προβλήματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Από τις δεξαμενές αποθήκευσης τροφοδοτούνται οι 3 γραμμές εμφιάλωσης, που διαθέτει η μονάδα, αποτελούμενες από εμφιαλωτική μηχανή, πωματική, ετικετέζα, ενώ σε μια από τις τρεις η γραμμή ολοκληρώνεται με εγκιβωτιστή. Επιπρόσθετα υπάρχει μια ημιαυτόματη γραμμή εμφιάλωσης για μεγάλες συσκευασίες (άνω του 1lt) που είναι ρυθμισμένη μόνιμα για συσκευασία 4lt.

Οι 3 εμφιαλωτικές γραμμές είναι αυτόματες με δυνατότητα εμφιάλωσης συσκευασιών από 250ml έως 700ml με ρυθμούς παραγωγής όπως παρατίθενται στον πίνακα 4, με κάποιες εξαιρέσεις σε συγκεκριμένους κωδικούς.

**Πίνακας 4: Ωριαία ταχύτητα εμφιαλωτικών μηχανών**

Εμφιαλωτική μηχανή	Ωριαίος Ρυθμός Παραγωγής
Εμφ 1	2600 φιάλες
Εμφ 2	2400 φιάλες
Εμφ 3	1500 φιάλες
Εμφ 4lt	225 φιάλες

Για τις ανάγκες της εργασίας, έγινε ομαδοποίηση των 46 διαφορετικών τελικών προϊόντων (SKU's) της ομάδας A που παράγει η εταιρία σε 17 διαφορετικά τελικά προϊόντα που μπορούν να προέρχονται από 9 διαφορετικές συνταγές (Πίνακας 5).

**Πίνακας 5: Αλληλοσυσχέτιση Αρχικών και Τελικών SKU's μέσω του Schedule Pro®**

Αρχική Συνταγή	Τελικό	Συσκευασία
L01	Prod G	24x380ml
	Prod Crf	24x350 ml
L02	Prod P	24x350 ml
L03	Prod Cz	24x380 ml
	Prod Bul	30x250 ml
L04	Prod F	30x370 ml
	Prod F4	3x4 lt
L05	Prod Pr1	24x400 ml
	Prod Pr2	24x400 ml



	Prod H	24x380 ml
	Prod UK	24x400 ml
	Prod UK4	3x4 lt
<b>L06</b>	Prod Mi	24x350 ml
<b>L07</b>	Prod Cyp	24x350 ml
	Prod Sir	2x12x350 ml
<b>L08</b>	Prod Lim	30x250 ml
<b>L09</b>	Prod J	12x250 ml

Για την ομαδοποίηση όσον αφορά τις αρχικές συνταγές λήφθηκαν υπόψη η διαφοροποίηση αναφορικά με τον χρόνο προετοιμασίας καθώς και η διαφορετική σύσταση ενώ για την ομαδοποίηση των τελικών προϊόντων τα κριτήρια είχαν να κάνουν με την πρωτογενή (χωρητικότητα φιάλης) και δευτερογενή συσκευασία (ποσότητα φιαλών ανά κιβώτιο).

Ταυτόχρονα, λήφθηκαν υπόψη περιορισμοί που αφορούν την σχέση εμφιαλωτικών και τελικών κωδικών, οι οποίοι παρατίθενται στον Πίνακα 6. Όπου εμφανίζεται η τιμή 0,00 αυτό συνεπάγεται ότι ο συγκεκριμένος κωδικός δεν εμφιαλώνεται στην συγκεκριμένη εμφιαλωτική ενώ αναφορικά με την Εμφιαλωτική 1, υπάρχουν 4 κωδικοί για τους οποίους μειώνεται ο ωριαίος ρυθμός παραγωγής.

**Πίνακας 6: Περιορισμοί που διέπουν τελικά προϊόντα και εμφιαλωτικές.**

	<b>Εμφ 1</b>		<b>Εμφ 2</b>		<b>Εμφ 3</b>
Prod Pr2	0.00	Prod G	0.00	Prod G	0.00
Prod UK	0.00	Prod P	0.00	Prod P	0.00
Prod Sir	1200.00	Prod Cz	0.00	Prod Cz	0.00
Prod Bul	2000.00	Prod F	0.00	Prod F	0.00
Prod Lim	2000.00	Prod Pr1	0.00	Prod Pr1	0.00
Prod J	2000.00	Prod H	0.00	Prod Pr2	0.00
Prod F4	0.00	Prod Mi	0.00	Prod Mi	0.00
Prod UK4	0.00	Prod Crf	0.00	Prod Crf	0.00
Prod V4	0.00	Prod Cyp	0.00	Prod Cyp	0.00
		Prod Sir	0.00	Prod Sir	0.00
		Prod Bul	0.00	Prod Bul	0.00
		Prod Lim	0.00	Prod Lim	0.00
		Prod J	0.00	Prod J	0.00
		Prod F4	0.00	Prod F4	0.00
		Prod UK4	0.00	Prod UK4	0.00
		Prod V4	0.00	Prod V4	0.00

Επιπρόσθετα, κατά την διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας και κατά την εναλλαγή των τελικών κωδικών στις εμφιαλωτικές υπάρχουν ανάγκες αναδιάταξης και επαναρύθμισης για κάθε κωδικό οι οποίες αποτυπώνονται στους πίνακες 7, 8 και 9.

Πίνακας 7:Απαιτούμενοι χρόνοι (min) για την προετοιμασία της εμφιαλωτικής 1

Duration (min)	Idle	Prod G	Prod P	Prod Cz	Prod F	Prod Pr1	Prod Pr2	Prod H	Prod UK	Prod Mi	Prod Crf	Prod Cyp	Prod Bul	Prod V	Prod V2
Idle	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	100.00	30.00	30.00	120.00	30.00	30.00
Prod G	30.00	0.00	30.00	15.00	15.00	30.00	30.00	15.00	30.00	100.00	30.00	30.00	120.00	30.00	30.00
Prod P	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	100.00	30.00	30.00	120.00	30.00	30.00
Prod Cz	30.00	15.00	30.00	0.00	15.00	30.00	30.00	30.00	30.00	100.00	30.00	30.00	120.00	30.00	30.00
Prod F	30.00	15.00	30.00	15.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	100.00	30.00	30.00	120.00	30.00	30.00
Prod Pr1	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00	30.00	30.00	100.00	30.00	30.00	120.00	30.00	30.00
Prod Pr2	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00	30.00	30.00	100.00	30.00	30.00	120.00	30.00	30.00
Prod H	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	30.00	100.00	30.00	30.00	120.00	30.00	30.00
Prod UK	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	100.00	30.00	30.00	120.00	15.00	15.00
Prod Mi	30.00	30.00	15.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00	120.00	30.00	30.00
Prod Crf	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	100.00	0.00	15.00	120.00	30.00	30.00
Prod Cyp	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	100.00	15.00	0.00	120.00	30.00	30.00
Prod Bul	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	100.00	90.00	90.00	0.00	90.00	90.00
Prod V	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	100.00	30.00	30.00	120.00	0.00	20.00
Prod V2	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	100.00	30.00	30.00	120.00	20.00	0.00

Πίνακας 8: Απαιτούμενοι χρόνοι (min) για την προετοιμασία της εμφιαλωτικής 2

Duration (min)	Idle	Prod G	Prod P	Prod Cz	Prod F	Prod Pr1	Prod Pr2	Prod H	Prod UK	Prod Mi	Prod Crf	Prod Cyp	Prod Bul	Prod V	Prod V2
Idle	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Prod G	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Prod P	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Prod Cz	30.00	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Prod F	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Prod Pr1	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Prod Pr2	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	49.80	49.80
Prod H	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Prod UK	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	49.80	49.80
Prod Mi	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Prod Crf	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Prod Cyp	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00	30.00
Prod Bul	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	30.00	30.00
Prod V	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	49.80	30.00	49.80	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00
Prod V2	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	49.80	30.00	49.80	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00

Πίνακας 9:Απαιτούμενοι χρόνοι (min) για την προετοιμασία της εμφιαλωτικής 3

Duration (min)	Idle	Prod G	Prod P	Prod Cz	Prod F	Prod Pr1	Prod Pr2	Prod H	Prod UK	Prod Mi	Prod Crf	Prod Cyp	Prod Bul	Prod V	Prod V2
Idle	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod Cz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod Pr1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod Pr2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod UK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	0.00
Prod Mi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod Crf	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod Cyp	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod Bul	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod V	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Prod V2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## 7. Μοντελοποίηση της Παραγωγικής Διαδικασίας

Η υπό μελέτη μονάδα περιλαμβάνει 3 στάδια επεξεργασίας:

- προετοιμασία/ανάμιξη συστατικών για παραγωγή "χαρμανιού" σε δεξαμενή ανάμιξης ("αναδευτήρα ")
- μεταφορά πολλαπλών χαρμανιών σε δεξαμενή αποθήκευσης
- συσκευασία με τροφοδοσία από δεξαμενή αποθήκευσης

Για κάθε προϊόν προς συσκευασία παράγονται πολλαπλά χαρμάνια σε διαφορετικούς αναδευτήρες τα οποία συσσωρεύονται σε μία δεξαμενή ανάδευσης από την οποία τροφοδοτείται η συσκευαστική. Θα θεωρηθεί ότι η δεξαμενή αποθήκευσης δεν είναι δυνατόν (και για λόγους ποιότητας) να τροφοδοτείται με χαρμάνια και ταυτόχρονα να τροφοδοτεί τη συσκευαστική.

Θα θεωρηθεί ως δεδομένο ότι η συσκευασία είναι το πιο αργό κι επομένως περιοριστικό στάδιο της συνολικής διεργασίας κι επομένως το ερώτημα είναι πως μπορούν να προγραμματιστούν κατά τον καλύτερο τρόπο οι διεργασίες ανάμιξης και αποθήκευσης ώστε να εξασφαλίζεται απρόσκοπτα η συνεχής λειτουργία των συσκευαστικών μηχανών. Οι αποφάσεις που σχετίζονται με τον βέλτιστο αυτό προγραμματισμό αφορούν το μέγεθος των παρτίδων ανάμιξης και αποθήκευσης και η χρονοθέτησή τους για δεδομένες ποσότητες προϊόντων που πρέπει να παραχθούν στις συσκευαστικές.

Για την μαθηματική περιγραφή του προβλήματος θα θεωρηθούν επομένως ως δεδομένα:

- ο αριθμός και ποσότητες των προϊόντων που πρέπει να παραχθούν
- η συσκευαστική μηχανή που θα χρησιμοποιηθεί για κάθε προϊόν και η δυναμικότητα της συσκευής για το προϊόν αυτό
- οι απαιτούμενοι χρόνοι κάθε σταδίου ως συνάρτηση του μεγέθους της παρτίδας
- ο αριθμός και χωρητικότητα των αναδευτήρων
- ο αριθμός και χωρητικότητα των δεξαμενών (αποθήκευσης).

Ο χρόνος εκτέλεσης  $t$  κάθε χαρμανιού θα θεωρηθεί ότι δίνεται από την εξίσωση:

$$t = \frac{X}{q} + q_c + \frac{X}{r}$$

όπου  $X$  είναι το μέγεθος του χαρμανιού,  $q$  είναι ο ρυθμός ανάμιξης που αντιπροσωπεύει όλες τις διεργασίες που γίνονται για την εκτέλεση του χαρμανιού των οποίων ο χρόνος εξαρτάται από το μέγεθος της παρτίδας (π.χ. φόρτωση των υλικών),  $q_c$  είναι μία σταθερά η οποία αντιπροσωπεύει όλες τις διεργασίες που έχουν σταθερό χρόνο εκτέλεσης (π.χ. ανάδευση του περιεχομένου) και  $r$  είναι ο ρυθμός μεταφοράς (παροχή) του χαρμανιού από τον αναδευτήρα στην δεξαμενή. Το μέγεθος παρτίδας και οι μεταβλητές ρυθμών εκφράζονται κατ' όγκο.

Αντίστοιχα, ο χρόνος εκτέλεσης της κάθε παρτίδας αποθήκευσης εκφράζεται από την εξίσωση:

$$t = \frac{T}{r} + t_c + \frac{T}{f}$$

όπου  $T$  είναι το μέγεθος της παρτίδας αποθήκευσης,  $t_c$  είναι μία σταθερά η οποία αντιπροσωπεύει όλες τις διεργασίες που έχουν σταθερό χρόνο εκτέλεσης (π.χ. ανάδευση του περιεχομένου) και  $f$  είναι η δυναμικότητα της συσκευαστικής (άρα και ο ρυθμός με τον οποίο υλικό αντλείται από την δεξαμενή).

Θα επιδιωχθεί να βρεθεί η βέλτιστη λύση που εξασφαλίζει συνεχή λειτουργία της κάθε συσκευαστικής για την προβλεφθείσα ποσότητα προϊόντων χρησιμοποιώντας ως μεταβλητές σχεδιασμού:

- τον αριθμό των παρτίδων αποθήκευσης και το μέγεθος της κάθε παρτίδας
- την εκχώρηση της κατάλληλης δεξαμενής για κάθε παρτίδα αποθήκευσης
- τον χρόνο έναρξης εκτέλεσης της κάθε παρτίδας (πότε ξεκινάει η συλλογή των χαρμανιών)
- τον αριθμό των χαρμανιών και το μέγεθός τους για κάθε παρτίδα αποθήκευσης
- την εκχώρηση του κατάλληλου αναδευτήρα για κάθε χαρμάνι
- τον χρόνο έναρξης εκτέλεσης του κάθε χαρμανιού.

Οι ακόλουθοι περιορισμοί θα πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- το μέγεθος του κάθε χαρμανιού δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από την χωρητικότητα του αναδευτήρα στον οποίο θα εκτελεστεί
- σε κάθε αναδευτήρα εκτελείται μόνο ένα χαρμάνι κάθε στιγμή
- το άθροισμα των μεγεθών των χαρμανιών είναι ίσο με το μέγεθος της αντίστοιχης παρτίδας αποθήκευσης
- το μέγεθος της κάθε παρτίδας αποθήκευσης δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από την χωρητικότητα δεξαμενής στην οποία θα εκτελεστεί
- η δεξαμενή αποθήκευσης πρώτα συλλέγει τα χαρμάνια που αντιστοιχούν στην παρτίδα αποθήκευσης και μετά τροφοδοτεί την συσκευαστική
- σε κάθε δεξαμενή αποθήκευσης εκτελείται μόνο μία παρτίδα κάθε στιγμή
- το άθροισμα των μεγεθών των παρτίδων αποθήκευσης κάθε προϊόντος είναι ίσο με την απαιτούμενη ποσότητα παραγωγής του προϊόντος αυτού.

## 7.1 Μαθηματική Περιγραφή

### *Περιορισμοί στην συσκευασία*

Θα θεωρηθεί ένα πλήθος  $p$  προϊόντων προς παραγωγή  $V = \{P_k | 1 \leq k \leq p\}$  όπου  $P_k$  είναι η ποσότητα προς παραγωγή του προϊόντος  $k$ . Η συσκευασία του κάθε προϊόντος γίνεται σε δεδομένη συσκευαστική με γνωστή δυναμικότητα  $\{f_k | 1 \leq k \leq p\}$ . Εάν κάποια προϊόντα απαιτούν την ίδια συσκευαστική θα πρέπει να ενεργοποιηθούν περιορισμοί μη-επικάλυσης ώστε να μην συμπέσει χρονικά η εκτέλεση δύο διαφορετικών προϊόντων στην ίδια συσκευαστική. Για την αποφυγή επικάλυψης θα πρέπει η έναρξη εκτέλεσης της συσκευασίας για κάποια προϊόντα να καθυστερήσει. Έστω  $\{d_k | 1 \leq k \leq p\}$  η καθυστέρηση έναρξης της συσκευασίας του κάθε προϊόντος σε σχέση με την χρονική στιγμή μηδέν η οποία θεωρείται (αυθαίρετα) ο χρόνος έναρξης εκτέλεσης του πρώτου προϊόντος ( $d_0 = 0$ ). Η ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων  $d_k$  είναι ένας πιθανός παράγοντας βελτιστοποίησης με σκοπό την όσο το δυνατόν γρηγορότερη ολοκλήρωση του προγράμματος παραγωγής. Με βάση τον ορισμό αυτό ο χρόνος έναρξης συσκευασίας  $s_k$  κάθε προϊόντος  $k$  είναι:

$$s_1 = 0$$

$$s_k = d_k \quad \forall k > 1$$



Αντίστοιχα ο χρόνος λήξης εκτέλεσης  $e_k$  της κάθε συσκευασίας είναι:

$$e_k = s_k + \frac{P_k}{f_k}$$

Για να μην υπάρχει χρονική επικάλυψη μεταξύ δύο οποιαδήποτε προϊόντων  $k_1, k_2$  που εκτελούνται στην ίδια συσκευαστική θα πρέπει να ισχύει:

$$e_{k_1} \leq s_{k_2} \quad \forall k_1 < k_2$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σειρά εμφάνισης των προϊόντων στο σύνολο  $V$  αντιπροσωπεύει και την σειρά εκτέλεσής τους, επομένως αν η συσκευασία του προϊόντος  $k_1$  προηγείται χρονικά τότε δεν υπάρχει επικάλυψη αν η λήξη της είναι πριν την έναρξη της επόμενης.

### **Περιορισμοί στην αποθήκευση**

Δεδομένου ότι ο αριθμός και το μέγεθος των παρτίδων αποθήκευσης είναι μεταβλητές σχεδιασμού, θα θεωρηθεί ένας μέγιστος αριθμός παρτίδων  $n = \{T_i | 1 \leq i \leq n\}$  που αντιστοιχεί σε κάθε προϊόν. Για κάθε προϊόν το άθροισμα των μεγεθών των παρτίδων αποθήκευσης πρέπει να είναι ίσο με την προς παραγωγή ποσότητα του προϊόντος, άρα πρέπει να ισχύει ο περιορισμός:

$$\sum_{i=1}^n T_{i,k} = P_k \quad \forall k$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των παρτίδων που θα εκτελεστούν στην πραγματικότητα θα αποφασιστεί από την επίλυση κι επομένως κάποιες τιμές των  $T_i$  μπορεί να είναι μηδενικές.

Για την εκτέλεση των παρτίδων αποθήκευσης είναι διαθέσιμες  $m$  δεξαμενές  $\{C_j | 1 \leq j \leq m\}$  χωρητικότητας  $C_j$  η καθεμία. Δεδομένου ότι δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων ποια δεξαμενή θα χρησιμοποιηθεί για κάθε παρτίδα, θα πρέπει να εισαχθούν δυαδικές (binary) σχεδιαστικές μεταβλητές  $\{b_{i,j} | 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m\}$  για κάθε ζευγάρι παρτίδας-δεξαμενής. Αν η μεταβλητή για κάποια παρτίδα πάρει την τιμή 1 αυτό υποδηλώνει την εκτέλεση της παρτίδας αυτής στην αντίστοιχη δεξαμενή. Δεδομένου ότι η κάθε παρτίδα μπορεί να εκτελεστεί το πολύ σε μία δεξαμενή (μπορεί και σε καμία αν η παρτίδα αυτή δεν εκτελεστεί καθόλου) ισχύει ο περιορισμός:

$$\sum_{j=1}^m b_{i,j} \leq 1 \quad \forall i$$

Κάθε παρτίδα που θα εκτελεστεί ( $b_{i,j}=1$ ) θα πρέπει να έχει μη μηδενικό μέγεθος και αντίστροφα. Αυτό εξασφαλίζεται από τον ακόλουθο περιορισμό:

$$T_i - H \sum_{j=1}^m b_{i,j} \leq 0 \quad \forall i$$

Η μορφή του παραπάνω περιορισμού αντιστοιχεί στο λεγόμενο *big-M constraint* όπου χρησιμοποιείται μία σταθερά  $H$  με μεγάλη τιμή η οποία εξασφαλίζει την ενεργοποίηση του περιορισμού όπου απαιτείται. Για παράδειγμα αν μία παρτίδα δεν θα πραγματοποιηθεί ( $b_{i,j}=0 \forall j$ ) ο παραπάνω περιορισμός επιβάλλει  $T_i=0$ . Αντίθετα αν πραγματοποιηθεί (κάποιο  $b_{i,j}=1$ ) τότε ο περιορισμός μετατρέπεται σε  $T_i-H \leq 0$  κάτι το οποίο ικανοποιείται δεδομένου ότι το  $H$  είναι ένας μεγάλος αριθμός.

Το μέγεθος της κάθε παρτίδας αποθήκευσης θα πρέπει να είναι μικρότερο από την δεξαμενή που θα την φιλοξενήσει. Αυτό εξασφαλίζεται από τον περιορισμό:

$$T_i \leq C_j + H(1 - b_{i,j}) \quad \forall i \forall j$$

Για να μην υπάρχει χρονική επικάλυψη μεταξύ δύο οποιαδήποτε παρτίδων  $i_1, i_2$  που εκτελούνται στην ίδια δεξαμενή θα πρέπει να ισχύει:

$$e_{i_1} \leq s_{i_2} \quad \text{ή} \quad e_{i_2} \leq s_{i_1}$$

όπου  $s$  και  $e$  είναι αντίστοιχα η χρονική στιγμή έναρξης και λήξης της κάθε παρτίδας. Αν η παρτίδα  $i_1$  προηγείται χρονικά τότε δεν υπάρχει επικάλυψη αν η λήξη της είναι πριν την έναρξη της επόμενης (πρώτος περιορισμός). Διαφορετικά θα πρέπει να ισχύσει ο δεύτερος περιορισμός. Παρτίδες που ανήκουν στο ίδιο προϊόν έχουν μία εξορισμού ιεράρχηση με βάση τον δείκτη  $i$ , δηλαδή είναι γνωστό εκ των προτέρων ότι η παρτίδα 1 θα εκτελεστεί πριν την παρτίδα 2 κλπ. οπότε θα χρησιμοποιηθεί ο πρώτος περιορισμός. Τέτοια γνώση όμως δεν υπάρχει μεταξύ παρτίδων διαφορετικών προϊόντων οπότε θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για την ενεργοποίηση είτε του πρώτου είτε του δεύτερου περιορισμού ανάλογα με το ποια παρτίδα ξεκινάει νωρίτερα.

Έστω  $d_{i_1 i_2}$  μία δυαδική μεταβλητή ανάμεσα σε κάθε παρτίδα  $i_1$  και  $i_2$  η οποία παίρνει την τιμή 1 όταν η παρτίδα  $i_1$  προηγείται της  $i_2$ . Λόγω συμμετρίας, θα πρέπει επομένως να ισχύει:

$$d_{i_1 i_2} + d_{i_2 i_1} = 1 \quad \forall i_1 \neq i_2$$

Η σχέση ανάμεσα στην τιμή της δυαδικής μεταβλητής και των χρόνων έναρξης διασφαλίζεται από τον περιορισμό:

$$s_{i_1} - s_{i_2} \leq H(1 - d_{i_1 i_2}) \quad \forall i_1 \neq i_2$$

Όταν  $d_{i_1 i_2} = 1$  τότε με βάση τον παραπάνω περιορισμό προκύπτει ότι  $s_{i_1} \leq s_{i_2}$  σε συμφωνία με τον ορισμό του  $d_{i_1 i_2}$ .

Με την εισαγωγή της  $d_{i_1 i_2}$  οι περιορισμοί μη-επικάλυψης των παρτίδων μπορούν να ξαναγραφούν ως:

$$e_{i_1} - s_{i_2} \leq H(1 - d_{i_1 i_2}) + H(2 - b_{i_1 j} - b_{i_2 j}) \quad \forall j, i_1 \neq i_2$$

$$e_{i_2} - s_{i_1} \leq H(1 - d_{i_2 i_1}) + H(2 - b_{i_1 j} - b_{i_2 j})$$

Εάν  $d_{i_1 i_2} = 1$  τότε ενεργοποιείται ο πρώτος περιορισμός ενώ ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση ο δεύτερος (δεδομένου ότι  $d_{i_2 i_1} = 0$ ). Το αντίστροφο ισχύει αν  $d_{i_2 i_1} = 1$ . Στους περιορισμούς έχουν εισαχθεί και όροι που εμπεριέχουν την δυαδική μεταβλητή  $b_{i,j}$  ώστε να ενεργοποιούνται μόνο εφόσον οι δύο παρτίδες εκτελούνται στην ίδια δεξαμενή (και άρα  $b_{i,j}=1$  και για τις δύο παρτίδες).

Ο χρόνος έναρξης της κάθε παρτίδας  $i$  για το προϊόν  $k$  καθορίζεται από τον χρόνο έναρξης της συσκευασίας του αντίστοιχου προϊόντος και την θέση της παρτίδας στην λίστα υποψήφιων παρτίδων για το προϊόν αυτό:

$$s_{i,k} = d_k + \frac{\sum_{l=1}^{i-1} T_l}{f_k} - \frac{T_i}{r} - t_c$$

$$e_{i,k} = s_{i,k} + \frac{T_i}{r} + t_c + \frac{T_i}{f_k}$$

Με άλλα λόγια, η έναρξη της τροφοδότησης της συσκευαστικής από την παρτίδα  $i$  συμπίπτει με την ολοκλήρωση τροφοδότησης της από τις προηγούμενες παρτίδες, επομένως η έναρξη της παρτίδας θα πρέπει να έχει προηγηθεί κατά τον χρόνο που απαιτείται για να φορτωθούν τα χαρμάνια στην δεξαμενή και να συντελεστεί και ο σταθερός χρόνος επεξεργασίας  $t_c$ .

### **Περιορισμοί στην ανάμιξη**

Για κάθε προϊόν θα πρέπει να έχει προηγηθεί η παραγωγή των αντίστοιχων χαρμανιών  $\{X_o | 1 \leq o \leq n_b\}$  όπου  $n_b$  είναι ο μέγιστος αριθμός πιθανών χαρμανιών. Δεδομένου ότι δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων η παρτίδα στην οποία θα ενσωματωθεί το κάθε χαρμάνι θα πρέπει να οριστεί μία δυαδική μεταβλητή  $b_{o,i}$  η οποία αντιστοιχίζει το χαρμάνι  $o$  με την παρτίδα  $i$ , και το αντίστοιχο μέγεθος του χαρμανιού  $X_{o,i}$ .

Για κάθε προϊόν το άθροισμα των μεγεθών των χαρμανιών πρέπει να είναι ίσο με το μέγεθος της αντίστοιχης παρτίδας αποθήκευσης, άρα πρέπει να ισχύει ο περιορισμός:

$$\sum_{o=1}^{n_b} X_{o,i} = T_i \quad \forall i$$

Όπως αναφέρθηκε και για τις παρτίδες αποθήκευσης, ο αριθμός των χαρμανιών που θα εκτελεστούν στην πραγματικότητα θα αποφασιστεί από την επίλυση κι επομένως κάποιες τιμές των  $X_{o,i}$  μπορεί να είναι μηδενικές. Κάθε χαρμάνι μπορεί να ανήκει μόνο σε μία παρτίδα επομένως:

$$\sum_{i=1}^n b_{o,i} \leq 1 \quad \forall o$$

Κάθε χαρμάνι που εκτελείται θα πρέπει να έχει μη μηδενικό μέγεθος παρτίδας, οπότε:

$$X_{o,i} \leq H b_{o,i} \quad \forall o, i$$

Για την εκτέλεση των χαρμανιών είναι διαθέσιμοι  $m_b$  αναδευτήρες  $\{C_j | 1 \leq j \leq m_b\}$  χωρητικότητας  $C_j$  ο καθένας. Μία νέα δυαδική μεταβλητή  $b_{o,i,j}$  ορίζει αν το χαρμάνι  $o$

της παρτίδας  $i$  εκτελείται στον αναδευτήρα  $j$ . Κάθε χαρμάνι εκτελείται το πολύ σε έναν αναδευτήρα (ή σε κανέναν αν αν δεν εκτελεστεί):

$$\sum_{j=1}^{m_b} b_{o,i,j} \leq 1 \quad \forall o \forall i$$

Επιπλέον, θα πρέπει να έχει μη μηδενικό μέγεθος παρτίδας αν εκτελείται σε κάποιον αναδευτήρα:

$$X_{o,i} - H \sum_{j=1}^{m_b} b_{o,i,j} \leq 0 \quad \forall o \forall i$$

Το μέγεθος του κάθε χαρμανιού θα πρέπει να είναι μικρότερο από τον αναδευτήρα που θα το φιλοξενήσει. Αυτό εξασφαλίζεται από τον περιορισμό:

$$X_{o,i} \leq C_j + H(1 - b_{o,i,j}) \quad \forall o \forall i \forall j$$

Τέλος, η εκτέλεση των χαρμανιών δεν θα πρέπει να προκαλεί χρονικές επικαλύψεις στην χρήση του ίδιου αναδευτήρα επομένως θα πρέπει να εισαχθούν αντίστοιχοι περιορισμοί με αυτούς που ορίστηκαν για τις δεξαμενές. Οι χρόνοι έναρξης και λήξης κάθε χαρμανιού καθορίζονται από τον χρόνο έναρξης της παρτίδας αποθήκευσης στην οποία ανήκουν και την σχετική θέση του χαρμανιού στην ακολουθία των υποψήφιων χαρμανιών:

$$s_{o,i,k} = s_{i,k} + \frac{\sum_{l=1}^{l=o-1} T_l}{r} - \frac{X_{o,i}}{q} - q_c$$

$$e_{o,i,k} = s_{o,i,k} + \frac{X_{o,i}}{q} + q_c + \frac{X_{o,i}}{r}$$

Ορίζοντας μία νέα δυαδική μεταβλητή  $d_{oik_1oik_2}$  οι περιορισμοί μη-επικάλυψης των χαρμανιών μπορούν να γραφούν ως:

$$e_{o,i,k_1} - s_{o,i,k_2} \leq H(1 - d_{oik_1oik_2}) + H(4 - b_{o,i_1} - b_{o,i_2} - b_{o,i,j_1} - b_{o,i,j_2})$$

$$e_{o,i,k_2} - s_{o,i,k_1} \leq H(1 - d_{oik_2oik_1}) + H(4 - b_{o,i_1} - b_{o,i_2} - b_{o,i,j_1} - b_{o,i,j_2})$$

Στους περιορισμούς έχουν εισαχθεί και όροι που εμπεριέχουν τις δυαδικές μεταβλητές που εκφράζουν το αν το χαρμάνι εκτελείται και αν εκτελείται στον

αναδευτήρα που αντιστοιχεί στον περιορισμό ώστε ο περιορισμός να ενεργοποιείται μόνο όπου είναι απαραίτητο.

Ως πρόσθετοι περιορισμοί είναι δυνατόν να εισαχθούν και κατώτερα όρια στο μέγεθος των παρτίδων.

Το σύνολο των παραπάνω περιορισμών αποτελεί ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων και ανισοτήτων με πραγματικές μεταβλητές (τα μεγέθη των παρτίδων) και ακέραιες μεταβλητές (δυαδικές μεταβλητές για την εκτέλεση ή όχι μίας παρτίδας και την χρήση ή όχι μίας συγκεκριμένης συσκευής). Ανήκει επομένως στην κατηγορία των προβλημάτων μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP).

### ***Αντικειμενική συνάρτηση***

Οι παραπάνω περιορισμοί καθορίζουν το πεδίο των εφικτών λύσεων για τον προγραμματισμό των χαρμανιών και των παρτίδων αποθήκευσης. Βέλτιστες λύσεις μέσα από το πεδίο των εφικτών λύσεων μπορούν να προκύψουν με την χρήση κατάλληλων αντικειμενικών συναρτήσεων. Κριτήρια τα οποία είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την βελτιστοποίηση είναι:

- η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των χρόνων έναρξης συσκευασίας κάθε προϊόντος ώστε να μειωθεί ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης της παραγωγής
- η ελαχιστοποίηση του αριθμού των χαρμανιών και παρτίδων αποθήκευσης που εκτελούνται
- η ελαχιστοποίηση της χρησιμοποιούμενης χωρητικότητας των δεξαμενών
- συνδυασμός των παραπάνω.

## 8. Αποτελέσματα

### 8.1 Μελέτη Περίπτωσης 1

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της παραγωγής εφαρμόστηκε στην μονάδα που περιγράφηκε παραπάνω με σκοπό την εξαγωγή των βέλτιστων λύσεων σε σχέση με τους χρόνους εκτέλεσης των χαρμανιών και της συσκευασίας.

Οι σταθερές παράμετροι του προβλήματος που σχετίζονται με τους χρόνους και τους ρυθμούς εκτέλεσης των σταδίων παραγωγής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 10.

Πίνακας 10: Παράμετροι του προβλήματος

Αριθμός δεξαμενών	2
Χωρητικότητα δεξαμενών	[10 6] m <sup>3</sup>
Αριθμός αναδευτήρων	4
Χωρητικότητα αναδευτήρων	[3,6 3,6 2 1] m <sup>3</sup>
Αριθμός εμφιαλωτικών	2
Δυναμικότητα εμφιαλωτικών	[0,96 0,96] m <sup>3</sup> /h
Ρυθμός φόρτωσης δεξαμενών ( <i>r</i> )	10 m <sup>3</sup> /h
Σταθερός χρόνος αποθήκευσης ( <i>t<sub>c</sub></i> )	0 h
Ρυθμός παραγωγής χαρμανιού ( <i>q</i> )	14,4 m <sup>3</sup> /h
Σταθερός χρόνος παραγωγής χαρμανιού ( <i>q<sub>c</sub></i> )	0,25 h

Θεωρήθηκε μία ημέρα παραγωγής με πραγματικά στοιχεία από την μονάδα. Κατά την ημέρα αυτή παράχθηκαν 5 τελικά προϊόντα στις ποσότητες που φαίνονται στο παρακάτω πίνακα 11

Πίνακας 11: Ημερήσια παραγωγή πρώτης ημέρας

Προϊόν	Ποσότητα	Ενδιάμεσο	Ποσότητα Ενδιάμεσου
Prod UK-1	19560 φιάλες	L05	7824 λίτρα
Prod UK-2	13104 φιάλες	L05	5241 λίτρα
Prod G	4656 φιάλες	L01	1770 λίτρα
Prod CRF	10200 φιάλες	L01	3570 λίτρα
Prod F	20040 φιάλες	L04	7200 λίτρα

Για λόγους απλοποίησης κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου έγινε ομαδοποίηση της πραγματικής παραγωγής με συγχωνεύσεις των τελικών προϊόντων, από πέντε σε τρία, χωρίς ουσιαστική μεταβολή ή διαστρέβλωση των δεδομένων καθώς το κριτήριο της συγχώνευσης βασίστηκε στην χρησιμοποίηση των ίδιων ενδιάμεσων προϊόντων. Στον πίνακα 12 φαίνονται και το είδος και η ποσότητα του ενδιάμεσου προϊόντος από το οποίο προέκυψαν τα τελικά προϊόντα όπως αυτά χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της παραγωγής

**Πίνακας 12: Απλοποιημένη ημερήσια παραγωγή πρώτης ημέρας για τις ανάγκες της εφαρμογής του αλγορίθμου**

Προϊόν	Ποσότητα	Ενδιάμεσο	Ποσότητα Ενδιάμεσου
<b>Prod UK</b> (Prod UK-1 + Prod UK-2)	32664 φιάλες	L05	13065 λίτρα
<b>Prod CRF</b> (Prod CRF + Prod G)	14856 φιάλες	L01	5400 λίτρα
<b>Prod F</b>	20040 φιάλες	L04	7200 λίτρα

Το προϊόν ProdUK εμφιαλώνεται στην πρώτη εμφιαλωτική ενώ τα υπόλοιπα στην δεύτερη.

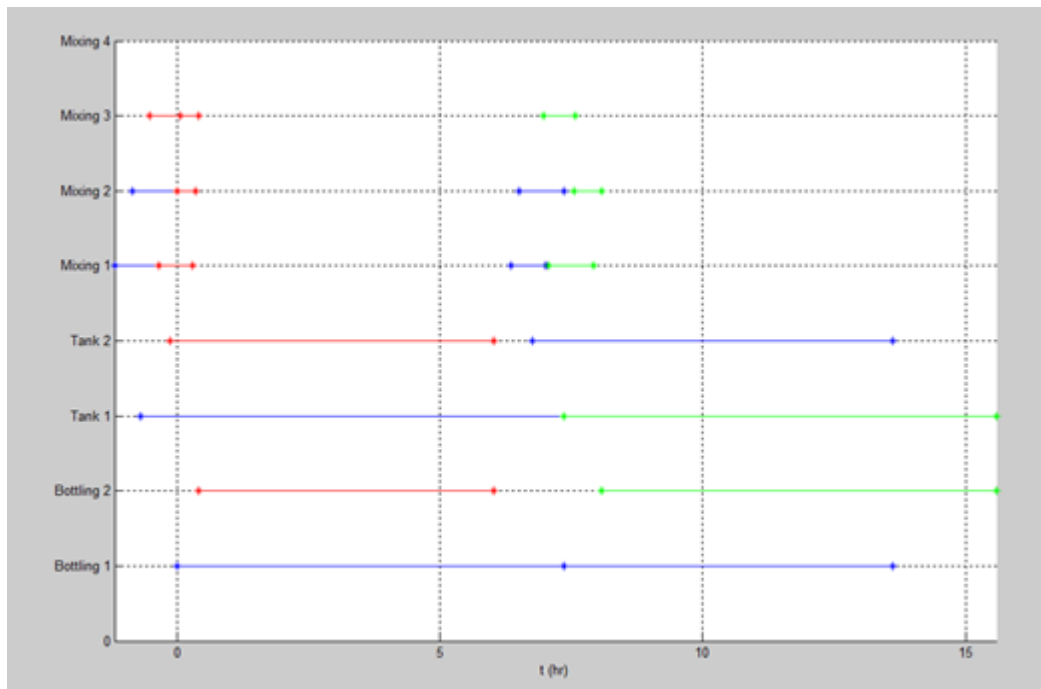
### *Ελαχιστοποίηση χρόνου αναμονής εμφιάλωσης*

Το Σχήμα 10 φαίνεται η βέλτιστη λύση η οποία προέκυψε όταν ως αντικειμενική συνάρτηση τέθηκε η ελαχιστοποίηση των χρόνων καθυστέρησης  $d_k$  στην έναρξη της εμφιάλωσης του κάθε προϊόντος:

$$\min \sum_k d_k$$

Οι καθυστερήσεις υπολογίζονται σε σχέση με τον χρόνο 'μηδέν' που είναι ο χρόνος έναρξης εμφιάλωσης του πρώτου (προς εκτέλεση) προϊόντος. Με άλλα λόγια, επιχειρήθηκε η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραγωγής των τριών προϊόντων.





Σχήμα 10: Διάγραμμα τύπου Gantt θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραγωγής

Το σχήμα έχει την μορφή διαγράμματος Gantt όπου στον κατακόρυφο άξονα εμφανίζονται οι πόροι (συσκευές) της μονάδας, ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στον χρόνο και οι οριζόντιες μπάρες αντιστοιχούν στην χρήση του κάθε πόρου στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα. Με μπλε χρώμα αντιπροσωπεύεται το προϊόν Prod UK, με κόκκινο το Prod CRF και με πράσινο το Prod F. Τα χαρμάνια που πρέπει να παραχθούν με βάση την λύση αυτή, οι αντίστοιχες ποσότητες και ο χρησιμοποιούμενος αναδευτήρας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 13.

Πίνακας 13: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραγωγής

Χαρμάνι	Ποσότητα Χαρμανιού (m <sup>3</sup> )	Αναδευτήρας
L05	3,465	Mixing 1
L05	3,6	Mixing 2
L05	2,4	Mixing 1
L05	3,6	Mixing 2
L01	2	Mixing 3
L01	2,3409	Mixing 1
L01	0,5279	Mixing 2
L01	0,5311	Mixing 3
L04	2	Mixing 3

L04	3,6	Mixing 1
L04	1,6	Mixing 2

Η παραγωγή ολοκληρώνεται σε 16,8 ώρες και οι χρόνοι αναμονής είναι 0,4 ώρες για το δεύτερο προϊόν και 8,1 για το τρίτο. Όπως όμως φαίνεται από τα αποτελέσματα στον πίνακα, η προσπάθεια για την όσο το δυνατόν νωρίτερη έναρξη εμφιάλωσης του δεύτερου προϊόντος (κόκκινες μπάρες) οδηγεί την βέλτιστη λύση στον κατακερματισμό της παραγωγής σε μικρά χαρμάνια ώστε να γίνεται παράλληλα η χρήση των διαθέσιμων αναδευτήρων όταν απελευθερώνονται από το προηγούμενο (μπλε) προϊόν. Για την συνολική παραγωγή, η βέλτιστη λύση ορίζει 11 χαρμάνια στους αναδευτήρες και 4 παρτίδες στις δεξαμενές. Στο σχήμα με την μορφή διαγράμματος Gantt παρατηρείται ότι η παραγωγή ολοκληρώνεται με την ολοκλήρωση του τρίτου προϊόντος (πράσινες μπάρες). Ταυτόχρονα όμως, η εμφιαλωτική που θα χρησιμοποιηθεί για την εμφιάλωση του βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής. Αυτό συνεπάγεται ότι η κατανομή των δεξαμενών δεν έγινε με τον πλέον αποδοτικό τρόπο ώστε να μην δημιουργούνται χρονικά κενά και επομένως μεγαλύτερος χρόνος για την ολοκλήρωση της παραγωγής.

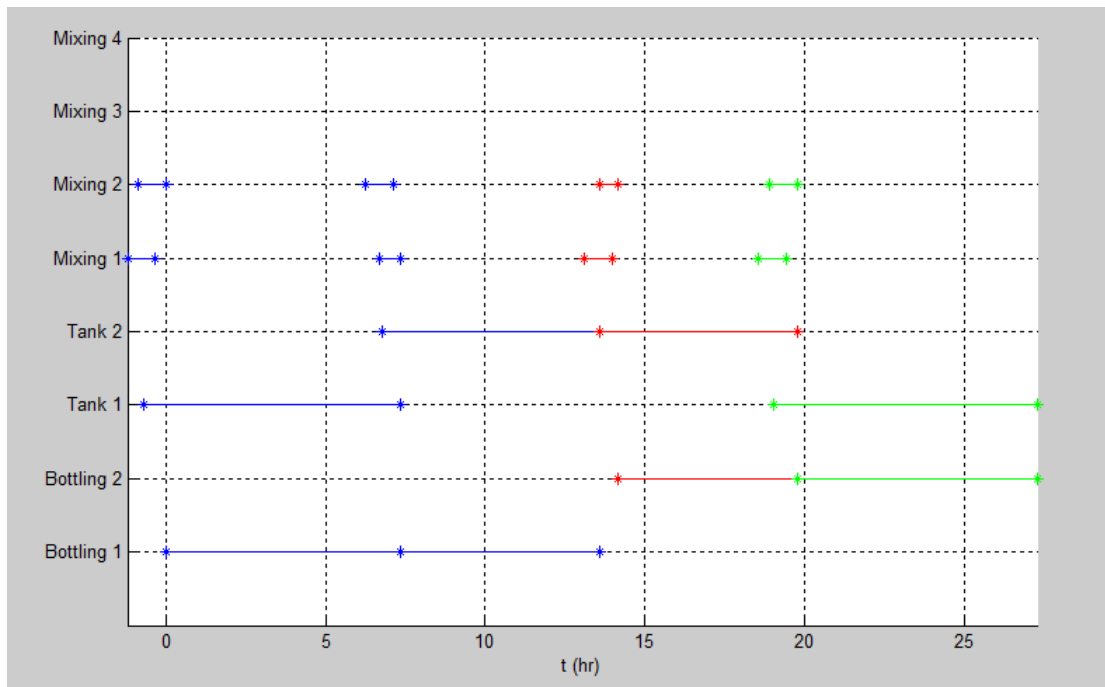
### *Ελαχιστοποίηση χρήσης χωρητικότητας*

Ως κριτήριο βελτιστοποίησης εδώ τίθεται η ελαχιστοποίηση της χρήσης της χωρητικότητας των αναδευτήρων και δεξαμενών. Κάθε χρήση εξοπλισμού "χρεώνεται" βάσει της χωρητικότητάς του ανεξάρτητα από το επίπεδο πραγματικής χρήσης της χωρητικότητας αυτής (με άλλα λόγια, ανεξάρτητα από το μέγεθος της παρτίδας που εκτελείται):

$$\min \sum_i \sum_j b_{i,j} C_j + \sum_o \sum_i \sum_j b_{o,i,j} C_j$$

Ο πρώτος όρος στην παραπάνω συνάρτηση αφορά τις δεξαμενές αποθήκευσης και ο δεύτερος τους αναδευτήρες.

Το Σχήμα 11 παρουσιάζει την βέλτιστη λύση για την παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση.



Σχήμα 11: Διάγραμμα τύπου Gantt θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση χρήσης χωρητικότητας αναδευτήρων και δεξαμενών

Ο Πίνακας 14 παρουσιάζει τα αντίστοιχα χαρμάνια. Ο αριθμός των χαρμανιών είναι πλέον 8 αντί για 11 που ήταν στην προηγούμενη λύση. Είναι προφανές ότι η επιβάρυνση της αντικειμενικής συνάρτησης με την χωρητικότητα των αναδευτήρων για κάθε χρήση τους, οδήγησε την βέλτιστη λύση στην μείωση της χρήσης τους και ταυτόχρονα στον αποκλεισμό της χρήσης των δύο μικρότερων σε χωρητικότητα αναδευτήρων. Επίσης αύξησε κατά το δυνατόν το μέγεθος των παρτίδων. Αυτό όμως συνέβει εις βάρος του χρόνου εκτέλεσης των παρτίδων (28,5 ώρες) -οι καθυστερήσεις έναρξης της εμφιάλωσης είναι πλέον μεγάλες (14,1 ώρες για το δεύτερο προϊόν και 19,8 ώρες για το τρίτο) και ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης της παραγωγής αυξήθηκε κατά παραπάνω από 10 ώρες σε σχέση με την προηγούμενη λύση. Και σε αυτή την περίπτωση αν ο αλγόριθμος είχε κατανέμει τις δεξαμενές με πιο αποδοτικό τρόπο θα είχαν μειωθεί κατά πολύ οι μεγάλες καθυστερήσεις. Αν για παράδειγμα μετά τα δύο πρώτα χαρμάνια για το πρώτο προϊόν οι αναδευτήρες διατίθονταν σε ένα από τα άλλα δύο προϊόντα και με δεδομένη την διαθεσιμότητα μιας δεξαμενής και μιας εμφιαλωτικής θα μπορούσαν να μειωθούν οι καθυστερήσεις σε πολύ μεγάλο βαθμό αφού δεν θα απαιτείται η αναμονή της ολοκλήρωσης εμφιάλωσης ενός προϊόντος για την έναρξη του δευτέρου.

Πίνακας 14: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση χρήσης χωρητικότητας αναδευτήρων και δεξαμενών

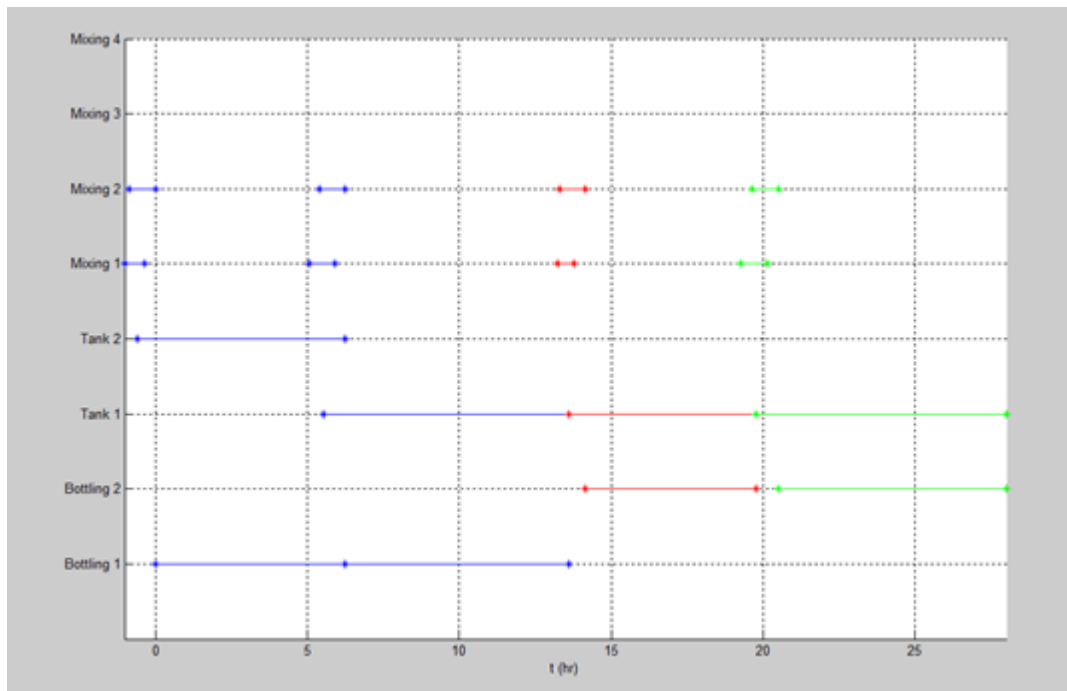
Χαρμάνι	Ποσότητα Χαρμανιού (m <sup>3</sup> )	Αναδευτήρας
L05	3,465	Mixing 1
L05	3,6	Mixing 2
L05	2,4	Mixing 1
L05	3,6	Mixing 2
L01	3,6	Mixing 1
L01	1,8	Mixing 2
L04	3,6	Mixing 1
L04	3,6	Mixing 2

### *Ελαχιστοποίηση αριθμού παρτίδων*

Η ελαχιστοποίηση του αριθμού των παρτίδων που εκτελούνται μπορεί να τεθεί το ίδιο ως κριτήριο βελτιστοποίησης αντί μέσω της χωρητικότητας όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Η αντικειμενική συνάρτηση στην περίπτωση αυτή είναι:

$$\min \sum_i \sum_j b_{i,j} + \sum_o \sum_i \sum_j b_{o,i,j}$$

Το Σχήμα 12 παρουσιάζει την βέλτιστη λύση για την παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση.



Σχήμα 12: Διάγραμμα τύπου Gantt θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση αριθμού παρτίδων

Ο Πίνακας 15 παρουσιάζει τα αντίστοιχα χαρμάνια.

Πίνακας 15: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες θέτοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση αριθμού παρτίδων

Χαρμάνι	Ποσότητα Χαρμανιού (m <sup>3</sup> )	Αναδευτήρας
L05	2,4	Mixing 1
L05	3,6	Mixing 2
L05	3,465	Mixing 1
L05	3,6	Mixing 2
L01	1,8	Mixing 1
L01	3,6	Mixing 2
L04	3,6	Mixing 1
L04	3,6	Mixing 2

Η λύση αυτή είναι παρόμοια με την προηγούμενη δημιουργώντας 8 μόνο χαρμάνια αλλά με κόστος την μεγάλη καθυστέρηση στην ολοκλήρωση της παραγωγής (29 ώρες - αναμονή έναρξης εμφιάλωσης 14,1 ώρες για το δεύτερο προϊόν και 20.5 ώρες για το τρίτο). Επίσης, όπως και στην προηγούμενη η μεγάλη καθυστέρηση οφείλεται σε όχι αποδοτική κατανομή των δεξαμενών και κατ' επέκταση των αναδευτήρων. Σε

αντίθεση με την προηγούμενη λύση, η προτεινόμενη δεξαμενή για χρήση είναι η πρώτη (Tank 1) καθώς δεν επιβαρύνεται λόγω της μεγαλύτερης χωρητικότητάς της.

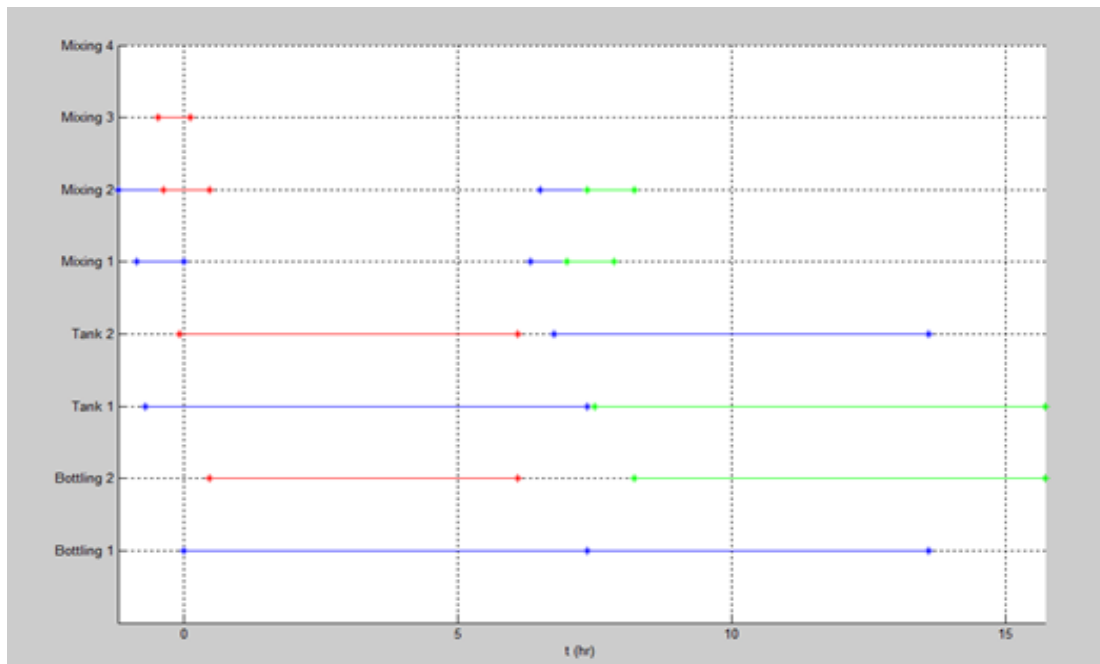
### ***Ελαχιστοποίηση συνδυαστικά του αριθμού παρτίδων και του χρόνου αναμονής εμφιάλωσης***

Αντί να ενσωματώνει ένα κριτήριο κάθε φορά, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να διαμορφωθεί πολυκριτηριακά ώστε να ικανοποιεί ταυτόχρονα πολλαπλές ανάγκες. Η παρακάτω αντικειμενική συνάρτηση:

$$\min \quad w_1 \left( \sum_k d_k \right) + w_2 \left( \sum_i \sum_j b_{i,j} + \sum_o \sum_i \sum_j b_{o,i,j} \right)$$

ενσωματώνει το κριτήριο τόσο του χρόνου αναμονής για εμφιάλωση όσο και του αριθμού των χαρμανιών και παρτίδων στην προσπάθεια ελαχιστοποίησης. Η σχετική βαρύτητα των δύο κριτηρίων μπορεί να ρυθμιστεί μέσω των συντελεστών βαρύτητας  $w_1$  και  $w_2$ .

Το Σχήμα 13 παρουσιάζει την βέλτιστη λύση για την παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση με  $w_1 = w_2 = 1$ . Ο Πίνακας 16 παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα χαρμάνια.



Σχήμα 13: Διάγραμμα τύπου Gantt θέτοντας πολυκριτηριακή αντικειμενική συνάρτηση

Πίνακας 16: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες θέτοντας πολυκριτηριακή αντικειμενική συνάρτηση

Χαρμάνι	Ποσότητα Χαρμανιού (m <sup>3</sup> )	Αναδευτήρας
L05	3,465	Mixing 2
L05	3,6	Mixing 1
L05	2,4	Mixing 1
L05	3,6	Mixing 2
L01	2	Mixing 3
L01	3,4	Mixing 2
L04	3,6	Mixing 1
L04	3,6	Mixing 2

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα η λύση επιτυγχάνει τόσο ελάττωση του αριθμού των χαρμανιών (8 συνολικά) όσο και μείωση του χρόνου εκτέλεσης της συνολικής παραγωγής (ολοκλήρωση σε 16,9 ώρες) μέσω της μείωσης των χρόνων αναμονής για την έναρξη εμφιάλωσης (0,46 ώρες για το δεύτερο προϊόν, 8,2 ώρες για το τρίτο). Από πρακτική άποψη, η λύση αυτή είναι και η προτιμότερη καθώς επιτυγχάνονται και οι δύο σημαντικοί παραγωγικοί στόχοι αφού έχουμε σχεδόν ίδιο χρόνο με την πρώτη περίπτωση στην οποία ως κριτήριο λήφθηκε η ελαχιστοποίηση του χρόνου

αναμονής εμφιάλωσης ενώ ταυτόχρονα έχουμε και τον μικρότερο δυνατό αριθμό χαρμανιών. Παρόλα αυτά όμως, ο συνολικός χρόνος παραγωγής θα μπορούσε να είναι μικρότερος καθώς, όπως και σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις ο αλγόριθμος δεν κατανέμει τις δεξαμενές και επομένως τους αναδευτήρες με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο. Αυτό εξάγεται παρατηρώντας τον χρόνο αναμονής της δεύτερης εμφιαλωτικής ενώ ταυτόχρονα υπάρχει διαθέσιμη δεξαμενή και αναδευτήρες. Αυτοί όμως δεσμεύονται από το πρώτο προϊόν (μπλε μπάρες) με αποτέλεσμα την αναμονή της εμφιαλωτικής μέχρι την ολοκλήρωση της εμφιάλωσης του πρώτου προϊόντος.

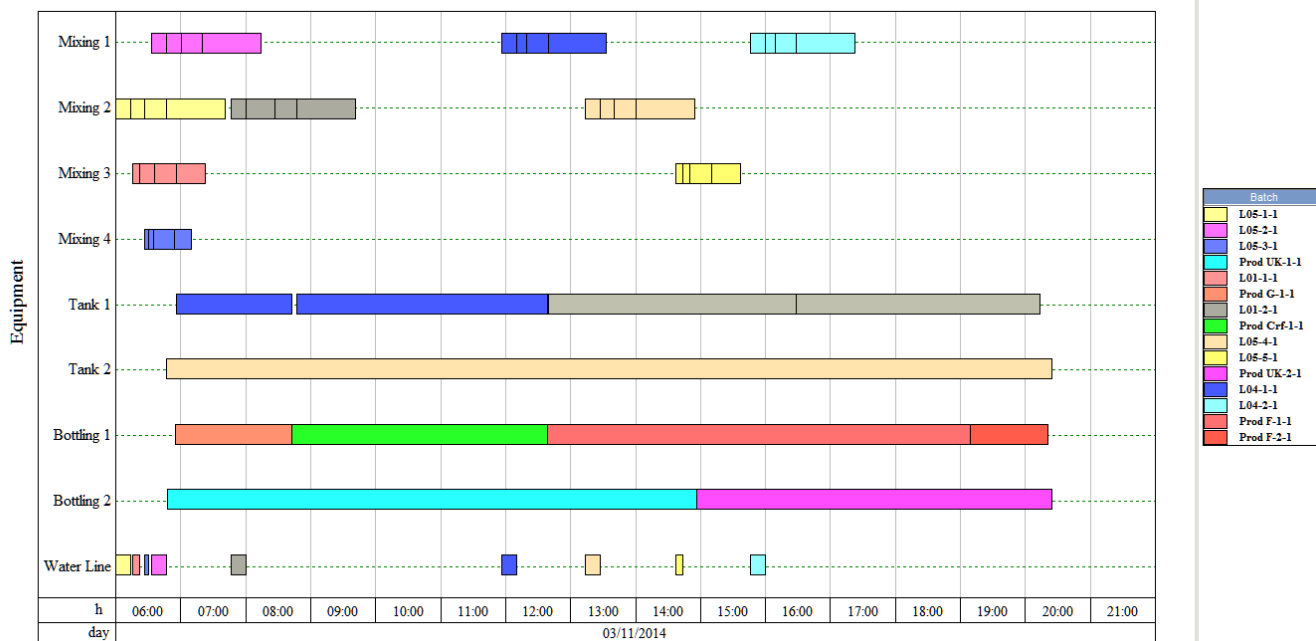
### ***Προσομοίωση της παραγωγικής διαδικασίας μέσω του λογισμικού Schedule Pro®***

Η ίδια μέρα παραγωγής προσομοιώθηκε στο λογισμικό Schedule Pro® και αποτυπώνει σε ικανοποιητικό βαθμό τον τρόπο παραγωγής που χρησιμοποιήθηκε από την επιχείρηση σε πραγματικές συνθήκες.

**Πίνακας 17: Ημερήσια παραγωγή πρώτης ημέρας**

<b>Προϊόν</b>	<b>Ποσότητα</b>	<b>Ενδιάμεσο</b>	<b>Ποσότητα Ενδιάμεσου</b>
<b>Prod UK-1</b>	19560 φιάλες	L05	7824 λίτρα
<b>Prod UK-2</b>	13104 φιάλες	L05	5241 λίτρα
<b>Prod G</b>	4656 φιάλες	L01	1770 λίτρα
<b>Prod CRF</b>	10200 φιάλες	L01	3570 λίτρα
<b>Prod F</b>	20040 φιάλες	L04	7200 λίτρα





Σχήμα 14: Διάγραμμα Gantt όπως παράχθηκε από το Schedule Pro® για την πρώτη ημέρα παραγωγής σε πραγματικές συνθήκες

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα Gantt τα χαρμάνια που παράχθηκαν για την ολοκλήρωση της παραγωγής ήταν 9, ένα περισσότερο από την βέλτιστη λύση που έδωσε ο αλγόριθμος. Οι αντίστοιχες ποσότητες και οι χρησιμοποιούμενοι αναδευτήρες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 18

Πίνακας 18: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες που χρησιμοποιήθηκαν από την επιχείρηση σε πραγματικές συνθήκες για την πρώτη ημέρα παραγωγής

Χαρμάνι	Ποσότητα Χαρμανιού (m <sup>3</sup> )	Αναδευτήρας
L05	3,6	Mixing 2
L05	3,6	Mixing 1
L05	1,0	Mixing 4
L01	1,8	Mixing 3
L01	3,6	Mixing 2
L05	3,6	Mixing 2
L05	1,8	Mixing 3
L04	3,6	Mixing 1
L04	3,6	Mixing 1

Η παραγωγή ολοκληρώνεται σε 14,5 ώρες που είναι κατά σχεδόν 2 ώρες μικρότερος χρόνος από τον χρόνο παραγωγής που δόθηκε από τον αλγόριθμο στην βέλτιστη λύση. Επιπρόσθετα όμως, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα Gantt, η χρήση των

εμφιαλωτικών γίνεται στο μέγιστο δυνατό βαθμό χωρίς να παρουσιάζονται αναμονές. Αυτό σχετίζεται με τον βέλτιστο τρόπο κατανομής των δεξαμενών και κατ' επέκταση της διάθεσης των ενδιάμεσων προϊόντων στους αναδευτήρες. Κάθε φορά που μια δεξαμενή είναι διαθέσιμη υπάρχει ενδιάμεσο προϊόν στους αναδευτήρες προς διάθεση. Το ένα προϊόν (Prod UK ή αντίστοιχα το προϊόν με τις μπλε μπάρες στα προηγούμενα) χρησιμοποιεί μόνο μια δεξαμενή, αυτή με την μεγαλύτερη χωρητικότητα, η οποία τροφοδοτείται δύο φορές κατά την διάρκεια της ημέρας και αντιστοιχούν σε δύο παρτίδες όπως αποτυπώνονται και στο γράφημα με δύο διαφορετικά χρώματα. Η δεύτερη δεξαμενή χρησιμοποιείται από τα υπόλοιπα προϊόντα. Κάθε φορά που η δεξαμενή πλησιάζει στο σημείο που θα είναι διαθέσιμη, προετοιμάζονται αντίστοιχα χαρμάνια στους αναδευτήρες για την τροφοδότηση της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην σταματά και η τροφοδοσία της εμφιαλωτικής οπότε και επιτυγχάνεται η παραγωγή χωρίς να παρουσιάζονται χρονικά κενά και αναμονές του εξοπλισμού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η βέλτιστη λύση δεν ενσωματώνει την δυνατότητα τροφοδότησης της δεξαμενής με χαρμάνια ενώ βρίσκεται σε εξέλιξη η εμφιάλωση. Αυτή η διαφοροποίηση εξηγεί και τα χρονικά κενά που υπάρχουν στην βέλτιστη λύση εξαιτίας της πρόβλεψης ότι θα πρέπει να ολοκληρωθεί η εμφιάλωση μίας παρτίδας πριν τροφοδοτηθούν νέα χαρμάνια στην δεξαμενή έστω και αν πρόκειται για το ίδιο ενδιάμεσο προϊόν. Αν αρθεί αυτός ο περιορισμός υπάρχει πολύ καλύτερη συμφωνία ανάμεσα στην βέλτιστη λύση που λαμβάνεται με την συνδυαστική αντικειμενική συνάρτηση και την πράξη όπως φαίνεται στην ακόλουθη μελέτη περίπτωσης.

## 8.2 Μελέτη Περίπτωσης 2

Για την ίδια μονάδα, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της παραγωγής εφαρμόστηκε και σε δεύτερη ημέρα παραγωγής με περισσότερα (4) προϊόντα. Οι παραχθείσες ποσότητες φαίνονται στο παρακάτω πίνακα 19 όπως και το είδος και η ποσότητα του ενδιάμεσου προϊόντος από το οποίο προέκυψαν τα τελικά προϊόντα. Καθώς και τα τέσσερα προϊόντα προέρχονται από διαφορετικό ενδιάμεσο προϊόν καμία απλοποίηση δεν έλαβε χώρα.

Πίνακας 19: Ημερήσια παραγωγή δεύτερης ημέρας

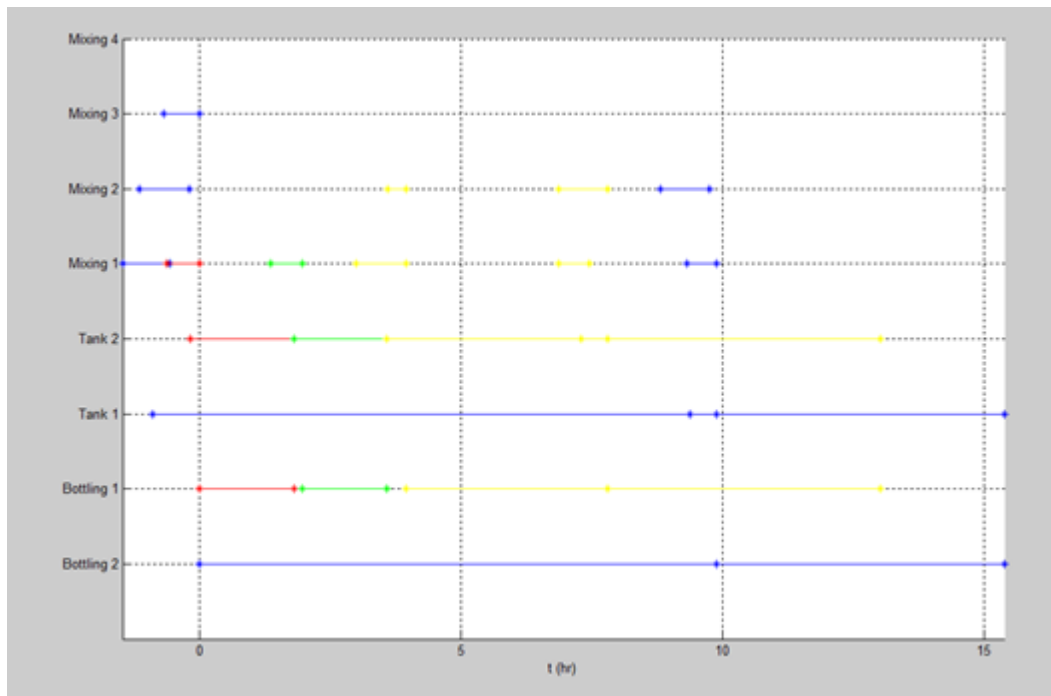
Προϊόν	Ποσότητα	Ενδιάμεσο	Ποσότητα Ενδιάμεσου
Prod Pr2	35138 μπουκάλια	L05	14400 λίτρα
Prod G	4584 μπουκάλια	L01	1740 λίτρα
Prod P	4400 μπουκάλια	L02	1550 λίτρα
Prod Mi	24648 μπουκάλια	L06	8700 λίτρα

Το προϊόν Prod Pr2 εμφιαλώνεται στην δεύτερη εμφιαλωτική ενώ τα υπόλοιπα στην πρώτη.

### *Ελαχιστοποίηση συνδυαστικά του αριθμού παρτίδων και του χρόνου αναμονής εμφιάλωσης*

Βάσει των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από την βελτιστοποίηση της ημέρας που προηγήθηκε, στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε μόνο το συνδυαστικό κριτήριο ελαχιστοποίησης του χρόνου αναμονής και του αριθμού των παρτίδων που δίνει αποτελέσματα ελκυστικότερα στην πράξη.

Το Σχήμα 15 δείχνει το γράφημα Gantt της βέλτιστης λύσης. Η αλληλουχία των χρωμάτων μπλε-κόκκινο-πράσινο-κίτρινο αντιστοιχεί στην αλληλουχία των προϊόντων όπως φαίνονται στον παραπάνω πίνακα. Η λύση κάνει βέλτιστη χρήση των δύο εμφιαλωτικών καθώς ξεκινούν μαζί στο χρόνο μηδέν και ολοκληρώνουν την παραγωγή της ημέρας χωρίς χρονικά κενά. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για το πρώτο προϊόν Prod Pr2 (μπλε) χρησιμοποιείται μόνο μία δεξαμενή (Tank 1) η οποία τροφοδοτείται σε δύο διαφορετικά χρονικά σημεία με χαρμάνια (που αντιστοιχούν σε 2 διαφορετικές παρτίδες). Αν και οι παρτίδες αποθήκευσης δεν θα πρέπει εν γένει να επικαλύπτονται χρονικά, ενσωματώθηκε στους περιορισμούς του προβλήματος η (προαιρετική) δυνατότητα χαλάρωσης του παραπάνω περιορισμού με δυνατότητα μερικής επικάλυψης για χρόνο που δεν μπορεί να υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο διάστημα (μισή ώρα στην συγκεκριμένη περίπτωση). Αυτή η χαλάρωση του περιορισμού για μη-επικάλυψη επιτρέπει την χρήση της ίδιας δεξαμενής για τροφοδοσία της εμφιαλωτικής με πολλαπλές παρτίδες. Το ίδιο συμβαίνει και για το προϊόν Prod Mi (κίτρινο) και την δεξαμενή Tank 2. Η "χαλάρωση" αυτή εφαρμόζεται και στην πράξη.



Σχήμα 15: Διάγραμμα τύπου Gantt θέτοντας πολυκριτηριακή αντικειμενική συνάρτηση για την δεύτερη ημέρα παραγωγής

Ο Πίνακας 20 παρουσιάζει τα χαρμάνια που αντιστοιχούν στην λύση αυτή.

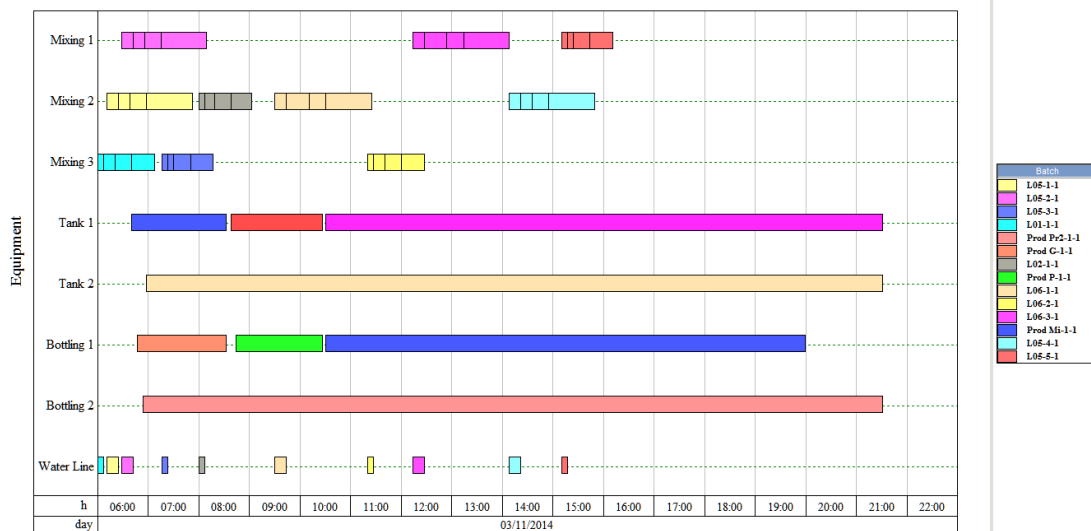
Πίνακας 20: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες θέτοντας πολυκριτηριακή αντικειμενική συνάρτηση για την δεύτερη ημέρα παραγωγής

Χαρμάνι	Ποσότητα Χαρμανιού (m <sup>3</sup> )	Αναδευτήρας
L05	3,4	Mixing 1
L05	3,6	Mixing 2
L05	2	Mixing 3
L05	3,6	Mixing 2
L05	1,4	Mixing 1
L01	1,74	Mixing 1
L02	1,55	Mixing 1
L06	3,6	Mixing 1
L06	0,1	Mixing 2
L06	1,4	Mixing 1
L06	3,6	Mixing 2

## Προσομοίωση της παραγωγικής διαδικασίας μέσω του λογισμικού Schedule Pro®

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η ίδια μέρα παραγωγής προσομοιώθηκε στο λογισμικό Schedule Pro® και αποτυπώνει σε πολύ μεγάλο βαθμό τον τρόπο παραγωγής που χρησιμοποιήθηκε από την επιχείρηση σε πραγματικές συνθήκες. Και σε αυτή την περίπτωση χρειάστηκε να γίνουν οι ίδιες παραδοχές σχετικά με τους χρόνους προετοιμασίας για την συγκρισιμότητα των μεγεθών που προκύπτουν από το λογισμικό και από τον αλγόριθμο.

Συγκρίνοντας το διάγραμμα Gantt που λήφθηκε από το λογισμικό με αυτό που προήλθε από την χρήση του αλγορίθμου διαπιστώνεται ότι υπάρχει πλήρης ταύτιση αναφορικά με τον τρόπο διαχείρισης και κατανομής των δεξαμενών και των εμφιαλωτικών μηχανών. Και οι δύο περιπτώσεις δίνουν σχεδόν τον ίδιο συνολικό χρόνο παραγωγής (15,5 ώρες) χωρίς χρονικά κενά και στις δύο εμφιαλωτικές.



Σχήμα 16: Διάγραμμα Gantt όπως παράχθηκε από το Schedule Pro® για την δεύτερη ημέρα παραγωγής σε πραγματικές συνθήκες

Ίδια ταύτιση υπάρχει στον αριθμό των χαρμανιών με μικρή διαφοροποίηση στους χρησιμοποιούμενους αναδευτήρες όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 21 και σε σύγκριση με τον πίνακα 20

Πίνακας 21: Ποσότητες χαρμανιών και αναδευτήρες που χρησιμοποιήθηκαν από την επιχείρηση σε πραγματικές συνθήκες για την δεύτερη ημέρα παραγωγής

Χαρμάνι	Ποσότητα Χαρμανιού (m <sup>3</sup> )	Αναδευτήρας
L01	1,8	Mixing 3
L05	3,6	Mixing 2
L05	3,6	Mixing 1
L05	1,8	Mixing 3
L02	1,6	Mixing 2
L06	3,6	Mixing 2
L06	1,8	Mixing 3
L06	3,6	Mixing 1
L05	3,6	Mixing 2
L05	1,8	Mixing 1

## 9. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της εργασίας μελετήθηκε το πρόβλημα του προγραμματισμού της παραγωγικής διαδικασίας μιας μονάδας παραγωγής και εμφιάλωσης σαλτσών και αρτυμάτων. Το πρόβλημα αποτυπώθηκε μαθηματικά στην γενική του μορφή ως πρόβλημα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και επιλύθηκε για την παραπάνω μονάδα σε δύο μέρες παραγωγής εστιάζοντας στον προσδιορισμό της καλύτερης δυνατής κατανομής δεξαμενών καθώς και τον χρονικό προγραμματισμό των εντολών παραγωγής. Υποστηρικτικά χρησιμοποιήθηκε εργαλείο προσομοίωσης για την αποτίμηση των προτεινόμενων λύσεων σε σχέση με την παραγωγική διαδικασία που εφαρμόστηκε από την μονάδα με εμπειρικό τρόπο.

Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου διαπιστώθηκε ότι η αποδοτικότερη εφαρμογή του γινόταν όταν η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώθηκε πολυκριτηριακά ενσωματώνοντας συνδυαστικά την ελαχιστοποίηση του αριθμού παρτίδων όσο και του χρόνου αναμονής της εμφιάλωσης (τον συνολικό χρόνο παραγωγής).

Η εφαρμογή του αλγορίθμου για την πρώτη μέρα παραγωγής έδειξε αποκλίσεις τόσο στον αριθμό χαρμανιών όσο κυρίως στον συνολικό χρόνο παραγωγής. Αυτό οφειλόταν στην μη βέλτιστη κατανομή των εντολών παραγωγής στους αναδευτήρες και στην συνέχεια, των παραγόμενων ενδιάμεσων προϊόντων στις δεξαμενές. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να υπάρχουν χρονικά κενά στην εμφιάλωση και επομένως αύξηση του συνολικού χρόνου παραγωγής σε σχέση με την παραγωγική διαδικασία που ακολουθήθηκε εμπειρικά.

Η εισαγωγή της δυνατότητας χαλάρωσης του περιορισμού της μη-επικάλυψης στην εφαρμογή του αλγορίθμου την δεύτερη ημέρα οδήγησε στην αποδοτικότερη κατανομή των εντολών παραγωγής των ενδιάμεσων προϊόντων στους αναδευτήρες που οδήγησε και στην βέλτιστη κατανομή αυτών στις δεξαμενές. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την απουσία χρονικών κενών κατά την διαδικασία της εμφιάλωσης και επομένως του συνολικού χρόνου παραγωγής όπως αυτός αποτυπώθηκε από την εμπειρική εφαρμογή του ημερήσιου προγράμματος παραγωγής.

Επομένως, η προτεινόμενη μαθηματική διαμόρφωση και η χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης που ελαχιστοποιεί παράλληλα τον αριθμό των χαρμανιών και τον χρόνο εκτέλεσης της παραγωγής, παράγει λύσεις που βρίσκονται πολύ κοντά στην πρακτική της μονάδας και άρα μπορούν να γίνουν αποδεκτές από τους υπεύθυνους παραγωγής. Το πλεονέκτημα της μαθηματικής διαμόρφωσης είναι ότι αποτελεί ένα επεκτάσιμο εργαλείο το οποίο με γρήγορο τρόπο και χωρίς την χρήση πολύπλοκων μαθηματικών υπολογισμών επιτρέπει ανά πάσα στιγμή να σχεδιαστεί ένα βέλτιστο πρόγραμμα παραγωγής. Σε συνδυασμό με την ανθρώπινη κριτική ικανότητα και εμπειρία δίνει την δυνατότητα στην μονάδα να γνωρίζει τι μπορεί να παράγει στην πραγματικότητα ώστε να ανταποκρίνεται γρήγορα και αποτελεσματικά στις ολοένα και πιο απαιτητικές συνθήκες της αγοράς.

Σε δεύτερη φάση, ο συνδυασμός των ανωτέρω κριτηρίων με την προθήκη του εργατικού κόστους με την μορφή εργατοωρών θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας καθώς πέρα από την παραγωγική ικανότητα της μονάδας μεγάλη σημασία στις μέρες μας έχει και το κόστος παραγωγής. Με άλλα λόγια, να δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός προγράμματος παραγωγής που να ικανοποιεί την ζήτηση και να αξιοποιεί τον μηχανολογικό εξοπλισμό όχι μόνο με τον καλύτερο δυνατό τρόπο από την οπτική γωνιά της δυναμικότητας και της διαθεσιμότητας αλλά και από την σκοπιά της βέλτιστης οικονομικής διαχείρισης.



## 10. Βιβλιογραφία

- Akkerman R. and van Donk D.P., “Analyzing scheduling in the food-processing industry: structure and tasks”, *Cognition Technology and Work* 11 (2009), 215-226
- Burke J.A., (2006), “Two mathematical programming models of cheese manufacture”, *Journal of Dairy Science* 89: 799-809
- Claassen G.D.H., “A decision support system for packaging lines in food industry”, *Operations Research Proceedings* (1991), 636-643
- Claassen G.D.H. and van Beek P., “Planning and scheduling packaging lines in food industry”, *European Journal of Operational Research* 70 (1993), 150-158
- Cox J.F. and Blackstone JH, “APICS Dictionary” 10<sup>th</sup> Edn., APICS – The Association for Operations Management (2002)
- Crawford S., MacCarthy B.L., Wilson J.R. and Vernon C, “Investigating the work of industrial schedulers through field study”, *Cognition Technology and Work* 2 (1999), 63-77
- INTELLIGEN, INC. (2007), «Getting Started», In: «SchedulePro: A Finite Capacity Scheduling Tool for Batch and Semi-Continuous Process Manufacturing User's Guide", New Jersey, USA
- Jakerman C.M., “Scheduling needs of the food processing industry”, *Food Research International* 27 (1994), 117-120
- Jensson P., “Daily production planning in fish processing firms”, *European Journal of Operational Research* 36 (1988), 410-415
- Lagodimos A.G., Charalambopoulos A. and Kavgalaki A., “Computer-aided packing shop scheduling in a manufacturing plant”, *Int. J. Production Economics* 46-47 (1996), 621-630
- McKay K.N., Pinedo M. and Webster S., “Practice-focused research issues for scheduling systems”, *Journal of Operations and Production Management* 11(2) (2002), 249-258
- Miller W.A., Leung L.C., Azhar T.M. and Sargent S., “Fuzzy production planning model for fresh tomato packing”, *Int. J. Production Economics* 53 (1997), 227-238

- Moret Ernst & Young Management Consultants (1997) ERP Packages Food 97/98: Reference Model and ERP Packages for the Food-Processing Industry). Utrecht, The Netherlands.
- Relvas S., Barbosa-Povoa A.P.F.D., Matos H.A., “Inventory Management MILP Modeling for Tank Farm Systems”, in Pierucci S. and Buzzzi Ferraris, 20<sup>th</sup> European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20, Elsevier B.V. (2010)
- Rothlauf F., (2011), “*Design of Modern Heuristics, Principles and Application*”, Springer
- Soman C.A., van Donk D.P. and Gaalman G.J.C, “Capacitated planning and scheduling for combined make-to-order and make-to-stock production in the food industry: An illustrative case study”, Int. J. Production Economics 108 (2007), 191-199
- Terrazas-Moreno S., Grossmann I.E. and Wassick J.M., “A Mixed-Integer Linear Programming Model for Optimizing the Scheduling and Assignment of Tank Farm Operations”, EWO Meeting, Carnegie Mellon University, (2011)
- Van Donk D.P., “Make to stock or make to order: The decoupling point in the food processing industries”, Int. J. Production Economics 69 (2001), 297-306

#### Ελληνική Βιβλιογραφία

- Λαμπρίδη Ε., (2014), “Γραμμικός προγραμματισμός για τη βέλτιστη κατανομή πρώτων υλών και προϊόντων σε τυροκομείο”, Διπλωματική Εργασία, ΜΠΣ “Συστήματα Διαχείρισης Ποιότητας και Οργάνωση Παραγωγής στη Βιομηχανία Τροφίμων” ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Τμήμα Τεχνολογίας Τροφίμων
- Σαββάκη Β., (2014), “Ελαχιστοποίηση συνολικού χρόνου παραγωγής μονάδας πολλαπλών προϊόντων με εξαρτώμενους χρόνους εναλλαγής”, Διπλωματική Εργασία, ΜΠΣ “Συστήματα Διαχείρισης Ποιότητας και Οργάνωση Παραγωγής στη Βιομηχανία Τροφίμων” ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Τμήμα Τεχνολογίας Τροφίμων

### Διαδικτυακή Βιβλιογραφία

- <http://www.ntua.gr/envirosystems/files/07-akeraios.pdf>
- <http://www.math.aegean.gr/eedip/ctsag/homepage/Operational%20Research/NOTES51.pdf>
- <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/8105/1/%CE%91%CE%BA%CE%AD%CF%81%CE%B1%CE%B9%CE%BF%CF%82%20%CE%A0%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82.pdf>
- <http://147.102.158.4/itcivil/program/kef8.pdf>
- <https://www.cs.upc.edu/~erodri/webpage/rpar/s6.pdf>
- <http://docplayer.gr/8496281-Panepisthmio-aigaiou-grammikos-programmatismos.html>

## 11. Παράρτημα-Κώδικας MATLAB

```
%MULTIPLE PRODUCTS THAT CAN SHARE PRE-DEFINED FILLERS
%but in multiple shared tanks & blenders

% BLENDING + FILLING as independent optimizations assuming there is no
% wait anywhere in the process (mixing is done just in time for feeding
% to tanks and material is collected in tanks just in time for filling

iOptim = 1; % index for optimization function 0:min # of batches
                    % 1:min capacity
                    % 2: min delays
                    % 3: min delays+#of batches
iOptim2=1; %include or not # of blend batches

inclnonoverlap=1; %include or not overlapping constraints between blends
inclBetwProdBlends = 0; %include or not overlapping constraints between
blends of different products

shift = 0; % shift for display only to avoid negative times
minBS = 2; %minimum BS in m3
incllowerbound = 0;

m=2; %number of tanks
mTanks = m;
C=[10 6]; %the capacity of the tanks (m3)
T=[-100 -100]; %tank availability (h) with respect to the filler start

%fillers
fro=[0.96 0.96]; %the filler rates (m3/h)
%fr=[1];
nf = length(fro); %number of fillers

P=[13.065 5.4 7.2]; %quantities to be processed in m3
%P=[24];
np=length(P); %number of products
n=[2 1 1]; %max number of batches, one entry for each product
%n=[5];
Sn=sum(n);
bfp=[2 1 1]; %assignment vector of length np: what filler each product
goes

tr=10; %the transfer-to-tank rate (m3/h)
tc=0; % the constant time for above op
H=10000; %big-M value
allowPartialTankOverlap = 1;
overlap = 0.5; %allowed overlap (in h) between tank batches of same product

% the following now correspond to the mixing batches
nb=4; %max number of batches per tank batch
mb=3; %number of tanks
Cb=[3.6 3.6 2]; %the capacity of the tanks (m3)
qr = 14.4; %the production (mixing) rate in m3/h
qc = 0.25; % the production constant time (hr)

%create a filler rate vector matching the products
for k=1:np
    fr(k)=fro(bfp(k));
end
```

```

%colors
colors=[0 0 1; 1 0 0; 0 1 0; 1 1 0]; %blue, red, green, yellow
%design variables are the batch sizes BSi of each batch,
%the assignment variables bi,j (if batch i is executed in tank j)
%the start delays for the np products
nt=Sn+Sn*m+np;

%the following constraints are generated WITHIN each product separately
%they are embedded in the constraint matrix A as diagonal blocks
%each submatrix assumes that the order of the design variables is:
%batch sizes, assignment to equip binaries, start delay of each product
%filling with respect to time 0
% (the start of the first product)
%the last variable (start dealy) is not included in the subfunctions
%so one column is added manually to the A submatrices
a1=[];b1=[];e1=[];
a2=[];b2=[];e2=[];
a3=[];b3=[];e3=[];
a4=[];b4=[];e4=[];
a5=[];b5=[];e5=[];
xint=[];
for k=1:np
    %assignment constraints
    [alp, b1p, e1p]=assignment(n(k),m, H);
    [nsub, msub]=size(alp);
    alp=[alp zeros(nsub, 1)];
    a1=blkdiag(a1, alp);
    b1=[b1;b1p];
    e1=[e1;e1p];

    %capacity constraints
    [a2p, b2p, e2p]=capacity(n(k),C,H);
    [nsub, msub]=size(a2p);
    a2p=[a2p zeros(nsub, 1)];
    a2=blkdiag(a2, a2p);
    b2=[b2;b2p];
    e2=[e2;e2p];

    %production constraint
    a3=blkdiag(a3, [ones(1,n(k)) zeros(1, n(k)*m) 0]); %extra zero at end
for delay
    b3=[b3; P(k)];
    e3=[e3; 0];

    %partial-overlapping constraints - WITHIN each product
    if allowPartialTankOverlap==1
        %where the sequence of batches is determined by its order)
        [a4p, b4p, e4p]=partialoverlapping(n(k),m,fr(k),tr,tc,H, overlap);
    else
        [a4p, b4p, e4p]=nonoverlapping(n(k),m,fr(k),tr,tc,H);
    end
    [nsub, msub]=size(a4p);
    a4p=[a4p zeros(nsub, 1)];
    a4=blkdiag(a4, a4p);
    b4=[b4;b4p];
    e4=[e4;e4p];

    %tank availability constraints
    [a5p, b5p, e5p] = availability(n(k),T,fr(k),tr,tc,H);
    [nsub, msub]=size(a5p);
    %the start time in the availability constraint should be shifted
    %by the product delay - this is why A is appended with ones

```

```

a5p=[a5p ones(nsub, 1)];
a5=blkdiag(a5, a5p);
b5=[b5;b5p];
e5=[e5;e5p];

%indices for recognizing boolean vars
%first n(k) are batch sizes (non boolean)
%next n(k)*M are binary if batch i is assigned to tank j
%last variable is the delay (not boolean)
xint=[xint;zeros(n(k),1);ones(n(k)*m,1);0];
end

%set the first delay as zero
a6=zeros(1, nt);
a6(n(1)+n(1)*m+1)=1;
b6=0;
e6=0; %equality constraint

%collect all constraints so far
a=[a1;a2;a3;a4;a5;a6];
b=[b1;b2;b3;b4;b5;b6];
e=[e1;e2;e3;e4;e5;e6];

%non-overlapping between products constraints
[a7, b7, e7, ntex]=nonoverlapping_betw_prods(n,m,fr,tr,tc,H);

%nt new vars have been introduced: dil,i2, expand all other matrices
[nsub, msub]=size(a);
a=[a zeros(nsub,ntex);a7];
b=[b;b7];
e=[e;e7];
xint=[xint;ones(ntex,1)]; %new vars are binary

nt=nt+ntex;

%non-overlapping between fillers (sharing same product)
[a8, b8, e8]=nonoverlapping_fillers(nt, n,m,bfp,fro,P);
a=[a;a8];
b=[b;b8];
e=[e;e8];

%tank constraints

% the vector of design vars is now expanded as follows: for each product
% and for each (potential) tank batch there are nb (maximum) number of
% potential blend batches. So, for every product, there are n*nb batch
% sizes and n*nb binaries indicating if a blend batch becomes part of a tank
% batch.
% Each blend batch must be executed in a tank so there are n*nb*m binaries
for
% blend-tank assignment (all above are for each product)

a10=[];b10=[];e10=[];xint10=[];
size10=[];
for k=1:np
    %blend assignment constraints - create as diagonal and append
    [a10p, b10p, e10p]=blend_tank_coupling(n(k), nb, Cb, qr, qc, tr, H);
    size10=[size10;size(a10p)];
    xint10p=[zeros(n(k)*nb,1);ones(n(k)*nb,1);ones(n(k)*nb*mb,1)];

```

```

    a10=blkdiag(a10, a10p);
    b10=[b10;b10p];
    e10=[e10;e10p];
    xint10=[xint10;xint10p];
end

a10
size10
sizeA=size(a)
a=blkdiag(a,a10);
b=[b;b10];
e=[e;e10];
xint=[xint;xint10];

rowoffset=sizeA(1);
coloffset=0;
for k=1:np

    %for each product k the first n(k) blend assignment constraints include
    % (in the mass balance) the corresponding tank batch size variable
    % that is not part of the matrix they 'saw'; have to add it here

    for j=1:n(k)
        a(rowoffset+j,coloffset+j) = -1;
    end

    if k<np
        rowoffset = rowoffset + size10(k,1);
        coloffset = coloffset + n(k)+n(k)*m+1;
    end

end

%overlapping constraints between blend batches of different
%products

if inclnonoverlap>0
    [nt, nv]=size(a);
    [a20, b20, e20, nv20]=nonoverlapping_betw_blends(nv,n,m,nb,mb,fr,
tr,qr,qc,H, inclBetwProdBlends);
    if nv20>0
        a=[a zeros(nt, nv20);a20]; %nv20 is the number of new vars
    else
        a=[a;a20];
    end
    b=[b;b20];
    e=[e;e20];
    xint=[xint;ones(nv20,1)]; %new vars are binary
end

[nt, nv]=size(a);
%optimization
f=zeros(nv,1);
%objective function

%calculate the number of batches f
f0=zeros(nv,1);
fC=zeros(nv,1);

kind=0;
for k=1:np
    f0(n(k)+1+kind : n(k)+n(k)*m+kind)=1; %tank batches

    for i=1:n(k)

```

```

        for j=1:m
            fC(n(k)+(i-1)*m+j+kind)=C(j);
        end
    end
    kind=kind+n(k)+n(k)*m+1;    %number of vars for each prod
end

if iOptim2>0
    %add for blend batches
    kind=kind+ntex;
    for k=1:np
        f0(kind+n(k)*nb+1 : kind+n(k)*nb+n(k)*nb)=1;

        offn=kind+2*n(k)*nb;
        for l=1:n(k)
            for i=1:nb
                for j=1:mb
                    offn=offn+1;
                    fC(offn)=Cb(j);
                end
            end
        end
        kind=kind+2*n(k)*nb+n(k)*nb*mb;
    end
end

if (iOptim == 0)
    %for minimizing the number of batches
    f=f0;
elseif (iOptim == 1 || iOptim == 4)
    %for minimizing the capacity used
    f=fC;

    if iOptim==4
        kind=0;
        for k=1:np
            delayIndex=n(k)+n(k)*m+1;    %number of vars for each prod
            kind=kind+delayIndex;
            if (k>1)
                f(kind)=100;    %extra weight for delays
            end
        end
    end
end
else

    %option #3: include the # of batches too
    if (iOptim==3)
        f=f0;
    end
    %minimize the sum delays for option #2 and oprtion #3
    kind=0;
    for k=1:np
        delayIndex=n(k)+n(k)*m+1;    %number of vars for each prod
        kind=kind+delayIndex;
        if (k>1)
            f(kind)=1;
        end
    end
end

%introduce lower bounds for BS
lb=zeros(length(f),1);

```



```

if incllowerbound
    Snk=0;
    for k=1:np
        for i=1:n(k)
            lb(Snk+i)=minBS;
        end
        Snk=Snk+n(k)*(m+1)+1;
    end
end

%Snk=0;
%for k=1:np
%    Snk=Snk+n(k)*(1+m)+1;
%    lb(Snk)=-10; %allow negative delays
%end

[obj, x, duals, stat] = my_lp_solve(f, a, b, e, lb, [], xint);

%assignments + results
%col1: BS, col2: tankId, col3: startTime for tank, col4: product id,
%col5: tank batch id (for each product)
res=zeros(Sn, 4);
delays=zeros(np,1);

ii=0;
kind=0;

for k=1:np
    tBS=0;
    pdelay=x(n(k)+n(k)*m+1+kind);
    delays(k)=pdelay; %record delay vector
    for i=1:n(k)
        if x(i+kind)>0
            ii=ii+1;
            res(ii,1)=x(i+kind);
            res(ii,5)=i;

            res(ii,3)=tBS/fr(k)-x(i+kind)/tr-tc + pdelay + shift;
            res(ii,4)= k;
            tBS = tBS+x(i+kind);

            for j=1:m
                if x(n(k)+(i-1)*m+j+kind)==1
                    res(ii,2)= j;
                end
            end
        end
    end
    kind=kind+n(k)+n(k)*m+1; %number of vars for each prod
end

res=res(1:ii,:) %ii is the number of tank batches to be executed
x
delays

% the results matrix contains the tank batches to be executed
%plot them in a Gantt-like chart
[nr, mr]=size(res);
figure(1);
maxEnd=0;
minStart = min(res(:,3));
hold on
%findex=1; %filler-line index
pindex=0; %product index

```

```

for i=1:nr
    delay = delays(res(i,4));    %delay for the corresponding product

    pindex=res(i,4);

    findex = -bfp(pindex)+1;    %recorded in negative Y lines (first filler in
row 0
                                %second in row -1 etc)

    startF=res(i,3)+tc+res(i,1)/tr;
    endF = startF+res(i,1)/fr(pindex);
    maxEnd = max(maxEnd, endF);

    startT=res(i,3);
    endT=endF;

    plot([startF endF],[findex findex],'*-','Color', colors(pindex,:))
    plot([startT, endT],[res(i,2) res(i,2)],'*-','Color', colors(pindex,:))
end

%collect the results for the blend batches
%the results start after the tank batches vars: kind+ntex
res2=[];
offset=kind+ntex;
for k=1:np    %for each product
    for i=1:n(k)    %for each tank batch of each product
        for j=1:nb    %for each possible blend
            batchPos = (i-1)*nb+j;
            if x(offset+batchPos)>0
                equipPos = offset+2*n(k)*nb+mb*(batchPos-1);
                for o=1:mb
                    if x(equipPos+o)>0
                        %we need not the tank batch id but the line in res
                        %it corresponds too
                        tankRow=i;
                        for ii=1:nr
                            if res(ii,5)== i && res(ii,4)==k
                                tankRow=ii;
                            end
                        end
                        res2=[res2; k tankRow j x(offset+batchPos) o];
                    end
                end
            end
        end
    end
end

offset = offset+size10(k, 2);
end

%endTankDeposit=zeros(nr, 1);
startTankDeposit=zeros(nr, 1);
for i=1:nr
    %endTankDeposit(i)=res(i,3)+res(i,1)/tr; %the end of transfer into the
tank
    startTankDeposit(i)=res(i,3); %the start of transfer into the tank
end

[nr2, mr2]=size(res2);
for i=1:nr2
    pID=res2(i,1);    %product id
    tbID=res2(i,2);    %tank batch id
    bbID=res2(i,3);    %blend batch id
    bs=res2(i,4);    %blend batch size
    btID=res2(i,5);    %blend tank id

```

```

%tankEnd=endTankDeposit(tbID);% start of tank batch
%tankStart=tankEnd-qc-bs/qr-bs/tr;
tankStart=startTankDeposit(tbID)-qc-bs/qr;
tankEnd=startTankDeposit(tbID)+bs/tr;

maxEnd = max(maxEnd, tankEnd);
minStart = min(minStart, tankStart);

plot([tankStart, tankEnd],[mTanks+btID mTanks+btID], '*-', 'Color',
colors(pID,:))

%endTankDeposit(tbID) = endTankDeposit(tbID)-bs/tr; %move the end of
deposit for next tank batch
startTankDeposit(tbID) = startTankDeposit(tbID)+bs/tr; %move the start
of deposit for next tank batch
end

axis([minStart maxEnd -nf m+mb+1]);

['BS ' ' tankId ' ' startTime ' ' product id ', ' tank batch id']
res

['product id ' ' tank batch id ' ' blend batch id ' ' blend BS ' ' blend
tank id']
res2

xlabel('t (hr)')
grid
hold off;

```