

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία Στο Χρονικό Προγραμματισμό και Διαχείριση Έργων

«Η Σπουδαιότητα Της Αναπαράστασης Του Χρόνου Στην Μαθηματική Μοντελοποίηση Μεγάλων Προ-
βλημάτων Χρονικού Προγραμματισμού – Μελέτη Περίπτωσης Από Τη Φαρμακοβιομηχανία»

Υπερήφανος Κωνσταντίνος

Υπεύθυνος Καθηγητής: Γ. Κ. Δ. Σαχαρίδης

Βόλος, Ιούνιος 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	0
Κεφάλαιο 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΟΤΗΤΕΣ.....	1
1.1. Εισαγωγή.....	1
1.2. Μοντέλα για αυτοματοποιημένο χρονικό παραγραμματισμό παραγωγής	2
1.2.1. Μέθοδοι Μαθηματικού Προγραμματισμού	2
1.2.2. Η Αναπαράσταση του Χρόνου	4
1.2.3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση και Πρόσφατες Εξελίξεις.....	5
Κεφάλαιο 2- Περιγραφή του Προβλήματος και των Περιορισμών.....	8
2.1. Γενικά χαρακτηριστικά των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού.....	8
2.2. Διακριτός και συνεχής χρόνος στα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού.....	11
2.3. Παρουσίαση των μοντέλων και επεξηγήσεις των περιορισμών.....	12
Α. Περιορισμοί Μορφοποίησης Συνεχούς Χρόνου	13
Β. Περιορισμοί Μορφοποίησης Διακριτού Χρόνου	15
2.4. Σύνοψη και συμπεράσματα από την παρουσίαση των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού	16
Κεφάλαιο 3- Ανάπτυξη κωδικών για την περίπτωση της συνεχούς μορφοποίησης	18
3.1. Ανάπτυξη κωδικών επίλυσης του προβλήματος συνεχούς χρόνου και η βιβλιοθήκη CPLEX	18
3.2. Αριθμητικά παραδείγματα	19
3.3. Χρησιμότητα των μοντέλων - Αδυναμίες του κώδικα.....	21
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	23
Π.Ι Περιορισμοί για τη μοντελοποίηση γενικότερης περίπτωσης.....	23
Π.ΙΙ Valid Inequality	25
Π.ΙΙΙ Άλλα συμπεράσματα από τους κώδικες	25
Π.ΙV Διαφορά μεταξύ θεωρίας και πράξης	27
Βιβλιογραφία.....	29

Κεφάλαιο 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΟΤΗΤΕΣ

1.1. Εισαγωγή

Χρονικός προγραμματισμός (scheduling) μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία λήψης αποφάσεων για τον καθορισμό του πότε, που και πως θα παραχθεί ένα σύνολο προϊόντων ή υπηρεσιών στη βέλτιστη δυνατή ποιότητα λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο ή μέρος των περιορισμών του υφιστάμενου συστήματος καθώς και την ύπαρξη δεδομένου χρονικού ορίζοντα (Floudas & Lin, 2004).

Ο χρονικός προγραμματισμός αποτελεί κρίσιμη παράμετρο των λειτουργικών/επιχειρησιακών διαδικασιών της βιομηχανίας και καίριο παράγοντα βελτίωσης της παραγωγικής απόδοσης. Κύριο χαρακτηριστικό πολλών βιομηχανιών είναι η συνεχής προσπάθεια για αύξηση της ευελιξίας. Η πίεση του ανταγωνισμού έχει διαμορφώσει την τάση στις βιομηχανίες να επιχειρούν να αποκτήσουν μορφή και χαρακτήρα μονάδων πολλαπλού σκοπού (multipurpose), παραγωγής πολλαπλών προϊόντων (multiproduct) ώστε να είναι δυνατή η παραγωγή διαφορετικών προϊόντων μέσω των ίδιων ή διαφορετικών αλληλουχιών διαδικασιών κάνοντας βέλτιστη χρήση του διαθέσιμου εξοπλισμού, υλικών (α' υλών ή ενδιάμεσων προϊόντων) και των υπολοίπων πόρων παραγωγής. Η ανάγκη για ευελιξία επιβάλλει ολιστική προσέγγιση στην αναδιαμόρφωση του χαρακτήρα των βιομηχανιών τόσο ως προς τη μορφή των εργοστασιακών διατάξεων αλλά και της αναδιοργάνωσης των διαδικασιών τους ώστε να παρέχεται ορθολογική βάση για τη μείωση των κόστων κάτι που επιβάλλει ανάμεσα στα άλλα και την εφαρμογή ορθών πρακτικών χρονικού προγραμματισμού (Floudas & Lin, 2004).

Την τελευταία εικοσαετία η συνεχώς εντεινόμενη πίεση για βελτίωση της αποδοτικότητας και τη μείωση διαφόρων ειδών κόστους, σε συνδυασμό με τη σημαντική πρόοδος των τεχνικών μοντελοποίησης και επίλυσης και τη ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής ισχύος αποτέλεσαν τους κυριότερους και καθοριστικότερους παράγοντες για την αύξηση του ενδιαφέροντος για θεωρητική διερεύνηση των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού από την ακαδημαϊκή κοινότητα και την υιοθέτησή τους από τη βιομηχανία.

Τα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού αποτελούν διαρκές πεδίο πρόκλησης τόσο από πλευράς μαθηματικής διατύπωσης και τεκμηρίωσης αλλά και λόγω της αυξημένης ζήτησης για πρακτική εφαρμογή τους στο σύνολο σχεδόν των βιομηχανικών διαδικασιών. Για το λόγο αυτό η σχετική βιβλιογραφία εμπλουτίζεται και επεκτείνεται σε βάθος και σε έκταση. Κύριο χαρακτηριστικό των προβλημάτων αυτών ότι από τη φύση τους είναι συνδυαστικά προβλήματα λόγω του μεγάλου αριθμού παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη και να μοντελοποιηθούν αλλά και των αντικρουόμενων αποφάσεων που πρέπει να εξαχθούν.

Η παρούσα εργασία μελετά πρόβλημα χρονικού προγραμματισμού σε φαρμακοβιομηχανία. Η προσπάθεια της συγκεκριμένης επιχείρησης για αύξηση του μεριδίου της στην αγορά στηρίζεται στη δυνατότητα γρήγορης απόκρισης εκτέλεσης των παραγγελιών αλλά και στον εύελικτο τρόπο αντίδρασης σε ξαφνικές μεταβολές της ζήτησης. Στην ίδια κατεύθυνση έχει προσανατολιστεί και ο υπόλοιπος

ανταγωνισμός. Οι επιχειρήσεις του είδους έχουν στραφεί στη θέσπιση ευέλικτων διαδικασιών παραγωγής πολλαπλών προϊόντων (multi-product production) που βοηθούν στην αντιμετώπιση των διαφοροποιήσεων της ζήτησης αυξάνοντας το βαθμό αξιοποίησης των πόρων και της εγκατάστασης (plant utilization) γενικότερα και κατ' επέκταση την ικανοποίηση του πελάτη.

Η αναδιαμόρφωση των δομών και διαδικασιών σε συνδυασμό με τη ρευστή κατάσταση της αγοράς έχουν καταστήσει τις εμπειρικές, απλοποιημένες ή γενικευμένες τεχνικές χρονικού προγραμματισμού ανεπαρκείς. Αποτελεί συνεπώς σημαντικό παράγοντα η βελτίωση των διαδικασιών του χρονικού προγραμματισμού που θα επιφέρει τη βελτίωση διαφόρων δεικτών (utilization, flexibility, lead time, costs).

1.2. Μοντέλα για αυτοματοποιημένο χρονικό προγραμματισμό παραγωγής

1.2.1. Μέθοδοι Μαθηματικού Προγραμματισμού

Τα προβλήματα σχεδιασμού¹ και κυρίως χρονικού² προγραμματισμού είναι πολύ δύσκολο να επιλυθούν με αποτελεσματικό (βέλτιστο) τρόπο. Η λύση τέτοιου είδους προβλημάτων απαιτεί χρήση μεθόδων οι οποίες αναζητούν είτε τη βέλτιστη λύση μέσα στο χώρο των πιθανών λύσεων, όσον αφορά την καθοριζόμενη αντικειμενική συνάρτηση, είτε εναλλακτικά μια ικανοποιητική λύση, υποβέλτιστη, σύμφωνα με προκαθορισμένα κριτήρια. Στη βιβλιογραφία υφίστανται διάφορες μέθοδοι αναζήτησης με το Μαθηματικό Προγραμματισμό (mathematical programming (MP)) να είναι η ευρύτερα απαντώμενη μέθοδος επίλυσης προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού για βιομηχανίες διαδικασιών (process industries). Η εκτενέστερα μελετημένη μέθοδος για προβλήματα σχεδιασμού συνεχών γραμμών παραγωγής (campaign)³ και προγραμματισμού διαδικασιών είναι ο Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (Μ.Α.Γ.Π., Mixed Integer Linear Programming - MILP), ο οποίος λόγω της αυστηρότητας του από τη μία πλευρά και της ευελιξίας του από την άλλη καθίσταται χρήσιμος για τη μοντελοποίηση και επίλυση πραγματικών προβλημάτων (real-world problems).

Τα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού συχνά περιλαμβάνουν διακριτές αποφάσεις όπως ανάθεση εξοπλισμού ή κατανομή εργασιών εντός δεδομένου χρονικού διαστήματος και γι' αυτό απαιτούνται ακέραιες μεταβλητές. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται MILP έναντι των αποτελεσματικότερων αλλά λιγότερο ακριβών μεθόδων Γραμμικού Προγραμματισμού (Linear Programming - LP).

¹ Το πρόβλημα του σχεδιασμού αποσκοπεί στην αναζήτηση σχεδίων (plan) για την επίτευξη στόχων. Πρόκειται δηλαδή διαδικασία λήψης αποφάσεων και η επίλυση του είναι η κατάρτιση αλληλουχίας δραστηριοτήτων που οδηγούν στην επίτευξη του στόχου. Αποτελεί προγραμματισμό σε υψηλότερο επίπεδο.

² Ο χρονικός προγραμματισμός πραγματεύεται το πρόβλημα της ακριβούς ανάθεσης ενεργειών σε πόρους (ή το αντίστροφο) λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς προτεραιοτήτων, διάρκειας, δυναμικότητας συμβατότητας κα.

³ Στη Συνεχής Γραμμή Παραγωγής (campaign or long campaign) περιορισμένος αριθμός προϊόντων παράγεται σε σχετικά μεγάλες ποσότητες. Χρησιμοποιείται εξειδικευμένος εξοπλισμός και υφίσταται συνεχής ροή υλικών χωρίς να είναι σαφή τα σημεία έναρξης και ολοκλήρωσης. Στον αντίποδα, στην παραγωγή παρτίδων (batch mode) παράγεται σε μικρές ποσότητες μεγάλος αριθμός διαφορετικών προϊόντων. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι γενικού σκοπού (multi-purpose). Ακολουθούνται συγκεκριμένοι κανόνες κατασκευής και είναι σαφώς ορισμένα τα σημεία έναρξης, πέρατος καθώς και τα ενδιάμεσα βήματα (Kallrath, 2002).

Όταν η υπό μελέτη παραγωγική διαδικασία διαθέτει σημαντικά μη γραμμικά χαρακτηριστικά (όπως συχνά συμβαίνει στον προγραμματισμό παραγωγής σε πραγματικό χρόνο ή σε προβλήματα ελέγχου) είναι απαραίτητες γραμμικές προσεγγίσεις για τις μη γραμμικές λειτουργίες ή εναλλακτικά να χρησιμοποιούνται μέθοδοι Μη Γραμμικού Προγραμματισμού (Non Linear Programming) ή Μικτού Ακέραιου Μη Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed Integer Non Linear Programming – MINLP). Τέλος υπάρχουν στις περιπτώσεις περιγραφής και μοντελοποίησης διαδικαστικών λειτουργιών (process operations) απαιτείται η χρήση μορφοποιήσεων Τετραγωνικού Προγραμματισμού (Quadratic Programming - QP) ή Μικτού Ακέραιου Τετραγωνικού Προγραμματισμού (Mixed Integer Quadratic Programming – MIQP).

Γενική παρουσίαση μοντέλων Επιχειρησιακής Έρευνας για το χρονικό προγραμματισμό συναντώνται ευρέως στη βιβλιογραφία όπου και αναφέρονται διάφορες μορφοποιήσεις και προσεγγίσεις. Μεγάλος είναι και ο αριθμός μοντελοποιήσεων προβλημάτων σχεδιασμού και χρονικού προγραμματισμού που έχουν προταθεί ειδικά για περιπτώσεις εφαρμογών διαδικασιών. Σε αντίθεση με τα γενικά μοντέλα της επιχειρησιακής έρευνας για χρονικό προγραμματισμό, στα μοντέλα όπου γίνεται και περιγραφή διαδικασιών η προσέγγισή τους απαιτεί επιπλέον τη χρήση εξισώσεων ισοζυγίου ποσοτήτων υλικών (material flow) και τοπολογίας του δικτύου (network topology) και για το λόγο διαφοροποιούνται αισθητά από τα παραδοσιακά σειριακά (serial) ή πολυεπίπεδα (multistage) συστήματα παραγωγής. Επιπλέον καλούνται να αντιμετωπίσουν προβλήματα παρτίδων ή/και συνεχούς παραγωγής ή διαδικασιών και γι' αυτό ενδέχεται να απαιτείται η χρήση λεπτομερών μη γραμμικών μοντέλων διαδικασιών.

Η φύση των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού γενικώς απαιτεί συχνά και τη χρήση ακεραίων μεταβλητών για την περιγραφή διακριτών αποφάσεων όπως προαναφέρθηκε. Στην επίλυση του γραμμικού προγραμματισμού εγείρονται ειδικά προβλήματα από την ακεραιότητα των μεταβλητών. Το συνδυασμένο εύρος των πιθανών λύσεων καθιστούν το χρονικό προγραμματισμό διαδικασιών των πραγματικών προβλημάτων σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης που κατατάσσεται στην κατηγορία των NP-Hard προβλημάτων. Στις περιπτώσεις αυτού του είδους προβλημάτων δηλαδή δεν υφίσταται γνωστός αλγόριθμος πολυωνυμικής πολυπλοκότητας (σε σχέση με το μέγεθος του προβλήματος) και η πολυπλοκότητα των αλγορίθμων να αυξάνεται εκθετικά ακόμα και με μικρή αύξηση του αριθμού των παραμέτρων. Το γεγονός αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις στην επίλυση των προβλημάτων καθώς οποιαδήποτε, έστω και μικρή, αύξηση του μέγεθος του προβλήματος μπορεί να επιφέρει αύξηση του χρόνου επίλυσης, της υπολογιστικής πολυπλοκότητας και εν γένει των υπολογιστικών απαιτήσεων (Garey & Johnson, 1979).

Με τη χρήση ακριβών μέθοδοι (exacts methods) όπως μέθοδοι Μ.Α.Γ.Π., είναι αδύνατο σε ορισμένες περιπτώσεις να βρεθούν ακέραιες λύσεις καθώς ακέραιες εφικτές λύσεις βρίσκονται στα άκρα του χώρου αναζήτησης. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι τα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού επιδέχονται δύσκολα γραμμική χαλάρωση (LP relaxation) και σε πολλές περιπτώσεις είναι εξαιρετικά δύσκολο να εξαχθούν χρήσιμα ανώτερα και κατώτερα όρια της βέλτιστης λύσης.

1.2.2. Η Αναπαράσταση του Χρόνου

Λόγω της υπολογιστικής πολυπλοκότητας των συνδυαστικών προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού είναι σημαντικό να αναπτυχθούν αποτελεσματικές μαθηματικές μορφοποιήσεις μοντελοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας και είναι εξίσου σημαντικό να αναζητηθούν αποδοτικές προσεγγίσεις επίλυσης. Οι προσεγγίσεις Μ.Α.Γ.Π. για προβλήματα χρονικού προγραμματισμού που περιγράφονται στη βιβλιογραφία διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο αναπαράσταση του χρόνου και αποτελεί το πρώτο και σημαντικότερο θέμα που εμφανίζεται κατά την μαθηματική μορφοποίηση οποιουδήποτε προβλήματος χρονικού προγραμματισμού.

Η επιλογή του τρόπου αναπαράστασης του χρόνου είναι καίριο θέμα στα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού και αποτελεί κριτήριο κατάταξης των προβλημάτων του είδους. Σε ορισμένες μελέτες γίνεται χρήση διακριτής αναπαράστασης του χρόνου ενώ σε άλλες γίνεται χρήση συνεχούς μορφοποίησης. Η πρώτη κατηγορία μορφοποιήσεων είναι αποτέλεσμα των αρχικών προσπαθειών μοντελοποίησης διαδικασιών χρονικού προγραμματισμού και σ' αυτές ο χρονικός ορίζοντας διαιρείται σε χρονικά διαστήματα ίσου μεγέθους τα γεγονότα λαμβάνουν χώρα στην αρχή και το τέλος των διαστημάτων αυτών (Floudas & Lin, 2004).

Στη μορφοποίηση συνεχούς χρόνου ο χρονικός ορίζοντας διαιρείται σε λιγότερα διαστήματα το εύρος των οποίων αποφασίζεται σαν μέρος του υπό λύση προβλήματος. Τα γεγονότα σ' αυτή την περίπτωση μπορούν να συμβούν σε οποιοδήποτε σημείο του συνεχούς πεδίου του χρόνου.

Γενικά οι μορφοποιήσεις διακριτού χρόνου έχουν κοινό σύστημα αναφοράς (grid) για όλους τους πόρους του συστήματος ενώ στις μορφοποιήσεις συνεχούς χρόνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο κοινό όσο και εξειδικευμένο (individual grid) σύστημα αναφοράς.

Στα κύρια χαρακτηριστικά των μορφοποιήσεων διακριτού χρόνου συγκαταλέγεται το γεγονός ότι είναι γενικώς ευέλικτες και μπορούν να υιοθετούν πολλά χαρακτηριστικά χρονικού προγραμματισμού για διάφορους τύπους εργοστασιακών διατάξεων. Έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε ποικίλα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε πρακτικό επίπεδο βιομηχανιών. Εντούτοις παρουσιάζουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα:

- i. Η αναπαράσταση του πεδίου ορισμού του χρόνου, ο οποίος είναι από τη φύση του συνεχές μέγεθος, είναι προσεγγιστική, γεγονός που δημιουργεί στο αναπτυσσόμενο μοντέλο εγγενείς αδυναμίες και ανακρίβειες καθιστώντας συνεπώς τη λύση υποβέλτιστη και
- ii. ο μεγάλος αριθμός περιορισμών και δυαδικών μεταβλητών που σχετίζονται με τα διακριτοποιημένα χρονικά διαστήματα που απαιτούνται για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια και πιστότερη προσέγγιση των πραγματικών βιομηχανικών εφαρμογών και οδηγεί κατά συνέπεια σε μεγάλο μέγεθος μοντέλα με αυξημένες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος (Floudas & Lin, 2004).

Επιπρόσθετα με τη διακριτοποίηση είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν λειτουργίες που εξαρτώνται από το μέγεθος της παραγόμενης παρτίδας. Η μοντελοποίηση συνεχών ή ημι-συνεχών λειτουργιών θα πρέπει να είναι προσεγγιστική και η πολύ πυκνή διαμέριση αυξάνει αισθητά το μέγεθος του μοντέλου.

Οι πιο πάνω αδυναμίες των διακριτών μορφοποιήσεων του χρόνου αποτέλεσε την αιτία για τον περιορισμό τους και ώθησαν, την τελευταία δεκαπενταετία, την ανάπτυξη αντίστοιχων μορφοποιήσεων συνεχούς χρόνου με πολλά πλέον μοντέλα να βασίζονται σ' αυτή την προσέγγιση. Οι μορφοποιήσεις συνεχούς χρόνου εξαλείφουν ένα μεγάλο μέρος των ανενεργών χρονικών διαστημάτων (και των αντίστοιχων μεταβλητών) που υφίστανται στην πρώτη κατηγορία, ενώ εισάγονται μεταβλητές για τον καθορισμό του χρονικού σημείου που λαμβάνουν χώρα τα διάφορα γεγονότα. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται για την ακριβή περιγραφή του προβλήματος περιορισμοί πολυπλοκότερης μορφής, γεγονός που δυσχεραίνει την μοντελοποίηση (Floudas & Lin, 2004).

Η πλειονότητα μορφοποιήσεων διακριτού χρόνου μπορεί να χρησιμοποιεί είτε κοινό σύστημα αναφοράς για τα γεγονότα (global event based – common grid) είτε σύστημα αναφοράς κάθε γεγονότος ξεχωριστά (unit-specific event based – individual grid). Πρόσφατες προσεγγίσεις ακολουθιακών διαδικασιών (sequential process) βασίζονται στην έννοια της προτεραιότητας παρτίδων (με το ίδιο τρόπο μπορεί να γίνει χειρισμός εργασιών (tasks) ή παραγγελιών (orders)), όπου γίνεται εισαγωγή μεταβλητών για την περιγραφή των σχέσεων προτεραιότητας των διαφορετικών παρτίδων και χρήση περιορισμών που χρησιμοποιούνται για να εξασφαλιστεί η σωστή ακολουθία των εργασιών παραγωγής.

Διάφορα παραδείγματα μορφοποιήσεων του προβλήματος της γενικής προτεραιότητας παρτίδων παρέχονται στη βιβλιογραφία. Οι προσεγγίσεις αυτές έχουν αναπτυχθεί σε πολλές εκδοχές, για διάφορα είδη βιομηχανιών παραγωγής ή διαδικασιών, πολλαπλών (multiproduct batch) ή μη παρτίδων, ενός ή πολλών σταδίων, με περιορισμού ή όχι των διαφόρων πόρων κα. Οι προσεγγίσεις χρησιμοποιούν ανεξάρτητα σύνολα δυαδικών μεταβλητών για το χειρισμό αποφάσεων ανάθεσης και αλληλουχίας που λαμβάνουν υπ' όψη τις χρονικές εξαρτήσεις των ακολουθιών μέσω αποδοτικών μορφοποιήσεων των περιορισμών ακολουθίας (sequencing constraints) που δεν απαιτούν τη χρήση επιπλέον μεταβλητών και περιορισμών. Σε πολλές πάντως περιπτώσεις οι χρησιμοποιούμενες μορφοποιήσεις αποδεικνύονται απλουστευτικές και προσεγγιστικές των πραγματικών συνθηκών παραγωγής καθώς αδυνατούν να ενσωματώσουν το σύνολο των παραγόντων και παραμέτρων του (σταθερών ή στοχαστικών).

1.2.3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση και Πρόσφατες Εξελίξεις

Η βιβλιογραφία, ο κύριος όγκος της οποίας συγκεντρώνεται στις δύο τελευταίες δεκαετίες, περιλαμβάνει εργασίες που απαντούν στα νέα ερωτήματα και ανοικτά θέματα της κάθε περιόδου και συντελεί στην εξέλιξη της έρευνας των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού σε ακαδημαϊκό ή πρακτικό επίπεδο. Παράλληλα, ανασκοπήσεις (reviews) σε παλαιότερα πεδία, συνοψίζουν τη συντελούμενη πρόοδο σε ειδικές ή γενικές πτυχές θέτοντας επιπλέον νέα ερωτήματα και νέες προκλήσεις.

Επιχειρώντας συνοπτική και ενδεικτική βιβλιογραφική παράθεση (ανασκόπηση) εντοπίζεται μεγάλος αριθμός εργασιών στις οποίες αποτυπώνεται η στενή σχέση και η σύνδεση μεταξύ σχεδιασμού και χρονικού προγραμματισμού. Σε πολλές περιπτώσεις, κοινό στοιχείο αποτελεί η παραγωγή σε μορφή παρτίδων (batch mode), λαμβάνοντας υπόψη σε πολλές απ' αυτές και τη υπεισερχόμενη αβεβαιότητα στις παραμέτρους του συστήματος παραγωγής, (Reklaitis, 1992), (Ripin, 1993).

Σε άλλες εργασίες περιγράφονται υφιστάμενες μέθοδοι βασισμένες σε μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού (και οι αντίστοιχες μέθοδοι επίλυσης) σαν αποδοτικά εργαλεία για την ολοκλήρωση ακόμη και σε τακτικό ή/και στρατηγικό επίπεδο, με ή χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η στοχαστικότητα (Bassett, και συν., 1996b).

Άλλη κατηγορία εργασιών συσχετίζει την επίλυση των προβλημάτων σχεδιασμού και χρονικού προγραμματισμού με την αντίστοιχη ανάπτυξη ειδικών εφαρμογών λογισμικού (Applequist, Semikoglu, Pekny, & Reclaitis, 1997). Σε σημαντικό αριθμό εργασιών συνηθίζεται η σύγκριση αποτελεσμάτων και η αναζήτηση συσχετισμών από τη εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων επίλυσης στο ίδιο πρόβλημα ή και το αντίστροφο η χρήση δηλαδή κοινής μεθόδου σε ενδεχομένως φαινομενικά διαφορετικά προβλήματα ενώ σε κάποιες άλλες έρευνες μελετώνται διαφορετικές μορφοποιήσεις σε απλουστευμένες περιπτώσεις με έμφαση σε τυπικές μαθηματικές μεθόδους, εστιάζονται και εφαρμόζοντας έπειτα τα αποτελέσματα σε γενικότερες περιπτώσεις σχεδιασμού παραγωγής (Shah, 1998).

Σημαντική είναι και η κατηγορία εργασιών στις οποίες διερευνάται η επίπτωση που έχουν στη χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία επίλυσης η φύση και τα χαρακτηριστικά των προβλημάτων σχεδιασμού και χρονικού προγραμματισμού. Παράλληλα με τις παραπάνω κατηγορίες εργασιών κάνουν την εμφάνιση τους νέες και περισσότερο εξελιγμένες τεχνικές χρονικού προγραμματισμού (ενδεικτικά rule-based methods, constraint guided search, simulation-based strategies) καθώς και μορφοποιήσεων μαθηματικού προγραμματισμού χρησιμοποιώντας συμβατικούς και μηχανικούς (engineered) αλγόριθμους επίλυσης (Pekny & Reklaiti, 1998).

Για το σημαντικό θέμα της αναπαράστασης του χρόνου δεν έχει υπάρξει έως τώρα μια μοναδική επικρατούσα μορφοποίηση ούτε έχουν εξαχθεί γενικευμένα συμπεράσματα που να προκρίνουν τη μια έναντι της άλλης από πλευρά υπολογιστικής αποδοτικότητας και καταλληλότητας για πραγματικά προβλήματα της παραγωγικής βιομηχανίας ή της βιομηχανίας διαδικασιών. Σε διάφορες εργασίες έχουν αναλυθεί και εντοπιστεί έμμεσες σχέσεις μεταξύ μορφοποιήσεων διακριτού και συνεχούς χρόνου που καταλήγουν στο (ενδιαφέρον) συμπέρασμα ότι υπό προϋποθέσεις μπορεί να εφαρμοστεί μέθοδος που αναπτύχθηκε για τη μία μορφοποίηση αντικαθιστώντας την άλλη. Σε διαφορετικές εργασίες επιχειρείται σύγκριση διαφόρων μορφοποιήσεων για ειδικές περιπτώσεις βιομηχανιών ή βιομηχανικών διατάξεων καταλήγοντας σε εξειδικευμένα συμπεράσματα τόσο για τα αποτελέσματα που προκύπτουν ή για τη γενικότερη χρησιμότητα των μοντέλων και των μορφοποιήσεων ανά περίπτωση.

Ελάχιστες είναι οι εργασίες που παρουσιάζουν ταυτόχρονη εμπειριστατωμένη σύγκριση των δύο μεθόδων και στην περίπτωση αυτή η σύγκριση υπολείπεται αντικειμενικότητας καθώς γίνεται συ-

νήθως από ερευνητικές ομάδες που βασίζουν την εργασίας τους στο ένα από τα δυο είδη μορφοποίησης. Επιπλέον, τα μοντέλα σπανίως δοκιμάζονται σε εκτενείς μελέτες περίπτωσης της βιομηχανικής πραγματικότητας. Η επιλογή του είδους της μορφοποίησης παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του προβλήματος που υπόκειται σε έρευνα και δοκιμή (επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας, μέγεθος του προβλήματος κα) και για το λόγο αυτό δύσκολα εξάγονται γενικευμένα συμπεράσματα.

Παρά τη πρόοδο των τελευταίων ετών πολλά σημαντικά θέματα παραμένουν άλυτα και νέες προκλήσεις εμφανίζονται στην αντιμετώπιση των προβλημάτων σχεδιασμού και χρονικού προγραμματισμού της παραγωγής. Καινούριοι τύποι και χαρακτηριστικά προβλημάτων προκύπτουν και εισάγονται στην έρευνα αυξάνοντας την πολυπλοκότητα των δομών των μοντέλων καθώς και την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς για την επίλυση πραγματικών προβλημάτων μεγάλης κλίμακας.

Η συγκεκριμένη μελέτη ερευνά το ίδιο πρόβλημα χρονικού προγραμματισμού και με τις δύο μεθόδους, χωρίς να είναι γνωστή εκ των προτέρων ποία θα μπορούσε να είναι καταλληλότερη. Γίνεται σύγκριση και εκτίμηση της υπολογιστικής δυσκολίας και προσπάθεια να εξαχθούν τα υπέρ και κατά της κάθε μορφοποίησης χωρίς όμως τα συμπεράσματα να αποτελούν γενική επιχειρηματολογία υπέρ της μιας της άλλης προσέγγισης επίλυσης πραγματικών προβλημάτων μεγάλης κλίμακας.

Κεφάλαιο 2- Περιγραφή του Προβλήματος και των Περιορισμών

2.1. Γενικά χαρακτηριστικά των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού

Το πρόβλημα ενδιαφέροντος του χρονικού περιορισμού είναι να καθοριστεί αποτελεσματικός τρόπος παραγωγής προϊόντων σε καθορισμένο χρονικό ορίζοντα, ικανοποιώντας δεδομένο σύνολο προδιαγραφών και περιορισμού πόρων με βέλτιστο τρόπο (Floudas & Lin, 2005). Ο χρονικός προγραμματισμός, κατά την τελευταία εικοσαετία, έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας, βρίσκοντας ταυτόχρονα ολοένα και ευρύτερη απήχηση και εφαρμογή στο σύνολο σχεδόν των βιομηχανικών διαδικασιών. Ο λόγος είναι διττός. Πρώτον, επειδή αντικατοπτρίζει την ανάγκη που προκύπτει από την πίεση που αντιμετωπίζουν οι βιομηχανίες (διαδικασιών ή παραγωγής προϊόντων) για βελτίωση της παραγωγικότητας τους και της μείωσης του κόστους. Δεύτερον, διότι οι εξελίξεις στο πεδίο της αντιμετώπισης των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού καθοδηγούνται και υποστηρίζονται από την ουσιαστική πρόοδο και τη συνεχή βελτίωση των τεχνικών μοντελοποίησης και επίλυσης σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη αύξηση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος, καθιστώντας τον πλέον οικείο εργαλείο.

Στα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού (π.χ.π) εντοπίζεται ένα σύνολο κοινών χαρακτηριστικών που τα συνθέτουν όπως π.χ. η ανάθεση εργασιών σε εξοπλισμό (equipment-task assignment), η ακολουθία (sequence) και συγχρονισμός (timing) ενεργειών κα. Παρά την ύπαρξη όμως κοινών στοιχείων αναφοράς, παρόμοια ή διαφορετικά προβλήματα ενδέχεται να παρουσιάζουν αισθητά διαφορετικές απαιτήσεις ή βαθμό δυσκολίας στη μοντελοποίηση ορισμένων διαδικασιών τους (Floudas & Lin, 2004).

Τα κυριότερα κοινά χαρακτηριστικά των π.χ.π. θα μπορούσαν να συγκεντρωθούν και να περιγραφούν: στην Αλληλουχία Διαδικασιών (Processing sequences) όπου βάσει της πολυπλοκότητας της παραγωγικής διαδικασίας για multiproduct/multipurpose εργοστασιακές διατάξεις, οι διαδικασίες μπορούν να ταξινομηθούν σε διαδοχικές διαδικασίες (sequential processes) και στις δικτυακά αναπαριστώμενες διαδικασίες. Στην μεν πρώτη περίπτωση ομοειδή προϊόντα ακολουθούν κοινή διαδοχή διαδικασιών, με ένα ή περισσότερα ενδιάμεσα στάδια παραγωγής με τον εξοπλισμό αποτελούμενο από μια μονάδα ή από περισσότερες παράλληλες μεταξύ τους παραγωγικές μονάδες. Η παρτίδα στην περίπτωση αυτή αποτελεί την παραγόμενη μονάδα και δεν απαιτείται να ληφθεί υπόψη το ισοζύγιο μαζών. Στην άλλη πλευρά υπάρχουν οι Δικτυακά αναπαριστώμενες διαδικασίες (Network-represented processes). Χρήση αυτών γίνεται όταν διαδικασίες και φασεολόγια (production recipes) γίνονται πολύπλοκα και τα παραγόμενα προϊόντα παρουσιάζουν ελάχιστες ομοιότητες μεταξύ τους. Τότε για την αναπαράσταση της παραγωγικής ακολουθίας χρησιμοποιούνται διαδικασίες που αναπαριστώνται με τη μορφή δικτύου. Η μορφή αυτή ανταποκρίνεται στη γενικότερη περίπτωση όπου οι παρτίδες μπορούν να διασπώνται (split) ή να ενώνονται (merged) και στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητο να ληφθεί υπ' όψη το ισο-

ζύγιο ποσοτήτων των υλικών. Για την περίπτωση αυτή έχει προταθεί (Kondili, Pantelides, & Sargent, 1993) γενικό πλαίσιο που αποδίδει τέτοιου είδους διαδικασίες μέσω των State-Task δικτύων (State-Task Network - STN). Οι αναπαραστάσεις αυτές αποτελούνται από δυο διαφορετικά είδη κόμβων τους κόμβους κατάστασης (state nodes) και τους κόμβους εργασιών (task nodes). Στα εποπτικά αυτά διαγράμματα αναγράφονται επίσης και οι ποσότητες υλικών που καταναλώνονται ή παράγονται από μια εργασία. Επέκταση και εξέλιξη του STN αποτέλεσε το Resource-Task δίκτυο (Resource- Task Network - RTN) (Pantelides, 1993), όπου επιπροσθέτως περιγράφονται αποθηκευτικά στάδια, μεταφορές υλικών ενώ απεικονίζεται και ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός. Σ' αυτού του είδους την απεικόνιση, εργασίες που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικού είδους μηχανές αντιμετωπίζονται σαν διαφορετικές εργασίες.

Οι πολιτικές ενδιάμεσης (ή/και τελικής) αποθήκευσης παίζουν σημαντικό ρόλο στη διατύπωση και μοντελοποίηση του προβλήματος. Διακρίνονται τέσσερις κύριες κατηγορίες που είναι: η απεριόριστη ενδιάμεση αποθήκευση (Ultimate intermediate storage - UIS) που δεν απαιτείται μοντελοποίηση του επιπέδου αποθεμάτων, η ανυπαρξία ενδιάμεσης αποθήκευσης (No intermediate storage - NIS) όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμοι ενδιάμεσοι αποθηκευτικοί χώροι (εντούτοις υλικά ή προϊόντα μπορούν να παραμείνουν και μετά το τέλος της εργασίας στην μονάδα επεξεργασίας μέχρι την μεταφορά τους στο επόμενο στάδιο), η περίπτωση της μηδενικής αναμονής (Zero-wait - ZW) στην οποία τα ενδιάμεσα υλικά απαιτείται να καταναλωθούν ή να προωθηθούν άμεσα μετά την παραγωγή τους. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να διατυπωθούν ειδικοί χρονικοί περιορισμοί και τέλος η περίπτωση του πεπερασμένου ενδιάμεσου αποθηκευτικού χώρου (Finite intermediate storage - FIS) που αποτελεί και τη γενικότερη περίπτωση.

Άλλο κοινό χαρακτηριστικό των π.χ.π. αποτελούν οι μεταβάσεις/αλλαγές (changeovers) όπου διακρίνονται τρεις κύριοι τύποι· οι μεταβάσεις εξαρτώμενες από την ακολουθία των εργασιών (Sequence dependent) όπου για αλλαγές μεταξύ εργασιών σε κοινή παραγωγική μονάδα ενδέχεται να είναι απαραίτητος ο καθαρισμός ή η εκ νέου ρύθμιση της (για λόγους ασφαλείας, ποιότητας κτλ), οι μεταβάσεις εξαρτώμενες από το χρόνο ή τη συχνότητα (Time or frequency dependent) που πρέπει να γίνεται μετά από συγκεκριμένο χρόνο ή αριθμό παρτίδων και η περίπτωση όπου κανένας περιορισμός μετάβασης μεταξύ διαδοχικών εργασιών στην ίδια μονάδα παραγωγής δεν υφίσταται.

Λειτουργικές καταστάσεις των εργασιών επεξεργασίας, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε εργασίες παραγωγής παρτίδων και σε συνεχείς εργασίες. Στην πρώτη περίπτωση για την δημιουργία παρτίδων (batch tasks) οι διάφορες προς επεξεργασία ύλες τροφοδοτούνται στην έναρξη της διαδικασίας και στο πέρας της λαμβάνονται τα προϊόντα. Στην περίπτωση των συνεχόμενων διαδικασιών (continuous tasks) τα διάφορα υλικά τροφοδοτούνται, με συνεχή ροή, καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας και αντίστοιχα προκύπτουν συνεχώς προϊόντα με σταθερούς ή μεταβλητούς ρυθμούς παραγωγής.

Για τα πρότυπα ζήτησης (Demand patterns) υφίστανται δύο κατηγορίες: η παράδοση των προϊόντων να ορίζεται στο τέλος του εξεταζόμενου χρονικού ορίζοντα ή να ζητείται κάλυψη της ζήτησης και σε ενδιάμεσες χρονικές στιγμές, εντός του εξεταζόμενου χρονικού ορίζοντα. Η εκτίμηση διαθέσι-

μων πόρων (Resource considerations) παρουσιάζεται με δύο κυρίως μορφές: τους ανανεώσιμους πόρους (Renewable resource), διάφορα δηλαδή υλικά, συστήματα κτλ απαραίτητα για την παραγωγή (πχ ατμός, ηλεκτρική ισχύς, εργατικό δυναμικό κτλ), τα οποία θεωρείται ότι ανανεώνονται πλήρως με το πέρασμα της διαδικασίας και η περίπτωση όπου δεν υφίσταται κανένας περιορισμός πόρων.

Τυπικά παραδείγματα γενικών αντικειμενικών συναρτήσεων που καλούνται να βελτιστοποιηθούν στα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραγωγής (Minimize makespan), δεδομένου δηλαδή των παραγωγικών απαιτήσεων και άλλων περιορισμών, η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιεί το χρόνο ολοκλήρωσης της συνολικής διαδικασίας. Σε άλλη περίπτωση είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση της πρώιμης ολοκλήρωσης⁴/καθυστέρησης/κόστους (Minimize earliness/tardiness/cost), δεδομένου δηλαδή των παραγωγικών απαιτήσεων ο βέλτιστος χρονικός προγραμματισμός εκτιμάται βάσει της ελαχιστοποίησης του κόστους (παραγωγής ή άλλου) ή κάποιας χρονικής παραμέτρου που εμμέσως μεταφράζεται σε κόστος (μέσω αποκλίσεων από τις καθορισμένες διορίες παράδοσης). Η μεγιστοποίηση του κέρδους (Maximize profit), όπου δεδομένου του διαθέσιμου εξοπλισμού και των υπολοίπων πόρων, η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζει το βέλτιστο προγραμματισμό με τη μέγιστη αξία του συνολικού κέρδους σε συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα (Floudas & Lin, 2004). Γενικώς στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί δεκάδες αντικειμενικές συστήσεις προς βελτιστοποίηση (Mellor, 1966).

Γενικά, η πολυπλοκότητα και η συνδυαστική φύση των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού απαιτεί την ανάπτυξη αποτελεσματικών σχημάτων για την οργάνωση του μεγάλου ποσού πληροφοριών και τη μοντελοποίηση τους. Για να επιτευχθεί συστηματοποίηση της αναπαράστασης του μεγάλου πεδίου των προβλημάτων του χρονικού προγραμματισμού προτάθηκε (Zentner, Elkamel, Pekny, & Reklaitis, 1998) γλώσσα υψηλού επιπέδου σαν ένα γενικό, συμπαγές και ανεξάρτητο μέσο για την έκφραση της μεγάλης ποικιλίας των προβλημάτων του χρονικού προγραμματισμού. Παράλληλα όμως υποστηρίχθηκαν και απόψεις (Honkomp, Lombardo, Rosen, & Pekny, 2000) σύμφωνα με τις οποίες το πλήθος και η ύψη όλων των χαρακτηριστικών των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού που περιγράφηκαν παραπάνω (περιορισμοί αποθεμάτων, κοινή χρήση πόρων, χρονισμός αναθέσεων ενεργειών κτλ) αυξάνουν τη δυσκολία του προβλήματος σε τέτοιο βαθμό που η τακτική χρήση των τεχνολογιών χρονικού προγραμματισμού να αποτελεί ακόμη πρόκληση.

Για τη μαθηματική μορφοποίηση οποιουδήποτε προβλήματος χρονικού προγραμματισμού διαδικασιών το πρώτο σημαντικό θέμα που εγείρεται είναι αυτό της αναπαράστασης του χρόνου. Όλα τα υφιστάμενα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού κατηγοριοποιούνται σε δύο κύριες κατηγορίες:

⁴ Η πρώιμη ολοκλήρωση (και αποδέσμευση) δεν αποτελεί πάντα επιθυμητό φαινόμενο, όπως για παράδειγμα η νωρίτερη αναχώρηση αεροσκάφους στο πρόγραμμα πτήσεων ενός αεροδρομίου.

στις μοντελοποιήσεις του διακριτού χρόνου και σ' αυτές του συνεχούς χρόνου (χαρακτηριστικά των οποίων έχουν αναφερθεί παραπάνω και αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια).

Η εργασία μελετά πραγματικό πρόβλημα και συγκρίνει τον προγραμματισμό παραγωγής δευτερογενούς μονάδα παρασκευής φαρμάκων με δύο διαφορετικές μοντελοποιήσεις. Η βιομηχανία της μελέτης περίπτωσης είναι μονάδα καθοδηγούμενη από τις παραγγελίες (order-oriented), με διακριτά στάδια παραγωγής (multistage) μεγάλης ποικιλίας οικογενειών προϊόντων (multi-product). Ο εξοπλισμός της μονάδας αποτελείται από πολλαπλής χρήσης (multi-purpose) μη σχετιζόμενες (unrelated) μηχανές σε κάθε στάδιο παραγωγής που παράγουν παρτίδες προϊόντων (batch mode). Οι μηχανές κάθε σταδίου εργάζονται παράλληλα και είναι διαφορετικής δυναμικότητας. Στη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας καταναλώνονται πόροι, το είδος των οποίων εξαρτάται από το παραγόμενο προϊόν και τη χρησιμοποιούμενη μηχανή. Συνολικά παράγονται 40 οικογένειες προϊόντων που περιλαμβάνουν 1000 διαφορετικά προϊόντα, με μέσο όρο παραγγελιών στην ουρά αναμονής τις 350.

Το πλήθος όλων των προαναφερόμενων παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη συνθέτουν ένα εξαιρετικά δύσκολο πρόβλημα προς επίλυση (extremely NP-hard problem).

2.2. Διακριτός και συνεχής χρόνος στα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού

Λόγω της μεγάλης υπολογιστικής πολυπλοκότητας των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού είναι σημαντικό να αναπτύσσονται αποδοτικά μαθηματικά μοντέλα. Η αναπαράσταση του χρόνου είναι το πρώτο κύριο θέμα που προκύπτει κατά τη διαμόρφωση του μαθηματικού μοντέλου σε πρόβλημα χρονικού προγραμματισμού. Για τα υφιστάμενα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού απαντώνται στη βιβλιογραφία δύο κύριες διαφορετικές προσεγγίσεις αναπαράστασης του χρόνου: οι μορφοποιήσεις του διακριτού χρόνου και αυτές του συνεχούς χρόνου και η επιλογή της επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη δομή και το χαρακτήρα του μοντέλου.

Στη διακριτή μορφοποίηση του χρόνου ο χρονικός ορίζοντας διαιρείται σε διαστήματα ίσης διάρκειας και τα διάφορα γεγονότα λαμβάνουν χώρα είτε στην αρχή είτε στο τέλος αυτών των διαστημάτων. Στην προσέγγιση του συνεχούς χρόνου ο χρονικός ορίζοντας διαιρείται σε λιγότερα διαστήματα, το εύρος των οποίων αποφασίζεται σαν μέρος της λύσης του προβλήματος.

Η μοντελοποιήσεις που βασίζονται στη διακριτή αναπαράσταση του χρόνου είναι γενικώς πολύ ευέλικτες και προσφέρονται για λογιστικό υπολογισμό πολλών χαρακτηριστικών και παραμέτρων του προγραμματισμού. Έχουν δε χρησιμοποιηθεί σε διάφορες κατηγορίες προβλημάτων. Παρουσιάζουν όμως δύο κύρια μειονεκτήματα: ότι ο χρόνος είναι από τη φύση του συνεχές μέγεθος και γι' αυτό το λόγο η αναπαράσταση του γίνεται προσεγγιστικά και ο μεγάλος αριθμός δυαδικών μεταβλητών και περιορισμών που απαιτούνται για τη μοντελοποίηση πραγματικών βιομηχανικών προβλημάτων που απαιτούν ακριβή διακριτοποίηση.

Για την αντιμετώπιση των πιο πάνω αδυναμιών αναπτύχθηκαν μοντέλα συνεχούς χρόνου που γενικώς αποδίδουν μικρότερο αριθμό περιορισμών και δυαδικών μεταβλητών συγκρινόμενα με τις

μορφοποιήσεις διακριτού χρόνου. Εντούτοις και σ' αυτή την περίπτωση ενυπάρχουν αδυναμίες καθώς οι απαιτούμενοι περιορισμοί έχουν πολυπλοκότερη δομή η οποία αυξάνει τη δυσκολία μοντελοποίησης. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν και οι δυο μορφοποιήσεις του χρόνου, χωρίς να είναι εκ των προτέρων γνωστό ποια προσέγγιση είναι καταλληλότερη (Stefansson, Sigmarsson, Jensson, & Shah, 2011).

2.3. Παρουσίαση των μοντέλων και επεξηγήσεις των περιορισμών

Και στις δυο περιπτώσεις επίλυσης χρησιμοποιούνται τα ίδια τέσσερα είδη περιορισμών και βελτιστοποιείται η ίδια αντικειμενική συνάρτηση:

- I. Περιορισμοί κατανομής ή ανάθεσης (allocation constraints)
- II. Περιορισμοί ακολουθίας (sequencing constraints)
- III. Περιορισμοί χρήσης πόρων (resource constraints)
- IV. Περιορισμοί παράδοσης (delivery constraints)

Επεξήγηση συμβόλων - (Nomenclature)	
Δείκτες	
i/i'	Παραγγελίες
j	Μηχανές
k	Συστήματα
t	Χρονοθυρίδες (timeslot)
Σύνολα	
I	Σύνολα παραγγελιών, $i \in I$ και $i' \in I$
J	Σύνολα μηχανών, $j \in J$
K	Σύνολα συστημάτων, $k \in K$
J_i	Σύνολο μηχανών που μπορούν να εκτελέσουν την παραγγελία i , $J_i \subseteq J$
$J_{i,i'}$	Σύνολο μηχανών που μπορούν να εκτελέσουν τις παραγγελίες i και i' , $J_{i,i'} = J_i \cap J_{i'}$
K_j	Σύνολο συστημάτων k που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μηχανή j
K_{j2}	Σύνολο συστημάτων k που μοιράζονται οι μηχανές j και j' , $K_{j2} \subseteq K_j$
K_i	Σύνολο συστημάτων k που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση της παραγγελίας i
$K_{i,i'}$	Σύνολο συστημάτων k που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση των παραγγελιών i και i' , $K_{i,i'} = K_{j2} \subseteq K_j$
S	Σύνολο των χρονοθυρίδων, $t \in S$
Παράμετροι	
d_i	Η ζητούμενη ημερομηνία παράδοσης της παραγγελίας i
$p_{i,j}$	Ο χρόνος επεξεργασίας της παραγγελίας i στη μηχανή j
$u_{i,i',j}$	Ο χρόνος αλλαγής μεταξύ των παραγγελιών i και i' (την ακολουθία των παραγγελιών στη μηχανή j)
pr_i	Ο βαθμός προτεραιότητας της παραγγελίας i
tsm_k	Ο αριθμός διαθέσιμων συστημάτων
usm	Ο απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς συστήματος από μια μηχανή και ρύθμισή του σε άλλη
g	Ο απαιτούμενος χρόνος για ποιοτικό έλεγχο μετά από επεξεργασία
M	Πολύ μεγάλος αριθμός

Μεταβλητές	
ST_i	Συνεχής μεταβλητή για το χρόνο έναρξης παραγωγής της παραγγελίας i ($ST_i \geq 0$)
L_i	Συνεχής μεταβλητή, για το χρόνο καθυστέρησης (η χρονική διαφορά δηλ. μεταξύ του εκτιμώμενου χρόνου ολοκλήρωσης της παραγωγής της παρτίδας i και του χρόνου παράδοσης της)
$Y_{i,i'}$	Δυαδική μεταβλητή = 1 αν η παραγγελία i εκτελείται πριν την i' , διαφορετικά = 0, $i \neq i'$
Δυαδικές Μεταβλητές	
$W_{i,i',k}$	Δυαδική μεταβλητή = 1 αν η παραγγελία i' , η οποία χρησιμοποιεί το σύστημα k έχει ολοκληρωθεί μετά την έναρξη επεξεργασίας της i με το ίδιο σύστημα k
$X_{i,j}$	Δυαδική μεταβλητή = 1 αν η παραγγελία i εκτελείται στη μηχανή j , διαφορετικά = 0 (Χρήση στη μορφοποίηση συνεχούς χρόνου)
$X_{i,t,j,k}$	Δυαδική μεταβλητή = 1 αν η παραγγελία i εκτελείται στη μηχανή j , στο χρόνο t με το σύστημα k , διαφορετικά = 0 (Χρήση στη μορφοποίηση διακριτού χρόνου)

Η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιεί τη συνολική σταθμισμένη καθυστέρηση (weighted tardiness) παράδοσης της παραγγελίας, δηλαδή τη σταθμισμένη διαφορά μεταξύ του χρόνου ολοκλήρωσης (completion time) της παραγγελίας και του καθορισμένου χρόνου παράδοσης της (confirmed delivered date).

A. Περιορισμοί Μορφοποίησης Συνεχούς Χρόνου

I. Περιορισμός κατανομής (Allocation constraints)

Για την περιγραφή της κατανομής εργασιών σε μονάδες παραγωγής χρησιμοποιείται μια εξίσωση που ορίζεται σε δύο διαστάσεις. Το πλήθος μεταβλητών που απαιτούνται είναι $i \times j$ (Floudas & Lin, 2004).

$$\sum_{j \in J_i} X_{i,j} = 1, \forall i \in I$$

Με τον περιορισμό αυτό διασφαλίζει ότι μια παραγγελία i ανατίθεται ακριβώς σε μια μηχανή j .

Στη βιβλιογραφία περιγράφεται και μοντελοποίηση συνεχούς χρόνου στην οποία εισάγεται η έννοια του timeslot (Floudas & Lin, 2004).

Επιπλέον περιορισμοί για την περιγραφή γενικότερης περίπτωσης αναφέρονται στο παράρτημα.

II. Περιορισμοί ακολουθίας (Sequencing constraints)

Για τον προσδιορισμό της αλληλουχίας των εργασιών στις μονάδες παραγωγής απαιτούνται δυο εξισώσεις που ορίζονται σε τρεις διαστάσεις με το συνολικό αριθμό μεταβλητών να είναι ίσος με $i \times i' \times j$.

$$\left. \begin{aligned} ST_i + p_{i,j} + u_{i,i',j} + g &\leq ST_{i'} + M \cdot (1 - Y_{i,i'}) + M \cdot (2 - X_{i,j} - X_{i',j}) \\ ST_{i'} + p_{i',j} + u_{i',i,j} + g &\leq ST_{i'} + M \cdot Y_{i,i'} + M \cdot (2 - X_{i,j} - X_{i',j}) \end{aligned} \right\} \forall i, i' \in I, j \in J_{i,i'}, i \neq i'$$

Ο περιορισμός ακολουθίας εξασφαλίζει ότι η παραγωγή της παραγγελίας i' δεν μπορεί να ξεκινήσει πριν την ολοκλήρωση της παραγγελίας i . Ο περιορισμός καθίσταται ενεργός όταν οι παραγγελίες i και i' ανατίθενται στην ίδια μηχανή j (τότε ο όρος $(2 - X_{i,j} - X_{i',j})$ γίνεται ίσος με μηδέν). Στο αριθμητικό μέρος περιγράφεται το επαρκές χρονικό διάστημα που απαιτείται για την παραγωγή της παραγ-

γελίας, το απαραίτητο changeover και τον ποιοτικό έλεγχο. Στο δεξιό μέρος περιγράφεται η ανάγκη να συμβούν ταυτόχρονα και τα δύο γεγονότα: η παραγωγή της παραγγελίας i να προηγείται της i' ($1 - Y_{i,i'}$) και οι δύο παραγγελίες να ανατίθενται στην ίδια μηχανή j ($2 - X_{i,j} - X_{i',j}$). Η πρώτη των εξισώσεων χρησιμοποιείται στην περίπτωση που η παραγγελία i προγραμματίζεται πριν την i' ενώ η δεύτερη η δεύτερη για την περίπτωση που η παραγγελία i προγραμματίζεται μετά την i' .

Επιπλέον περιορισμοί για την περιγραφή γενικότερης περίπτωσης αναφέρονται στο παράρτημα.

III. Περιορισμοί χρήσης πόρων (Resource constraints)

Για την περιγραφή του περιορισμού χρήσης πόρων χρησιμοποιείται group περιορισμών αποτελούμενο από μια ομάδα δυο εξισώσεων για την περιγραφή της ανάθεσης των παραγγελιών στις μηχανές σε συνδυασμό με περιορισμό που εξασφαλίζει ότι για μηχανές είναι διαθέσιμο ένα και μόνο σύστημα k ($tsm_k=1$).

$$\left. \begin{aligned} M \cdot W_{i',k} + M \cdot (2 - X_{i,j} - X_{i',j+1}) &\geq ST_{i'} + p_{i',j+1} - ST_i + usm + g \\ M \cdot W_{i,k} + M \cdot (2 - X_{i',j} - X_{i,j+1}) &\geq ST_i + p_{i,j} - ST_{i'} + usm + g \end{aligned} \right\} \forall k, i, i' \in K_{i,i'}, j \in K_{j2}$$

$$W_{i',k} + W_{i,k} \leq 1 \forall k, i, i' \in K_{i,i'}, tsm_k = 1$$

Ο περιορισμός λειτουργεί όταν οι παραγγελίες i και i' ανατίθενται αντίστοιχα σε διαφορετικές μηχανές j και $j+1$ που χρησιμοποιούν το ίδιο σύστημα k . Η δυαδική μεταβλητή $W_{i',k}$ λαμβάνει την τιμή 1 εάν η παραγγελία i' , που χρησιμοποιεί για την παραγωγή της το σύστημα k , δεν ολοκληρώνεται όταν η παραγγελία i ξεκινά. Στο αριστερό μέρος υποδεικνύεται πως πρέπει να συμβούν και τα δύο γεγονότα ταυτόχρονα, δηλαδή οι παραγγελίες i και i' να ανατεθούν σε διαφορετικές μηχανές (j και $j+1$) που χρησιμοποιούν κοινό σύστημα k . Στο δεύτερο μέρος υπολογίζεται ο απαιτούμενος χρόνος αποτελούμενος από το usm (για το setup του συστήματος k) κατά τη μεταφορά του συστήματος από την j στην $j+1$ μηχανή.

IV. Περιορισμοί παράδοσης (Delivery constraints)

Οι περιορισμοί των χρόνων παράδοσης κάθε παραγγελίας i περιγράφονται από μια εξίσωση (ισότητα) σε δύο διαστάσεις και απαιτούνται $i \times j$ μεταβλητές. Για την περιγραφή του περιορισμού χρησιμοποιείται η συνεχής μεταβλητή L_i που αναπαριστά την καθυστέρηση της παράδοσης της παραγγελίας i , τη διαφορά δηλαδή του χρόνου παραγωγής από τον καθορισμένο χρόνο παράδοσης (confirmed delivered time). Στην περίπτωση θετικής διαφοράς ($L_i \geq 0$) υφίσταται καθυστέρηση στην παράδοση.

$$L_i = ST_i + \sum_{j \in J_i} X_{i,j} \cdot p_{i,j} - d_i = 1, \forall i \in I$$

V. Η Αντικειμενική Συνάρτηση (Objectives)

Η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιεί τη συνολική σταθμισμένη καθυστέρηση (weighted tardiness) παράδοσης της παραγγελίας, δηλαδή τη σταθμισμένη διαφορά μεταξύ του χρόνου ολοκλήρωσης (completion time) της και του καθορισμένου χρόνου παράδοσης της (confirmed delivered date) βάσει συντελεστού βαρύτητας της κάθε παραγγελίας pr_i .

$$\text{Min} \sum_{i \in I} pr_i \cdot \max \{0, L_i\}$$

B. Περιορισμοί Μορφοποίησης Διακριτού Χρόνου

I. Περιορισμός κατανομής (Allocation constraints)

Για την περιγραφή του περιορισμού κατανομής εργασιών στην περίπτωση της μορφοποίησης διακριτού χρόνου χρησιμοποιείται μια εξίσωση σε τέσσερις διαστάσεις και απαιτείται $i \times t \times j \times k$ πλήθος μεταβλητών.

$$\sum_{j \in J_i} \sum_{t \in S} \sum_{k \in K_i K_j} X_{i,t,j,k} = 1, \forall i \in I$$

Με την παραπάνω ισότητα διασφαλίζεται ότι μια παραγγελία i ανατίθεται ακριβώς στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα t , σε μια μηχανή j , με χρήση του συστήματος k .

Επιπλέον περιορισμοί για την περιγραφή γενικότερης περίπτωσης αναφέρονται στο παράρτημα.

II. Περιορισμοί ακολουθίας (Sequencing constraints)

Για την περιγραφή των περιορισμών ακολουθίας (αλληλουχίας) χρησιμοποιείται μια εξίσωση τεσσάρων διαστάσεων και απαιτούνται $i \times t \times j \times k$ μεταβλητές.

$$\sum_{k \in K_j} \sum_{i' \in J_{i',K_{i'}}} \sum_{t'=t}^{t+p_{i',j}+g-1} X_{i',t',j,k} \leq M \left(1 - \sum_{k \in K_i K_j} X_{i,t,j,k} \right), \forall i \in I, j \in J_i, t \in S$$

Ο περιορισμός ακολουθίας εξασφαλίζει ότι εάν μια παραγγελία i έχει ανατεθεί το χρονικό διάστημα t , στη μηχανή j με το σύστημα k (δηλαδή $X_{i,t,j,k}=1$), τότε καμιά άλλη παραγγελία i' δεν μπορεί να ανατεθεί (στην ίδια μηχανή j) πριν την ολοκλήρωσή της i (δηλαδή εάν δεν ολοκληρωθεί το χρονικό διάστημα που περιλαμβάνει την παραγωγή της $p_{i,j}$, τον απαιτούμενο χρόνο για το changeover $u_{i',j}$ και τον ποιοτικό έλεγχο g).

Επιπλέον περιορισμοί για την περιγραφή γενικότερης περίπτωσης αναφέρονται στο παράρτημα.

III. Περιορισμοί χρήσης πόρων (Resource constraints)

Αυτό το σύνολο περιορισμών διασφαλίζει ότι σύστημα k που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από δύο μηχανές ανατίθεται σε μία μόνο μηχανή j , σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή t . Ενεργοποιείται όταν υφίσταται μόνο ένα σύστημα k (όταν δηλαδή $t_{sm_k}=1$).

$$\sum_{i' \in J_{i',K_{i'}}} \sum_{t'=t}^{t+p_{i,j}+u_{sm}+g} X_{i',t',j+1,k} \leq M(1 - X_{i,t,j,k}), \forall k \in K, i \in K_i, j \in K_{j2}, t_{sm_k} = 1$$

$$\sum_{i' \in J_{i'}, K_i} \sum_{t'=t}^{t+p_{i,j+1}+usm+g} X_{i',t',j+1,k} \leq M(1 - X_{i,t,j+1,k}), \forall k \in K, i \in K_i, j \in K_{j2}, tsm_k = 1$$

IV. Περιορισμοί παράδοσης (Delivery constraints)

Χρησιμοποιείται η συνεχής μεταβλητή L_i που αναπαριστά την καθυστέρηση της παράδοσης της παραγγελίας i , τη διαφορά δηλαδή του προγραμματισμένου χρόνου παραγωγής από τον καθορισμένο χρόνο παράδοσης (confirmed delivered time). Στην περίπτωση θετικής διαφοράς ($L_i \geq 0$) υφίσταται καθυστέρηση στην παράδοση.

$$L_i = \sum_{j \in J_i} \sum_{t \in S} \sum_{k \in K_i K_j} X_{i,t,j,k} \cdot (t + p_{i,j}) - d_i = 1, \forall i \in I$$

V. Η Αντικειμενική Συνάρτηση (Objectives)

Η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιεί τη συνολική σταθμισμένη καθυστέρηση (weighted tardiness) παράδοσης της παραγγελίας, δηλαδή τη σταθμισμένη διαφορά μεταξύ του χρόνου ολοκλήρωσης (completion time) της και του καθορισμένου χρόνου παράδοσης της (confirmed delivered date) βάσει συντελεστού βαρύτητας της παραγγελίας.

$$\text{Min} \sum_{i \in I} pr_i \cdot \max \{0, L_i\}$$

2.4. Σύνοψη και συμπεράσματα από την παρουσίαση των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού

Τα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού αποτελούν κατηγορία πολύπλοκων συνδυαστικών προβλημάτων. Αν και η έρευνα είναι συνεχής από την ακαδημαϊκή κοινότητα και παρατηρείται ολοένα και μεγαλύτερη διεύρυνση και υιοθέτηση ως πρακτική διαδικασία για τη βιομηχανία κυρίως τελευταία εικοσαετία, η βιβλιογραφία σχετική είναι ήδη είναι αρκετά πλούσια. Σ' αυτή γίνεται προσπάθεια να συστηματοποιηθεί η μελέτη τους και να αναδειχθούν και αναλυθούν διάφορες πτυχές και χαρακτηριστικά των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού.

Κατά την μελέτη τους εντοπίζονται πολλά κοινά χαρακτηριστικά που τα συνθέτουν (όπως πχ η ανάθεση/κατανομή εργασιών σε εξοπλισμό, η αλληλουχία/χρονισμός (timing) δραστηριοτήτων κα) με διαφορετικό όμως βαθμό δυσκολίας και επίπεδο απαιτήσεων ως προς την προσέγγιση και την μοντελοποίηση τους. Σε διάφορες εργασίες αναλύονται και μοντελοποιούνται περισσότερο εξειδικευμένες πτυχές των π.χ.π. (πχ καταστάσεις και πολιτικές ενδιάμεσων αποθηκεύσεων, ενδιάμεσες ημερομηνίες παράδοσης προϊόντων, ισοζύγια ποσοτήτων υλικών, περιορισμοί ανανεώσιμων πόρων και άλλων κριτηρίων).

Σε κάθε π.χ.π. το σημαντικότερο θέμα που εγείρεται είναι η αναπαράσταση του χρόνου που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη συνολική μορφή του μοντέλου ως προς το μέγεθος και την πολυπλοκό-

τητα της δομής του. Οι μορφοποιήσεις διακριτού χρόνου εμφανίζουν περιορισμένες δυνατότητες και εφαρμογές στα πραγματικά πρακτικά προβλήματα της βιομηχανίας καθώς ή θα υπολείπονται σε ακρίβεια σε περίπτωση χονδροειδούς διαίρεσης του χρονικού ορίζοντα ή θα οδηγούν σε μεγάλο μέγεθος, δυσεπίλυτα μοντέλα. Λόγω της συνεχούς φύσης του χρόνου αποτελούν συνήθως προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης και συνήθως πρέπει να επιτευχθεί συμβιβασμός μεταξύ της ποιότητας της λύσης και της απαιτούμενης υπολογιστικής προσπάθειας.

Σε αντίθεση με τις μορφοποιήσεις διακριτού χρόνου τα μοντέλα συνεχούς χρόνου παρουσιάζονται πιο ευέλικτα, έχουν μικρότερο μέγεθος και συνεπώς η επίλυσή (τουλάχιστον υπολογιστικά) τους καθίσταται ευκολότερη. Παρουσιάζουν όμως πολυπλοκότερη δομή περιορισμών.

Για τη μείωση της δυσκολίας επίλυσης μεγάλων προβλημάτων π.χ.π. έχουν προταθεί και αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές, όπως:

- i. Μετασχηματισμού (reformulations) για μείωση του κενού (gap) μεταξύ βέλτιστης λύσης και λύσης μετά από χαλάρωση περιορισμών,
- ii. Η χρήση επιπλέον περιορισμών που μειώνουν το χώρο των δυνατών λύσεων (cut constraints, valid inequalities)
- iii. Μέθοδοι αποσύνθεσης (decomposition) που επιμερίζουν τα μεγάλα και πολύπλοκα προβλήματα σε επιμέρους μικρότερα και ευκολότερα διαχειρίσιμα.

Από την περιγραφή και την ανάλυση κάθε περιορισμού γίνονται φανερές οι διαφορές μεταξύ των ομοειδών περιορισμών σε διακριτό και συνεχή χρόνο. Διαφορές ως προς τις διαστάσεις των εξισώσεων και των απαιτούμενων μεταβλητών. Αυξάνοντας τη γενικότητα της περίπτωσης εμφανίζονται πολυπλοκότερες δομές περιορισμών για τη μοντελοποίηση.

Κεφάλαιο 3- Ανάπτυξη κωδικών για την περίπτωση της συνεχούς μορφοποίησης

3.1. Ανάπτυξη κωδικών επίλυσης του προβλήματος συνεχούς χρόνου και η βιβλιοθήκη CPLEX

Για την επίλυση και την ουσιαστικότερη διερεύνηση του προβλήματος αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού C++ με χρήση λογισμικού βελτιστοποίησης προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού CPLEX.

Το σχετικό λογισμικό προσφέρει βιβλιοθήκες για την επίλυση προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού και άλλων συναφών προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα επιλύει γραμμικά ή τετραγωνικά προβλήματα βελτιστοποίησης όπου η προς βελτιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί σαν γραμμική ή κυρτή τετραγωνική συνάρτηση. Οι μεταβλητές του μοντέλου μπορούν να δηλωθούν ως συνεχείς ή περιορίζοντας τις μόνο σε ακέραιες τιμές (IBM Corp, 2009).

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα χρονικού προγραμματισμού σκοπός είναι να προγραμματιστεί βέλτιστα το τελευταίο στάδιο παραγωγής (στάδιο συσκευασίας των προϊόντων) στο οποίο έχει διαπιστωθεί ότι λόγω των χαμηλών δυναμικοτήτων των μηχανών δημιουργείται στένωμα (bottleneck) στα προηγούμενα στάδια της γραμμής παραγωγής. Ο βέλτιστος προγραμματισμός αποσκοπεί στην ανάθεση της παραγγελίας i σε κάποια από τις παράλληλες μηχανές του σταδίου j ($X_{i,j}=I$), τον προσδιορισμό του χρόνου έναρξης παραγωγής της παραγγελίας (ST_i) και τον προσδιορισμό του κατάλληλου συστήματος⁵ παραγωγής που πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Οι κώδικες που αναπτύχθηκαν επιλύουν τη μορφοποίηση του συνεχούς χρόνου με δυο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση σε γλώσσα προγραμματισμού C++ στηρίχθηκε, στα βασικά της τμήματα, σε παλαιότερο κώδικα που αναπτύχθηκε για παρεμφερές πρόβλημα χρονικού προγραμματισμού. Αποτελείται από ένα μοναδικό σώμα κώδικα και είναι εστιασμένη στο σύνολο της διαδικασίας και όχι στα αντικείμενα (orders i , machines j , systems k) του προβλήματος. Η δομής της δε είναι απλούστερη και χαρακτηρίζεται ως μη δομημένη (Non-Structured Programming).

Η δεύτερη προσέγγιση (επίσης σε γλώσσα προγραμματισμού C++) είναι αντικειμενοστραφής (Object-Oriented) και χρησιμοποιεί κλάσεις (classes) για τον προσδιορισμό και χαρακτηρισμό των αντικειμένων. Σε κάθε κλάση περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων όπως πχ η ταυτότητα και χρόνος παράδοσης για κάθε παραγγελία, η ταυτότητα και χρόνος επεξεργασίας μιας παραγγελίας σε συγκεκριμένη μηχανή, η ταυτότητα και οι χρόνοι εναλλαγής συστημάτων μεταξύ των μηχανών κα. Σε

⁵ Συστήματα καλούνται διάφοροι πόροι η χρήση των οποίων εξαρτάται από το είδος της παραγγελίας και από τη μηχανή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί (order and machine depended).

διάφορες μεταβλητές δόθηκαν προκαθορισμένες τιμές (default values) παράλληλα με τη δυνατότητα διαφοροποίησης της αν αυτό είναι επιθυμητό.

Εν γένει οι κώδικες αποδίδουν λογικοφανείς λύσεις στο πρόβλημα για μικρό σχετικά αριθμό παραγγελιών (περίπου 70 παραγγελίες έναντι 350 που μπορούν να βρίσκονται πραγματικά, κατά μέσο όρο, σε ουρά αναμονής). Αυξάνοντας τον αριθμό των παραγγελιών είναι απαραίτητο (για να υπάρξει λύση) να εισάγονται και όλοι οι υπόλοιποι παράμετροι της παραγωγής (πχ σε ποιες μηχανές μπορεί να επεξεργαστεί η νέα παραγγελία ποια είναι τα σχετικά changeover times μεταξύ της νέας παραγγελίας και των υπολοίπων κτλ), δεδομένα που δε δίδονται από το πρόβλημα και λαμβάνονται αυθαίρετα.

3.2. Αριθμητικά παραδείγματα

Ο κώδικες που ανατήχθηκαν δοκιμάστηκαν με σειρά αριθμητικών παραδειγμάτων. Τα παραδείγματα αυτά έτρεξαν σε virtual machine (VirtualBox v.4.2.12, σε επεξεργαστή Intel Core i5, 2.4GHz/4GB RAM) και με χρήση του solver CPLEX v12.4.

Κριτήριο για το μέγεθος του μοντέλου αποτελεί το πλήθος των περιορισμών και των μεταβλητών καθώς και το ποσό μνήμης που απαιτήθηκε⁶. Ο κώδικας της αντικειμενοστραφούς προσέγγισης περιέχει 4 διαφορετικές παραλλαγές με διαφορετικές δυνατότητες η καθεμία. Η παραλλαγή που χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την μελέτη του προβλήματος ήταν αυτή στην οποία όλα τα απαιτούμενα στοιχεία (id παραγγελίας, changeover time, deadline κτλ) δίδονταν χειροκίνητα.

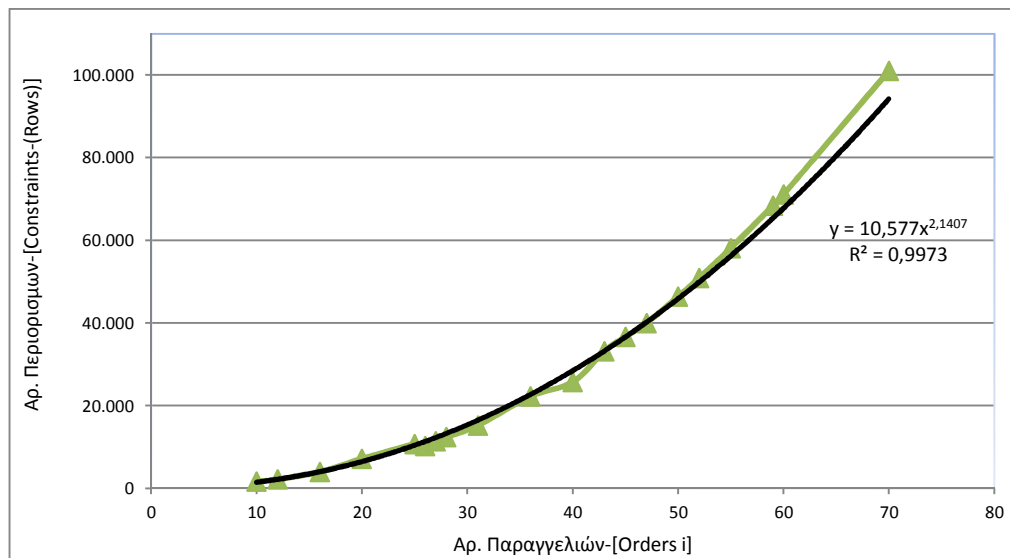
Τα αποτελέσματα προέκυψαν αυξάνοντας σταδιακά τον αριθμό παραγγελιών και καταγράφοντας τα μεγέθη ενδιαφέροντος, όπως αυτά προέκυπταν στη στατιστική σύνοψη κάθε λύσης.

Παρατίθενται ο σχετικός πίνακας αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με γραφική απεικόνιση αυτών.

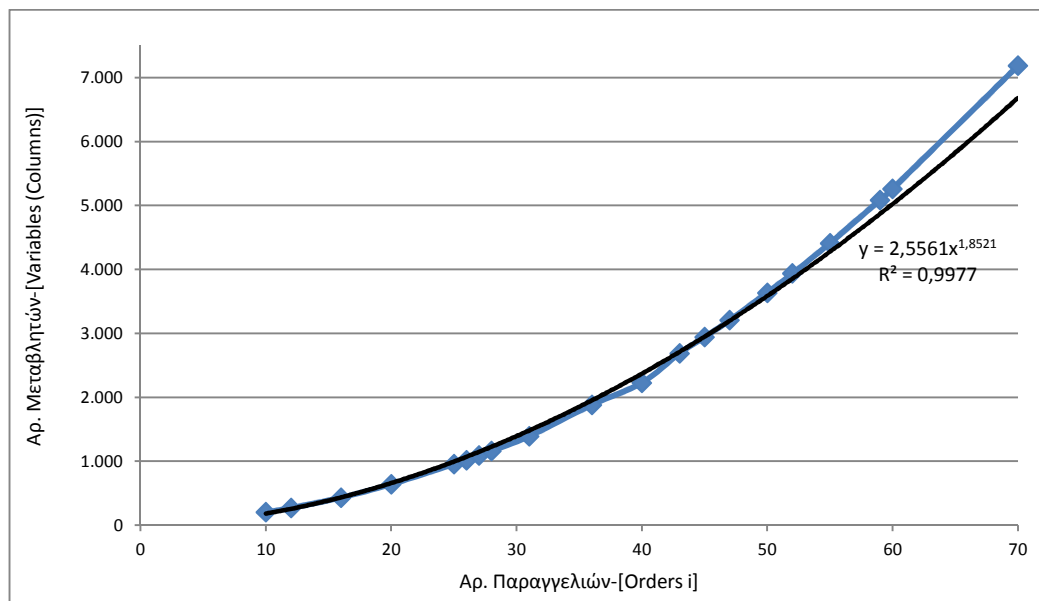
Scenario					Results							
i	j	k	Time Horizon	Objective	Constraints [Rows]	Variables [Columns]	Binaries Variables	Real Time	Tree Size [CPU-Mb]	Gap [%]	Comments	
1	10	7	5	40	4	1.621	203	173	2,47	0	0	
2	12	7	5	40	4	2.160	269	233	2,44	0	0	
3	16	7	5	40	4	3.939	431	383	1,38	0	0	
4	20	7	5	40	4	7.133	641	581	59,97	0,68	0	
5	25	7	5	50	4	10.673	953	878	106,20	0,79	0	
6	26	7	5	50	4	10.239	1.012	934	84,48	2,21	0	
7	27	7	5	50	4	11.407	1.091	1.010	96,38	4,94	0	
8	28	7	5	50	0	12.413	1.159	1.075	107,92	1,44	0	
10	31	7	5	55	4	15.183	1.391	1.298	127,75	7,7	0	

⁶ Μετρήθηκε το μέγεθος [MB] του brunch-and-cut search tree.

	Scenario				Results							Comments
	i	j	k	Time Horizon	Objective	Constraints [Rows]	Variables [Columns]	Binaries Variables	Real Time	Tree Size [CPU-Mb]	Gap [%]	
11	36	7	5	65	4	22.236	1.881	1.733	194,23	9,23	0	
12	40	7	5	70	0	25.676	2.227	2.107	191,36	4,04	0	
13	43	7	5	90	0	33.159	2.686	2.557	401,75	2,74	0	Max Tree size 33,62 MB
14	45	7	5	80	0	36.627	2.942	2.807	280,27	20,54	0	
15	47	7	5	85	0	39.997	3.206	3.065	125,84	9,52	0	Max Tree size
16	50	7	5	90	0	46.390	3.635	3.485	420,47	58,98	0	
17	52	7	5	100	0	50.912	3.936	3.780	172,31	8,67	0	
18	55	7	5	100	0	58.085	4.410	4.245	309,98	27,15	0	
19	59	7	5	110	0	68.377	5.084	4.907	351,47	42,76	0	
20	60	7	5	105	119	71.080	5.260	5.080	629,61	84,21	100	Break
21	70	7	5	120	148	100.970	7.185	6.975	653,28	68,96	100	Break



Γραφική Παράσταση 1: Πλήθος Περιορισμών του προβλήματος συναρτῆσει του αριθμού παραγγελιών



Γραφική Παράσταση 2: Πλήθος Μεταβλητών του προβλήματος συναρτήσει του αριθμού παραγγελιών

Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις φαίνεται ο αρκετά ραγδαίος ρυθμός αύξησης του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του προβλήματος (αριθμός περιορισμών και μεταβλητών) που προκύπτει από την αύξηση του αριθμού των παραγγελιών και συμφωνεί με την βιβλιογραφία για τα NP-Hard προβλήματα. Στα διαγράμματα αναπαρίσταται και η γραμμή τάσης με την αντίστοιχη εξίσωσή της και το συντελεστή συσχέτισης R^2 (ο οποίος αποδίδει την πολύ καλή προσαρμογή της γραμμής τάσης στα δεδομένα). Το διάγραμμα αναπαράστασης της χρησιμοποιούμενης μνήμης συναρτήσει του αριθμού παραγγελιών, στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν μπορεί να αποδώσει χρήσιμα συμπεράσματα καθώς δε δείχνει να ακολουθεί κάποια συγκεκριμένη καμπύλη. Οι κυριότεροι λόγοι είναι ότι:

- ο χρονικός ορίζοντας αποκτά δυναμικό χαρακτήρα για τον προγραμματισμό συνεχώς αυξανόμενου αριθμού παραγγελιών καθώς αναπροσαρμόζεται παράλληλα με την αύξηση των παραγγελιών και
- οι διάφοροι παράμετροι λαμβάνουν τιμές στηριζόμενες σε αυθαίρετες παραδοχές καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα χρήσης και ανάλυσης πραγματικών δεδομένων της παραγωγικής διαδικασίας.

3.3. Χρησιμότητα των μοντέλων - Αδυναμίες του κώδικα

Η προσέγγιση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή παραδειγμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων παρουσιάζει ορισμένες αδυναμίες. Ο κώδικας αναζητά και αποδίδει βέλτιστες λύσεις (Objective=0) εκτός από τις περιπτώσεις των λίγων παραγγελιών. Στις περιπτώσεις που ο χρονικός ορίζοντας δεν είναι ικανός ώστε να προγραμματιστούν μέσα σ' αυτόν ο σχετικός αριθμός παραγγελιών, ο κώδικας τρέχει συνεχώς χωρίς να μειώνεται το κενό (gap⁷) με τους εναπομένοντες προς διερεύνηση

⁷ Gap: η σχετική διαφορά μεταξύ μια ακεραίας λύσης που βρέθηκε και της αποδεδειγμένης καλύτερης πιθανής τιμής της αντικειμενικής (IBM)

κόμβους παράλληλα να αυξάνονται. Ο κώδικας αδυνατεί να επιλύσει σε εύλογο χρόνο τις περιπτώσεις με τους μεγαλύτερους αριθμούς παραγγελιών (σε χρόνο συγκρίσιμο μ' αυτούς των απλούστερων περιπτώσεων).

Πληρέστερος ορισμός του προβλήματος θα απαιτούσε επιπλέον και συγκεκριμένα δεδομένα και χαρακτηριστικά των παραγγελιών, του εξοπλισμού και των διατιθέμενων πόρων (πχ συγκεκριμένες ποσότητες κάθε είδους ανά οικογένεια προϊόντος, ημερομηνίες παράδοσης), πραγματικές συσχετίσεις παραγγελιών i μηχανών j και συστημάτων k κτλ. Το γεγονός αυτό προκαλεί εγγενείς αδυναμίες στον κώδικα. Οι επιπλέον αυτοί περιορισμοί ενδεχομένως να διαμόρφωναν διαφορετικά χαρακτηριστικά των λύσεων.

Χωρίς πλήρη γνώση του περιβάλλοντος παραγωγής καθίσταται δύσκολο να διαμορφωθεί σαφής εικόνα για την χρησιμότητα των αποτελεσμάτων και της ποιότητας των λύσεων. Η ποιότητα των λύσεων μπορεί να εκτιμηθεί από πρακτικούς (practitioners) του χρονικού προγραμματισμού και μέτρο για την αξιολόγηση και την αποδοχή των αποτελεσμάτων είναι κυρίως η εφικτότητα αυτών των λύσεων και ο έλεγχος της ορθότητας της αντικειμενικής συνάρτησης (καθυστέρηση/βραδύτητα- *tardiness* L_i) σε σύγκριση με πραγματικές διαθέσιμες λύσεις. Εντούτοις η λεπτομερής σύγκριση δεν είναι εύκολη καθώς εν γένει τα χαρακτηριστικά του μοντέλου εμφανίζονται πιο στατικά έναντι του έντονα δυναμικού χαρακτήρα του πραγματικού περιβάλλοντος παραγωγής και συνεπώς δεν παρέχονται επαρκή στοιχεία και για τη βελτιστότητα των λύσεων.

Για τους προαναφερόμενους λόγους το μοντέλο εμφανίζει σχετικά μικρή πρακτική χρησιμότητα και για να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες θα απαιτούσε προγραμματιστικές βελτιώσεις. Αυτοματοποιημένα εργαλεία (ανάπτυξη κωδίκων) για την υποβοήθηση του χρονικού προγραμματισμού μπορούν να αντικαταστήσουν χειροκίνητες (και σε μεγάλο βαθμό εμπειρικές και ενστικτώδεις) διαδικασίες που δεν περιλαμβάνουν κριτήρια βελτιστότητας. Από την άλλη πλευρά όμως η αυτοματοποιημένη μέθοδος δύσκολα μπορεί να ενσωματώσει το σύνολο της πρακτικής γνώσης, της εμπειρίας και των διαθέσιμων πληροφοριών. Από την άποψη αυτή η βέλτιστη λύση που προκύπτει από τον κώδικα να χρησιμοποιείται σαν βάση για περεταίρω βελτίωση από τους scheduling experts.

Συμπερασματικά η μορφοποίηση του συνεχούς χρόνου δείχνει αρκετά ευέλικτη και «ισχυρή» για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος χρονικού προγραμματισμού σε μικρό σχετικά χρόνο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 Περιορισμοί για τη μοντελοποίηση γενικότερης περίπτωσης

Για λόγους πληρότητας παρατίθενται επιπλέον περιορισμοί που απαιτούνται για την μοντελοποίηση πιο συνδυαστικών προβλημάτων όταν δηλαδή λαμβάνονται υπόψη περισσότερες πτυχές της πραγματικής κατάστασης.

Επεξήγηση συμβόλων περιορισμών Παραρτήματος - (Nomenclature)	
Ισχύουν οι Δείκτες (Indices) που περιγράφονται στην παρ. §2.3 και επιπλέον:	
i_{jii}	Setup εργασία (cleaning task) για τη διαδοχή της εργασίας i από την i' στη μηχανή j , αντίστοιχο του $u_{i,i',j}$
l	Στάδιο επεξεργασίας
l_i^l	Τα τελευταία στάδια της παραγγελίας i
f_i^l	Τελευταίο στάδιο παραγωγής της παραγγελίας i
Ισχύουν τα ίδια Σύνολα (Sets) που περιγράφονται στην παρ. §2.3 και επιπλέον:	
F_i	Σύνολο σταδίων παραγωγής που απαιτούνται για την παραγωγή της μηχανής j
F_j	Σύνολο σταδίων παραγωγής που μπορούν να εκτελεστούν στη μηχανή j
I_j	Σύνολο παραγγελιών που μπορούν να εκτελεστούν στη μηχανή j
S_j	Σύνολο timeslots για τη μηχανή j
$I_j^{(i)}, I_j^{(i')}$	Σύνολο παραγγελιών που μπορούν να εκτελεστούν στην μηχανή j διαδοχικά
J_l	Σύνολο μηχανών του σταδίου l
Ισχύουν οι Παράμετροι (Parameters) που περιγράφονται στην παρ. §2.3 και επιπλέον:	
ru_j	Ο νωρίτερος χρόνος που η μηχανή j είναι διαθέσιμη
ro_i	Ο νωρίτερος χρόνος στον οποίο μπορεί να ξεκινήσει η παραγωγή της παραγγελίας i
su_{ij}	Χρόνος setup της παραγγελίας i στη μηχανή j
Ισχύουν οι Μεταβλητές (Variables) που περιγράφονται στην παρ. §2.3 και επιπλέον:	
T_{eti}, T_{sti}	Συνεχείς μεταβλητές, χρόνος έναρξης και ολοκλήρωσης της παραγγελίας i στο στάδιο l
T_{st}	Συνεχής μεταβλητή, ο χρόνος έναρξης του timeslot s της μηχανής j
Ισχύουν οι Δυαδικές Μεταβλητές (Variables) που περιγράφονται στην παρ. §2.3 και επιπλέον:	
$X_{i,j}$	Δυαδική μεταβλητή = 1 αν η παραγγελία i εκτελείται στη μηχανή j , διαφορετικά = 0
$X_{i,t,j,k}$	Δυαδική μεταβλητή = 1 αν η παραγγελία i εκτελείται στη μηχανή j , στο χρόνο t με το σύστημα k , διαφορετικά = 0
C_{il}	Συνεχής μεταβλητή, χρόνος ολοκλήρωσης της παραγγελίας i στο στάδιο l
C_{il}^l	Συνεχής μεταβλητή, χρόνος ολοκλήρωσης της παραγγελίας i στο τελευταίο στάδιο l
$X_{i,j,t,l}$	Δυαδική μεταβλητή = 1 αν στο στάδιο l η παραγγελία i ανατίθεται στο timeslot t , στη μηχανή j , στο χρόνο t , διαφορετικά = 0

I. Περιορισμός κατανομής (Allocation constraints – Continuous time formulation)

Στη γενική περίπτωση όπου υπάρχουν περισσότερα του ενός σταδίου με παράλληλες μηχανές ο περιορισμός κατανομής καθίσταται πολύπλοκότερος σε σχέση με αυτόν της μελέτης περίπτωσης. Περιγράφεται από δύο group (για την ανάθεση και για το συγχρονισμό) που περιλαμβάνουν set δυο εξισώσεων και είναι της μορφής:

$$\sum_{j \in (J_i \cap J_l)} \sum_{t \in S} X_{i,j,t,l} = 1, \forall i \in I, l \in T_i$$

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{l \in (F_i \cap F_j)} X_{i,j,t,l} \leq 1, \forall j \in J, t \in S_j$$

Επιπλέον, όσον αφορά το θέμα του συγχρονισμού, οι ακόλουθοι περιορισμοί χρησιμοποιούνται για να αντιστοιχισθεί ο χρόνος έναρξης των παραγωγής των παρτίδων με τα timeslots και να συσχετιστεί η ώρα έναρξης παραγγελίας μιας παρτίδας σε ένα στάδιο με το τέλος του χρόνου της ίδιας παραγγελίας στο προηγούμενο στάδιο:

$$-M(1 - X_{i,j,t,l}) \leq T_{si_{il}} - T_{s_{jt}} \leq M(1 - X_{i,j,t,l}), \forall i \in I, J \in (F_i \cap F_j), k \in S_j, l \in T_i$$

$$T_{ei_{il}} \leq T_{si_{il,(l+1)}} \forall i \in I, l \in T_i - \{l_i^l\}$$

Γίνεται φανερό ότι αυτού του είδους τα μοντέλα απαιτούν μεγάλο αριθμό δυαδικών μεταβλητών, αποτέλεσμα της χρήσης της μεταβλητής $X_{i,j,t,l}$ που ορίζεται σε τέσσερις διαστάσεις με το σύνολο των απαιτούμενων μεταβλητών να είναι $i \times j \times t \times l$.

II. Περιορισμοί ακολουθίας (Sequencing constraints – Continuous time formulation)

Στη γενικότερη περίπτωση που υφίστανται περισσότερα του ενός σταδίου για την ολοκλήρωση της παραγωγής της παραγγελίας i οι περιορισμοί ακολουθίας καθίστανται πολυπλοκότεροι ως προς τη δομή τους. Περιγράφονται από σύνολο 3 ανισώσεων:

$$C_l \geq \sum_{j \in J_{il}} X_{ij} (\text{Max}[ru_j, ro_i]) + su_{ij} + pt_{ij}, \forall i \in I, l \in F_i$$

$$C_{il} \geq C_{i,l+1} - \sum_{j \in J_{i,l+1}} Y_{ij} \cdot pt_{ij}, \forall i \in I, l \in F_i - \{f_i^l\}$$

$$C_{il}^l \leq d_i$$

III. Περιορισμός κατανομής (Allocation constraints - Discrete time formulation)

Στη μοντελοποίηση της γενικής περίπτωσης ο περιορισμός ενισχύεται με τη χρήση μίας επιπλέον εξίσωσης που διασφαλίζει η απαίτηση ότι εφόσον η παραγγελία i έχει ξεκινήσει στη μηχανή j στην αρχή του διαστήματος t καμιά άλλη εργασία δεν μπορεί να ξεκινήσει στην ίδια μηχανή πριν το πέρας του χρόνου επεξεργασίας.

$$\sum_{i' \in I_j} \sum_{t=t'} \sum_{k \in K_i K_j}^{t+p_{ij}-1} X_{i'jt'} - 1 \leq M(1 - X_{ijt}), \forall j \in J, i \in J_j, t \in T$$

Ο περιορισμός καθίσταται τετριμμένος (περιττός) για την περίπτωση που η εργασία i δεν ξεκινά στο χρονικό διάστημα t και δεν ενεργοποιείται (Floudas & Lin, 2004).

IV. Περιορισμοί ακολουθίας (Sequencing constraints - Discrete time formulation)

Στη γενικότερη περίπτωση χρονικού προγραμματισμού παραγωγής οι εξαρτήσεις στην αλληλουχία μεταξύ διαδοχικών εκτελέσεων των παραγγελιών i και i' στην ίδια μηχανή j περιγράφονται από εξίσωση της μορφής:

$$\sum_{t=t_1+1}^{t_2-1} X_{ijiv',j,t} \geq \sum_{i \in I_j^{(i)}} X_{ijt_1} + \sum_{i' \in I_j^{(i')}} X_{ijt_2} - \sum_{t=t_1+1}^{t_2-1} \sum_{i \in I_j} X_{ijt} - 1, j \in J, i \neq i' \in I, t_1 < t_2 \in S$$

με $I_j^{(i)}$ και $I_j^{(i')}$ τα σύνολα εργασιών για τις παραγγελίες i και i' στη μηχανή j

Ο παραπάνω περιορισμός έχει νόημα στην περίπτωση που τα δύο πρώτα αθροίσματα στο δεξιό μέρος της ανισότητας είναι ίσα με τη μονάδα και το τρίτο ισούται με μηδέν (Floudas & Lin, 2004).

II.II Valid Inequality

Για τον περιορισμό του χώρου λύσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια επιπλέον ανισότητα (valid inequality) η οποία προκύπτει από την μελέτη του συστήματος. Η χρήση των συστημάτων εξαρτάται από την παραγγελία και τη μηχανή (product and machine depended).

Ορίζουμε δυο επιπλέον δυαδικές μεταβλητές:

- $N_{ik}=1$, η παραγγελία i χρησιμοποιεί το σύστημα k για την παραγωγή της, αλλιώς 0 και
- $N_{jk}=1$, το σύστημα k μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μηχανή, αλλιώς 0.

Μπορούν να διαμορφωθεί η παρακάτω ανισότητα και να ενσωματωθούν στο υπάρχον group περιορισμών πόρων:

$$N_{ik} + N_{jk} > 1^8$$

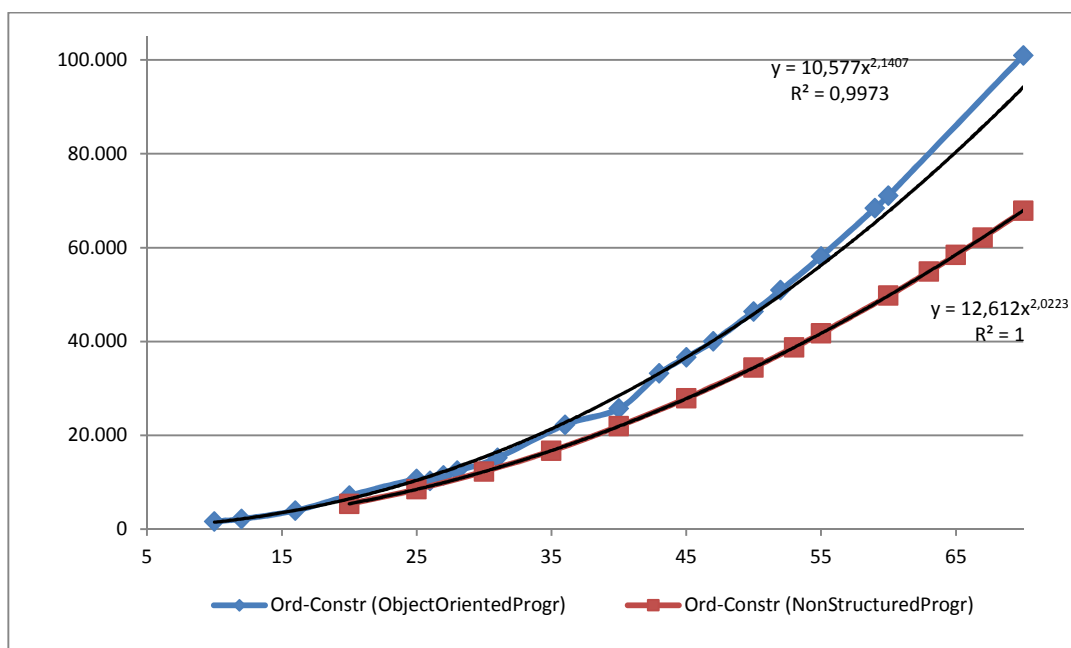
II.III Άλλα συμπεράσματα από τους κώδικες

Για τη μοντελοποίηση του συνεχούς χρόνου αναπτύχθηκε και άλλα παραδείγματα κώδικα. Παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ αντικειμενοστραφούς και μη δομημένης προσέγγισης προγραμματισμού ως προς τον αριθμό περιορισμών και μεταβλητών. Στο σχετικό πίνακα δίδονται αποτελέσματα από την εκτέλεση παραδειγμάτων στον κώδικα της μη δομημένης προσέγγισης.

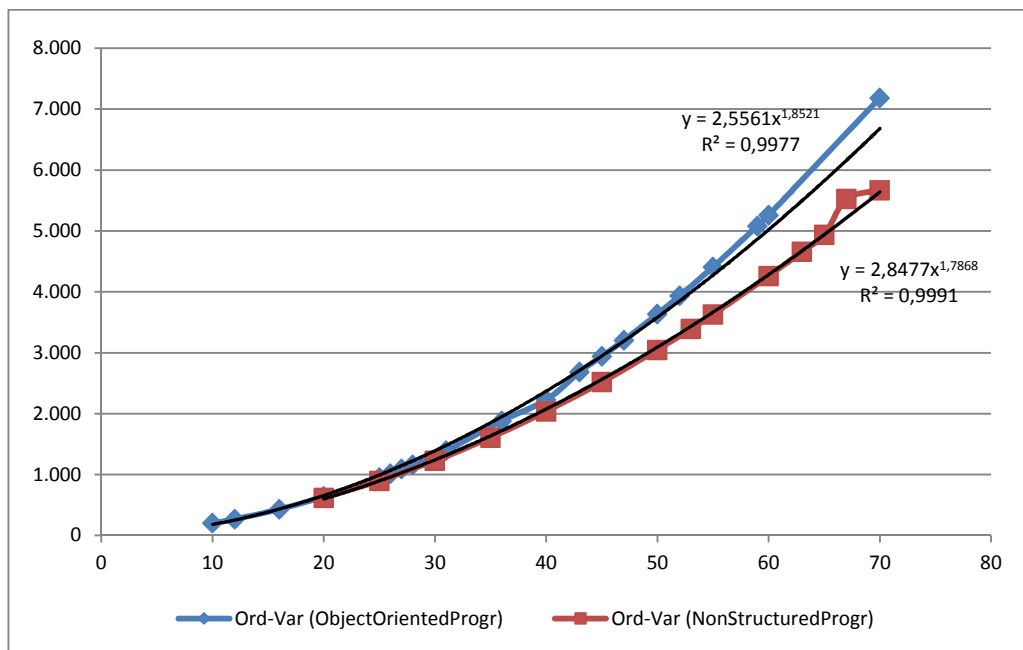
	Scenario				Results							Comments
	i	j	k	Time Horizon	Objective	Constraints [Rows]	Variables [Columns]	Binaries Variables	Real Time [sec]	Tree Size [CPU-Mb]	Gap [%]	
1	20	7	5	30	0	5.380	620	560	4,38	0,01	0	
2	25	7	7	35	0	8.475	900	825	4,14	0,01	0	

⁸ Παρόμοια θα μπορούσε να εκφραστεί και η ανίσωση $\sum_{k \in K_i} N_{ik} \cdot \sum_{k \in K_j} N_{jk} > 0$ η οποία όμως είναι μη γραμμική (non-linear) και δεν μπορεί να μελετηθεί στην παρούσα εργασία

Scenario					Results							Comments
i	j	k	Time Horizon	Objective	Constraints [Rows]	Variables [Columns]	Binaries Variables	Real Time [sec]	Tree Size [CPU-Mb]	Gap [%]		
3	30	7	7	40	0	12.270	1.230	1.140	24,66	0,60	0	
4	35	7	7	45	0	16.675	1.610	1.505	104,48	13,73	0	
5	40	7	7	45	0	21.960	2.040	1.920	87,20	0,31	0	
6	45	7	7	55	0	27.855	2.520	2.385	117,95	0,01	0	
7	50	7	7	65	0	34.450	3.050	2.900	100,38	2,18	0	
8	53	7	7	65	0	38.743	3.392	3.233	163,56	6,68	0	
9	55	7	7	80	0	41.745	3.630	3.465	149,31	8,48	0	
10	60	7	7	80	0	49.740	4.260	4.080	405,55	21,41	0	
11	63	7	7	80	0	54.873	4.662	4.473	473,25	16,73	0	
12	65	7	7	85	0	58.435	4.940	4.745	542,61	7,40	0	
13	67	7	7	87	0	62.109	5.526	5.025	234,02	20,89	0	
14	70	7	7	95	0	67.830	5.670	5.460	552,91	35,29	0	



Γραφική Παράσταση 3: Πλήθος περιορισμών συναρτήσει του αριθμού παραγγελιών στη αντικειμενοστραφή και τη μη δομημένη προσέγγιση προγραμματισμού



Γραφική Παράσταση 4: Πλήθος περιορισμών συναρτήσει του αριθμού παραγγελιών στη αντικειμενοστραφή και τη μη δομημένη προσέγγιση προγραμματισμού

Οι γραφικές αναπαραστάσεις δείχνουν να υφίσταται διαφοροποίηση στο πλήθος περιορισμών και μεταβλητών συναρτήσει του αριθμού παραγγελιών.

Π.ΙV Διαφορά μεταξύ θεωρίας και πράξης

Η προσεγγιστική αποδοχή του χρόνου σαν διακριτό μέγεθος (μορφοποίηση διακριτού χρόνου) καταδεικνύει ότι υπάρχουν διάφορες εγγενείς αδυναμίες που μπορούν να εμφανιστούν τόσο στη μοντελοποίηση όσο και στην ανάπτυξη των εργαλείων για υιοθέτηση και εφαρμογή των πορισμάτων και αποτελεσμάτων του χρονικού προγραμματισμού. Οι αδυναμίες αυτές περιπλέκουν τα ήδη ισχυρά NP-Hard προβλήματα όπως κατέδειξε ακόμη και η πρώιμη θεωρητική διερεύνηση για το σύνολο σχεδόν των προβλημάτων του είδους.

Στη μορφοποίηση των προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού οι διάφορες απλοποιητικές παραδοχές δημιουργούν εξιδανικευμένο και στατικό περιβάλλον (πχ μηχανές που δεν υφίστανται βλάβες ντετερμινιστικοί τεχνολογικοί περιορισμοί γνωστοί εκ των προτέρων κτλ). Αυτό οδηγεί συχνά σε αποτυχία ή δυσχέρεια της θεωρίας να αντιμετωπίσει ολιστικά το πραγματικό και πρακτικό περιβάλλον μέσα στο οποίο λειτουργεί ο χρονικός προγραμματισμός. Σημαντικές πτυχές του εξαιρετικά δυναμικού περιβάλλοντος παραγωγής αγνοούνται παρότι μπορεί να είναι σημαντικές και ουσιαστικές για την εφικτότητα της λύσης (πχ οι δυναμικότητες των μηχανών οι μεταβαλλόμενες ζήτησεις, η αναπροσαρμογή ημερομηνιών παράδοσης κτλ).

Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις οι διαδικασίες του χρονικού προγραμματισμού δείχνουν αποκομμένες από τα υψηλότερα επίπεδα λήψης αποφάσεων καθώς οι μορφοποιήσεις των μοντέλων δεν

μπορούν να αποτυπώσουν τέτοιου είδους σχέσεις και αλληλεπιδράσεις. Διάφορα στοιχεία του συνολικού επιχειρηματικού περιβάλλοντος μπορούν ενδεχομένως να επηρεάσουν την πρακτική εφαρμογή του χρονικού προγραμματισμού (πχ τα είδη των αντικειμενικών συναρτήσεων, τα είδη των περιορισμών κτλ) (Maccarthy & Liu, 1993).

Βιβλιογραφία

- Barták, R. (n.d.). Dynamic Constraint Models for Planning and Scheduling Problems.
- Applequist, G., Semikoglu, O., Pekny, J., & Recalitis, G. (1997). Issues in the use, design and evolution of process scheduling and planning systems. *ISA Transactions*, 36, σσ. 81–121.
- Bassett, M. H., Dave, P., Doyle III, F. J., Kudva, G. K., Pekney, J. F., Reklaitis, G. V., και συν. (1996b). Perspectives on model based integration of process. *Computers and Chemical Engineering*(20), σσ. 821–844.
- Floudas, C. A., & Lin, X. (2004, March 25). Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. *Computer and Chemical Engineering*(28), σσ. 2109-2129.
- Floudas, C. A., & Lin, X. (2004). Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. *Computers and Chemical Engineering*(28), σσ. 2109–2129.
- Floudas, C. A., & Lin, X. (2005). Mixed Integer Linear Programming in Process Scheduling: Modeling, Algorithms, and Applications. *Annals of Operations Research*(139), σσ. 131–162.
- Garey, M. R., & Johnson, D. R. (1979). Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness.
- Honkomp, S. J., Lombardo, S., Rosen, O., & Pekny, J. F. (2000). The curse of reality—why process scheduling optimization problems are difficult in practice. *Computers and Chemical Engineering*(24), σσ. 323-328.
- IBM Corp. (2009). *IBM ILOG CPLEX V12.1 - User's Manual for CPLEX*. IBM Corp.
- IBM. (n.d.). *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.2*. Ανάκτηση 6 1, 2013, από http://pic.dhe.ibm.com/infocenter/cosinfoc/v12r2/index.jsp?topic=%2Filog.odms.cplex.help%2FContent%2FOptimization%2FDocumentation%2FCPLEX%2F_pubske1%2FCPLEX916.html.
- Kallrath, J. (2002). Planning and scheduling in the process industry. *OR Spectrum*(24), σσ. 219–250.
- Kondili, E., Pantelides, C. C., & Sargent, R. H. (1993). A general algorithm for short-term scheduling of batch operations - Part 1 MELP formulation. *Computers and Chemical Engineering*(17), σσ. 211-227.
- Maccarthy, B. L., & Liu, J. (1993). Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. *International Journal of Production Research*, 31(1), σσ. 59-79.
- Mellor, P. (1966, Jun.). A Review of Job Shop Scheduling. *Operational Research Society*, 17(2), σσ. 161-171.

- Pantelides, C. C. (1993). Unified frameworks for optimal process planning and scheduling. Στο *Proceedings of the second international conference on foundations of* (σσ. 253–274). Colorado: Crested Butte: Rip-pin, D. W. T.; Hale, J. C.; Davis, J.;
- Pekny, J. F., & Reklaitis, G. V. (1998). Towards the convergence of theory and practice: A technology guide for scheduling/planning methodology. *J. F. Pekny, & G. E. Blau (Eds.)* (σσ. 91–111). Utah: J. F. Pekny, & G. E. Blau (Eds.).
- Reklaitis, G. V. (1992). *Overview of scheduling and planning of batch*. NATO Advanced Study Institute - Batch process systems engineering, Turkey: Antalya.
- Rippin, D. T. (1993). Batch process systems engineering: A retrospective and prospective review. *Computers and Chemical Engineering*(17), σσ. S1-S13.
- Shah, N. (1998). Single- and multisite planning and scheduling: Current status and future challenges. Στο *J. F. Pekny, & G. E. Blau (Επιμ.)*. (σσ. 75-90). Utah: Snowbird: J. F. Pekny, & G. E. Blau.
- Stefansson, H., Sigmarsdottir, S., Jensson, P., & Shah, N. (2011). Discrete and continuous time representations and mathematical models for large production scheduling problems: A case study from the pharmaceutical industry. *European Journal of Operational Research*(215), σσ. 383–392.
- Zentner, M. G., Elkamel, A., Pekny, J. F., & Reklaitis, G. V. (1998). A language for describing process scheduling problems. *Computers and*(22), σσ. 125-145.