ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Πολυκριτηριακή Μοντελοποίηση και Επίλυση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μεγάλης κλίμακας

Διδακτορική Διατριβή

Ιωάννα Ν. Μακαρούνη

Επιβλέπων:
Ι.-Ε. Σαμουηλίδης
Ομοτ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Πολυκριτηριακή Μοντελοποίηση και Επίλυση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής μεγάλης κλίμακας

ΙΩΑΝΝΑ ΜΑΚΑΡΟΥΝΗ

Αθήνα Ιανουάριος 2014

Συμβουλευτική Επιτροπή : ΣΑΜΟΥΗΛΙΔΗΣ ΙΗΣΟΥΣ-ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΨΑΡΡΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 15/1/2014

.....	.....	.....
Ι.-Ε. Σαμουηλίδης,	Βασίλης Ασημακόπουλος	Ιωάννης Ψαρράς
Ομοτ. Καθηγητής ΕΜΠ	Καθηγητής ΕΜΠ	Καθηγητής ΕΜΠ
.....	.....	.....
Δημήτριος Ασκούνης	Γρηγόρης Μέντζας	Ιωάννης Σίσκος
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ	Καθηγητής ΕΜΠ	Καθηγητής Παν. Πειραιά

.....

Κωνσταντίνος Μεταξιώτης

Επικ. Καθηγητής Παν. Πειραιά

.....
Ιωάννα Ν. Μακαρούνη
Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιωάννα Μακαρούνη, 2014
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τη συγγραφέα.
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Με την ολοκλήρωσή της, νιώθω μεγάλη χαρά αλλά και υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά:

- τον επιβλέποντά μου, ομότιμο καθηγητή Ι.-Ε. Σαμουηλίδη ο οποίος, μέχρι και σήμερα, αποτελεί για εμένα μεγάλο «δάσκαλο» και σοφό σύμβουλο. Κάθε συνεργασία και συζήτηση μαζί του αποτελεί μοναδική χαρά και εμπειρία γνώσης για μένα.
- τον καθ. Ι. Ψαρρά, μέλος της τριμελούς επιτροπής, ο οποίος με έχει στηρίξει σε όλη την ερευνητική και επαγγελματική πορεία μου και στον οποίο χρωστάω τόσα πολλά που λόγια δεν μπορούν να εκφράσουν. Χωρίς την επιμονή, την καθοδήγησή του, την απαράμιλλη υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έχει επιδείξει δεν θα είχα καταφέρει να ολοκληρώσω την παρούσα διατριβή.
- τον καθ. Β. Ασημακόπουλο, μέλος της τριμελούς επιτροπής, για την πολύτιμη υποστήριξή του σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.
- τον καθ. Ι. Σίσκο, για την ουσιαστική ερευνητική του καθοδήγηση σε καίρια σημεία κατά την εκπόνηση της διατριβής. Οι συζητήσεις μας ήταν έμπνευση για μένα και συχνά με βοήθησαν να διαμορφώσω την ερευνητική στρατηγική της διατριβής.
- τον αναπλ. καθηγητή Δ. Ασκούνη για την επιστημονική υποστήριξη σε κάθε βήμα μου στο εργαστήριο, την εκτίμηση που μου δείχνει και την άριστη συνεργασία όλα αυτά τα χρόνια.
- τον καθηγητή Γρ. Μέντζα και τον επικ. καθηγητή Κ. Μεταξιώτη για την τιμή που μου κάνουν να συνεισφέρουν σε αυτή την ερευνητική προσπάθεια ως μέλη της επταμελούς επιτροπής.

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω τα μέλη του Εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης, τους οποίους πραγματικά θεωρώ δεύτερη οικογένειά μου, για την υποστήριξη -ο καθένας με τον τρόπο του- και την άψογη συνεργασία όλα αυτά τα χρόνια.

Δεν παραλείπω να ευχαριστήσω τον συναδέλφους μηχανικούς που εκπόνησαν την διπλωματική εργασία τους υπό την καθοδήγησή μου, οι οποίοι συνέβαλαν σε κάποιο βαθμό στην ολοκλήρωση της διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να αναφερθώ και να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον σύζυγό μου Νίκο, τους γονείς και την οικογένειά μου, αλλά και τους φίλους μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και την υπομονή τους, ιδιαίτερα στα τελευταία στάδια συγγραφής της διατριβής.

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

Περίληψη

Η αποτελεσματική πολυκριτηριακή προσέγγιση πραγματικών προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής δύναται να προσφέρει ισορροπημένο συνδυασμό θετικών επιπτώσεων σε κατευθύνσεις που αποτελούν στρατηγικές προτεραιότητες για μια επιχείρηση, ειδικά την εποχή της οικονομικής κρίσης και του έντονου ανταγωνισμού.

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η πολυκριτηριακή μοντελοποίηση μεγάλης κλίμακας προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής και η πρόταση μεθοδολογίας επίλυσης τους με προσαρμογή και αξιοποίηση πολυκριτηριακών μεθόδων υποστήριξης αποφάσεων.

Η έμφαση δίνεται σε ένα από τα απαιτητικά προβλήματα βελτιστοποίησης στο πεδίο της διαχείρισης παραγωγικών πόρων, συγκεκριμένα, στον χρονοπρογραμματισμό εργασιών παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης προϊόντων μικτού μοντέλου, φιλοσοφίας Just-in-Time, με χρήση πολλαπλών κριτηρίων.

Η διατριβή αξιοποιεί και συνδυάζει στην πρότασή της μεθόδους και τεχνικές τόσο από το πεδίο της επιχειρησιακής έρευνας και του μαθηματικού προγραμματισμού, όσο και από την περιοχή της πολυκριτηριακής υποστήριξης αποφάσεων, προκειμένου να απαντήσει αποτελεσματικά στις ερευνητικές προκλήσεις και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν τα πραγματικά προβλήματα του σχετικού βιομηχανικού πεδίου.

Η μεθοδολογία επίλυσης της επιλεγμένης κατηγορίας προβλημάτων αναπτύχθηκε και εξειδικεύθηκε σε δύο σενάρια/περιπτώσεις του γενικευμένου προβλήματος αναφοράς: στην περίπτωση του δικριτηριακού προβλήματος και στην περίπτωση του πολυκριτήριου προβλήματος για τα οποία προτείνεται να ακολουθηθεί διαφορετική προσέγγιση.

Στο πλαίσιο της διατριβής, παρουσιάζεται το περιβάλλον του προβλήματος, γίνεται επισκόπηση του σχετικού ερευνητικού πεδίου, των τεχνικών βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα διαχείρισης παραγωγής και αναδεικνύονται οι προκλήσεις του προβλήματος που δεν έχουν απαντηθεί επαρκώς από την ερευνητική κοινότητα και στις οποίες εστιάζει η συμβολή της παρούσας διατριβής.

Προς την ίδια κατεύθυνση, παρουσιάζονται οι υπάρχουσες επιστημονικές προσεγγίσεις στο πεδίο τεχνικών πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού.

Στόχος της διατριβής είναι η ανάπτυξη εξειδικευμένης για το πρόβλημα πολυκριτηριακής μεθοδολογίας, η οποία μοντελοποιεί και ενισχύει την συμμετοχή του αποφασίζοντος στην διαδικασία αναζήτησης κατάλληλων Pareto λύσεων προκειμένου να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση σε αποδεκτό χρόνο.

Η διατριβή συμβάλλει στα ακόλουθα:

- Ανάπτυξη μαθηματικής μοντελοποίησης του πολυκριτηριακού προβλήματος χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου.
- Εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων, αντιπροσωπευτικών ως προς τον χρονισμό μεθόδευσης της εμπλοκής του αποφασίζοντος στην διαδικασία αναζήτησης Pareto ικανών λύσεων, για την επίλυση του πολυκριτηριακού προβλήματος.
- Μεθοδολογία επίλυσης του δικριτηριακού σεναρίου του προβλήματος, βασισμένη σε πρωτότυπη υβριδική αλληλεπιδραστική και a-posteriori μέθοδο μη εξαντλητικής παραγωγής αντιπροσωπευτικών λύσεων Pareto.
- Μεθοδολογία επίλυσης του πολυκριτηριακού σεναρίου του προβλήματος βασισμένη σε πρωτότυπη υβριδική αλληλεπιδραστική και a-priori μέθοδο στρατηγικής αναζήτησης ικανοποιητικής Pareto ικανής λύσης.

Η συμβολή της διατριβής πιστοποιείται με την συνεισφορά αυτής στην επίλυση συγκεκριμένου προβλήματος με χρήση δεδομένων που προσομοιάζουν πραγματικές συνθήκες βιομηχανικού περιβάλλοντος, ως προς:

- τις παραμέτρους λειτουργίας του παραγωγικού συστήματος,
- το μέγεθος/όγκο των δεδομένων,
- την κωδικοποίηση και την ποιότητα των δεδομένων,
- το προφίλ του αποφασίζοντος και
- την στρατηγική προτιμήσεών του.

Λέξεις κλειδιά: χρονοπρογραμματισμός παραγωγής, γραμμές συναρμολόγησης μεικτού μοντέλου, μεγάλης κλίμακας βελτιστοποίηση, πολυκριτηριακός μαθηματικός προγραμματισμός, μέθοδοι έκφρασης προτίμησης αποφασίζοντος, Pareto ικανότητα

Abstract

Effective multi-criteria approach of real-life production scheduling problems can provide a balanced combination of positive effects in aspects that are considered strategic priorities for an organisation, especially during current times of economic crisis and intense competition.

The phd thesis aims at proposing a multicriteria modeling of large- scale production scheduling problems and a methodology for their solution by adapting and utilising multi-criteria decision support methods.

The emphasis is set on one of the challenging optimization problems in the field of production resources management, in particular, production scheduling in mixed-model Just-in-Time assembly lines, with multiple criteria.

The research work utilizes and combines methods and techniques from the fields of operations research, mathematical programming and the area of multicriteria decision support in order to respond effectively to the research challenges and characteristics that are pertinent in real-life problems of the relevant industrial field.

The scope of the research work is developed and focuses on two cases/scenaria of the generalized reference problem: the case of the bi-criteria problem and the case of multi-criteria problem for which a different solution approach is proposed.

As part of the thesis, presents the environment of the problem, an overview of the relevant research field of optimization techniques used in production and management problems, identifying challenges that have not been adequately answered by the research community, which focuses on the contribution of this thesis. To the same objective, current scientific approaches in the field of multi-criteria mathematical programming problems are presented.

The thesis aims at producing a specialized, for the reference problem, multicriteria methodological approach that models the enhanced Decision Maker's engagement in the process of generating effective Pareto solutions, in order to optimize the problem efficiently in acceptable timeframe.

The thesis contributes to the following :

- Mathematical MILP modeling of a large scale multi-criteria problem of scheduling tasks in mixed model assembly lines.
- Adaptation and application of representative multicriteria methods of engaging the decision maker in the search and resolution process.

- Original Methodology for solving the bicriteria scenario of the problem based on a hybrid interactive, non-exhaustive ‘a-posteriori’ method of generating representative Pareto solutions.
- Original Methodology solving multicriteria scenario of the problem based on a hybrid interactive and an ‘a-priori’ method of resolving representative Pareto solutions.

The contribution of the PhD thesis is confirmed by the application of the proposed methodological framework – at all four levels-, in a particular problem with data that simulate a real industrial environment of a mixed model Just-in-Time assembly line production systems, in terms of:

- the operational parameters,
- the size/volume of the data,
- the coding and the quality of the data,
- the decision maker’s profile and
- his preferences’ strategy.

Keywords: Production scheduling, mixed-model assembly lines, large scale optimisaton, multi-objective mathematical programming, methods of engaging the decision maker’s preferences, Pareto optimality.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή 3

1.1 Γενικά 3

1.2 Ερευνητικές προκλήσεις 4

1.2.1 Προβλήματα χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου 5

1.2.2 Πολυκριτηριακές προσεγγίσεις 8

1.3 Η συμβολή της διατριβής 10

1.4 Η διάρθρωση της διατριβής 16

Το πρόβλημα 21

2.1. Εισαγωγή 21

2.2. Διοίκηση και προγραμματισμός παραγωγής 22

2.2.1 Εισαγωγή 22

2.2.2 Λήψη αποφάσεων στην διοίκηση παραγωγής 23

2.2.3 Χρονοπρογραμματισμός στην Παραγωγή 25

2.2.4 Βασικές Παράμετροι: Εργασίες, Πόροι και Περιορισμοί 27

2.2.5 Βασικές Παράμετροι: Οι Στόχοι – Τα κριτήρια 28

2.3. Παραγωγικά συστήματα 30

2.3.1 Πλαίσιο και κατηγοριοποίηση 30

2.3.2 Σημειογραφία συστημάτων προγραμματισμού παραγωγής 35

2.3.3 Παραδείγματα πολυκριτηριακών προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής 41

2.4 Μέθοδοι βελτιστοποίησης στον προγραμματισμό παραγωγής 45

2.4.1 Μαθηματικός Προγραμματισμός 46

2.4.2 Γραμμικός προγραμματισμός 49

2.4.3 Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός 51

2.4.4 Δυναμικός Προγραμματισμός 55

2.4.5 Βελτιστοποίηση με Αποικίες Μυρμηγκιών 57

2.4.6 Αναζήτηση βάσει Απαγορευμένων κινήσεων 58
2.4.7 Προσομοίωση Ανόπτησης 60
2.4.8 Γενετικοί Αλγόριθμοι 62
2.4.9 Νευρωνικά δίκτυα 64
2.5 Το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού εργασιών παραγωγής σε Just-In-Time Γραμμές Συναρμολόγησης Μεικτού Μοντέλου 67
2.5.1 Γενικά 67
2.5.2 Προσεγγίσεις Μοντελοποίησης και Βελτιστοποίησης 69
2.5.3 Η πολυκριτήρια φύση του προβλήματος 70
2.6 Συμπεράσματα και ερευνητικές προκλήσεις 73
Πολυκριτηριακή Ανάλυση και Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός 79
3.1. Εισαγωγή 79
3.2. Πολυκριτήρια Ανάλυση και Λήψη Αποφάσεων 80
3.3. Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός 85
3.4.1. Σύντομη Ιστορική Αναδρομή 85
3.4.2. Βασικές Έννοιες - Χαρακτηριστικά 87
3.4.3. Πολυκριτηριακός Γραμμικός Προγραμματισμός 92
3.4.4. Πολυκριτηριακός Ακέραιος Προγραμματισμός 95
3.4. Μέθοδοι επίλυσης πολυκριτήριων προβλημάτων Γραμμικού και Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού 97
3.5.1 Μέθοδοι επίλυσης με έκφραση προτίμησης εκ των προτέρων 100
3.5.2 Μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων με έκφραση προτίμησης κατά την επίλυση 104
3.5.3 Μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων με έκφραση προτίμησης εκ των υστέρων 111
3.6 Μεθοδολογικό πλαίσιο επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής προϊόντων και υπηρεσιών 114
3.6.1 Ορισμοί 114
3.6.2 Σημειολογία των πολυκριτηριακών προβλημάτων προγραμματισμού 117

3.7 Πολυκριτηριακές προσεγγίσεις σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού σε γραμμές συναρμολόγησης 119
3.8 Ερευνητική στόχευση της διατριβής 123
Η πρόταση της διατριβής 131
4.1. Εισαγωγή 131
4.2. Μοντελοποίηση του περιβάλλοντος παραγωγής περιβάλλοντος παραγωγής JIT Γραμμών Συναρμολόγησης 133
4.2.1 Άτυπη Περιγραφή του Προβλήματος 134
4.2.2 Η προτεινόμενη μαθηματική μοντελοποίηση 140
4.3. Δικριτηριακή μοντελοποίηση και μεθοδολογία επίλυσης 147
4.3.1. Εισαγωγή 147
4.3.2. Επιδιώξεις και λογική της προτεινόμενης μεθοδολογίας επίλυσης 148
4.3.3. Μέθοδος περιορισμών 150
4.3.4. Χρήσιμα χαρακτηριστικά της επαυξημένης μεθόδου περιορισμών 154
4.3.5. Το δι-κριτήριο πρόβλημα 158
4.3.6. Προτεινόμενη Μεθοδολογία Επίλυσης 161
4.3.7. Χαρακτηριστικά και Πλεονεκτήματα 171
4.4. Πολυκριτηριακή μοντελοποίηση και μεθοδολογία επίλυσης 173
4.4.1 Εισαγωγή 173
4.4.2 Επιδιώξεις και λογική της προτεινόμενης μεθοδολογίας επίλυσης 174
4.4.3 Μέθοδος Ολικού Κριτηρίου 176
4.4.3.1 Παρουσίαση της μεθόδου 176
4.4.3.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα 178
4.4.4 Μέθοδος Ικανοποιητικών Στόχων 180
4.4.4.1 Παρουσίαση της μεθόδου 180
4.4.4.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα 183
4.4.5 Προτεινόμενη Μεθοδολογία Επίλυσης 185
4.4.5.1 Παρουσίαση της μεθόδου 185
4.4.5.2 Χαρακτηριστικά και Πλεονεκτήματα 193

Εφαρμογή και αποτελέσματα 199

5.1 Εισαγωγή 199

5.2 Το πρόβλημα της εφαρμογής: Χαρακτηριστικά και παράμετροι 200

5.3 Δικριτηριακή μεθοδολογία επίλυσης: Εφαρμογή και αποτελέσματα 207

5.4 Πολυκριτηριακή μεθοδολογία επίλυσης: Εφαρμογή και αποτελέσματα 217

5.4.1 Λεξικογραφικός Πίνακας Πληρωμών 217

5.4.2 Μέθοδος Ολικού Κριτηρίου 221

5.4.3 Μέθοδος Ικανοποιητικών Στόχων 231

5.4.4 Προτεινόμενη Μεθοδολογία Επίλυσης 239

5.4.5 Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων 249

5.5 Αξιολόγηση του μεθοδολογικού πλαισίου 256

Συμπεράσματα και προοπτικές 261

6.1 Γενικά 261

6.2 Συμπεράσματα 263

6.3 Προοπτικές – Περαιτέρω ερευνητικές κατευθύνσεις 269

Βιβλιογραφία 275

Παράρτημα: Τυποποίηση και Οργάνωση Δεδομένων 293

Παράρτημα: Κατάλογος Δημοσιεύσεων 303

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2. 1 Ο ρόλος του Χρονοπρογραμματισμού σε ένα τυπικό σύστημα παραγωγής....25
Σχήμα 2. 2 Διάγραμμα ενδεικτικού Συστήματος Παραγωγής, Μιας Μηχανής....31
Σχήμα 2. 3 Διάγραμμα ενδεικτικού Συστήματος Παράλληλων Μηχανών....31
Σχήμα 2. 4 Διάγραμμα ενδεικτικού Flow-shop Συστήματος Παραγωγής....32
Σχήμα 2. 5 Διάγραμμα ενδεικτικού job-shop συστήματος παραγωγής....33
Σχήμα 2. 6 Διάγραμμα ενδεικτικού Κυψελοειδούς συστήματος παραγωγής....34
Σχήμα 2. 7 Διάγραμμα ενδεικτικού συστήματος πολλαπλής επεξεργασίας....35
Σχήμα 2. 8 Φιλοσοφία αναζήτησης αλγορίθμου SIMPLEX....50
Σχήμα 2. 9 Διάγραμμα ροής μεθόδου Branch & Bound....55
Σχήμα 2. 10 Απεικόνιση Σταδιακής Διαδικασίας Λήψης Αποφάσεων – Δυναμικός Προγραμματισμός....57
Σχήμα 2. 11 Δομή της φιλοσοφίας των γενετικών αλγορίθμων....63
Σχήμα 2. 10 Απεικόνιση της λογικής των νευρωνικών δικτύων....65
Σχήμα 3. 1 Το μεθοδολογικό πλαίσιο της πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων....82
Σχήμα 3. 2 Ικανές (E_i) και κυριαρχούμενες λύσεις (D_i) σε πρόβλημα 2 κριτηρίων....89
Σχήμα 3. 3 Ο γραμμοσκιασμένος χώρος είναι η απεικόνιση του συνόλου S των δυνατών λύσεων....90
Σχήμα 3. 4 Ρόλος και εμπλοκή του αποφασίζοντος στα στάδια επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων....98
Σχήμα 3. 5 Τυπολογία μεθόδων Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού....100
Σχήμα 3. 6 Γενική Πολυκριτηριακή Προσέγγιση Προβλημάτων Χρονοπρογραμματισμού Παραγωγής....115
Σχήμα 4. 1 Περίγραμμα του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου....133
Σχήμα 4. 2 Ενδεικτικό προφίλ του αποφασίζοντα....134
Σχήμα 4. 3 Χαρακτηριστικά Παραγγελιών....135
Σχήμα 4. 4 Το πρόβλημα του προγραμματισμού (δρομολόγησης) εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μεικτού μοντέλου....135
Σχήμα 4. 5 Περιορισμοί και Προτιμήσεις του προβλήματος....136
Σχήμα 4. 6 Κύρια χαρακτηριστικά της προτεινόμενης μεθοδολογίας επίλυσης του δικριτηριακού σεναρίου....150
Σχήμα 4. 7 Γραφική απεικόνιση μεγεθών της διαδικασίας ε-constraint....152
Σχήμα 4. 8 Διάγραμμα ροής της μεθόδου AUGMECON....157
Σχήμα 4. 9 Τα κριτήρια της προτεινόμενης μοντελοποίησης....158
Σχήμα 4. 10 Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθόδου δικριτηριακής επίλυσης....163
Σχήμα 4. 11 Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου module παραγωγής αντιπροσωπευτικών λύσεων....163
Σχήμα 4. 12 Απεικόνιση ενδεικτικής παραγγωγής και γραφικής καταγραφής λύσεων Pareto – σε τρεις κύκλους σάρωσης....169
Σχήμα 4. 13 Βασικά χαρακτηριστικά προτεινόμενης μεθοδολογίας επίλυσης πολυκρ/κού σεναρίου....174
Σχήμα 4. 14 Προτεινόμενη Μεθοδολογία:Συνέργειας δυο μεθόδων ΠΜΠ....175
Σχήμα 4. 15 Διάγραμμα ροής της μεθόδου «Ικανοποιητικών στόχων»....181
Σχήμα 4. 16 Διάγραμμα ροής προτεινόμενης πολυκριτηριακής μεθοδολογίας επίλυσης....186
Σχήμα 5. 1 Σχηματική αναπαράσταση του Πολυκριτηριακού Ακέραιου Γραμμικού Μοντέλου....205
Σχήμα 5.2 Προϋποθέσεις θεώρησης κριτηρίων για την ανάπτυξη του δικριτηριακού σεναρίου....207
Σχήμα 5. 3 Γράφημα με τα σημεία του πίνακα πληρωμών δικριτηριακού προβλήματος....209

Σχήμα 5. 4 Γραφική απεικόνιση -Ικανές λύσεις *1ου σταδίου* εφαρμογής της μεθόδου σάρωσης του μετώπου....212
Σχήμα 5. 5 Επιλογή νέου πεδίου σάρωσης για το *2ο στάδιο* εφαρμογής της μεθόδου 212
Σχήμα 5. 6 Γραφική απεικόνιση -Ικανές λύσεις 2ου σταδίου εφαρμογής της σάρωσης του μετώπου....214
Σχήμα 5. 7 Γραφική απεικόνιση -Ικανές λύσεις του μετώπου Pareto 215
Σχήμα 5. 8 Πίνακας Πληρωμών – Όψη α. 220
Σχήμα 5. 9 Πίνακας Πληρωμών – Όψη β. 220
Σχήμα 5. 10 Αποτελέσματα Κριτηρίων - σύνοψη....227
Σχήμα 5. 11 Αποτελέσματα Κριτήριου K_1: Εύρος Δρομολόγησης....228
Σχήμα 5. 12 Αποτελέσματα Κριτήριου K_2: Απόκλιση από Προθεσμίες Παράδοσης....228
Σχήμα 5. 13 Αποτελέσματα Κριτήριου K_3: Ακρίβεια JIT Παραγωγής 229
Σχήμα 5. 14 Αποτελέσματα Κριτήριου K_4: Χρησιμοποίηση – Λόγων Απόστασης Πόρων....229
Σχήμα 5. 15 Εξέλιξη του K_1 στους κύκλους της μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων 236
Σχήμα 5. 16 Εξέλιξη του K_2 στους κύκλους της μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων....236
Σχήμα 5. 17 Εξέλιξη του K_3 στους κύκλους της μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων....237
Σχήμα 5. 18 Εξέλιξη του K_4 στους κύκλους της μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων....237
Σχήμα 5. 19 Εξέλιξη κριτηρίου K1 ανά κύκλο Μ.Ι.Σ. και τοπική στρατηγική παραχώρησης Μ.Ο.Κ. 247
Σχήμα 5. 20 Εξέλιξη κριτηρίου K2 ανά κύκλο Μ.Ι.Σ. και τοπική στρατηγική παραχώρησης Μ.Ο.Κ. 247
Σχήμα 5. 21 Εξέλιξη κριτηρίου K3 ανά κύκλο Μ.Ι.Σ. και τοπική στρατηγική παραχώρησης Μ.Ο.Κ. 248
Σχήμα 5. 22 Εξέλιξη κριτηρίου K4 ανά κύκλο Μ.Ι.Σ. και τοπική στρατηγική παραχώρησης Μ.Ο.Κ. 248
Σχήμα 5. 23 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων κριτηρίου K_1....254
Σχήμα 5. 24 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων κριτηρίου K_2....254
Σχήμα 5. 25 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων κριτηρίου K_3....255
Σχήμα 5. 26 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων κριτηρίου K_4....255

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3. 1 Πίνακας Πληρωμών 91
Πίνακας 5. 1 Χαρακτηριστικά και βασικά δεδομένα του προβλήματος της εφαρμογής 203
Πίνακας 5. 2 Πίνακας πληρωμών δικριτηριακού προβλήματος 209
Πίνακας 5. 3 Κομβικά σημεία $1^{ης}$ σάρωσης μετώπου Pareto 210
Πίνακας 5. 4 Ικανές λύσεις *πρώτου σταδίου* εφαρμογής της μεθόδου σάρωσης του μετώπου 211
Πίνακας 5. 5 Κομβικά σημεία $2^{ης}$ σάρωσης μετώπου Pareto 213
Πίνακας 5. 6 Ικανές λύσεις $2^{ο}$ *σταδίου* εφαρμογής της μεθόδου σάρωσης του μετώπου 214
Πίνακας 5. 7 Λεξικογραφικός πίνακας Πληρωμών 218
Πίνακας 5. 8 Πίνακας Πληρωμών: Ποσοστιαία απόστασης επί του βέλτιστου, για κάθε κριτήριο 218
Πίνακας 5. 9 Πίνακας Πληρωμών: Ταξινόμηση θέσεων βελτιστοποίησης ανά κριτήριο 219
Πίνακας 5. 10 Πίνακας Πληρωμών: Ποσοστιαία απόσταση επί του βέλτιστου 219
Πίνακας 5. 11 Πίνακας Πληρωμών: Ποσοστιαία απόδοση λύσεων επί του βέλτιστου κάθε κριτηρίου 219
Πίνακας 5. 12 Περιπτώσεις – Σενάρια Εταιρικής Πολιτικής Προτίμησης Κριτηρίων 222
Πίνακας 5. 13 Συντελεστές Κριτηρίων ανά σενάριο βαρύτητας κριτηρίων 222
Πίνακας 5. 14 Διάλογος 1: Καθορισμός trade-off μεταξύ κριτηρίων $K_2 \leftrightarrow K_1$ 223
Πίνακας 5. 15 Διάλογος 2: Καθορισμός trade-off μεταξύ κριτηρίων $K_2 \leftrightarrow K_3$ 223
Πίνακας 5. 16 Διάλογος 3: Καθορισμός trade-off μεταξύ κριτηρίων $K_2 \leftrightarrow K_4$ 224
Πίνακας 5. 17 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης – Τιμές Κριτηρίων ανά Περίπτωση 224
Πίνακας 5. 18 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης – Τιμές Ολικού Κριτηρίου ανά Περίπτωση 225
Πίνακας 5. 19 Ποσοστιαία απόσταση αποτελεσμάτων από ιδεατές τιμές κριτηρίων 225
Πίνακας 5. 20 Συσχετισμός μεταβολής συντελεστών κριτηρίων και μεταβολής βελτίωσης τιμών κριτηρίων 226
Πίνακας 5. 21 Αποφάσεις και αποτελέσματα μεθόδου Ικανοποιητικών στόχων ανά κύκλο βελτιστοποίησης 235
Πίνακας 5. 22 Ενέργειες του αποφασίζοντος ανά κύκλο της μεθόδου συνέργειας των ΜΙΣ, ΜΟΚ 245
Πίνακας 5. 23 Αποτελέσματα διαδικασίας (ικανές λύσεις) ανά κύκλο της μεθόδου συνέργειας των ΜΙΣ, ΜΟΚ 246
Πίνακας 5. 24 Κατάταξη λύσεωντης μεθόδου συνέργειας των ΜΙΣ, ΜΟΚ αναφορικά με κάθε κριτήριο 246
Πίνακας 5. 25 Συγκεντρωτική παρουσίαση λύσεων ανά μέθοδο 250
Πίνακας 5. 26 Συγκριτική σχετική κατάταξη λύσεων – α' 251
Πίνακας 5. 27 Συγκριτική σχετική κατάταξη λύσεων – β' 252
Πίνακας 5. 28 Σύνοψη συγκριτικών πλεονεκτημάτων προτεινόμενων μεθοδολογιών επίλυσης 258

1

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

- Γενικά
- Ερευνητικές προκλήσεις
- Η συμβολή της διατριβής
- Η διάρθρωση της διατριβής

1.1 Γενικά

Η διαδικασία της λήψης αποφάσεων στον χρονοπρογραμματισμό της παραγωγής αφορά στην καλύτερη δυνατή χρονική ανάθεση και διαχείριση των περιορισμένων πόρων ενός συστήματος για την επεξεργασία ενός αριθμού εργασιών.

Ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον είναι ένα από τα πιο ενδιαφέροντα προβλήματα βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού προσδιορίζεται από μια σειρά παραμέτρων, όπως η διαθέσιμη δυναμικότητα του συστήματος, οι απαιτήσεις για παραγωγή που καθορίζονται από τη ζήτηση των προϊόντων και διάφοροι τεχνολογικοί και άλλοι περιορισμοί που αφορούν ενδεικτικά στις απαιτήσεις για τη συντήρηση και το στήσιμο των μηχανών, στις λειτουργικές ιδιαιτερότητες της εκάστοτε τεχνολογίας του εξοπλισμού, στην διαχείριση του ανθρώπινου δυναμικού και των αποθεμάτων.

Με τα δεδομένα αυτά, επιδιώκεται η επιλογή κατάλληλων τιμών για τις μεταβλητές απόφασης που οδηγούν στην καλύτερη δυνατή τιμή των κριτηρίων κόστους/ οφέλους οι οποίες εκφράζονται εν γένει στην αντικειμενική συνάρτηση. Τα κριτήρια αυτά μπορεί να αναφέρονται στην γρηγορότερη εξυπηρέτηση των πελατών, στο συνολικό κόστος παραγωγής, στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της διαθέσιμης δυναμικότητας κλπ.

Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι η μονοσήμαντη έκφραση ενός κριτηρίου κόστους (π.χ. πλήθος καθυστερημένων παραγγελιών, συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης παραγγελιών κλπ) ή, συνηθέστερα στα πραγματικά προβλήματα, μια πολυδιάστατη έκφραση πολλών κριτηρίων κόστους.

Τις τελευταίες δεκαετίες πολλές ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώθηκαν στο πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής. Για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων σε πραγματικά προβλήματα όπου η υπολογιστική πολυπλοκότητα αποτελεί ένα από βασικά χαρακτηριστικά, έχουν αναπτυχθεί κατά περίπτωση εφαρμογές, σε ερευνητικό κυρίως επίπεδο, που αξιοποιούν τεχνικές βελτιστοποίησης, μεθόδους επιχειρησιακής έρευνας κα τεχνητής νοημοσύνης. Η βιβλιογραφία είναι πραγματικά πλούσια και οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες απαντούν με ευρηματικότητα και αποτελεσματικότητα σε επιμέρους ερευνητικά προβλήματα, ιδιαίτερα στον χώρο της βελτιστοποίησης.

Όμως, η ερευνητική δραστηριότητα σχετίζεται περισσότερο με την ανάπτυξη και αξιοποίηση μεθόδων βελτιστοποίησης και προσεγγιστικών τεχνικών με σκοπό την εύρεση βέλτιστων λύσεων, και λιγότερο με τον τρόπο και το μοντέλο θεώρησης των κριτηρίων βάσει των οποίων μια λύση κρίνεται «βέλτιστη». Ως αποτέλεσμα η επίλυση των προβλημάτων γίνεται μέσα σε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο υποθέσεων, προσεγγίσεων και παραδοχών που ορίζουν μη ρεαλιστικά προβλήματα.

Σήμερα υπάρχουν αξιόλογες προτάσεις και μέθοδοι της επιχειρησιακής έρευνας (π.χ. μαθηματικός προγραμματισμός, δυναμικός προγραμματισμός, κλπ) και της τεχνητής νοημοσύνης (εξελικτικοί αλγόριθμοι, νευρωνικά δίκτυα, έμπειρα συστήματα) που εξασφαλίζουν πολύ καλή απόκριση στην βελτιστοποίηση μεγάλου ποσοστού της ευρύτερης τυπολογίας των προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού ακόμα και εκείνων NP-hard πολυπλοκότητας. Πρόκειται στην πλειονότητά τους όμως για θεωρητικές προσεγγίσεις με εφαρμογή σε προβλήματα αναφοράς μικρού κατά κανόνα μεγέθους και με πολλές παραδοχές συμβιβασμού κατά την μοντελοποίηση του πραγματικού βιομηχανικού περιβάλλοντος. Δεν αποτελούν, δηλαδή, ολοκληρωμένη πρόταση για την προσέγγιση του συνόλου των προκλήσεων που απαντώνται στα πραγματικά προβλήματα.

1.2 Ερευνητικές προκλήσεις

Όταν πρόκειται για επίλυση πραγματικών προβλημάτων διοίκησης παραγωγής, και συγκεκριμένα χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε παραγωγικά συστήματα, η διαμόρφωση του σωστού μοντέλου αποτελεί μια από τις προκλήσεις της διαδικασίας και γίνεται σε συνεργασία του αναλυτή με τους ειδικούς του περιβάλλοντος παραγωγής. Στόχος είναι να αποτυπωθεί στο μοντέλο τόσο ο τρόπος λειτουργίας του

συστήματος παραγωγής, όσο και οι περιορισμοί και τα κριτήρια αξιολόγησης που εκφράζουν τον τρόπο λήψης αποφάσεων στην επιχείρηση. Σε αυτή την φάση, επισημαίνεται ο κίνδυνος ορθής επίλυσης του λάθος προβλήματος.

Άλλες προκλήσεις στην διαδικασία διαμόρφωσης του προβλήματος είναι το μέγεθος του μοντέλου, καθώς αυτό συνήθως αντανακλά το κόστος του χρόνου υπολογισμού/επίλυσης. Στο πλαίσιο αυτό, κατά κανόνα, επιδιώκεται η κατά το δυνατόν η ελάττωση των διαστάσεων του προβλήματος, ήτοι ενός συνδυασμού του αριθμού των μεταβλητών, του πεδίου τιμών τους και των σχέσεων αποτύπωσης των περιορισμών.

Η ανάγκη για αντιμετώπιση των πραγματικών προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής οδήγησε την επιστημονική κοινότητα στη δημιουργία προηγμένων τεχνικών και μαθηματικών προσεγγίσεων . Αποτέλεσμα είναι σήμερα οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες να εστιάζονται πλέον στην «προσεγγιστική επίλυση» όλο και περισσότερων πραγματικών προβλημάτων, ενώ λίγες είναι αυτές που ασχολούνται με τη διερεύνηση της χρήσης μεθόδων βελτιστοποίησης σε πραγματικά προβλήματα.

Ειδικότερα, η φύση των πραγματικών προβλημάτων στον χώρο του χρονοπρογραμματισμού εργασιών χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο από ιδιαιτερότητες η συνδυαστική αντιμετώπιση των οποίων απαιτεί βέβαια την αξιοποίηση των κατάλληλων – κατά περίπτωση- μεθόδων και τεχνικών της επιχειρησιακής έρευνας ή και της τεχνητής νοημοσύνης στο τμήμα του προβλήματος που αφορά στην βελτιστοποίηση, όμως σίγουρα απαιτείται και η ταυτόχρονη αξιοποίηση και προσαρμογή τεχνικών και μεθόδων της επιστήμης υποστήριξης λήψης αποφάσεων για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση επίλυσης που θα είναι και πρακτικά εφαρμόσιμη.

Η αντιμετώπιση πραγματικών προβλημάτων και η ανάπτυξη πρακτικά εφαρμόσιμων λύσεων απαιτεί εξειδικευμένη και στοχευμένη προσέγγιση για κάθε κατηγορία προβλήματος. Στο πλαίσιο αυτό, η διατριβή εξειδικεύει την ερευνά της σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου (ΧΠΓΣΜΜ).

1.2.1 Προβλήματα χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου

Διάφορες θεωρητικές και ερευνητικές προσεγγίσεις υπάρχουν για την επίλυση του προγραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου (MMALS-problem). Σε μοντέλα που θεωρούν τη βελτιστοποίηση ενός και μόνο κριτηρίου,

χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι μαθηματικού προγραμματισμού, συνεχών ή διακριτών μεταβλητών (ακέραιος και μικτός-ακέραιος προγραμματισμός), δυναμικός προγραμματισμός κλπ. Από την άλλη πλευρά, προβλήματα προγραμματισμού παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης που είναι μη γραμμικά ή μεγάλης κλίμακας, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες και τις δυσκολίες που μπορεί να τα χαρακτηρίζουν, αντιμετωπίζονται συχνά στην βιβλιογραφία με προσεγγιστικό τρόπο, βρίσκοντας προσεγγιστικά βέλτιστες λύσεις με τη βοήθεια των ευρετικών ή μετα-ευρετικών τεχνικών βάσει εξελικτικών αλγορίθμων, ήτοι γενετικών αλγόριθμών ή αλγόριθμων γειτονικής αναζήτησης. Η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του προβλήματος, τον αριθμό και τη διάταξη των μηχανημάτων, το σύστημα παραγωγής, το σύστημα γραμμή συναρμολόγησης και την στατική ή δυναμική φύση της εργασίας.

Ωστόσο, όταν προσπαθεί κάποιος να διαμορφώσει και να λύσει πραγματικά προβλήματα προγραμματισμού μιας γραμμής συναρμολόγησης, συνήθως υπάρχει κάποιος αποφασίζων ο οποίος καθορίζει περισσότερα από ένα κριτήρια (στόχους) για την αξιολόγηση και την επιλογή των λύσεων πλάνου παραγωγής. Η ανάλυση αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων απόφαση έχει αντιμετωπίσει αυτό το γεγονός σε πολλές πτυχές του, προσπαθώντας να βοηθήσει τον αποφασίζοντα να ενσωματώσει τις προτιμήσεις του στα κριτήρια αυτά κατά τη διαδικασία αναζήτησης, ώστε στη συνέχεια να προκύψουν αποδεκτές λύσεις για αυτόν. Μια εμπεριστατωμένη επανεξέταση για τον προγραμματισμό παραγωγής που αφορά πολλαπλά κριτήρια προτείνεται από (T'Kindt & Billaut, 2005).

Για την ειδική περίπτωση των πολυκριτηριακών προβλημάτων προγραμματισμού εργασιών σε περιβάλλον γραμμών συναρμολόγησης, αναφέρεται χαρακτηριστικά η περίπτωση της συναρμολόγησης οχημάτων σε εργοστάσιο αυτοκινητοβιομηχανίας. Το πρόβλημα συνίσταται στον καθορισμό της κατανομής των πόρων και του σχεδιασμού προγράμματος δρομολόγησης οχημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες επιλογές μοντέλων, τους περιορισμούς και τους στόχους του περιβάλλοντος παραγωγής. Στη βιβλιογραφία, το πρόβλημα, παρά την πολυκριτηριακή του φύση, έχει αντιμετωπιστεί είτε ως ένα πρόβλημα με ένα και μοναδικό στόχο (κριτήριο) είτε με διάφορους στόχους λεξικογραφικά διατεταγμένους (Benoit, 2007), (Briant, Naddef, & Mounié, 2007), (Cordeau, Laporte, & Pasin, 2007), (Estellon, Gardi, & Nouioua, 2008), (Ribiero, Aloise, & Urrutia, 2007).

Είναι χαρακτηριστικό ότι, λίγοι ερευνητές και βιομηχανίες έχουν καταφέρει ή επιδιώξει να χρησιμοποιήσουν αλγορίθμους που προσεγγίζουν πολυκριτηριακά την επίλυση, για την αντιμετώπιση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης, ενδεικτικά, στον χώρο των αυτοκινητοβιομηχανιών. Η

κατάσταση αυτή μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι π.χ. το πρόβλημα προγραμματισμού οχημάτων στην αυτοκινητοβιομηχανία εθεωρείτο μέχρι πριν λίγα χρόνια ως ένα πρόβλημα με έντονα λεξικογραφικό χαρακτήρα κριτηρίων βελτιστοποίησης. Ωστόσο, είναι πλέον αποδεκτό και κατανοητό ότι η λεξικογραφική θεώρηση των κριτηρίων είναι τέτοια ώστε να μπορεί να εξαλείψει και να κρύψει πολλές «ενδιαφέρουσες» λύσεις για τον αποφασίζοντα (Zinflou, Gagné, & Gravel, 2008). Πράγματι, η χαλάρωση της απόλυτης προτεραιότητας που αποδίδεται λεξικογραφικά στο κύριο κριτήριο είναι δυνατόν να αποκαλύψει και άλλες ελκυστικές «βέλτιστες» λύσεις που αποτυπώνουν συμβιβασμό ανάμεσα στα κριτήρια. Οι νέες αυτές λύσεις δίνουν νέο ορίζοντα στην υποστήριξη σχετικών αποφάσεων χρονοπρογραμματισμού και μπορούν να εξασφαλίσουν οφέλη για την εταιρεία σε οικονομικό, εμπορικό, κοινωνικό επίπεδο. Έστω και μικρές βελτιώσεις μπορεί να είναι ιδιαίτερα κρίσιμες και σημαντικές στην ιδιαίτερα ανταγωνιστική περίοδο που διανύουν οι επιχειρήσεις.

Πολλές τεχνικές έχουν προταθεί για την επίλυση προβλημάτων απόφασης πολλαπλών κριτηρίων λαμβάνοντας υπόψη το γνωστικό στυλ του αποφασίζοντος και τις ικανότητες, όπως μέθοδοι υπεροχής, συναρτήσεις χρησιμότητας, μέθοδοι παλινδρόμησης ή επιμερισμού και πολυκριτήριες μαθηματικές τεχνικές προγραμματισμού (βλέπε (Eds: Figueira, Greco, & Ehrgott, 2005) και (Eds: Ehrgott, Figueira, & Greco, 2010) για περαιτέρω εμβάθυνση στην κατάσταση του ερευνητικού επιπέδου στο συγκεκριμένο πεδίο). Οι τεχνικές όμως αυτές συνήθως εξαντλούνται σε ανάλυση ακαδημαϊκού επιπέδου, σε εφαρμογή σε δοκιμαστικά benchmark προβλήματα περιορισμένων διαστάσεων και τυποποιημένων μορφών και σπάνια περνούν -υπό προϋποθέσεις κι παραδοχές- σε εφαρμογές πραγματικών προβλημάτων.

Τα πραγματικά προβλήματα είναι συνήθως πολύ μεγάλα και σύνθετα, με την έννοια ότι εμπλέκονται πολλές μεταβλητές και περιορισμοί, ενώ επικρατούν μεταξύ τους πολύπλοκες σχέσεις. Στην περίπτωση των προβλημάτων πολλαπλών κριτηρίων για δρομολόγηση εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης, οι περισσότεροι ερευνητές υποβαθμίζουν το τμήμα υποστήριξης αποφάσεων του προβλήματος ή θεωρούν μια έναν εικονικό αποφασίζοντα που ορίζει τα βάρη ή τους στόχους των κριτηρίων και επικεντρώνονται στην πτυχή της βελτιστοποίησης του προβλήματος.

Συμπερασματικά, θεωρούμε ότι, κατά την γνώμη μας, υπάρχει σημαντικό ερευνητικό κενό στην ολοκληρωμένη αντιμετώπιση των ιδιαίτερων ερευνητικών προκλήσεων που αφορούν σε κατηγορία των πραγματικών προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού εργασιών παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης. Τα σχετικά προβλήματα

εμφανίζουν τα ακόλουθα ιδιαίτερα έντονα χαρακτηριστικά ο συνδυασμός των οποίων αποτελεί ακόμα πρόκληση για την ερευνητική κοινότητα:

- Μεγάλη κλίμακα προβλήματος που αποτυπώνεται τόσο στον μεγάλο όγκο δεδομένων όσο και στον μεγάλο αριθμό περιορισμών και μεταβλητών απόφασης.
- Ύπαρξη πολλαπλών και αντικρουόμενων κριτηρίων απόφασης, που εκφράζουν διαφορετικές εκφάνσεις/μορφές προτιμήσεων, κόστους ή κέρδους για την επιχείρηση.
- Ανάγκη ενεργού συμμετοχής του αποφασίζοντος (θεωρούμενου ιδιοκτήτη του προβλήματος και χρήστη της εφαρμογής) τόσο στην διαδικασία μοντελοποίησης του προβλήματος όσο και στην διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, ήτοι, στην διαδικασία επίλυσης αναζήτησης της θεωρούμενης βέλτιστης λύσης, στο πλαίσιο ενός αλληλεπιδραστικού μοντέλου πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.
- Απαίτηση για εύρεση ικανοποιητικής «βέλτιστης» (ή συνόλου) λύσης σε χρονικά αποδεκτό χρόνο, γεγονός που αποκλείει την εφαρμογή εξαντλητικών μεθόδων αναζήτησης στον χώρο των λύσεων ή/και τον χώρο των κριτηρίων.

1.2.2 Πολυκριτηριακές προσεγγίσεις

Για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, η διαδικασία αναζήτησης λύσεων ενός πολυκριτηριακού προβλήματος στο συγκεκριμένο πεδίο αντιμετωπίστηκε, τόσο από μαθηματική όσο και από «φιλοσοφική» οπτική, ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μιας εκ των προτέρων διαμορφωμένης αριθμητικής έκφρασης, που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει τη συνάρτηση χρησιμότητας του εν λόγω προβλήματος.

Στην πραγματικότητα, πρόκειται για μια παραπλανητική προσέγγιση, δεδομένου ότι σε ένα σύνθετο πρόβλημα ή σε ένα πρόβλημα μη σύμμετρων κριτηρίων η συνάρτηση χρησιμότητας δεν εκφράζει παρά μια αυθαίρετη συνάθροιση των μέτρων επίδοσης, που οδηγεί σε μία και μοναδική τελική λύση του προβλήματος, που χωρίς τεκμηρίωση θεωρείται ως η πλέον πρόσφορη. Μάλιστα, η προσέγγιση αυτή δεν αποκλείει την δυνατότητα υποκειμενικής κατεύθυνσης της διαδικασίας αναζήτησης σε μια προαποφασισμένη επιλογή, που καλύπτεται από ένα πέπλο φαινομενικής αντικειμενικότητας. Σε κάθε περίπτωση, η συνάθροιση των κριτηρίων αναιρεί τη δυνατότητα διερεύνησης κρίσιμων πτυχών του προβλήματος, που σχετίζονται με τον τρόπο αλληλεπίδρασης των κριτηρίων και την ύπαρξη καλά συμβιβαστικών περιοχών του πεδίου αποτίμησης.

Η σύγχρονη προσέγγιση αποσκοπεί στην ξεκάθαρη αντιμετώπιση του προβλήματος, με ξεχωριστό χειρισμό των επιμέρους κριτηρίων. Πρόκειται για μια σαφώς πιο δίκαιη

και αντικειμενική στρατηγική, που αποσκοπεί στην ταυτόχρονη παραγωγή πολλαπλών μη κατωτέρων λύσεων, που είναι αντιπροσωπευτικές του μετώπου Pareto.

Επισημαίνεται ακόμη ότι, παρά την αλματώδη ανάπτυξή της τελευταίας δεκαετίας, η εφαρμογή των πολυκριτηριακών αλγορίθμων σε προβλήματα επιχειρησιακού χαρακτήρα είναι μάλλον περιορισμένη. Ειδικότερα, σε θέματα διαχείρισης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης έχουν δοκιμαστεί πρακτικά ελάχιστες τεχνικές, και αυτές περιορισμένες σε μικρό, σχετικά, εύρος προβλημάτων.

Επιπλέον, υπάρχει ελάχιστη εμπειρία σε εφαρμογές με περισσότερα από δύο κριτήρια. Συχνά, όταν σε ένα πρόβλημα εμπλέκονται πολλαπλά κριτήρια, προτείνεται η ενσωμάτωσή τους σε έως τρία μέτρα επίδοσης, που αποτελούν συνιστώσες της διανυσματικής αντικειμενικής (στοχικής) συνάρτησης. Με τη διαδικασία αυτή αποφεύγεται ο κίνδυνος δημιουργίας εξαιρετικά εκτεταμένων μετώπων Pareto, που καλύπτουν σημαντικό τμήμα του πεδίου αποτίμησης. Η άποψή μας είναι ότι πρόκειται για εγγενή αδυναμία των υφιστάμενων πολυκριτηριακών σχημάτων να χειριστούν πολυδιάστατα πεδία αποτίμησης.

Ένα σημαντικό ερώτημα που εγείρεται είναι ο τρόπος που μπορεί ο χρήστης-αποφασίζων να ερμηνεύσει και, στη συνέχεια, να χειριστεί το σύνολο των Pareto βέλτιστων λύσεων στις οποίες καταλήγει η διαδικασία ανάλυσης και παραγωγής λύσεων, ώστε να επιλέξει την καλύτερα συμβιβαστική από αυτές. Προφανώς, σε μια εφαρμογή όχι απλά ακαδημαϊκού ενδιαφέροντος αλλά επιχειρησιακού χαρακτήρα απαιτείται η διατύπωση μιας ξεκάθαρης λύσης, που εγγυάται έναν πρόσφορο συγκερασμό των αντικρουόμενων κριτηρίων.

Οι πολυκριτηριακοί αλγόριθμοι παρέχουν μια ικανοποιητική προσέγγιση του μετώπου Pareto, δηλαδή των διαφόρων συμβιβασμών μεταξύ των επιμέρους κριτηρίων, λαμβάνοντας υπόψη αποκλειστικά την αρχή της κυριαρχίας. Με τον τρόπο αυτό, ενδέχεται να κατευθυνθούν σε περιοχές λύσεων που είναι μαθηματικά βέλτιστες (αφού ανήκουν στο μέτωπο Pareto), αλλά όχι αποδεκτές από την σκοπιά του χρήστη. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση λύσεων που βρίσκονται στις ακραίες περιοχές του μετώπου, που σημαίνει ότι υπερτερούν σημαντικά ως προς κάποια από τα κριτήρια, αλλά παρουσιάζουν χαμηλή επίδοση ως προς τα υπόλοιπα κριτήρια. Ωστόσο, δεν είναι ασυνήθιστη η περίπτωση που για να είναι αποδεκτή, στην πράξη, μια βέλτιστη επιλογή Pareto, οφείλει να παρέχει μια ελάχιστη επίδοση για το σύνολο των κριτηρίων. Για τον λόγο αυτό, οι «ακραίες» λύσεις ενός πολυκριτηριακού προβλήματος θεωρούνται τελικά απορριπτέες, ανεξάρτητα αν είναι αποδεκτές από καθαρά μαθηματική άποψη.

Συμπερασματικά, διαφαίνεται ότι υπάρχουν ακόμη αρκετά περιθώρια βελτίωσης των υφιστάμενων σχημάτων διανυσματικής βελτιστοποίησης, όσον αφορά:

- την προσαρμογή διαφορετικών μηχανισμών αναζήτησης λαμβάνοντας υπόψη και τις ιδιαιτερότητες του πολυκριτηριακού προβλήματος.
- τον χειρισμό προβλημάτων με περισσότερα των δύο κριτήρια, αλλά με τρόπο ώστε η διαδικασία επιλογής να μην καταλήγει σε ένα ανεξέλεγκτα μεγάλο αριθμό βέλτιστων λύσεων.
- την ενσωμάτωση επιπλέον κριτηρίων στη διαδικασία επιλογής, που θα αξιοποιούν την εμπειρία του χρήστη και θα καθοδηγούν την αναζήτηση προς τις πλέον πρόσφορες περιοχές του μετώπου Pareto, που είναι όχι μόνο βέλτιστες από μαθηματική άποψη, αλλά και αποδεκτές, με βάση τις απαιτήσεις του προβλήματος, εξασφαλίζοντας έτσι την παραγωγή επιχειρησιακά αξιοποιήσιμων συμβιβασμών μεταξύ των αντικρουόμενων κριτηρίων.

1.3 Η συμβολή της διατριβής

Αντικείμενο της διατριβής είναι η πολυκριτηριακή μοντελοποίηση μεγάλης κλίμακας πολυστοχικών προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής και η πρόταση μεθοδολογίας επίλυσης τους με προσαρμογή και αξιοποίηση πολυκριτηριακών μεθόδων υποστήριξης αποφάσεων.

Η διατριβή εστιάζει τόσο στο μαθηματικό-υπολογιστικό σκέλος (επισκόπηση και αξιοποίηση αλγορίθμων βελτιστοποίησης και πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού) όσο και στο μεθοδολογικό σκέλος που αφορά στην εφαρμογή προσεγγίσεων σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής. Ως προς το τελευταίο, η έμφαση δίνεται σε ένα από τα πλέον απαιτητικά προβλήματα, ήτοι στο χρονοπρογραμματισμό παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου, με χρήση πολλαπλών κριτηρίων.

Το πρόβλημα εξετάζεται ως προς διάφορες πτυχές του, από τη διαμόρφωση του μοντέλου (σχηματοποίηση, παραμετροποίηση) μέχρι τη διαδικασία αναζήτησης λύσεων και την στρατηγική επιλογής της καλύτερα συμβιβαστικής λύσης. Η διερεύνηση ξεκινά από την απλή δομή του προβλήματος βελτιστοποίησης, που αφορά σε ακέραιες συναρτήσεις. Το ενδιαφέρον εστιάζεται αρχικά στις τεχνικές ολικής βελτιστοποίησης. Εξετάζονται και αξιολογούνται οι υφιστάμενες μέθοδοι βελτιστοποίησης, όπως μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού, αλλά και προσεγγιστικές μέθοδοι αρκετές από τις οποίες εμπνέονται από συναφείς φυσικές (π.χ. προσομοιωμένη ανόπτηση) και βιολογικές διεργασίες (π.χ. γενετικοί

αλγόριθμοι). Η διερεύνηση γίνεται για να αποτυπωθεί η αναγκαία γνώση και να αξιοποιηθεί προηγούμενη ερευνητική εμπειρία από σχετικές προσπάθειες μοντελοποίησης και μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης προβλημάτων παρόμοιας προβληματικής, στην φάση μαθηματικής μοντελοποίησης της συγκεκριμένης τυπολογίας προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις (κριτήρια).

Ο χειρισμός του προβλήματος ως προς το τμήμα της βελτιστοποίησης διαφοροποιείται ριζικά εφόσον λαμβάνονται υπόψη περισσότερα του ενός κριτήρια, που είναι μεταξύ τους ανταγωνιστικά και συχνά δεν αποτιμώνται σε κοινή μονάδα μέτρησης.

Το υπόβαθρο μιας τέτοιας προσέγγισης είναι η έννοια της κυριαρχίας, που συνεπάγεται την ύπαρξη πολλαπλών εναλλακτικών λύσεων που είναι από μαθηματική οπτική βέλτιστες, διαμορφώνοντας το λεγόμενο μέτωπο Pareto στο πεδίο αποτίμησης. Μετακινούμενοι στην επιφάνεια του μετώπου, δεν είναι δυνατή η βελτίωση ενός κριτηρίου χωρίς την επιδείνωση ενός τουλάχιστον άλλου. Στα πλαίσια της εργασίας εξετάζεται με λεπτομέρεια το ιστορικό των μεθόδων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Εξετάζονται και αξιολογούνται αντίστοιχα οι τεχνικές πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού κυρίως ως προς τους διαφορετικούς τρόπους εμπλοκής του αποφασίζοντος στη διαδικασία επίλυσης και από τη διαφορετική υποστήριξη αποφάσεων που παρέχουν.

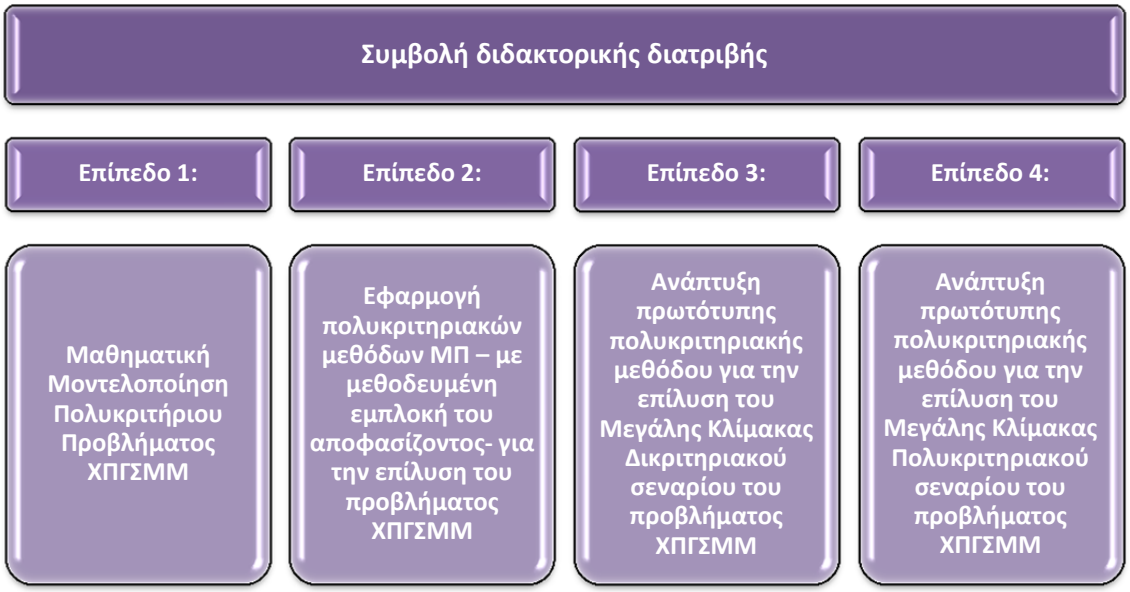
Η διατριβή αξιοποιεί και συνδυάζει στην πρότασής της, μεθόδους και τεχνικές τόσο από το πεδίο της επιχειρησιακής έρευνας και του μαθηματικού προγραμματισμού όσο και από την περιοχή της πολυκριτηριακής υποστήριξης αποφάσεων, προκειμένου να απαντήσει αποτελεσματικά στις ερευνητικές προκλήσεις και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν τα πραγματικά προβλήματα του σχετικού βιομηχανικού πεδίου.

Η μεθοδολογία επίλυσης της επιλεγμένης κατηγορίας προβλημάτων αναπτύσσεται σε δύο επίπεδα-περιπτώσεις που εκφράζουν αντίστοιχα δύο διαφορετικά σενάρια του γενικευμένου προβλήματος: το επίπεδο του δικριτηριακού προβλήματος και το επίπεδο του πολυκριτήριου προβλήματος για τα οποία προτείνεται να ακολουθηθεί διαφορετική προσέγγιση.

Η Πρόταση της Διατριβής που παρουσιάζεται αναφέρεται σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου (ΧΠΓΣΜΜ). Όμως, γίνεται σαφές στην εργασία ότι μπορεί να εφαρμοστεί -με κατάλληλες προσαρμογές- και σε διαφορετικά προβλήματα προγραμματισμού παραγωγής που αντιμετωπίζουν ερευνητικές προκλήσεις παρόμοιας φύσης.

Στόχος δεν είναι το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο να ακυρώσει ή να αντικαταστήσει υπάρχοντα συστήματα αλλά να δράσει συμπληρωματικά στο τμήμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης που αφορά στην πολυκριτηριακή θεώρηση των μέτρων αξιολόγησης-στόχων ποιότητας. Η διατριβή δεν στοχεύει να προτείνει έναν ακόμα αλγόριθμο βελτιστοποίησης καθώς θεωρούμε ότι το υπάρχον ερευνητικό επίπεδο καλύπτει τις απαιτήσεις μας σε επίπεδο μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης.

Η συμβολή της διδακτορικής διατριβής εντοπίζεται σε τέσσερα (4) επίπεδα όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 1. 1 Συμβολή διατριβής

Επίπεδο 1ο:

Μαθηματική μοντελοποίηση του πολυκριτηριακού μεγάλης κλίμακας προβλήματος χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου.

Η πρόταση της διατριβής προτείνει και παρουσιάζει την μαθηματική μοντελοποίηση του γενικευμένου προβλήματος χρονικού προγραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου, ως ενός πολυκριτηριακού προβλήματος ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Η εργασία της μοντελοποίησης είναι μια συνεργατική διαδικασία του αναλυτή με τον αποφασίζοντα (ιδιοκτήτη του προβλήματος), και γίνεται με γνώμονα την ελαχιστοποίηση των παραδοχών και των συμβιβασμών που τείνουν να απομακρύνουν το προκύπτον μοντέλο από το πραγματικό πρόβλημα. Επιλέγεται, επιδιώκεται και επιτυγχάνεται η αποτύπωση του προβλήματος σε ακέραιο γραμμικό μοντέλο, προκειμένου να μειωθεί κατά το δυνατόν η προσεγγιστικότητα των υπολογιστικών διεργασιών βελτιστοποίησης, στο βαθμό που το επιτρέπουν το μέγεθος του προβλήματος και η δυνατότητα των λυτών που

χρησιμοποιούνται. Σε αυτή την φάση, αναπτύσσεται το «μοντέλο βάσης» του προβλήματος το οποίο χρησιμοποιείται, με τις κατάλληλες προσαρμογές θεώρησης των κριτηρίων, κατά την μεθοδολογία επίλυσης. Αποφεύγεται στο πλαίσιο της διατριβής (χωρίς να αποκλείεται, ή να επηρεάζει την ουσία της μεθοδολογίας επίλυσης) η χρήση προσεγγιστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, οι οποίοι αφενός απαιτούν πολύπλοκη κωδικοποίηση και ανάπτυξη τεχνικών εξέλιξης γενεών (π.χ. διασταύρωσης και μετάλλαξης στην περίπτωση των γενετικών), λόγω των πολλών και ιδιαίτερων περιορισμών που χαρακτηρίζουν το πρόβλημα, αφετέρου δεν εξασφαλίζουν σύγκλιση του αλγορίθμου σε ολικά βέλτιστες λύσεις, γεγονός που θα έθετε ακόμα μια παράμετρο ασάφειας στο ήδη «βεβαρημένο» λόγω της πολυκριτηριακής του φύσης πρόβλημα. Ακολουθούνται αρχές αποδοτικού σχεδιασμού μοντέλων ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού προκειμένου να ευνοούνται κατά το δυνατόν η βελτίωση της απόδοσης των αλγορίθμων αναζήτησης βέλτιστης λύσης. Η μοντελοποίηση σε αυτή την μορφή επιτρέπει την αξιοποίηση κατάλληλου λύτη από το πλήθος των λυτών μαθηματικού προγραμματισμού οι οποίοι κατά γενική παραδοχή ανταποκρίνονται άριστα και με ταχύτητα στην περίπτωση γραμμικών προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού, ακόμα και μεγάλης κλίμακας (ενδεικτικά CPLEX της ILOG, Mosek, Gurobi, κ.α.).

Σε κάθε περίπτωση, η προτεινόμενη μοντελοποίηση επιτρέπει την κατ’ επιλογήν συνδυαστική αξιοποίηση και εξελικτικών αλγορίθμων κατά τις υπολογιστικές φάσεις βελτιστοποίησης. Η βιβλιογραφία παρέχει πλήθος καλών επιλογών για την προσεγγιστική βελτιστοποίηση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού, ενδ. (Μπότσικας, 2009). Θα απαιτούνταν βέβαια η κατάλληλη κωδικοποίηση των λύσεων, με γνώμονα πάντα το ήδη προτεινόμενο μοντέλο για την συγκεκριμένη κατηγορία προβλημάτων.

Επίπεδο 2ο:

Εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων – με μεθοδευμένη εμπλοκή του αποφασίζοντος- για την επίλυση του πολυκριτηριακού σεναρίου του προβλήματος.

Η διατριβή προσάρμοσε και εφάρμοσε πολυκριτηριακές μεθόδους μαθηματικού προγραμματισμού στην γενική περίπτωση των προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής – με έμφαση σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου.

Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της διατριβής αξιοποιήθηκαν και εφαρμόστηκαν χαρακτηριστικές αντισταθμιστικές και μη αντισταθμιστικές μέθοδοι, αλλά και -ιδωμένες από άλλη σκοπιά- μέθοδοι αλληλεπιδραστικές, εκ-των-προτέρων και εκ-των υστέρων εμπλοκής του αποφασίζοντος σε πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου. Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών αποτελεί μια ακόμα καινοτομία καθώς –εξ' όσων γνωρίζουμε, δεν συναντάμε στην βιβλιογραφία σχετική ερευνητική εργασία πολυκριτηριακής προσέγγισης σε πραγματικά προβλήματα αυτής της συγκεκριμένης κατηγορίας. Με τον τρόπο αυτό αναδείχθηκαν οι αδυναμίες και τα πλεονεκτήματά τους, γεγονός που οδήγησε στην ανάπτυξη δύο πρωτότυπων μεθοδολογιών για την επίλυση του δικριτηριακού σεναρίου και του πολυκριτηριακού σεναρίου του προβλήματος.

Επίπεδο 3ο:

Πρωτότυπη Μεθοδολογία επίλυσης του δικριτηριακού σεναρίου του προβλήματος.

Η διατριβή προτείνει συγκεκριμένη Μεθοδολογία Επίλυσης του Ειδικού Δικριτηριακού σεναρίου του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου. Η μεθοδολογία είναι κατάλληλη για τις περιπτώσεις εκείνες των προβλημάτων που η εταιρεία (αποφασίζων) δίνει απόλυτη και σαφή προτεραιότητα/ιεραρχία σε κάποια κριτήρια, και είναι σε θέση να εντοπίσει την πολυκριτηριακή θεώρηση επίλυσης σε δύο μόνο κριτήρια, για τα οποία δεν έχει ορίσει μοντέλο ιεραρχίας. Στην περίπτωση αυτή, η πρόταση της διατριβής είναι σε θέση να αξιοποιήσει επιπλέον και το πλεονέκτημα της δυνατότητας οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων στον χώρο των δύο διαστάσεων, γεγονός που δεν είναι εύκολο/εύληπτο από τον αποφασίζοντα όταν περνάμε σε περισσότερες των δύο διαστάσεις. Με μελέτη της βιβλιογραφίας αναφερόμενης σε σχετικά πραγματικά προβλήματα, θεωρούμε ότι η δικριτήρια περίπτωση είναι συνήθης στον χώρο των βιομηχανιών παραγωγής με γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου (π.χ. στις αυτοκινητοβιομηχανίες), και για τον λόγο αυτό έγινε η ερευνητική προσπάθεια ιδιαίτερης (ή και εναλλακτικής) αντιμετώπισης, δεδομένων των πλεονεκτημάτων που μπορεί να αξιοποιηθούν, εφόσον ισχύει η παραδοχή των δύο κριτηρίων.

Η πρόταση της διατριβής αφορά στην κατάλληλη προσαρμογή και επέκταση της μεθόδου των Περιορισμών, και της συγγενούς αυτής Augmecon, δηλ. μιας πολυκριτήριας, εκ των υστέρων (a-posteriori) μεθόδου παραγωγής Pareto λύσεων, σε μια πρωτότυπη διαδραστική (interactive) προσέγγιση πολυκριτήριας λήψης αποφάσεων προσαρμοσμένη στο πρόβλημά μας.

Η μεθοδολογία επιδιώκει να καθοδηγήσει με συστηματικό τρόπο, μέσω της εμπλοκής του αποφασίζοντος, την αναζήτηση σε αντιπροσωπευτικές αλλά και ενδιαφέρουσες «βέλτιστες» λύσεις του μετώπου Pareto. Στόχος είναι να εντοπίσει την αναζήτηση μόνο σε περιοχές που παρουσιάζουν προοπτική από πλευράς συμβιβαστικής θεώρησης των κριτηρίων και να μετριάσει, με τον τρόπο αυτό, το απαιτούμενο υπολογιστικό κόστος που χαρακτηρίζει εν γένει τις εξαντλητικές μεθόδους παραγωγής.

Με τον τρόπο αυτό η προτεινόμενη προκύπτουσα προσέγγιση, αξιοποιεί τα συμπληρωματικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι δυο πολυκριτηριακές προσεγγίσεις.

Επίπεδο 4ο:

Πρωτότυπη Μεθοδολογία επίλυσης του πολυκριτηριακού σεναρίου του προβλήματος.

Η μεθοδολογία είναι κατάλληλη για την γενική περίπτωση των προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής – με έμφαση σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου. Η διατριβή προτείνει, σε αυτή την περίπτωση, μια υβριδική προσέγγιση η οποία συνδυάζει και προσαρμόζει κατάλληλα μια αντισταθμιστική, εκ-των προτέρων (a-priori) μέθοδο πολυκριτήριας βελτιστοποίησης με μία μη αντισταθμιστική, διαδραστική (interactive) μέθοδο. Στην μεθοδολογία επιδιώκεται ισορροπημένα άλλα έντονα η εμπλοκή του αποφασίζοντος, με στόχο την επιτάχυνση της διαδικασίας αναζήτησης ικανοποιητικών «βέλτιστων» λύσεων και την αποφυγή σπατάλης πολύτιμης ενέργειας και χρόνου σε περιοχές αναζήτησης των μετώπου Pareto που, αξιολογώντας την πορεία της αναζήτησης και των αποτελεσμάτων, παρουσιάζουν μικρό σχετικό ενδιαφέρον. Με τον τρόπο αυτό η προτεινόμενη προκύπτουσα προσέγγιση, αξιοποιεί τα συμπληρωματικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι δυο πολυκριτηριακές προσεγγίσεις.

Σε όλα τα επίπεδα συμβολής της διατριβής στόχος είναι η συμμετοχή και η συνεισφορά του αποφασίζοντος να γίνεται με εύκολο και άμεσο τρόπο, προκειμένου να εξασφαλίζεται η προθυμία του να υποστηρίξει την χρησιμοποίηση του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου σε επίπεδο εφαρμογής, σε πραγματικές συνθήκες.

Η συμβολή της διατριβής επιβεβαιώνεται με την εφαρμογή της Πρότασης – και στα τέσσερα επίπεδα-, σε συγκεκριμένο πρόβλημα με δεδομένα που προσομοιάζουν πραγματικές συνθήκες βιομηχανικού περιβάλλοντος, ως προς τις παραμέτρους λειτουργίας του παραγωγικού συστήματος, το μέγεθος/όγκο των δεδομένων, την κωδικοποίηση και την ποιότητα των δεδομένων, το προφίλ του αποφασίζοντος και την στρατηγική προτιμήσεων.

1.4 Η διάρθρωση της διατριβής

Η διατριβή είναι οργανωμένη σε 6 κεφάλαια και 2 παραρτήματα, ως ακολούθως:

Κεφάλαιο 1:

Το πρώτο (το παρόν) κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της αναφοράς και ουσιαστικά παρουσιάζεται η δομή και διάρθρωση του τόμου της εργασίας.

Κεφάλαιο 2:

Στο παρόν κεφάλαιο ορίζεται το περιβάλλον του προβλήματος το οποίο πραγματεύεται η διδακτορική διατριβή και γίνεται επισκόπηση του σχετικού ερευνητικού πεδίου. Στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζεται μια σύντομη εισαγωγή στην διοίκηση παραγωγής και στην λήψη αποφάσεων στο σχετικό πεδίο, τα κύρια στοιχεία του γενικού προβλήματος χρονοπρογραμματισμού στην παραγωγή, οι κυριότερες προσεγγίσεις που προτείνονται μέχρι σήμερα από την ερευνητική κοινότητα για την επίλυση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού και μέθοδοι που προσεγγίζουν σχετικά πραγματικά προβλήματα. Τέλος, αναδεικνύονται οι προκλήσεις του προβλήματος που δεν έχουν απαντηθεί επαρκώς από την ερευνητική κοινότητα και στις οποίες εστιάζει η συμβολή της παρούσας διατριβής.

Κεφάλαιο 3:

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι υπάρχουσες επιστημονικές προσεγγίσεις στο πεδίο προβλημάτων πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού. Ειδικότερα, παρουσιάζονται αρχικά μια σύντομη εισαγωγή στην πολυκριτήρια ανάλυση και λήψη αποφάσεων και δίνεται έμφαση σε προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού και πολυκριτήριου μαθηματικού προγραμματισμού. Στην συνέχεια αναφέρονται υπάρχουσες προσεγγίσεις και μέθοδοι επίλυσης πολυκριτήριου μαθηματικού προγραμματισμού και γίνεται ιδιαίτερη μνεία στην περίπτωση των πολυκριτήριων

προβλημάτων στην περιοχή του προγραμματισμού παραγωγής. Στο πλαίσιο αυτό αναδεικνύονται οι υπάρχουσες θεωρητικές προσεγγίσεις για την ανάλυση και επίλυση σχετικών προβλημάτων, και επισημαίνονται οι μέχρι σήμερα προσεγγίσεις επίλυσης πολυκριτήριων προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού σε γραμμές συναρμολόγησης, ήτοι μορφών παρόμοιων του προβλήματος που πραγματεύεται η διατριβή.

Τέλος γίνεται εισαγωγή στον τρόπο που επιδιώκει η πρόταση της Διατριβής να απαντήσει στα ερευνητικά κενά που έχουν αναδειχθεί, συνδυάζοντας και περαιτέρω αναπτύσσοντας τις κατάλληλες πολυκριτηριακές μεθόδους.

Κεφάλαιο 4:

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η πρόταση της διατριβής ως προς τα τέσσερα επίπεδα αυτής:

α) Της μοντελοποίησης του περιβάλλοντος χρονοπρογραμματισμού εργασιών παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου,

β) της εφαρμογής επιλεγμένων μεθόδων πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού στο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού εργασιών παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου

γ) της ανάπτυξης της πρωτότυπης δικριτηριακής μεθοδολογίας επίλυσης και

δ) της ανάπτυξης της πρωτότυπης πολυκριτηριακής μεθοδολογίας επίλυσης.

Παρουσιάζονται οι χρησιμοποιούμενες επιμέρους τεχνικές και ο τρόπος προσαρμογής αυτών στην μεθοδολογία της κάθε περίπτωσης, προκειμένου να αξιοποιηθούν συμπληρωματικά τα πλεονεκτήματά τους και να μετριαστούν κατά το δυνατόν τα μειονεκτήματά τους.

Κεφάλαιο 5:

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η εφαρμογή της πρότασης της διατριβής στο «πραγματικών χαρακτηριστικών» παράδειγμα προβλήματος χρονοπρογραμματισμού εργασιών παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου. Παρουσιάζεται αναλυτικά το πρόβλημα και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, η μοντελοποίησή του και η απευθείας εφαρμογή των μεθόδων ΠΜΠ όσο και τόσο των δύο πρωτότυπων μεθοδολογιών για το δικριτηριακό και για το πολυκριτηριακό σενάριο αντίστοιχα. Αναλύονται για κάθε περίπτωση ο τρόπος εφαρμογής της μεθοδολογίας, τα αποτελέσματα εφαρμογής, καθώς και σχόλια τόσο επί της εφαρμογής όσο και επί των αποτελεσμάτων, ειδικά σε σύγκριση με την εφαρμογή άλλων μεθόδων στο ίδιο πρόβλημα, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα που επικυρώνουν την συμβολή της διατριβής.

Κεφάλαιο 6:

Το τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζει τα γενικά συμπεράσματα και παρουσιάζει προοπτικές της πρότασης της διατριβής τόσο σε επίπεδο εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας όσο και σε επίπεδο περαιτέρω έρευνας σε πεδία που αναδείχθηκαν και θεωρούμε ότι η περαιτέρω ερευνητική ενασχόληση θα ενισχύσει τα πλεονεκτήματα και τα αναμενόμενα οφέλη.

Παράρτημα 1:

Στο Παράρτημα της Διατριβής παρουσιάζεται η τυπολογία και η οργάνωση των δεδομένων εισόδου του προβλήματος στο οποίο εφαρμόστηκε η Πρόταση της Διατριβής.

Παράρτημα 2:

Περιλαμβάνει τον κατάλογο των δημοσιεύσεων της ερευνήτριας.

2

Το πρόβλημα

Κεφάλαιο 2

Το πρόβλημα

- Εισαγωγή
- Διοίκηση και προγραμματισμός παραγωγής
- Πλαίσιο και σημειογραφία συστημάτων παραγωγής
- Μέθοδοι βελτιστοποίησης στον προγραμματισμό παραγωγής
- Το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού σε JIT Γραμμές Συναρμολόγησης Μεικτού Μοντέλου
- Συμπεράσματα και Ερευνητικές προκλήσεις

2.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο ορίζεται το περιβάλλον του προβλήματος το οποίο πραγματεύεται η διδακτορική διατριβή. Στόχος είναι να παρουσιαστούν:

- μια σύντομη εισαγωγή στην διοίκηση παραγωγής και στην λήψη αποφάσεων στο σχετικό πεδίο,
- τα κύρια στοιχεία του γενικού προβλήματος χρονοπρογραμματισμού στην παραγωγή, με έμφαση στα προβλήματα χρονικού προγραμματισμού σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου προϊόντων,
- οι κυριότερες προσεγγίσεις που προτείνονται από την ερευνητική κοινότητα για την επίλυση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού και μέθοδοι που προσεγγίζουν σχετικά πραγματικά προβλήματα,
- οι προκλήσεις του προβλήματος που δεν έχουν απαντηθεί επαρκώς από την ερευνητική κοινότητα και στις οποίες εστιάζει η συμβολή της παρούσας διατριβής.

2.2. Διοίκηση και προγραμματισμός παραγωγής

2.2.1 Εισαγωγή

Η διοίκηση της παραγωγής είναι μια διαδικασία λήψης αποφάσεων που παίζει σημαντικό ρόλο σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας και αφορά σε αποφάσεις στο πλαίσιο του σχεδιασμού, του προγραμματισμού και του ελέγχου της λειτουργίας παραγωγικών συστημάτων. Οι προμήθειες και η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή, η επεξεργασία των πληροφοριών και οι επικοινωνίες στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό σε αυτή την διαδικασία λήψη αποφάσεων.

Ο Προγραμματισμός παραγωγής συνιστά μία διαδικασία ανάθεσης εργασιών σε πόρους επεξεργασίας και εμπλέκει δύο κατηγορίες αποφάσεων:

- αποφάσεις χρονικής τοποθέτησης των εργασιών
- αποφάσεις κατανομής των πόρων σε κάθε εργασία.

Αμφότερες οι κατηγορίες αποφάσεων έχουν οικονομική διάσταση, καθώς σχετίζονται με τη διαχείριση μίας οικονομικής μονάδας.

Σκοπός του προγραμματισμού παραγωγής είναι ο σχεδιασμός και ο έλεγχος συγκεκριμένων εργασιών με στόχο να επιτευχθεί μια γρήγορη, ποιοτική και οικονομική παραγωγή.

Οι πόροι, τα χρήματα, ο χρόνος, αποτελούν μεμονωμένα προβλήματα του προγραμματισμού παραγωγής. Στην πράξη υπάρχουν ποικίλα προβλήματα σχεδιασμού ή και κατανομής πόρων. Ο κατάλογος με τις παραμέτρους που επηρεάζουν τον προγραμματισμό παραγωγής είναι μεγάλος. Για αυτό το λόγο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το περιβάλλον στο οποίο αναφέρεται το πρόβλημα. Είναι διαφορετικό το σύστημα προγραμματισμού σε μία βιομηχανία και διαφορετικό στον προγραμματισμό ενός νοσοκομείου. Ακόμα και από εργοστάσιο σε εργοστάσιο μπορεί να υπάρχουν διαφορές καθώς διαφορετικός είναι ο κύκλος παραγωγής πλακών σιδήρου και διαφορετικός αυτός ενός εργοστασίου αυτοκινήτων που περιλαμβάνει πολύ περισσότερα στάδια. Οι αλγόριθμοι που καλούνται να λύσουν τέτοια προβλήματα είναι προσαρμοσμένοι σε συγκεκριμένες περιστάσεις/συνθήκες περιβάλλοντος.

Αύξηση της ποιότητας των προϊόντων, μείωση των ενδιάμεσων αποθεμάτων, μείωση των χρόνων επεξεργασίας και αύξηση της ευελιξίας των παραγωγικών συστημάτων αποτελούν σχετιζόμενες τάσεις που παρατηρούνται στις σύγχρονες επιχειρήσεις.

Στο πλαίσιο της διαχείρισης παραγωγής, οι νέες μέθοδοι έχουν ως βασικό στόχο την αποδοτικότερη και αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση πρακτικών θεμάτων που

αφορούν στις κυριότερες πολιτικές διαχείρισης παραγωγής οι οποίες υιοθετούνται από τις επιχειρήσεις:

- παραγωγή για απόθεμα (make to stock, MTS)
- παραγωγή για παραγγελία (make to order, MTO)
- σχεδίαση για παραγγελία (engineer / design to order, ETO)
- σύγχρονη παραγωγή (Just-in-Time, JIT)

2.2.2 Λήψη αποφάσεων στην διοίκηση παραγωγής

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων και επίλυσης προβλημάτων στη διοίκηση παραγωγικών συστημάτων περιλαμβάνει (Ασκούνης, Κουσουρής, & Παπαδέλης, 2008):

1. την αναγνώριση μιας κατάστασης που χρήζει απόφασης αναφορικά με ενέργειες που πρέπει να υλοποιηθούν. (π.χ. για βελτίωση απόδοσης συστήματος, μείωση κόστους, αύξηση κέρδους),
2. την αναγνώριση και τον καθορισμό των εναλλακτικών δράσεων που αποτελούν λύση για την επίτευξη του στόχου,
3. την αξιολόγησή τους με βάση κριτήρια/ δείκτες ποιότητας που εκφράζουν το προτιμησιακό μοντέλο επιλογής λύσης από την επιχείρηση,
4. την επιλογή μίας από αυτές τις δράσεις/λύσεις (επί της αρχής, εκείνης που ικανοποιεί στο μεγαλύτερο βαθμό τα κριτήρια αξιολόγησης),
5. την εφαρμογή της επιλεγμένης λύσης.

Προς αυτή την κατεύθυνση, η διαδικασία υποστηρίζεται με την διαμόρφωση του μοντέλου που απεικονίζει την προβληματική του θέματος αναφοράς και αφορά στον καθορισμό:

- των μεταβλητών του παραγωγικού συστήματος και των παραμέτρων που επηρεάζουν το σύστημα στο συγκεκριμένο πρόβλημα για το οποίο απαιτείται λήψη απόφασης (π.χ. ζήτηση προϊόντων, χαρακτηριστικά παραγγελιών κ.λπ.).
- των σταθερών χαρακτηριστικών του συστήματος (π.χ. ανάλωση πρώτων υλών ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος, ταχύτητα επεξεργασίας των μηχανών, κ.λπ.).
- των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών και των σταθερών του συστήματος, που περιγράφουν τη λειτουργία του συστήματος υπό τους περιορισμούς του περιβάλλοντος, των διαθέσιμων πόρων, της διάρθρωσης του συστήματος και της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας.

- της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή μιας συνάρτησης των ελεγχόμενων μεταβλητών που εκφράζει τα κριτήρια αξιολόγησης του συστήματος (π.χ. κέρδος, κόστος).

Στα προβλήματα αποφάσεων στην διοίκηση παραγωγής επιδιώκεται ο καθορισμός των τιμών των μεταβλητών, ώστε να επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή να μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση ανάλογα με την περίπτωση.

Όταν πρόκειται για επίλυση πραγματικών προβλημάτων διοίκησης παραγωγής, η διαμόρφωση του σωστού μοντέλου αποτελεί μια από τις προκλήσεις της διαδικασίας και γίνεται σε συνεργασία του αναλυτή με τους ειδικούς του περιβάλλοντος παραγωγής. Στόχος είναι να αποτυπωθεί στο μοντέλο τόσο ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος παραγωγής, όσο και οι περιορισμοί και τα κριτήρια αξιολόγησης που εκφράζουν τον τρόπο λήψης αποφάσεων της επιχείρησης. Σε αυτή την φάση, επισημαίνεται ο κίνδυνος ορθής επίλυσης του λάθος προβλήματος. Η ανάλυση και διαμόρφωση του σωστού μοντέλου απαιτεί στενή συνεργασία με τους ειδικούς της επιχείρησης και συνεχή επικύρωση της αξιοπιστίας του με διαδοχικές επιδείξεις:

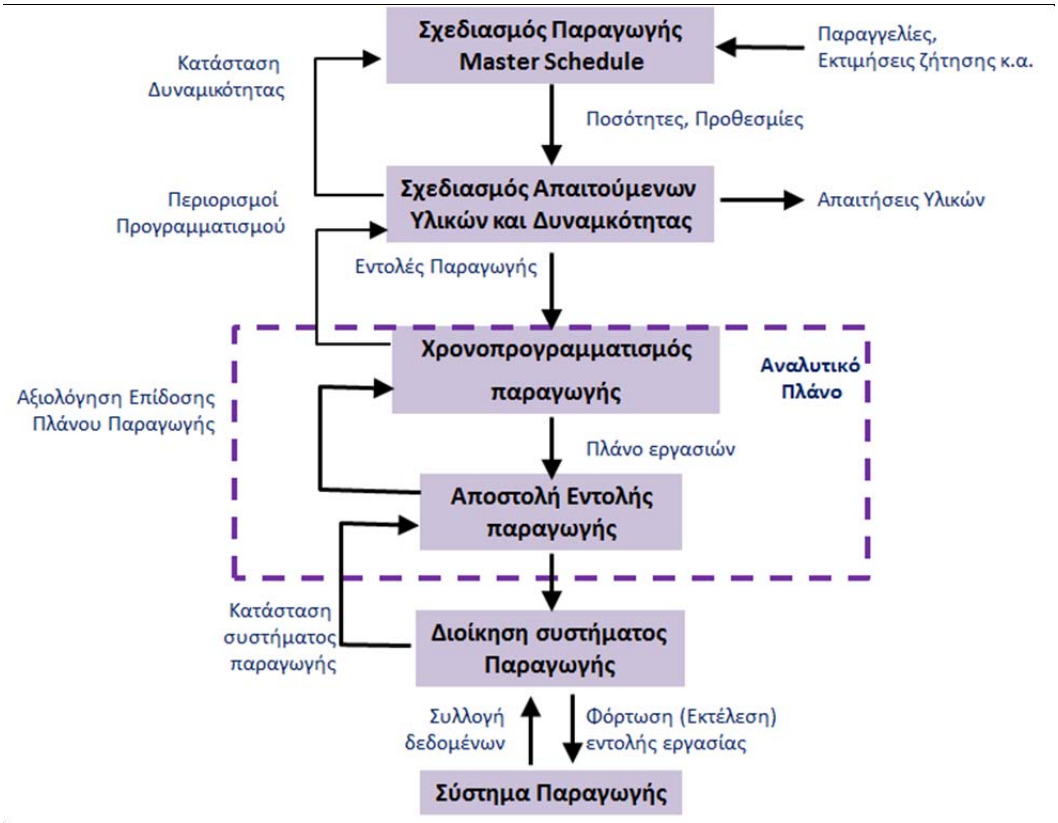
- της συμπεριφοράς του μοντέλου σε σχέση με την συμπεριφορά του πραγματικού παραγωγικού συστήματος.
- του τρόπου λήψης απόφασης του μοντέλου (κριτήρια αξιολόγησης/ αντικειμενική συνάρτηση)

Άλλες προκλήσεις στην διαδικασία διαμόρφωσης του προβλήματος είναι το μέγεθος του μοντέλου, καθώς αυτό συνήθως αντανακλά στο κόστος του χρόνου υπολογισμού/επίλυσης. Στο πλαίσιο αυτό, κατά κανόνα, επιδιώκεται η κατά το δυνατόν η ελάττωση των διαστάσεων του προβλήματος, ήτοι ενός συνδυασμού του αριθμού των μεταβλητών, του πεδίου τιμών τους και των σχέσεων αποτύπωσης των περιορισμών. Ο τρόπος που θα αποτυπωθεί το πρόβλημα σε μαθηματικό μοντέλο καθορίζει:

- τον όγκο των στοιχείων/ δεδομένων που υφίστανται επεξεργασία,
- το κόστος συλλογής τους,
- την επιλογή/ ανάπτυξη του κατάλληλου αλγορίθμου επίλυσης του μοντέλου,
- την επιλογή/ ανάπτυξη της προσέγγισης λήψης αποφάσεων,
- τον χρόνο επίλυσης.

2.2.3 Χρονοπρογραμματισμός στην Παραγωγή

Η διαδικασία της λήψης αποφάσεων στον χρονοπρογραμματισμό της παραγωγής αφορά στην καλύτερη δυνατή χρονική ανάθεση των περιορισμένων πόρων ενός συστήματος για την επεξεργασία ενός αριθμού εργασιών. Η αξιολόγηση της ποιότητας της ανάθεσης πραγματοποιείται εκτιμώντας κατά πόσο εξυπηρετεί τους στόχους της επιχείρησης και βελτιστοποιεί τους αντικειμενικούς σκοπούς της. Η διαδικασία της ανάθεσης των πόρων στις εργασίες γίνεται υπό την επίδραση μιας ποικιλίας περιορισμών και προτιμήσεων. Οι περιορισμοί αυτοί μπορεί να είναι ισχυροί, ασθενείς ή και προτιμήσεις.



Σχήμα 2. 1 Ο ρόλος του Χρονοπρογραμματισμού σε ένα τυπικό σύστημα παραγωγής

Πηγή: (Μπότσικας, 2009) και δική μου επεξεργασία

Ο σωστός χρονικός προγραμματισμός της παραγωγής αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την αύξηση των οικονομικών εισροών στο σύστημα. Αντίθετα, οι μεγάλες καθυστερήσεις σε ένα συστήματα παραγωγής αποτελούν εμπόδιο για τα οικονομικά μεγέθη.

Ο χρονοπρογραμματισμός παραγωγής σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον συνήθως είναι ένα από τα δυσκολότερα αλλά ταυτόχρονα και πιο ενδιαφέροντα προβλήματα βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας. Η ύπαρξη μεγάλου αριθμού παραγόντων, πολλοί από τους οποίους αλλάζουν δυναμικά στο χρόνο, οι οποίοι επηρεάζουν την τελική απόφαση, δικαιολογούν τον παραπάνω χαρακτηρισμό.

Στο πλαίσιο του αρχικού σταδίου επίλυσης ενός προβλήματος χρονοπρογραμματισμού, χρειάζονται δεδομένα αναφορικά με τις απαιτήσεις που υπάρχουν για την παραγωγή των προϊόντων του παραγωγικού συστήματος. Τα δεδομένα αυτά συχνά προκύπτουν από τις πληροφορίες/στοιχεία των παραγγελιών, ή, στην περίπτωση που δεν αναφερόμαστε σε παραγωγή κατά παραγγελία αλλά σε παραγωγή για απόθεμα, από εκτιμήσεις/προβλέψεις για τις παραγγελίες. Οι απαιτήσεις αυτές μεταφράζονται με τη σειρά τους σε απαιτήσεις για παραγωγικούς πόρους, μέσω των πινάκων υλικών, των παραγγελιών ή των προβλέψεων παραγγελιών των πελατών. Έτσι γίνεται εκτίμηση για τα χαρακτηριστικά και τον αριθμό των μηχανών που απαιτούνται, για τις διεργασίες και τη σειρά που θα γίνουν, για τους χρόνους επεξεργασίας στις μηχανές, τις προθεσμίες παράδοσης των παραγγελιών και, γενικά, τους χρόνους παραγωγής.

Οι μεταβλητές απόφασης μπορεί να εκφράζουν το μέγεθος μιας παρτίδας παραγωγής, τη σειρά εκτέλεσης των παραγγελιών, την ανάθεση συγκεκριμένων εργασιών σε συγκεκριμένες μηχανές κλπ.

Σημαντικοί παράγοντες στο πρόβλημα του χρονικού προγραμματισμού παραγωγής είναι οι περιορισμοί και οι κανόνες του συστήματος, που αφορούν τη δυναμικότητα σε διαθέσιμο παραγωγικό εξοπλισμό, τις απαιτήσεις για τη συντήρηση και το στήσιμο των μηχανών, την εκπλήρωση των απαιτήσεων που ορίζει η εκάστοτε τεχνολογία των μηχανημάτων και τα δεδομένα του προγράμματος παραγωγής για το συνολικό επίπεδο της παραγωγής, του ανθρώπινου δυναμικού και των αποθεμάτων.

Τέλος, η συνάρτηση κόστους/ οφέλους, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αφορά την εκπλήρωση κάποιων κριτηρίων που μπορεί να αναφέρονται στην γρηγορότερη εξυπηρέτηση των πελατών, στο συνολικό κόστος παραγωγής, στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της διαθέσιμης δυναμικότητας κλπ. Έτσι, ένα πρόγραμμα παραγωγής είναι καλύτερο από ένα άλλο αν το πρώτο ικανοποιεί σε μεγαλύτερο βαθμό τα κριτήρια που έχουν τεθεί (π.χ. ικανοποιούνται ταχύτερα οι παραγγελίες), το οποίο κρίνεται με βάση την τιμή που παίρνει αντίστοιχα η συνάρτηση κόστους/ οφέλους.

Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι η μονοσήμαντη έκφραση ενός κριτηρίου κόστους (π.χ. πλήθος καθυστερημένων παραγγελιών, συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης παραγγελιών κλπ) ή πολυδιάστατη έκφραση πολλών κριτηρίων κόστους. Και στις δύο περιπτώσεις, συχνά ο καθορισμός βέλτιστης λύσης (πλάνου εργασιών) είναι πολύ δύσκολος, οπότε το ζητούμενο ανάγεται στην εύρεση ενός πλάνου, το οποίο θα είναι καλό και θα ικανοποιεί κάποια συγκεκριμένα κριτήρια που έχουν οριστεί από την επιχείρηση.

Την τελευταία δεκαετία πολλές ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώθηκαν στο πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, ενώ αναμένεται ότι αυτές θα

συνεχιστούν με αμείωτη ένταση και στα επόμενα χρόνια. Για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων σε πραγματικά προβλήματα όπου η υπολογιστική πολυπλοκότητα αποτελεί ένα από βασικά χαρακτηριστικά, έχουν αναπτυχθεί κατά περίπτωση εφαρμογές, σε ερευνητικό ή και σε επιχειρησιακό επίπεδο, που αξιοποιούν τεχνικές βελτιστοποίησης, μεθόδους επιχειρησιακής έρευνας κα τεχνητής νοημοσύνης. Ισχυρά πληροφοριακά συστήματα και νέες μέθοδοι ολοκληρωμένης διαχείρισης της παραγωγής εφαρμόζονται, με στόχο την κατάρτιση των, κατά το δυνατόν, βέλτιστων πλάνων χρονοπρογραμματισμού.

Η επίλυση μεγάλων προβλημάτων του προγραμματισμού εργασιών σε τακτικό ή επιχειρησιακό επίπεδο απαιτεί την ανάπτυξη συνθετότερων και ευφυέστερων μοντέλων. (Panopoulos, 2006). Προβλήματα βραχυπρόθεσμου ορίζοντα, είναι δυνατό να αντιστοιχούν σε μοντέλα με τεράστιο αριθμό περιορισμών, εξαιρετικά υψηλή πολυπλοκότητα και έλλειψη γραμμικότητας. Πολλές από τις μεταβλητές είναι δυνατό να είναι διακριτές οπότε η επίλυση καθίσταται περαιτέρω δυσχερής. Μοντέλα αυτού του είδους, που βασίζονται σε διακριτές μεταβλητές, κατατάσσονται στην κατηγορία των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Οι μεταβλητές των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης αντιπροσωπεύουν αποφάσεις «ναι/όχι» ή άλλη πιθανή εκλογή διακριτών εναλλακτικών.

Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά των προβλημάτων προγραμματισμού που επιδρούν στην επιλογή τεχνικών βελτιστοποίησης. Τέλος, δίνονται σχετικά παραδείγματα πραγματικών προβλημάτων.

2.2.4 Βασικές Παράμετροι: Εργασίες, Πόροι και Περιορισμοί

Οι εργασίες που καλείται να εκτελέσει ένα παραγωγικό σύστημα ανάλογα με τις απαιτήσεις επεξεργασίας των υπο παραγωγή προϊόντων και ανάλογα με τις δυνατότητας των μηχανών του συστήματος, διακρίνονται σε:

1. *Συνεχείς / Διακριτές*
2. *Χρονικά Εξαρτημένες / Ανεξάρτητες*
3. *Χωρικά Εξαρτημένες / Ανεξάρτητες*
4. *Διακοπτόμενες / Μη-διακοπτόμενες*
5. *Εφάπαξ / Επαναλαμβανόμενες*

Οι πόροι ενός παραγωγικού συστήματος διακρίνονται σε:

1. *Σταθεροί/ Εναλλάξιμοι*
2. *Ανανεώσιμοι/ Αναλώσιμοι/ Μεταβλητής κατάστασης*
3. *Απλοί/ Πολλαπλοί*

Τα προβλήματα προγραμματισμού παραγωγής χαρακτηρίζονται από πληθώρα περιορισμών ανάλογα με το είδος του προβλήματος. Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι: η διάρκεια μιας δραστηριότητας, η ημερομηνία έναρξης και η τελική προθεσμία, οι περιορισμοί προτεραιότητας, οι χρόνοι μεταφοράς και οργάνωσης των πρώτων υλών και των προϊόντων, οι πόροι που βρίσκονται σε διαθεσιμότητα (μετατοπίσεις, χρόνος διακοπής, συντήρηση των πόρων) και η κατανομή αυτών.

Οι περιορισμοί μπορεί να είναι χαλαροί οπότε απλά χαρακτηρίζουν την ποιότητα του σχεδιασμού των αποφάσεων. Αφορούν συνήθως τις ημερομηνίες προθεσμιών, την παραγωγικότητα, το κάθε πότε αλλάζει η συχνότητα των μηχανών, τις υπερωρίες κ.α. Κατά την διάρκεια της μοντελοποίησης, ορισμένοι από τους περιορισμούς αυτούς δύναται να ενταχθούν στα κριτήρια αξιολόγησης και να λαμβάνονται υπόψιν στην φάση αξιολόγησης για την βελτιστοποίηση του προβλήματος. Χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του προβλήματος με σκοπό να περιοριστεί το πιθανό διάστημα αναζήτησης, τα σύνθετα προβλήματα μπορούν να λυθούν αποτελεσματικότερα.

Είναι προφανές πως υπάρχουν πολλά αλληλοσχετιζόμενα προβλήματα και υποπροβλήματα στον τομέα του προγραμματισμού παραγωγής. Στην πράξη, για πραγματικά βιομηχανικά και κοινωνικά συστήματα τα όρια μεταξύ αυτών είναι πολύ θολά. Δεν έχουν υπάρξει περιπτώσεις όπου να συναντάει κανείς κάποιο πραγματικό πρόβλημα και να λύνεται εξ ολοκλήρου με την βοήθεια ενός προϋπάρχοντος μοντέλου χωρίς να χρειαστεί να περικόψει κάποια τμήματα του προβλήματος και να προσθέσει κάποια άλλα ώστε να το φέρει στην επιθυμητή μορφή. Άρα, πρέπει να γίνει κατανοητό ότι οι προσεγγίσεις που γίνονται περιέχουν αρκετή δόση εξιδανίκευσης προκειμένου να ικανοποιήσουν τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Περαιτέρω περιπλοκή προκαλεί το θέμα της βελτιστοποίησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο χρήστης είναι ικανοποιημένος απλά με το να βρει μια γενικευμένη απάντηση που να αυτοματοποιεί το πρόβλημά του. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις επιδιώκεται η καλύτερη δυνατή λύση.

2.2.5 Βασικές Παράμετροι: Οι Στόχοι – Τα κριτήρια

Για να μπορέσουμε να αντιληφθούμε καλύτερα την σημασία ορισμού και θεώρησης των κριτηρίων για τον χρονοπρογραμματισμού, αρκεί να προσεγγίσουμε την διεργασία ιεραρχικά. Ήτοι, ο προγραμματισμός παραγωγής μπορεί να διακριθεί ιεραρχικά σε διαφορετικά επίπεδα: στρατηγικό, τακτικό και επιχειρησιακό.

Το πλάνο παραγωγής στο τακτικό επίπεδο καθορίζει τις ποσότητες των προϊόντων

που θα παραχθούν σε μια χρονική περίοδο. Οι στόχοι της διεργασίας προγραμματισμού παραγωγής στο επίπεδο αυτό είναι:

- Η ικανοποίηση των απαιτήσεων των πελατών, δηλαδή, η παροχή στον πελάτη του προϊόντος που επιθυμεί, στην επιθυμητή ποσότητα και την επιθυμητή ημερομηνία.
- Η συνεχής εξισορρόπηση των υπαρχόντων πόρων και των πόρων που απαιτούνται για την παραγωγή, αποφεύγοντας υπερφορτώσεις, καθώς και υπο-φορτώσεις.
- Η εξασφάλιση της παραγωγής στο χαμηλότερο δυνατό κόστος, ή τουλάχιστον με το μέγιστο δυνατό κέρδος.

Στην συνέχεια, σε επιχειρησιακό επίπεδο, το καθορισμένο πλάνο πρέπει να εφαρμοστεί όσο πιο πιστά και με ακρίβεια γίνεται. Λαμβάνουμε πάντα υπόψη ότι στο προηγούμενο επίπεδο γίνεται διαχείριση συγκεντρωτικής πληροφορίας/δεδομένων ενώ στο επιχειρησιακό επίπεδο γίνεται διαχείριση πιο λεπτομερούς πληροφορίας, γεγονός το οποίο από τη φύση του μπορεί να προκαλεί θέματα συνεκτικότητας.

Συνοψίζοντας, ο χρονοπρογραμματισμός σε ένα κέντρο εργασίας έχεις ως βασικούς σκοπούς:

- Τήρηση των προθεσμιών παράδοσης (Due Dates).
- Ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης του προγράμματος παραγωγής (Lead Time).
- Μεγιστοποίηση του ποσοστού (ή χρόνου) χρησιμοποίησης των πόρων του συστήματος (εξοπλισμός ή ανθρώπινο δυναμικό) (Machine or Labor Utilization).
- Ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου χρόνου ή κόστους για την ρύθμιση των μηχανών του παραγωγικού συστήματος (Setup Time)
- Ελαχιστοποίηση των μη εργασιών που δεν ολοκληρώνονται αλλά παραμένουν σε εκκρεμότητα

Από την φύση του λοιπόν, ένα πρόβλημα προγραμματισμού παραγωγής είναι πολύ συχνά πολυκριτηριακό. Ο χρονοπρογραμματισμός εργασιών με περιορισμό πόρων περιλαμβάνει ορισμένα κριτήρια χρόνου και κόστους (Herroelen, De Reyck, & Demeulemeester, 1998a) και (Hapke, Jaszkiewicz, & Slowinski, 1998).

Παραδείγματα τέτοιων προβλημάτων είναι προβλήματα αντιστάθμισης κριτηρίων. Ως γενικός κανόνας (Roy B. , 1985), λαμβάνοντας υπόψιν πολλά διαφορετικά κριτήρια κατά τον προγραμματισμό παραγωγής, επιτρέπει για λογαριασμό του αποφασίζοντος την παραγωγή λύσεων πιο ρεαλιστικών, και ως εκ τούτου πιο άμεσα εφαρμόσιμων.

Εκτενής βιβλιογραφική ανάλυση για την περιοχή του πολυκριτηριακού

προγραμματισμού παραγωγής γίνεται από τους (Dileepan & Sen, 1988), (Hoogeveen J. A., 1992) (Nagar, Haddock, & Heragu, 1995) και (Hoogeveen H. , 2005). Η ανάλυση αυτών των εργασιών υπογραμμίζει:

- Την ανάγκη γνώσης των προσεγγίσεων που παρέχονται από το πεδίο της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, προκειμένου να γίνει κατανόηση των δυσκολιών που αναμένονται και σχετίζονται με την θεώρηση πολλαπλών και αντικρουόμενων κριτηρίων.
- Την ανάγκη ανάπτυξης μιας τυπολογίας που να επιτρέπει τον χαρακτηρισμό και την τυπική απεικόνιση των διαφορετικών τύπων προβλημάτων, προκειμένου να γίνει μια υπάρξει κοινή σημειολογία και ορολογία των προβλημάτων αυτών.
- Την ανάγκη γνώσης σχετικών αποτελεσμάτων σε αντίστοιχα μονο-κριτηριακά προβλήματα προγραμματισμού παραγωγής.

Η εφαρμογή των προσεγγίσεων της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης αποτελεί ένα πεδίο στο οποίο, κατά κοινή παραδοχή, δεν έχει υπάρξει εκτενής διερεύνηση μέχρι σήμερα για αρκετούς τύπους πραγματικών προβλημάτων παραγωγής.

2.3. Παραγωγικά συστήματα

2.3.1 Πλαίσιο και κατηγοριοποίηση

Η βιβλιογραφία είναι ιδιαίτερα πλούσια στο πεδίο ανάλυσης της τυπολογίας των παραγωγικών συστημάτων σε επίπεδο ακαδημαϊκό, ερευνητικό αλλά και επιχειρησιακό, ανάλογα με την σκοπιμότητα της κάθε μελέτης. Ενδεικτικά, ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες και χρήσιμες είναι οι εργασίες των (Μεταξιώτης, 2001), (T'Kindt & Billaut, 2005).

Η κατηγοριοποίηση των παραγωγικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται στις σημερινές επιχειρήσεις συνηθίζεται να γίνεται με βάση τα ακόλουθα κριτήρια :

- Την σύνθεση ή τη διάταξη των μηχανών και των κέντρων επεξεργασίας που απαρτίζουν τις παραγωγικές μονάδες
- Τον αριθμό των μηχανών ή άλλων παραγωγικών μονάδων
- Τη ροή των υλικών και προϊόντων μέσα στην παραγωγική διαδικασία
- Την ευελιξία τους
- Το επίπεδο αυτοματοποίησης.

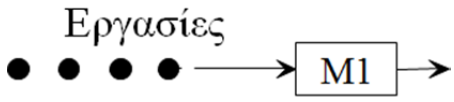
Στόχος αυτής της κατηγοριοποίησης είναι να επιτρέψει τη διάκριση των διαφορετικών εκδοχών με βάση τους παράγοντες που τις διαφοροποιούν και στη συνέχεια να

διευκολύνει τη διαφορετική προσέγγιση στο θέμα του χρονοπρογραμματισμού για κάθε κατηγορία.

Ακολούθως, παρατίθενται τα βασικά στοιχεία του πλαισίου κατηγοριοποίησης των παραγωγικών συστημάτων. Διακρίνονται οι ακόλουθοι τύποι παραγωγικών συστημάτων:

Σύστημα μιας μηχανής (single machine shop)

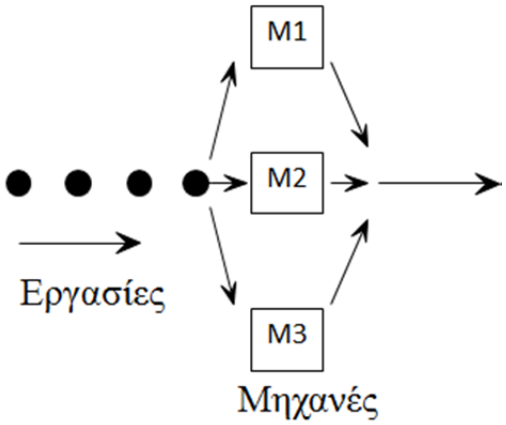
Πρόκειται για μια απλή μηχανή. Είναι η απλούστερη των δυνατών βιομηχανικών περιβαλλόντων και αποτελεί ειδική περίπτωση πιο πολύπλοκων περιπτώσεων.



Σχήμα 2. 2 Διάγραμμα ενδεικτικού Συστήματος Παραγωγής, Μιας Μηχανής

Σύστημα παράλληλων μηχανών (parallel machine shop)

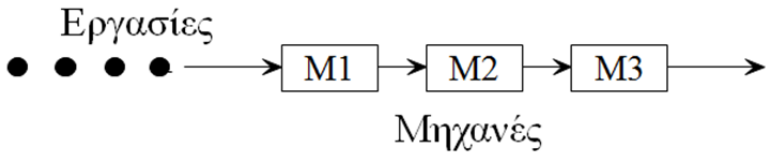
Είναι ένα παραγωγικό σύστημα με μηχανές συνδεδεμένες παράλληλα και αποτελεί γενίκευση του συστήματος με μια απλή μηχανή.



Σχήμα 2. 3 Διάγραμμα ενδεικτικού Συστήματος Παράλληλων Μηχανών

Σύστημα συνεχούς ροής (flow shop)

Στα συστήματα του τύπου συνεχούς ροής, η παραγωγή εξειδικεύεται σε ένα περιορισμένο αριθμό τυποποιημένων προϊόντων που παράγονται σε αντίστοιχες γραμμές παραγωγής και προορίζονται για ευρεία κατανάλωση. Οι εργασίες περνούν από συγκεκριμένα στάδια επεξεργασίας και έχουν το ίδιο δρομολόγιο μέσα στο σύστημα παραγωγής.



Σχήμα 2. 4 Διάγραμμα ενδεικτικού Flow-shop Συστήματος Παραγωγής

Οι μηχανές είναι σε σειρά διατεταγμένες και όταν ολοκληρώνεται η επεξεργασία της εργασίας σε μια μηχανή, η εργασία οδηγείται στην επόμενη μηχανή.

Βασικές υποκατηγορίες του κλασικού συστήματος συνεχούς ροής είναι οι εξής:

- Συστήματα με κοινή ακολουθία σε όλες τις μηχανές (permutation flow shops). Λειτουργούν με βάση τον κανόνα FIFO (First In First Out - εξυπηρέτηση με την σειρά άφιξης των εργασιών). Σε κάθε μηχανή η ακολουθία των εργασιών για επεξεργασία, είναι η ίδια.
- Συστήματα χωρίς υποχρεωτικά κοινή ακολουθία σε όλες τις μηχανές (non – permutation flow shops). Σε ορισμένα συστήματα συνεχούς ροής, αν μια εργασία δεν χρειάζεται επεξεργασία σε μια συγκεκριμένη μηχανή, μπορεί να την παρακάμψει. Θεωρούνται οι πιο αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις των συστημάτων συνεχούς ροής, γιατί αποτελούν μια καλύτερη αναπαράσταση των πρακτικών προβλημάτων.
- Ευέλικτα συστήματα (flexible flow shops ή hybrid flow shops). Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από έναν αριθμό σταδίων σε σειρά με ένα αριθμό μηχανών συνδεδεμένων παράλληλα σε κάθε στάδιο (συνδυασμός συστήματος παράλληλων μηχανών και συνεχούς ροής). Οι εργασίες υφίστανται επεξεργασία σε κάθε στάδιο σε οποιαδήποτε από τις παράλληλες μηχανές. Οι ουρές μεταξύ των διάφορων σταδίων συνήθως λειτουργούν με βάση τον κανόνα FIFO.
- Συστήματα με επανεισαγωγή (reentrant flow shops). Υπάρχει ένας αριθμός εργασιών και μηχανών οργανωμένων σε σύστημα συνεχούς ροής. Οι εργασίες μετακινούνται μέσω του συστήματος και είναι δυνατό να παρακάμπτουν ορισμένες μηχανές. Όταν μια εργασία ολοκληρώσει ένα πέρασμα μέσω του συστήματος, είναι δυνατό να ξαναμπεί σε αυτό για άλλου είδους επεξεργασία, ενώ δεν είναι απαραίτητο να ξαναπεράσει ακριβώς από τις ίδιες μηχανές που υπέστη επεξεργασία στο προηγούμενο στάδιο.
- Συστήματα με διακλαδώσεις (diverging flexible flow shops). Κάθε στάδιο έχει τουλάχιστον όσες μηχανές είχε και το προηγούμενό του.

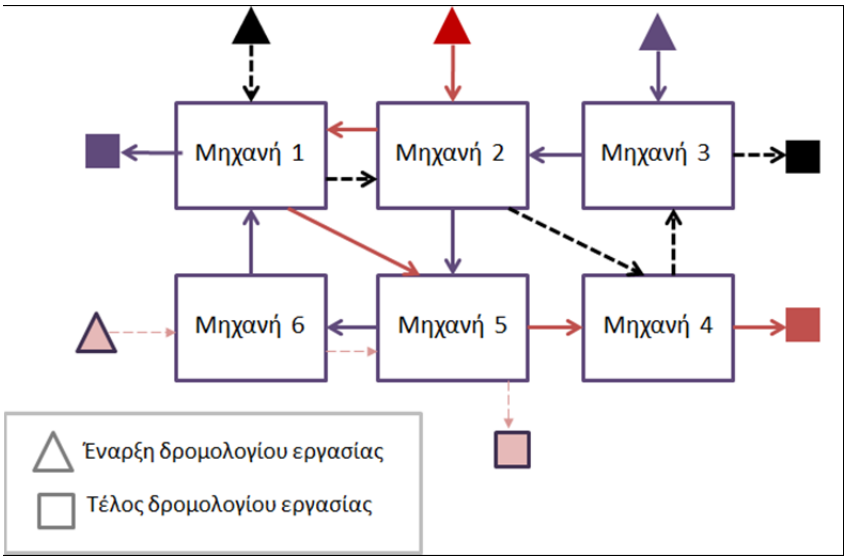
Σύστημα δρομολόγησης κατά παραγγελία (job shop).

Στα συστήματα δρομολόγησης κατά παραγγελία, βασικό στοιχείο αποτελεί η παραγγελία η οποία πρέπει να ολοκληρωθεί. Η παραγγελία αναφέρεται στην δημιουργία/παραγωγή ενός ή πολλών προϊόντων που φέρουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά/προδιαγραφές, ορισμένες από τον πελάτη της διαδικασίας. Εφόσον οι προδιαγραφές είναι διαφορετικές ανά παραγγελία, η γραμμή παραγωγής είναι επίσης διαφορετική για κάθε μια, ανεξάρτητα από το αν θα χρησιμοποιηθεί ένα συγκεκριμένο πλήθος παραγωγικών μονάδων.

Τα κατά παραγγελία συστήματα είναι ουσιαστικά μια γενίκευση των συστημάτων συνεχούς ροής (ένα σύστημα συνεχούς ροής είναι ουσιαστικά ένα κατά παραγγελία σύστημα στο οποίο κάθε εργασία έχει το ίδιο δρομολόγιο).

Σε αυτά τα συστήματα, μπορούμε να διακρίνουμε τις ακόλουθες κατηγορίες:

- Ευέλικτα συστήματα (flexible job shops).
- Συστήματα κυκλικής επανακυκλοφόρησης (recirculated job shops).



Σχήμα 2. 5 Διάγραμμα ενδεικτικού job-shop συστήματος παραγωγής

Ανοικτό Σύστημα (open shop).

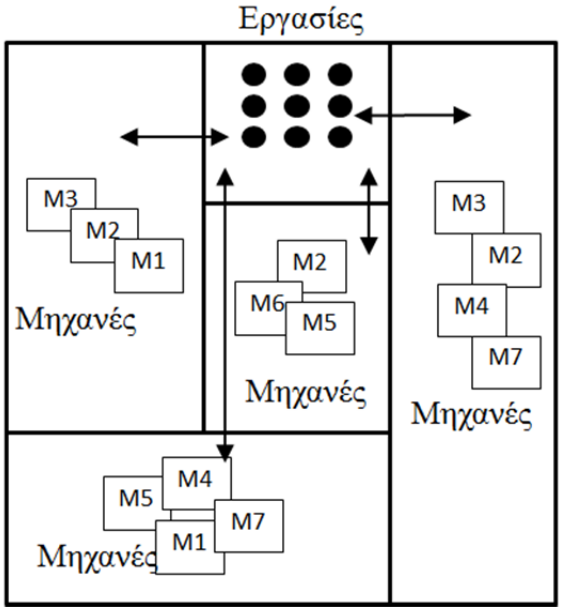
Στα ανοικτά συστήματα, η σειρά εκτέλεσης των διεργασιών είναι διαφορετική για κάθε εργασία και μια εργασία μπορεί να έχει και παραπάνω από έναν εναλλακτικούς δρόμους για τη σειρά των διεργασιών επεξεργασίας αυτής.

Σύστημα συναρμολόγησης (assembly shop).

Τα συστήματα συναρμολόγησης διαφέρουν από τα άλλα παραγωγικά συστήματα. Εδώ, η κίνηση των εργασιών «χειραγωγείται» από ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο επιβάλλει περιορισμούς στους χρόνους έναρξης των εργασιών στις διάφορες μηχανές. Τα συστήματα αυτά έχουν ένα μεταφορέα που κινείται συνήθως με σταθερή ταχύτητα. Οι μονάδες που πρέπει να συναρμολογηθούν μετακινούνται - με τη βοήθεια του μεταφορέα - από τον ένα σταθμό παραγωγής στον άλλο. Κάθε σταθμός παραγωγής έχει την δική του ικανότητα παραγωγής και τους δικούς του περιορισμούς. Τέτοιου τύπου συστήματα είναι πολύ συνηθισμένα στις αυτοκινητοβιομηχανίες, όπου διαφορετικοί τύποι αυτοκινήτων (π.χ. διαφορετικού χρώματος, διαφορετικού επιπέδου εξοπλισμού) πρέπει να συναρμολογηθούν σε μια γραμμή παραγωγής.

Κυψελοειδές σύστημα παραγωγής (manufacturing cell).

Εδώ αναφερόμαστε στην φιλοσοφία Group Technology (GT) (Levary, 1993) των κυψελοειδών συστημάτων παραγωγής. Η τεχνολογία αυτή προήλθε από την ανάγκη για περαιτέρω βελτίωση της παραγωγικότητας των συστημάτων παραγωγής. Στηρίζεται στην αναδιοργάνωση των παραδοσιακών συστημάτων συνεχούς ροής και κατά παραγγελίας σε κυψελοειδή συστήματα. Βασικά, τα προϊόντα που πρέπει να παραχθούν ομαδοποιούνται σε αρκετές “οικογένειες”. Κάθε οικογένεια εξυπηρετείται από μια κυψελίδα η οποία αποτελείται από μια δέσμη μηχανών μαζί με ένα σύστημα χειρισμού.



Σχήμα 2. 6 Διάγραμμα ενδεικτικού Κυψελοειδούς συστήματος παραγωγής

Οι κύριοι στόχοι της φιλοσοφίας αυτής είναι:

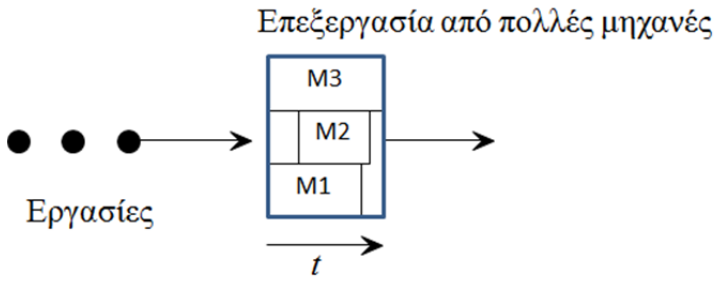
- Απλοποίηση της ροής των εργασιών.
- Μείωση των χρόνων προετοιμασίας των μηχανών.
- Μείωση του χρόνου μεταφοράς των εργασιών.
- Μείωση του χρόνου παραγωγής.

Σύστημα μαζικής παραγωγής (batch shop).

Ένα σύστημα μαζικής παραγωγής είναι βασικά ένα σύστημα στο οποίο η παραγωγή πανομοιότυπων τελικών ή ενδιάμεσων προϊόντων είναι τόσο μεγάλη, ώστε προτιμάται η παραγωγή κάποιων τμημάτων σε συγκεκριμένες παρτίδες για να επιτυγχάνονται μεγάλες οικονομίες κλίμακας. Η ροή των εργασιών στο συγκεκριμένο σύστημα παραγωγής δεν είναι τελείως γραμμική άλλα συνήθως είναι λιγότερο πολύπλοκη από ότι στα προηγούμενα συστήματα. Ένα παράδειγμα ενός διακριτού συστήματος μαζικής παραγωγής είναι μια βιοτεχνία ρούχων.

Σύστημα πολλαπλής επεξεργασίας (multi-processor task system)

Εδώ οι εργασίες απαιτούν επεξεργασία από μια ή περισσότερες μηχανές ταυτόχρονα.



Σχήμα 2. 7 Διάγραμμα ενδεικτικού συστήματος πολλαπλής επεξεργασίας

Σύστημα μηχανών πολλαπλής χρήσης (multi-purpose machine shop)

Σε ένα σύστημα μηχανών πολλαπλής χρήσης (multi-purpose machine, MPM) οι μηχανές είναι εξοπλισμένες με διαφορετικά εργαλεία και είναι ικανές να διεκπεραιώσουν διαφόρων ειδών εργασίες. Μια μηχανή μπορεί να επεξεργαστεί μια εργασία, μόνο αν είναι εξοπλισμένη με τα κατάλληλα εργαλεία.

2.3.2 Σημειογραφία συστημάτων προγραμματισμού παραγωγής

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει γίνει μεγάλη θεωρητική έρευνα στο πεδίο του ντετερμινιστικού προγραμματισμού και το πλήθος των μοντέλων που έχει προκύψει

είναι μεγάλο. Με τον καιρό δημιουργήθηκε μια σημειογραφία που μπορεί να αποτυπώσει ένα μεγάλο μέρος της δόμησης των ντετερμινιστικών μοντέλων.

Σε όλα τα μοντέλα προβλημάτων γίνεται η παραδοχή ότι είναι πεπερασμένος ο αριθμός των εργασιών και των μηχανών.

Το σύμβολο n είναι ο αριθμός των εργασιών και το m ο αριθμός των μηχανών. Συνήθως το j αναφέρεται σε εργασία ενώ το i σε μηχανή. Αν μια εργασία απαιτεί ένα αριθμό βημάτων ή λειτουργιών τότε το ζεύγος (i, j) αναφέρεται στο βήμα της εργασίας j στη μηχανή i.

Τα ακόλουθα δεδομένα σχετίζονται με το j.

Χρόνος Επεξεργασίας (Processing time p_{ij}): Το p_{ij} αναπαριστά το χρόνο επεξεργασίας της εργασίας j στη μηχανή i. Το i παραλείπεται αν ο χρόνος επεξεργασίας της j δεν εξαρτάται από τη μηχανή ή η εργασία j επεξεργάζεται σε μία μόνο μηχανή.

Ημερομηνία ενάρξεως (Release/creation date r_j): Είναι ο χρόνος που η εργασία j φτάνει στο σύστημα και είναι ο συντομότερος χρόνος που η εργασία j αρχίζει την επεξεργασία.

Προκαθορισμένη ημερομηνία παράδοσης (Due date d_j): Αναπαριστά τον χρόνο αποπεράτωσης, προθεσμία (η ημερομηνία που έχει υποσχεθεί στον πελάτη). Η αποπεράτωση της εργασίας μετά την ημερομηνία αυτή επιτρέπεται αλλά επιφέρει ποινή. Όταν απαραιτήτως πρέπει να ακολουθηθεί η d_j, αυτή αναφέρεται ως προθεσμίες (deadlines).

Συντελεστής Βάρους (Weight, w_j): Είναι ένας παράγοντας προτεραιότητας που δηλώνει την σπουδαιότητα της εργασίας j σχετικά με τις άλλες εργασίες του συστήματος. Για παράδειγμα, το w_j μπορεί να αναπαριστά το πραγματικό κόστος το να κρατήσουμε την εργασία στο σύστημα. Αυτό το κόστος μπορεί να είναι π.χ. κόστος απογραφής. Επίσης το w_j μπορεί να είναι η ποσότητα που προστίθεται σε μία εργασία.

Ένα πρόβλημα προγραμματισμού περιγράφεται από μία τριπλέτα α/β/γ. Το α περιγράφει το περιβάλλον της μηχανής και έχει μία είσοδο. Το β παρέχει λεπτομέρειες των χαρακτηριστικών της επεξεργασίας και των περιορισμών και μπορεί να μη περιέχει εισόδους, να έχει μία είσοδο ή πολλαπλές εισόδους. Το γ περιέχει την αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να βελτιστοποιηθεί και περιέχει μία είσοδο ή πολλαπλές εισόδους όπως θα επισημανθεί και στο επόμενο κεφάλαιο.

2.3.1.1 α - Περιβάλλον μηχανών παραγωγής

Τα ακόλουθα παραδείγματα είναι πιθανά περιβάλλοντα μηχανών και αναφέρονται στο **α**.

Περιβάλλον Απλής Μηχανής (Single machine, 1): Η περίπτωση της μίας μηχανής είναι η πιο απλή και είναι μία ειδική περίπτωση των περιβαλλόντων των μηχανών.

Παρόμοιες Μηχανές εν Παραλλήλω (Identical machines in parallel, Pm): Έστω ότι υπάρχουν m μηχανές παράλληλα. Η εργασία j απαιτεί μία μόνο λειτουργία και μπορεί να επεξεργαστεί σε οποιαδήποτε από τις m μηχανές ή σε οποιαδήποτε υποσύνολο υπάγεται. Αν η j δεν επιτρέπεται να επεξεργαστεί σε οποιαδήποτε αλλά μόνο στο υποσύνολο που υπάγεται, έστω M_j, τότε η είσοδος M_j εμφανίζεται στο β πεδίο.

Μηχανές εν παραλλήλω με διαφορετικές Ταχύτητες (Machines in parallel with different speeds, Qm): Υπάρχουν m μηχανές παράλληλα με διαφορετικές ταχύτητες. Η ταχύτητα της μηχανής i σημειώνεται ως v_i Ο χρόνος p_{ij} που η εργασία j σπαταλά στη μηχανή i, υποθέτοντας ότι η επεξεργασία γίνεται μόνο στη μηχανή i, είναι ίσος με p_j/v_i. Αυτό το περιβάλλον αναφέρεται επίσης και ως ομοιόμορφο (uniform). Αν όλες οι μηχανές έχουν την ίδια ταχύτητα $v_i = 1$ για όλες και $p_{ij} = p_j$ τότε το περιβάλλον είναι όμοιο με το προηγούμενο.

Μη Σχετιζόμενες μηχανές εν Παραλλήλω (Unrelated machines in parallel, Rm): Αυτό το περιβάλλον είναι μια γενίκευση του προηγούμενου. Υπάρχουν m διαφορετικές μηχανές παράλληλα. Η μηχανή i, επεξεργάζεται την εργασία j με ταχύτητα v_{ij}. Ο χρόνος p_{ij} που η εργασία j σπαταλά στη μηχανή i είναι, υποθέτοντας ότι η επεξεργασία γίνεται μόνο στη μηχανή i, ίσος με p_j/v_{ij}. Αν οι ταχύτητες των μηχανών είναι ανεξάρτητες των εργασιών, δηλαδή $v_{ij} = v_{i,}$ για όλα τα i και j, τότε το περιβάλλον είναι όμοιο με το προηγούμενο.

Γραμμές Συνεχούς Ροής (Flow shop, Fm): Υπάρχουν m μηχανές σε σειρά. Κάθε εργασία πρέπει να υποστεί επεξεργασία σε κάθε μία από τις m μηχανές. Όλες οι εργασίες έχουν το ίδιο δρομολόγιο, δηλαδή πρέπει να επεξεργαστεί πρώτα στη μηχανή 1,μετά στη 2 κτλ. Μετά την αποπεράτωση της εργασίας σε μία μηχανή αυτή μπαίνει στη ουρά για την επόμενη. Συνήθως, όλες οι ουρές λειτουργούν υπό τον κανόνα first in first out (FIFO), δηλαδή μια εργασία δεν περνά αν περιμένει στην ουρά. Αν η FIFO είναι επιτυχής τότε το Fm αναφέρεται και ως permutation (μετάθεση) Fm και το β πεδίο περιέχει την είσοδο prmu.

Ευέλικτες Γραμμές Παραγωγής Ροής (Flexible flow shop, FFs): Το FFs είναι μια γενίκευση των περιβαλλόντων παράλληλα και σειράς. Αντί για m μηχανές υπάρχουν s στάδια σε σειρά με ένα αριθμό μηχανών παράλληλα σε κάθε στάδιο. Κάθε εργασία πρέπει να περάσει πρώτα το στάδιο 1, μετά το 2 κτλ. Κάθε στάδιο λειτουργεί ως τράπεζα παράλληλων μηχανών. Σε κάθε στάδιο η εργασία j απαιτεί μόνο μια μηχανή και συνήθως κάθε μηχανή επεξεργάζεται οποιαδήποτε εργασία. Οι ουρές μεταξύ των διαφόρων σταδίων λειτουργούν συνήθως υπό την FIFO πειθαρχία.

Γραμμές παραγωγής Ανοικτής ροής (Open shop, Om): Υπάρχουν m μηχανές. Κάθε εργασία πρέπει να επεξεργαστεί ξανά σε κάθε μία από τις m μηχανές. Ωστόσο μερικοί από τους χρόνους επεξεργασίας μπορεί να είναι μηδέν. Δεν υπάρχουν περιορισμοί όσον αφορά τη δρομολόγηση κάθε εργασίας στις μηχανές. Ο προγραμματιστής επιτρέπεται να αποφασίσει τη δρομολόγηση κάθε εργασίας και διαφορετικές εργασίες μπορούν να έχουν διαφορετική δρομολόγηση.

Γραμμή Παραγωγής με ανεξάρτητα δρομολογούμενες Εργασίες (Job shop, Jm): Κάθε εργασία έχει τη δική της δρομολόγηση. Διάκριση γίνεται μεταξύ των Jm όταν μία εργασία πηγαίνει σε μία μηχανή περισσότερο από μία φορά. Στην τελευταία περίπτωση το β πεδίο περιλαμβάνει την είσοδο recrc για ανακύκλωση (recirculation).

2.3.1.2 β - Περιορισμοί

Οι περιορισμοί που καθορίζονται στο **β** πεδίο μπορούν να περιέχουν πολλαπλές εισόδους. Πιθανές είσοδοι στο πεδίο **β** είναι:

Ημερομηνίες Ενάρξεως εργασιών (Release dates, r_j): Αν αυτό το σύμβολο παρουσιάζεται στο β πεδίο, η εργασία j δεν μπορεί να αρχίσει την επεξεργασία πριν την r_j. Αν η r_j δεν εμφανίζεται στο πεδίο β, η επεξεργασία της j μπορεί να αρχίσει οποιαδήποτε στιγμή. Σε αντίθεση με τις r_j, οι d_j δεν καθορίζονται σε αυτό το πεδίο. Ο τύπος της αντικειμενικής συνάρτησης δίνει αρκετές ενδείξεις αν υπάρχουν ή όχι d_j.

Ανάθεση Χρόνου Με Σειριακή Εξάρτηση (Sequence dependent setup times, s_{jk}): Αναπαριστά τη διαδοχή- εξάρτηση χρόνου έναρξης μεταξύ των εργασιών j και k. s_{ok} είναι ο χρόνος έναρξης της εργασίας k εάν η εργασία k είναι πρώτη στη διαδοχή και s_{jo} ο χρόνος αποπεράτωσης αν η j είναι η τελευταία στη διαδοχή (τα s_{ok} και s_{jo} μπορεί να είναι μηδέν). Αν ο χρόνος έναρξης μεταξύ των j και k εξαρτάται από τη μηχανή τότε περιέχεται ο δείκτης i, δηλαδή s_{ijk}. Αν δεν εμφανίζεται καθόλου s_{jk} στο β πεδίο όλοι οι χρόνοι έναρξης θεωρούνται μηδέν ή ανεξάρτητοι στην οποία περίπτωση απλά προστίθενται στους χρόνους επεξεργασίας.

Δείκτες προσωρινής διακοπής (Preemptions, prmp): Ο προγραμματιστής επιτρέπεται να διακόπτει την επεξεργασία μιας εργασίας (πρόληψη) οποιαδήποτε στιγμή και να επιτρέψει κάποια άλλη εργασία στη μηχανή. Το κομμάτι της επεξεργασίας της εργασίας που διακόπτεται δεν χάνεται και όταν επιστρέψει η εργασία στη μηχανή (ή τοποθετηθεί σε κάποια άλλη που δουλεύει παράλληλα), τότε χρειάζεται μόνο τον εναπομείναντα χρόνο επεξεργασίας. Όταν επιτρέπεται η πρόληψη τότε περιέχεται στο β πεδίο το prmp, ενώ όταν δεν περιέχεται δεν επιτρέπονται οι διακοπτόμενες επεξεργασίες.

Περιορισμοί προτεραιότητας (Precedence constraints, prec): Εμφανίζονται σε περιβάλλον μίας μηχανής ή παραλλήλων και απαιτούν μία ή περισσότερες εργασίες να ολοκληρωθούν πριν επιτραπεί η έναρξη κάποιας άλλης. Υπάρχουν διάφορες μορφές των prec. Αν κάθε εργασία έχει το πολύ μία προηγούμενη και μία επόμενη, οι περιορισμοί αναφέρονται ως αλυσίδα (chains). Αν έχει το πολύ μία επόμενη, τότε αναφέρονται ως 'σε δέντρο' (in-tree). Αν έχει το πολύ μία προηγούμενη αναφέρονται ως out-tree. Όταν το prec δεν εμφανίζεται στο β πεδίο οι εργασίες δεν υπόκεινται σε αυτούς τους περιορισμούς.

Βλάβες (Breakdowns, brkdwn): Βλάβες στις μηχανές σημαίνουν ότι οι μηχανές δεν είναι συνέχεια διαθέσιμες. Οι χρονικές περίοδοι που μια μηχανή δεν είναι διαθέσιμη είναι καθορισμένες. Όταν υπάρχουν μηχανές παράλληλα, ο αριθμός των διαθέσιμων μηχανών οποιαδήποτε χρονική στιγμή είναι συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή m(t).

Περιορισμοί Ικανότητας Μηχανής (Machine eligibility restrictions, M_j): Το M_j μπορεί να εμφανιστεί στο πεδίο β όταν υπάρχουν m μηχανές παράλληλα (Pm). Όταν εμφανίζεται το M_j τότε δεν είναι όλες οι m μηχανές ικανές να επεξεργαστούν την εργασία j. Αν το πεδίο β δεν περιέχει το M_j, τότε όλες οι μηχανές μπορούν να επεξεργαστούν την j.

Μετάθεση (Permutation, prmu): Ένας περιορισμός που μπορεί να εμφανιστεί στη ροή είναι ότι οι ουρές σε κάθε μηχανή λειτουργούν σύμφωνα με τον κανόνα FIFO. Αυτό υπονοεί ότι η σειρά (μετά από εκτέλεση των απαραίτητων μεταθέσεων μεταξύ των εργασιών) με την οποία κάθε εργασία περνά από την πρώτη μηχανή διατηρείται σε όλο το σύστημα.

Μπλοκάρισμα (Blocking block): Το μπλοκάρισμα είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να εμφανιστεί σε μία ροή. Μεταξύ δυο διαδοχικών μηχανών μπορεί να συμβεί μία ολοκληρωμένη εργασία να μην επιτραπεί να προχωρήσει, όταν το όριο προφύλαξης μεταξύ των μηχανών είναι γεμάτο. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως μπλοκάρισμα. Η ολοκληρωμένη εργασία πρέπει να παραμείνει εντός της μηχανής μπλοκάροντας έτσι τη μηχανή από το να ξεκινήσει κάποια εργασία. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι όταν μεταξύ δύο διαδοχικών μηχανών το όριο προστασίας είναι μηδέν. Σε αυτή την περίπτωση μια εργασία που έχει ολοκληρωθεί σε μία μηχανή δεν φεύγει από την μηχανή αν η εργασία που προηγείται δεν έχει τελειώσει την επεξεργασία της στην επόμενη μηχανή. Έτσι η μπλοκαρισμένη εργασία μπλοκάρει την επόμενη της από το να αρχίσει η επεξεργασία της στη μηχανή. Στα μοντέλα όπου θεωρείται το μπλοκάρισμα, η υπόθεση είναι ότι οι μηχανές λειτουργούν σύμφωνα με το FIFO δηλ. το μπλοκάρισμα προϋποθέτει prmu.

Μη Αναμονή (No-wait nwt): Η απαίτηση αυτή είναι ένα άλλο φαινόμενο που μπορεί να εμφανιστεί κατά τη ροή. Οι εργασίες δεν επιτρέπεται να περιμένουν μεταξύ δύο

διαδοχικών μηχανών. Αυτό προϋποθέτει ότι ο χρόνος έναρξης μίας εργασίας στην πρώτη μηχανή πρέπει να καθυστερήσει για να βεβαιώσουμε ότι η εργασία μπορεί να συνεχίσει τη ροή της χωρίς να περιμένει σε οποιαδήποτε μηχανή.

Ανακύκλωση (Recirculation rerc): Εμφανίζεται όταν μία εργασία πηγαίνει σε μία μηχανή περισσότερες από μία φορές. Οποιαδήποτε άλλη είσοδο εμφανίζεται στο πεδίο β είναι αυτονόητη. Για παράδειγμα, p_j= p υπονοεί ότι όλοι οι χρόνοι επεξεργασίας είναι ίσοι και d_j= d ότι όλες οι προκαθορισμένες ημερομηνίες είναι ίσες. Η αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να βελτιστοποιηθεί είναι μία συνάρτηση των χρόνων, εργασιών, η οποία εξαρτάται από το πρόγραμμα. Ο χρόνος αποπεράτωσης της εργασίας j στη μηχανή i σημειώνεται ως C_{ij}. Ο χρόνος που η j βγαίνει από το σύστημα σημειώνεται ως C_j. Η αργοπορία (lateness) της εργασίας j ορίζεται ως $L_j = C_j - d_j$ η οποία είναι θετική όταν η j ολοκληρώνεται καθυστερημένα και αρνητική όταν ολοκληρώνεται νωρίτερα. Η καθυστέρηση (tardiness) της j ορίζεται ως T_j= max($C_j - d_j$, 0) = max(L_j, 0).

Η διαφορά τους είναι ότι η καθυστέρηση δεν είναι ποτέ αρνητική. Η ποινή της μονάδος (unit penalty) μιας εργασίας ορίζεται ως

U_j, όταν $C_j > d_j$,

0, σε άλλη περίπτωση

2.3.1.3 γ – Αντικειμενική συνάρτηση

Τα ακόλουθα παραδείγματα είναι πιθανές, ενδεικτικές αντικειμενικές συναρτήσεις:

Εύρος Κατασκευής (Make span, C_{max}): Ορίζεται ως το max(C_1…C_n) και είναι ισοδύναμο με τον χρόνο αποπεράτωσης της τελευταίας εργασίας που έφυγε από το σύστημα. Ένα ελάχιστο Cmax προϋποθέτει συνήθως μεγάλη χρησιμοποίηση των μηχανών.

Μέγιστη καθυστέρηση (Maximum lateness, L_{max}): Ορίζεται ως max (L_1,….,L_n). Μετρά την μεγαλύτερη παραβίαση των due dates.

Συνολικός Σταθμισμένος Χρόνος Αποπεράτωσης (Total weighted completion time, $\Sigma w_j c_j$): Το σταθμισμένο άθροισμα των χρόνων n εργασιών δίνει μία ένδειξη του συνολικού κόστους διατήρησης αποθεμάτων που εμφανίστηκαν σε ένα πρόγραμμα. Το άθροισμα των χρόνων αποπεράτωσης αναφέρεται ως flow time (χρόνος ροής). Το σταθμισμένο αυτό άθροισμα αναφέρεται ως weighted flow time.

Σταθμισμένο Άθροισμα Ανηγμένων Χρόνων Αποπεράτωσης (Discounted total weighted completion time, $\Sigma w_j(1-\exp(-rt))$): Αυτή είναι περισσότερο μία συνάρτηση κόστους όπου τα κόστη μειώνονται με ρυθμό r, 0 < r < 1, ανά μονάδα χρόνου. Δηλαδή αν μία εργασία j δεν ολοκληρωθεί στο χρόνο t ένα επιπρόσθετο κόστος εμφανίζεται

κατά την περίοδο [t, t + dt]. Αν η j ολοκληρωθεί στο χρόνο t, το συνολικό κόστος εμφανίζεται την περίοδο [0, t] και είναι w_j (1 – exp(- rt)). Η τιμή του r είναι συνήθως κοντά στο 0, περίπου 0.1 ή 10%.

Συνολική Σταθμισμένη Καθυστέρηση (Total weighted tardiness, $\Sigma w_j T_j$): Αυτή είναι επίσης μια πιο γενική συνάρτηση κόστους.

Σταθμισμένο Πλήθος Καθυστερημένων Εργασιών (Weighted number of tardy jobs, $\Sigma w_j U_j$): Ο αριθμός αυτός δεν είναι μόνο ένα μέτρο ακαδημαϊκού ενδιαφέροντος αλλά συχνά είναι στην πράξη μια αντικειμενική συνάρτηση.

2.3.3 Παραδείγματα πολυκριτηριακών προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής

Πολλά προβλήματα προγραμματισμού παραγωγής εμπλέκουν έναν αριθμό από κριτήρια βελτιστοποίησης. Ενδεικτικά, στην βιβλιογραφία, ανταποκρινόμενη στην απεικόνιση πραγματικών βιομηχανικών περιβαλλόντων παραγωγής, συναντώνται συχνά περιπτώσεις που αφορούν σε μια συγκεκριμένη -ιδιαίτερα δημοφιλή- φιλοσοφία παραγωγής: την ανάγκη παραγωγής σε "Just-in-Time". Αυτή η ανάγκη μεταφράζεται σε δύο επιδιώξεις:

1) Την έγκαιρη μη καθυστερημένη παράδοση στον πελάτη και
2) Την ελαχιστοποίηση της αποθεματοποίησης υλικών (πρώτων υλών, έτοιμων ή/και ημι-έτοιμων)

Συνεπώς, η παραγωγή "Just-in-Time" αποτελεί μια δικριτηριακή φιλοσοφία αντιστάθμισης μεταξύ της παραγωγής «νωρίτερα» και της παραγωγής «αργότερα».

Στην ακόλουθη παράγραφο, παρουσιάζονται κάποια πολυκριτηριακά προβλήματα χρονοπρογραμματισμού που ανταποκρίνονται σε πραγματικές περιπτώσεις διαφόρων πεδίων εφαρμογής.

Παραγωγή Μπουκαλιών

Ένα εργοστάσιο παρασκευάζει γυάλινα μπουκάλια, το χρώμα των οποίων καθορίζεται εκ των προτέρων, κατά την φάση σχεδιασμού (T'kindt & Billaut, 2001). Ένας φούρνος που περιέχει λιωμένο γυαλί δεδομένου χρώματος, εξυπηρετεί διαφορετικές μηχανές μορφοποίησης. Σε αυτές οι μηχανές εφαρμόζονται διάφορα καλούπια, επιτρέποντας έτσι να παραχθούν διαφορετικές μορφές μπουκαλιών, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές παραγγελίες. Η αλλαγή του καλουπιού σε μία μηχανή απαιτεί αμελητέο χρόνο σε σχέση με τον χρόνο παραγωγής, επιτρέποντας, έτσι την μετάβαση από τον

ένα τύπο προϊόντος στον άλλο, θεωρώντας μηδενική επιβάρυνση χρόνου.

Η παραγωγή ενός προϊόντος από μία μηχανή δημιουργεί κάποιο κέρδος το οποίο είναι μετρήσιμο. Ένας από τους στόχους είναι λοιπόν, λαμβάνοντας υπόψιν τον χρονικό ορίζοντα, η ανάθεση εργασιών στις μηχανές προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το αντίστοιχο κέρδος. Από την άλλη, η αλλαγή χρώματος στους φούρνους επηρεάζει την ρύθμιση των μηχανών που εξυπηρετεί, οπότε αυτή η αλλαγή χρώματος μπορεί να γίνει μόνο όταν όλες οι σχετιζόμενες μηχανές έχουν ολοκληρώσει την τρέχουσα εργασία τους. Προκειμένου να μην επιτραπεί στις μηχανές να είναι ανενεργές για μεγάλο χρονικό διάστημα, το οποίο δημιουργεί κόστος, επιδιώκεται οι μηχανές να ολοκληρώσουν την τρέχουσα εργασία τους εντός του ίδιου μικρού χρονικού διαστήματος, προκειμένου να μην υπάρχουν αναμονές. Ένα δεύτερο λοιπόν κριτήριο, στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της μέγιστης διαφοράς φόρτου εργασίας μεταξύ των μηχανών. Ο αποφασίζων, επιθυμεί να βρει την καλύτερη δυνατή αντιστάθμιση μεταξύ του συνολικού κέρδους και του μεγαλύτερου άεργου χρονικού διαστήματος μεταξύ των μηχανών.

Γαλβανική ηλεκτραπόθεση και χημική βιομηχανία

Αυτή η κατηγορία προβλημάτων παραπέμπει στο πρόβλημα Προγραμματισμού Συσκευών Ανύψωσης (Hoist scheduling) της βιβλιογραφίας. Ένας συγκεκριμένος αριθμός από δεξαμενές που περιέχουν χημικά διατίθενται για την γαλβανική επεξεργασία των αντικειμένων. Η άφιξη των αντικειμένων στο βιομηχανικό περιβάλλον είναι κυκλική. Αυτά τα αντικείμενα περνούν από την μία δεξαμενή στην άλλη, μέσω αυτοματοποιημένου ρομπότ μεταφοράς, το οποίο συνήθως αιωρείται πάνω από τις δεξαμενές. Ο χρόνος επεξεργασίας των αντικειμένων μέσα στις δεξαμενές είναι μια μεταβλητή του προβλήματος. Πράγματι, οι χημικοί μηχανικοί δίνουν ένα ελάχιστο και ένα μέγιστο χρόνο διάρκειας για κάθε επεξεργασία, αφήνοντας περιθώριο ελευθερίας στους αναλυτές για τον υπολογισμό της βέλτιστης διάρκειας. Το βασικό πρόβλημα έγκειται στην ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου επεξεργασίας, ως κριτηρίου βελτιστοποίησης. Παρ’ όλ’ αυτά, υπάρχουν δύο παράγοντες που μας υποχρεώνουν να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα από πολυκριτηριακή σκοπιά. Πρώτον, πρακτικοί λόγοι δείχνουν ότι ο προγραμματισμός της μετακίνησης των ρομπότ (που μετακινούν τα αντικείμενα από την μία δεξαμενή στην άλλη) είναι το πιο δύσκολο σημείο να καθοριστεί, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας. Δεύτερον, για τις περισσότερες δεξαμενές, η τήρηση της ελάχιστης διάρκειας βύθισης είναι η βασική επιδίωξη. Στην πράξη όμως, υπάρχουν φορές που επιτρέπεται η υπέρβαση της μέγιστης διάρκειας βύθισης προκειμένου να διευκολυνθεί η μετακίνηση των ρομπότ. Έτσι, το πρόβλημα γίνεται δικριτηριακό, όταν επιδίωξη είναι τόσο να ελαχιστοποιηθεί ο συνολικός

χρόνος επεξεργασίας, όσο και ένα σταθμισμένο άθροισμα της υπέρβασης των χρόνων βύθισης σε σχέση με τους μέγιστους επιτρεπόμενους χρόνους βύθισης (Fargier & Lamothe, 2001).

Συναρμολόγηση αυτοκινήτων

Οι γραμμές παραγωγής αυτοκινήτων δημιουργούν περιβάλλον πολυκριτηριακών προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής. Ενδεικτικά, αναφέρεται ως μια πολυκριτήρια διάσταση του προβλήματος η περίπτωση της κατασκευής των καθισμάτων από υπεργολάβους προμηθευτές. Ο κατασκευαστής των καθισμάτων και η βιομηχανία συναρμολόγησης είναι συγχρονισμένες και η δρομολόγηση ενός οχήματος στην γραμμή συναρμολόγησης, αυτόματα δίνει εντολή στον κατασκευαστή καθισμάτων να παράγει καθίσματα, τα οποία πρέπει να διατεθούν στην γραμμή συναρμολόγησης σε περιορισμένο χρονικό διάστημα. Αυτό το πρόβλημα είναι τυπικό πρόβλημα Just-in-Time προγραμματισμού παραγωγής, καθώς η παραγωγή καθισμάτων νωρίτερα δημιουργεί για την βιομηχανία συναρμολόγησης επιπλέον κόστος αποθήκευσης (συνήθως υψηλότερο απ’ ότι για την αποθήκευση μιας μηχανής). Αντίστοιχα, η αργοπορημένη παραγωγή και παραλαβή των καθισμάτων προκαλεί καθυστέρηση στην γραμμή συναρμολόγησης, με αποτέλεσμα το όχημα υπό επεξεργασία να πρέπει να μετακινηθεί στην αρχή της γραμμής, το οποίο προκαλεί επιπλέον κόστος παραγωγής.

Προβλήματα προγραμματισμού στις μεταφορές

Πολυάριθμα προβλήματα προγραμματισμού και δρομολόγησης προκύπτουν στον τομέα των μεταφορών προϊόντων ή/και επιβατών. Ανάμεσα σε πολλά, αναφέρουμε το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού των πληρωμάτων αεροσκαφών το οποίο αποτελεί πολυκριτηριακό πρόβλημα (Lucie & Teodorovic, 1999). Το πρόβλημα προκύπτει κατά την διαχείριση των βαρδιών στις πτήσεις των αεροσκαφών. Θεωρείται ένα σύνολο από πτήσεις και ένα σύνολο από προκαθορισμένες βάρδιες, όπου ως βάρδια θεωρείται μια αλληλουχία πτήσεων. Έχοντας ως δεδομένο ένα σύνολο από πιλότους, πρέπει να γίνουν αναθέσεις σε βάρδιες χωρίς να παραβιάζονται περιορισμοί που έχουν σχέση με την ασφάλεια πτήσεων και τις ικανότητες των πιλότων. Για παράδειγμα, ένας πιλότος πετάει μόνο συγκεκριμένο τύπο αεροσκαφών, ο μηνιαίος χρόνος πτήσης περιορίζεται στις 85ωρες, ο αριθμός των απογειώσεων δεν πρέπει να ξεπερνάει τις 90/μήνα κλπ. Επιπλέον, κάθε μέρα που ο πιλότος διαμένει σε ξεχωριστή πόλη. χώρα και λαμβάνει ημερήσια αποζημίωση. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση δύο κριτηρίων. Το πρώτο αφορά στην μέση σχετική απόκλιση ανά πιλότο μεταξύ του πραγματικού και του ιδεατού χρόνου πτήσης και το δεύτερο είναι η μέση απόλυτη απόκλιση μεταξύ του πραγματικού και του ιδεατού πλήθους των ημερησίων αποζημιώσεων που λαμβάνει κάθε πιλότος/μήνα.

Άλλη εφαρμογή στον χώρο των μεταφορών αναφέρεται στην διαχείριση σιδηροδρομικών υπηρεσιών σε γραμμές υψηλής ταχύτητας (Chang, Yeh, & Shen, 2000).

Πολυκριτηριακά προβλήματα συναντάμε σε πλήθος άλλων περιοχών όπως:

- Διαχείρισης ωρολόγιων χρονοπρογραμμάτων σε ακαδημαϊκά ιδρύματα. Οι πόροι σε αυτή την περίπτωση είναι: μαθητές, καθηγητές, προσωπικό, υποδομές, εξοπλισμός, οικονομικοί πόροι και χρόνος. Η ανάθεση και προγραμματισμός πόρων αναφέρεται στον καθορισμό των επιπέδων συγκεκριμένων πόρων που πρέπει να διατεθούν/κατανεμηθούν σε ανταγωνιστικές δραστηριότητες. Αυτό αφορά διαχείριση προγράμματος εξετάσεων, ωρολογίου προγράμματος μαθημάτων και ανάθεση αιθουσών κλπ. Η έρευνα σε αυτού του είδους τα προβλήματα (Mustafa & Goh, 1996) προτείνει ενδεικτικά την χρήση προγραμματισμού στόχων, ευρετικούς κανόνες και αλληλεπιδραστικές μεθόδους.
- Προγραμματισμός στον αθλητισμό. Αποτελεί μια ειδική περίπτωση προγραμματισμού που σχετίζεται με τα προβλήματα διαχείρισης χρονοπρογραμμάτων: σκοπός είναι συνήθως να καθοριστεί ένα πρόγραμμα αγώνων σε ένα τουρνουά ή πρωτάθλημα. Αυτού του είδους προβλημάτων χαρακτηρίζονται συνήθως από πολλούς περιορισμούς, και είναι ενδιαφέρουσα η προσέγγισης χαλάρωσης περιορισμών και έκφρασής τους ως κριτηρίων βελτιστοποίησης, διαμορφώνοντας με αυτό τον τρόπο ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα (Wright, M B., 2005)
- Διαχείριση και προγραμματισμός δορυφόρων. Οι δορυφόροι είναι σπάνιοι και ακριβοί πόροι που πρέπει να υλοποιήσουν καθορισμένες εργασίες. Ένα παράδειγμα πολυκριτηριακού προβλήματος στην περιοχή αυτή περιγράφουν οι (Gabrel, V. and Vanderpooten, D., 2002) που ασχολούνται με την περίπτωση του προγραμματισμού ενός δορυφόρου επίγειας παρακολούθησης. Ένας τέτοιος δορυφόρος πρέπει να επεξεργάζεται καθημερινά μια σειρά από φωτογραφίες σύμφωνα με το καθημερινό πλάνο. Το πλάνο αυτό υπολογίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να τηρούνται μια σειρά περιορισμοί: κάθε φωτογραφία πρέπει να λαμβάνεται σε συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο λόγω της τροχιάς του δορυφόρου, υπάρχουν χρόνοι set-up μεταξύ δύο φωτογραφιών, ο δορυφόρος μπορεί να λαμβάνει φωτογραφίες μόνο με το φως ημέρας κλπ. Το πρόβλημα πραγματικά έχει τόσους περιορισμούς που κάποιες φωτογραφίες δεν μπορούν να ληφθούν. Ως εκ τούτου, αυτό το πρόβλημα προγραμματισμού θεωρεί ενδεικτικά τρία κριτήρια: (i) μεγιστοποίηση κάλυψης ζήτησης (ii) μεγιστοποίηση του αθροίσματος των προτεραιοτήτων των προγραμματισμένων φωτογραφιών. (iii) ελαχιστοποίηση του κόστους των χρησιμοποιούμενων καμερών, Οι Gabrel και

Vanderpooten επιλύουν το πρόβλημα με απαρίθμηση των αυστηρά Pareto λύσεων (διαδρομών) σε ένα τρισδιάστατο γράφο. Επισημαίνεται ότι αυτό δεν γίνεται σε πολυωνυμικό χρόνο. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ο τρόπος μοντελοποίησης του συγκεκριμένου προβλήματος ως ενός προβλήματος μίας μηχανής, με *n εργασίες* (οι φωτογραφίες), χρονικά παράθυρα, set-up χρόνους και με κόστος απόρριψης (Bartal, Leonardi, Marchetti-Spaccamela, Sgall, & Stougie, 2000).

2.4 Μέθοδοι βελτιστοποίησης στον προγραμματισμό παραγωγής

Τα προβλήματα χρονοπρογραμματισμού και ευρύτερα διοίκησης παραγωγής απασχολούν τα τελευταία χρόνια την επιστημονική κοινότητα λόγω των ιδιαίτερων ερευνητικών προκλήσεων που τα χαρακτηρίζουν. Για την προσέγγιση επίλυσής τους έχουν αναπτυχθεί και αξιοποιούνται κατά περίπτωση πλήθος διάφορα μαθηματικά μοντέλα και τεχνικές, καθώς και υπολογιστικές μέθοδοι. Έτσι, σήμερα έχουμε στη διάθεσή μας εργαλεία ανάλυσης, μοντελοποίησης και επίλυσης των προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού τα οποία η επιστημονική κοινότητα μπορεί να αξιοποιήσει για να προσεγγίσει την ανάλυση και ρεαλιστική επίλυση πραγματικών προβλημάτων της βιομηχανίας.

Μερικές από τις πιο γνωστές θεωρίες, μεθόδους ή λύσεις είναι οι:

- Μαθηματικός Προγραμματισμός
- Γραμμικός Προγραμματισμός
- Ανάλυση Ευαισθησίας
- Χρονικός Προγραμματισμός
- Θεωρία Αποφάσεων
- Θεωρία Παιγνίων
- Συστήματα Αναμονής
- Δυναμικός Προγραμματισμός
- Μη-Γραμμικός Προγραμματισμός
- Ακέραιος Προγραμματισμός
- Αναλυτικά Μοντέλα Προσομοίωσης
- Πιθανοτικά και Στοχαστικά Μοντέλα
- Βέλτιστοι Αλγόριθμοι Εκτίμησης
- Ευρετικές (Heuristic) Μέθοδοι
- Προσεγγιστικές Μέθοδοι
- Γενετικοί Αλγόριθμοι

- κλπ.

Επισημαίνεται ότι μέθοδοι διακρίνονται σε μεθόδους βελτιστοποίησης (optimization methods), ήτοι μεθόδους που στοχεύουν στην εύρεση βέλτιστης λύσης για το πρόβλημα, και σε μεθόδους προσεγγιστικές μέθοδοι (approximation methods), ήτοι, μεθόδους που αν και δεν εγγυώνται την εύρεση μιας βέλτιστης λύσης, δίνουν εφικτές (ως προς την πραγματοποίησή τους λύσεις) που δεν απέχουν ιδιαίτερα από τη βέλτιστη, σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Οι τελευταίες μέθοδοι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή/εύκολα υλοποιήσιμη η εύρεση βέλτιστης λύσης λόγω είτε μεγάλης πολυπλοκότητας του προβλήματος, είτε μεγάλου μεγέθους/όγκου δεδομένων οπότε ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται καθιστά τις μαθηματικές μεθόδους βελτιστοποίησης απαγορευτικές. Οι δυσκολίες, όμως, εφαρμογής αυτών των τεχνικών σε πραγματικά προβλήματα, οδήγησαν στην προσπάθεια για την ανάπτυξη κατάλληλων μεθόδων για την εύρεση «σχεδόν βέλτιστων» (near optimal) λύσεων, όπου η προσεγγιστική βελτιστοποίηση είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του υπολογιστικού κόστους της λύσης. Αυτός ο προσανατολισμός των ερευνητικών προσπαθειών προς εύρεση καλών και εφικτών λύσεων σε διάφορα σημαντικά προβλήματα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής παραμένει και σήμερα, έχοντας αποκτήσει έναν πιο ξεκάθαρο και μόνιμο χαρακτήρα.

Ακολούθως παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένες από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής.

2.4.1 Μαθηματικός Προγραμματισμός

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός (Mathematical Programming) είναι η περιοχή των μαθηματικών που ασχολείται με τη μοντελοποίηση και την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Με τον όρο μοντελοποίηση εννοείται η όσο το δυνατό πιο ρεαλιστική απεικόνιση του πραγματικού προβλήματος με μαθηματικές σχέσεις κατάλληλης μορφής, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τεχνικές επίλυσης του Μαθηματικού Προγραμματισμού και να βρεθεί η ζητούμενη λύση.

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός (Μ.Π.) και οι τεχνικές που τον αποτελούν χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης πόρων σε διάφορες δραστηριότητες. Τα προβλήματα αυτά προκύπτουν όταν οι διαθέσιμοι πόροι (κεφάλαια, πρώτες ύλες, μηχανολογικός εξοπλισμός, κ.λπ.) είναι περιορισμένοι.

Το πρόβλημα του μαθηματικού προγραμματισμού μπορεί να οριστεί ως εξής:

$\min f(x), x \in S \subseteq \mathbb{R}^n$

όπου το $\mathbb{R}^n$ είναι το σύνολο όλων των διανυσμάτων n διαστάσεων με συντεταγμένες πραγματικούς αριθμούς και η f είναι μία πραγματική συνάρτηση ορισμένη πάνω στο

S. Το σύνολο S καλείται σύνολο περιορισμών (constraint set) και η συνάρτηση f αντικειμενική συνάρτηση (objective function).

Κάθε $x \in S$ καλείται εφικτή (feasible) λύση του προβλήματος.

Εάν υπάρχει $x_0 \in S$ για το οποίο ισχύει πως:

$-\infty < f(x_0) \leq f(x), \forall x \in S$

τότε το x_0 είναι βέλτιστη λύση (optimal solution) του προβλήματος.

Κατά την επίλυση ενός προβλήματος μαθηματικού προγραμματισμού επιδιώκεται η εύρεση μιας ή περισσότερων βέλτιστων λύσεων.

Το πρόβλημα αναφοράς μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων όπου το S αναπαριστά το σύνολο όλων των επιτρεπτών αποφάσεων και η f αντιστοιχίζει σε κάθε $x \in S$ μία τιμή κόστους (ή κέρδους όταν πρόκειται για πρόβλημα μεγιστοποίησης). Οι εφαρμογές του μοντέλου αυτού αφθονούν στον πραγματικό κόσμο (βιομηχανία, επιχειρήσεις, φυσικές και κοινωνικές επιστήμες) (Nemhauser & Garfinkel, 1972).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατηγοριοποίησης των προβλημάτων Μαθηματικού Προγραμματισμού. Ειδικότερα, ξεχωρίζουμε και αναφέρουμε τις πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις:

Γραμμικότητα

Όταν οι σχέσεις που συσχετίζουν τις μεταβλητές απόφασης για την μοντελοποίηση των περιορισμών αλλά και των κριτηρίων είναι γραμμικές, τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού (Linear Programming). Αντίστοιχα, όταν οι σχέσεις αυτές δεν είναι όλες γραμμικές τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα Μη Γραμμικού Προγραμματισμού (Non Linear Programming). Για την επίλυση γραμμικών προβλημάτων επικρατούν πλέον η μέθοδος Simplex και οι παραλλαγές αυτής, που μπορούν σήμερα και λύνουν προβλήματα Γραμμικού Προγραμματισμού μεγάλων διαστάσεων (χιλιάδες μεταβλητές απόφασης και περιορισμούς) σε δευτερόλεπτα. Αντίθετα, η επίλυση προβλημάτων Μη Γραμμικού Προγραμματισμού είναι πιο δύσκολη πρόκληση για τους αναλυτές. Με δεδομένα τα παραπάνω, συχνά επιδιώκεται τα πραγματικά προβλήματα να μοντελοποιούνται γραμμικά, χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές μετατροπής μη γραμμικών σχέσεων σε γραμμικές (π.χ. με την εισαγωγή βοηθητικών μεταβλητών και βοηθητικών περιορισμών), προκειμένου να είναι δυνατή η εύκολη επίλυσή τους.

Συνεχείς ή Διακριτές Μεταβλητές

Διακρίνουμε τα προβλήματα στα οποία οι μεταβλητές είναι συνεχείς και τα προβλήματα στα οποία οι μεταβλητές είναι ακέραιες. Στην δεύτερη περίπτωση το χωρίο των εφικτών λύσεων παρουσιάζει εν γένει ασυνέχειες δυσκολεύοντας έτσι κατά πολύ τη διαδικασία επίλυσης. Από την άλλη, η δυνατότητα μοντελοποίησης ενός προβλήματος με χρήση ακέραιων μεταβλητών επιτρέπει την πιο ρεαλιστική αποτύπωση του περιβάλλοντος και των παραμέτρων του προβλήματος, καθώς συχνά οι μεταβλητές απόφασης έχουν φυσική σημασία με διακριτό/ ακέραιο πεδίο τιμών. Με τις ακέραιες μεταβλητές μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο λογικές συνθήκες, οικονομίες κλίμακας, σταθερά κόστη κλπ, δηλαδή φαινόμενα που δεν μπορούν να εκφρασθούν με τη χρήση συνεχών μεταβλητών. Επιπλέον, είναι δυνατή η μοντελοποίηση πραγματικών προβλημάτων που έχουν συνδυαστικό χαρακτήρα (συνδυαστική βελτιστοποίηση). Τέτοια προβλήματα είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν και επιλυθούν χωρίς την χρήση ακέραιων μεταβλητών. Σε πολλές περιπτώσεις πραγματικών προβλημάτων, οι ακέραιες μεταβλητές είναι δυαδικές μεταβλητές δηλαδή παίρνουν τιμή 0 ή 1. Αν ένα μοντέλο Μαθηματικού Προγραμματισμού έχει μόνο ακέραιες μεταβλητές χαρακτηρίζεται ως μοντέλο Ακέραιου Προγραμματισμού (Integer Programming). Αν έχει και συνεχείς και ακέραιες μεταβλητές χαρακτηρίζεται ως μοντέλο Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (Mixed Integer Programming).

Στοχαστικότητα

Οι παράμετροι ενός προβλήματος Μαθηματικού Προγραμματισμού μπορεί να μην εκφράζονται με πραγματικούς αριθμούς αλλά με κατανομές πιθανότητας ή με ασαφείς αριθμούς απεικονίζοντας έτσι την αβεβαιότητα ως προς την τιμή τους. Τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται αντίστοιχα ως πρόβλημα Στοχαστικού Προγραμματισμού (Stochastic Programming) ή Ασαφούς Προγραμματισμού (Fuzzy Programming). Τα τελευταία χρόνια μάλιστα έχει αρχίσει να απασχολεί ιδιαίτερα η διαχείριση της αβεβαιότητας ως προς τις παραμέτρους ενός μοντέλου ξεφεύγοντας από τις απλές μορφές ανάλυσης ευαισθησίας που μπορεί να προσφέρει και ο Μαθηματικός Προγραμματισμός.

Πλήθος Κριτηρίων

Όταν η προβληματική αποτυπώνεται με ένα μόνο κριτήριο, τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται μονοκριτηριακό. Στην περίπτωση που η προβληματική εκφράζεται με περισσότερα από ένα κριτήρια (ήτοι, αντικειμενικές συναρτήσεις), τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα

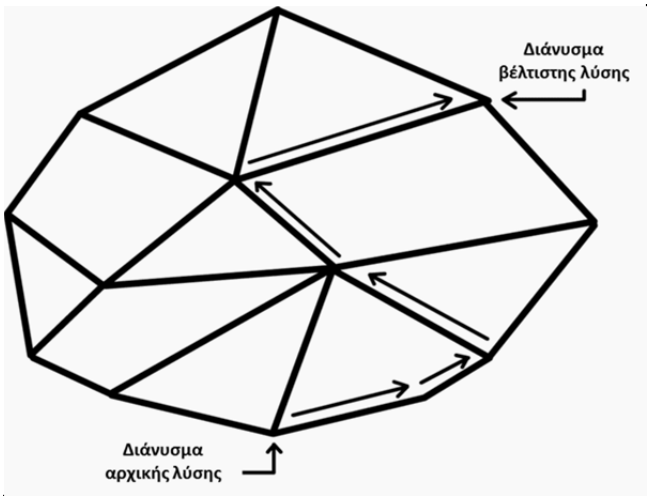
Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού (Multiobjective Programming, Multicriteria Programming). Ο όρος Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση συχνά συναντάται και με τον όρο διανυσματική βελτιστοποίηση (vector optimization) σε αντιδιαστολή με την μονοδιάστατη βελτιστοποίηση (scalar optimization) που αφορά στον συμβατικό Μαθηματικό Προγραμματισμό. Ο Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός αναπτύχθηκε κυρίως τις δύο τελευταίες δεκαετίες, όταν η θεώρηση περισσοτέρων από μιας αντικειμενικών συναρτήσεων άρχισε να καθορίζει ένα πιο ρεαλιστικό πλαίσιο μοντελοποίησης των πολύπλοκων προβλημάτων μάνατζμεντ. Η πολλαπλότητα των κριτηρίων στη σύγχρονη λήψη αποφάσεων όπου πλέον μαζί με το συνηθισμένο κριτήριο βελτιστοποίησης (το οικονομικό) εξετάζονται και άλλα κριτήρια (περιβαλλοντικά, κοινωνικά κλπ) καθιέρωσε το Πολυκριτηριακό Μαθηματικό Προγραμματισμό ως ένα σύγχρονο, πλήρες εργαλείο στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

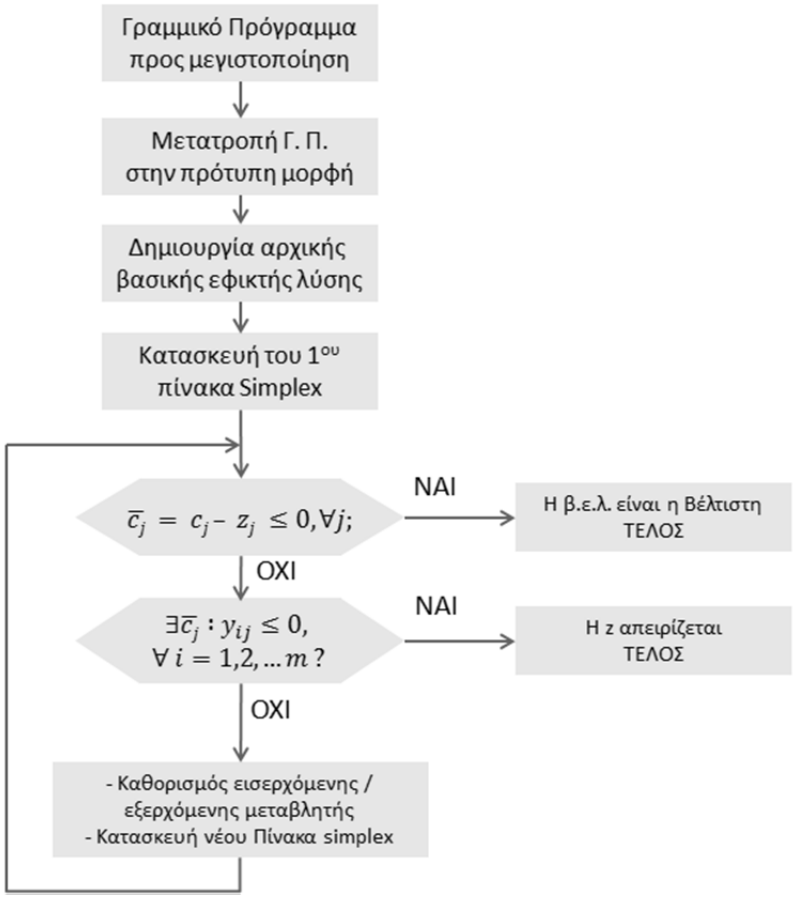
2.4.2 Γραμμικός προγραμματισμός

Ο Γραμμικός Προγραμματισμός (Γ.Π.) στην διοίκηση παραγωγής πραγματεύεται την τοποθέτηση περιορισμένων δραστηριοτήτων μεταξύ ανταγωνιστικών θέσεων κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο. Ο όρος γραμμικός χρησιμοποιείται διότι υπάρχει μόνο γραμμική εξάρτηση σε όλες τις διατυπωμένες σχέσεις του προβλήματος. Η διαμόρφωση του μαθηματικού μοντέλου περιλαμβάνει την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς του προβλήματος.

Ενδεικτικά προβλήματα που αντιμετωπίζονται με Γ.Π. είναι : σχεδιασμός εθνικής οικονομίας, ενεργειακός προγραμματισμός, προγραμματισμός παραγωγής, αποθεμάτων, επενδύσεων, κατανομή προσωπικού σε εργασίες, επιλογή θέσεως εργοστασίων και αποθηκών, μεταφορά εμπορευμάτων από τόπους παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης, καθορισμός ημερησίου διαιτολογίου, κλπ.

Μία σειρά γραμμικών ανισοτήτων ορίζει ένα κυρτό πολύτοπο ως την εφικτή περιοχή του προβλήματος. Ένας τρόπος για να επιλύσουμε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού είναι η αναζήτηση εκείνης της κορυφής του αντίστοιχου πολυτόπου που θα έχει την βέλτιστη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό ακριβώς κάνει και ο αλγόριθμος Simplex. Ξεκινά από μία αρχική κορυφή και κινείται διαμέσου των ακμών του πολυτόπου έως ότου καταλήξει στην κορυφή (διάνυσμα) που αντιστοιχεί στην βέλτιστη λύση του προβλήματος.





Σχήμα 2. 8 Φιλοσοφία αναζήτησης αλγορίθμου SIMPLEX

Ο αλγόριθμος δηλαδή ξεκινάει από μία αρχική κορυφή του πολυτόπου και προχωράει σε μία γειτονική κορυφή εάν και μόνο εάν υπάρχει βελτίωση στην αντικειμενική συνάρτηση. Εάν σε μια κορυφή καμία γειτονική της δεν παρέχει βελτίωση στην αντικειμενική συνάρτηση, τότε αυτή η κορυφή θα είναι και η βέλτιστη λύση.

Δεδομένου δε ότι ο αριθμός των κορυφών ενός πολυτόπου είναι πεπερασμένος, ο αριθμός των βημάτων του αλγορίθμου θα είναι επίσης πεπερασμένος.

Ο αλγόριθμος Simplex θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως συνδυαστικός αλγόριθμος, που ενώ ο αριθμός των επαναλήψεων που θα εκτελέσει είναι στην χειρότερη περίπτωση εκθετικός, στην πράξη λειτουργεί αρκετά γρήγορα, σε πολυωνυμικό δηλαδή χρόνο ως προς τον αριθμό των μεταβλητών και των περιορισμών.

Οι (Klee, Victor; Minty, George J., 1972) απέδειξαν με ένα παράδειγμα πως στην χειρότερη περίπτωση η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου SIMPLEX είναι εκθετική.

Υπάρχουν επίσης και αλγόριθμοι, γνωστοί ως αλγόριθμοι εσωτερικών σημείων, που στην χειρότερη περίπτωση απαιτούν πολυωνυμικό αριθμό πράξεων, υπολογίζοντας λύση σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού μετακινούμενοι στο εσωτερικό του πολυτόπου των περιορισμών.

2.4.3 Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός

Όταν στους περιορισμούς ενός προβλήματος μαθηματικού προγραμματισμού προστίθεται και η απαίτηση κάποιες απ' τις μεταβλητές (ή και όλες) να λαμβάνουν μόνο ακέραιες τιμές τότε αναφερόμαστε σε ένα πρόβλημα Ακεραίου Προγραμματισμού ή Διακριτής Βελτιστοποίησης. Τα προβλήματα αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τα Προβλήματα Καθαρού Ακεραίου προγραμματισμού (Pure Integer Programming Problems), όπου οι μεταβλητές λαμβάνουν μόνο ακέραιες τιμές και τα Προβλήματα Μεικτού Ακεραίου Προγραμματισμού (Μ.Α.Π.), όπου ορισμένες μεταβλητές λαμβάνουν ακέραιες και ορισμένες λαμβάνουν πραγματικές τιμές.

Ένα Πρόβλημα Καθαρού Ακεραίου Προγραμματισμού μπορεί να διατυπωθεί σε γενική μορφή ως εξής:

$\min f(x), x \in S \subseteq \mathbb{R}^n$

με

$S = \{x \mid Ax = b, x \geq 0, x \in \mathbb{Z}^n\}$

Δεδομένου ότι πρόκειται για πρόβλημα γραμμικού ακεραίου προγραμματισμού, η συνάρτηση f είναι γραμμική ήτοι έχει την μορφή:

$f(x) = c^T x.$

Στρογγυλοποιώντας την βέλτιστη λύση x_0 του αντίστοιχου γραμμικού προβλήματος σε μια γειτονική ακέραιη τιμή, δεν μπορούμε γενικά να θεωρήσουμε ότι θα προκύψει η βέλτιστη ή σχεδόν βέλτιστη λύση του ακέραιου προβλήματος. Ειδικότερα, πρέπει να λάβουμε υπόψιν ότι η μέθοδος αυτή:

α) δεν εξασφαλίζει ότι η προκύπτουσα ακέραια λύση είναι εφικτή λύση του προβλήματος,

β) σε πολλά ακέραια προβλήματα υπάρχουν 0-1 μεταβλητές, και στην περίπτωση αυτή η στρογγυλοποίηση στο κοντινότερο ακέραιο διάνυσμα δεν έχει νόημα προσέγγισης μικρού σφάλματος και

γ) μπορεί να υπάρχουν μέχρι και 2^n γειτονικά ακέραια σημεία, οπότε δεν είναι σαφές ποιο από αυτά αποτελεί την καλύτερη επιλογή στρογγυλοποίησης του *x.* Πολλά από αυτά τα 2^n σημεία μπορεί να μην είναι εφικτές λύσεις του προβλήματος και η εύρεση ενός γειτονικού ακέραιου σημείου του *x* που να αποτελεί και εφικτή λύση είναι από μόνη της ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα όταν το n είναι μεγάλο. Ακόμη και αν ένα γειτονικό του *x* σημείο με ακέραιες συντεταγμένες βρεθεί, μπορεί να απέχει πολύ από την βέλτιστη ακέραια λύση του προβλήματος, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Κατά συνέπεια η στρογγυλοποίηση της λύσης του αντίστοιχου γραμμικού προβλήματος δεν αποτελεί αποτελεσματική προσέγγιση στην πλειοψηφία των περιπτώσεων (Murty, 1976).

2.4.3.1 Μέθοδοι απαρίθμησης

Οι διάφορες μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων ακεραίου προγραμματισμού με απαρίθμηση εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι σε ένα φραγμένο ακέραιο πρόβλημα το σύνολο των συνδυασμών τιμών των ακέραιων μεταβλητών είναι πεπερασμένο.

Εάν ο συνολικός αριθμός των ενδεχόμενων λύσεων του προβλήματος είναι μικρός θα μπορούσε κανείς να υπολογίσει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την κάθε μία ξεχωριστά και να διαλέξει την βέλτιστη λύση συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ τους. Αυτή η προσέγγιση λέγεται ολική ή εξαντλητική απαρίθμηση (total or exhaustive enumeration). Στα πολλά πρακτικά προβλήματα η εξαντλητική απαρίθμηση μπορεί να κρίνεται αναποτελεσματική, ως προς τον παράγοντα του υπολογιστικού φόρτου και χρόνου, καθώς ο αριθμός των εφικτών λύσεων που πρέπει να ελεγχθούν συχνά αποδεικνύεται απαγορευτικά μεγάλος.

2.4.3.2 Εξαντλητικός έλεγχος

Είναι μία μέθοδος που ενδείκνυται μόνο για πολύ μικρά προβλήματα, αφού μερικές φορές είναι γρηγορότερη και μπορούν να αποδείξουν την βελτιστοποίηση, ενώ για μεγάλα προβλήματα δεν είναι πρακτική. Οι δύο τεχνικές που ακολουθούνται είναι της οπισθοδρόμησης (*backtracking)* και του εμπρόσθιου ελέγχου (*forward checking).*

- *Backtracking (Οπισθοδρόμηση).*

Είναι η απλούστερη τεχνική. Στην οπισθοδρόμηση, ανατίθεται μια τιμή στην τωρινή μεταβλητή από το πεδίο της. Η ανάθεση τότε ελέγχεται σε σχέση με την τωρινή μερική λύση: εάν οποιοσδήποτε περιορισμός ανάμεσα στις μεταβλητές και τις

παρελθοντικές μεταβλητές παραβιασθεί, η ανάθεση εγκαταλείπεται και μια άλλη τιμή για την τωρινή μεταβλητή επιλέγεται. Εάν όλες οι τιμές για την τωρινή μεταβλητή έχουν δοκιμασθεί, ο αλγόριθμος οπισθοανιχνεύει στην προηγούμενη μεταβλητή και της αναθέτει μια νέα τιμή. Εάν μια πλήρης λύση βρεθεί, δηλαδή μια τιμή έχει ανατεθεί σε κάθε μεταβλητή, ο αλγόριθμος τερματίζεται εάν μόνο μια λύση απαιτείται, η συνεχίζει για να βρει νέες λύσεις. Εάν δεν υπάρχουν λύσεις, ο αλγόριθμος τερματίζει όταν όλες οι περιπτώσεις έχουν ληφθεί υπόψη.

- *Εμπρόσθιος Έλεγχος (Forward checking)*

Ο οπισθοανιχνευτικός αλγόριθμος ελέγχει μόνο τους περιορισμούς ανάμεσα στην τωρινή μεταβλητή και τις παρελθοντικές μεταβλητές. Από την άλλη πλευρά, ο εμπρόσθιος έλεγχος είναι προς τα εμπρός αλγόριθμος ο οποίος ελέγχει τους περιορισμούς ανάμεσα στην τωρινή, τις παρελθοντικές μεταβλητές και τις μελλοντικές μεταβλητές. Στον αλγόριθμο εμπρόσθιου ελέγχου, όταν μια τιμή έχει ανατεθεί στην τωρινή μεταβλητή, οποιαδήποτε τιμή στο πεδίο μιας μελλοντικής μεταβλητής η οποία έρχεται σε αντίθεση με αυτή την ανάθεση (προσωρινά) απομακρύνεται από το πεδίο. Το πλεονέκτημα αυτού είναι ότι εάν το πεδίο μιας μελλοντικής μεταβλητής αδειάσει, τότε είναι αμέσως γνωστό ότι η τωρινή μερική λύση είναι ασταθής, και όπως πριν, είτε δοκιμάζεται άλλη τιμή για την τωρινή μεταβλητή είτε ο αλγόριθμος οπισθοανιχνεύει στην προηγούμενη μεταβλητή: η κατάσταση των πεδίων των μελλοντικών μεταβλητών, όπως ήταν πριν από την ανάθεση η οποία οδήγησε σε αποτυχία, αποκαθιστάται. Με απλή οπισθοανίχνευση, αυτή η αποτυχία δεν θα είχε ανιχνευθεί έως ότου η μελλοντική μεταβλητή είχε ληφθεί υπόψη, και τότε θα είχε διαπιστωθεί ότι καμία από τις τιμές δεν είναι σταθερή με την τωρινή μερική λύση. Ο εμπρόσθιος έλεγχος, για αυτό, επιτρέπει παρακλάδια του δένδρου ανίχνευσης το οποίο θα οδηγήσει σε αποτυχία να εμφανιστεί νωρίτερα από ότι με απλή οπισθοανίχνευση. Σημειώνεται ότι όποτε μια νέα μεταβλητή εξετάζεται, όλες οι εναπομένουσες τιμές είναι εγγυημένα ότι είναι ευσταθείς με τις προηγούμενες αναθέσεις, έτσι ώστε ο έλεγχος μιας ανάθεσης για συνέπεια με την τωρινή μερική λύση δεν είναι πλέον απαραίτητη. Ο εμπρόσθιος έλεγχος κάνει περισσότερη εργασία από την απλή οπισθοανίχνευση όταν κάθε ανάθεση προστίθεται στην τωρινή μερική λύση, με σκοπό να μειώσει το μέγεθος του δένδρου ανίχνευσης και τελικά να μειώσει την συνολική εργασία που έγινε.

2.4.3.3 Μέθοδος Περιορισμού και Διακλάδωσης

Η μέθοδος Περιορισμού και Διακλάδωσης (Branch and Bound) είναι ένας αλγόριθμος αναζήτησης της βέλτιστης λύσης με υλοποίηση μιας μερικής απαρίθμησης (partial enumeration). Κατά την υλοποίηση της μεθόδου, το σύνολο των εφικτών λύσεων

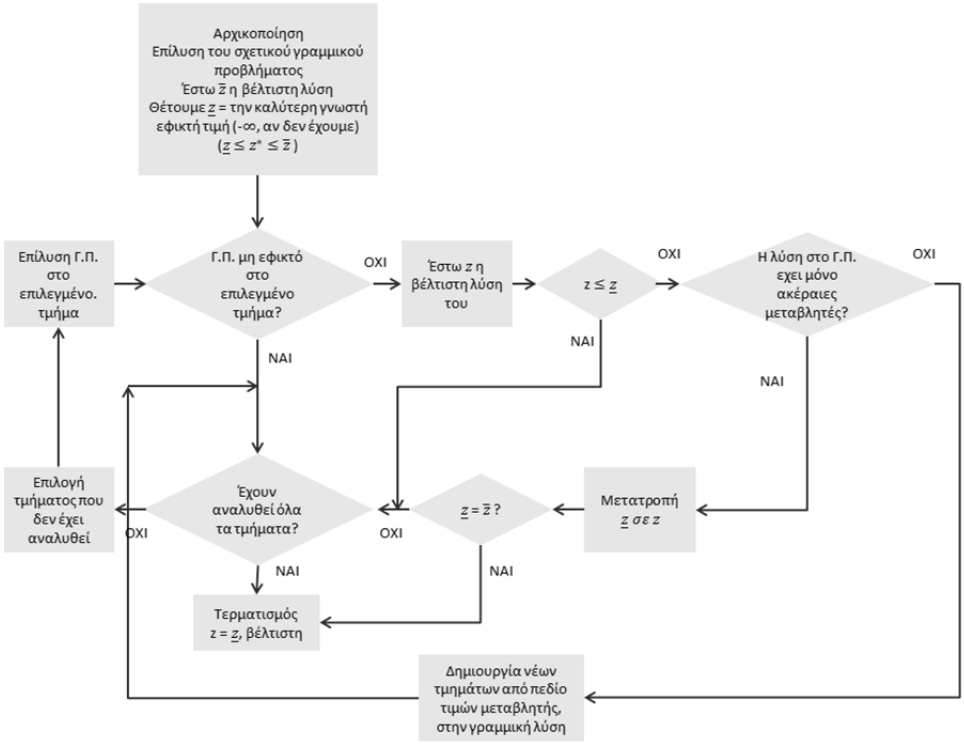
χωρίζεται σε επιμέρους υποσύνολα. Σε κάθε στάδιο του αλγορίθμου, επιχειρείται να βρεθεί η καλύτερη λύση που περιλαμβάνεται σε ένα επιλεγμένο υποσύνολο. Εάν βρεθεί τότε το υποσύνολο λέγεται πως είναι αξιολογημένο. Εάν δεν βρεθεί, τότε το υποσύνολο χωρίζεται εκ νέου σε απλούστερα υποσύνολα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Η εκτέλεση της διαδικασίας Περιορισμού και Διακλάδωσης υποστηρίζεται από τον υπολογισμό είτε της βέλτιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης είτε ενός φράγματος αυτής (άνω φράγματος για την περίπτωση της μεγιστοποίησης και κάτω φράγματος για προβλήματα ελαχιστοποίησης) σε κάθε υποσύνολο που προέκυψε από τον διαμερισμό. Ο υπολογισμός αυτός καθίσταται δυνατός με την επίλυση μίας χαλαρωμένης εκδοχής του αρχικού προβλήματος. Τα φράγματα βοηθούν στην επιλογή των πλέον κατάλληλων και με καλύτερες προοπτικές υποσυνόλων για την εκτέλεση του αλγορίθμου και για την απόρριψη αναζήτησης σε υποσύνολα που λόγω της τιμής του φράγματος που τα χαρακτηρίζει, αποκλείεται να περιλαμβάνουν την βέλτιστη λύση του προβλήματος. Η διαδικασία περιγράφεται ως ακολούθως (Ζλατάνης, 2007):

Κάθε ένα από τα υποσύνολα S_i, όπως αυτά προέκυψαν από τον διαχωρισμό της εφικτής περιοχής S του αρχικού προβλήματος, συνδέεται με ένα υποπρόβλημα, έστω P_i, που προκύπτει από το αρχικό πρόβλημα P, με τον επιπλέον περιορισμό η λύση του να ανήκει στο S. Για ένα πρόβλημα P_i έστω z_i^L ένα κάτω φράγμα της ελάχιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης στο S_i. Έστω L η λίστα των υποψήφιων προς εξέταση προβλημάτων (ή αλλιώς ενεργών κόμβων του προβλήματος). Τέλος έστω z^U ένα άνω φράγμα της ελάχιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του αρχικού προβλήματος. Ο αλγόριθμος Περιορισμού και Διακλάδωσης θα μπορούσε να διατυπωθεί ως εξής:

1. Αρχικοποίηση:
   $L = \{P_0\}$, $K_U = \infty$, $x' = \emptyset$
2. Τερματισμός:
   Εάν $L = \emptyset$ τότε η x'^* είναι μια βέλτιστη λύση στο αρχικό πρόβλημα. Διαφορετικά μετάβαση στο βήμα 3.
3. Επιλογή:
   Επιλογή και διαγραφή από την L ενός προβλήματος P_i.
4. Διαχωρισμός:
   Διαχωρισμός της S_i σε k περιοχές $S_{i1}, S_{i2}, \ldots, S_{ik}$, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί ένα υποπρόβλημα P_{ij}
5. Αξιολόγηση:

Για κάθε *j* =1, 2,..., *k,* επίλυση μίας χαλαρωμένης εκδοχής του P_{ij} και υπολογισμός της βέλτιστης λύσης x_{ij} και της αντίστοιχης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης Z_{ij}^{L}. Εάν $Z_{ij}^{L} \leq Z^{U,}$ τότε διαγραφή του προβλήματος. Διαφορετικά, εάν $x_{ij} \in S$ τότε $x' \leftarrow x_{ij}$, $Z^{U} \leftarrow Z_{ij}^{L}$ και διαγραφή από την *L* κάθε προβλήματος P_l με $Z_l^{L} \geq Z^{U}$, ενώ εάν $x_{ij} \notin S$ προσθήκη του S_{ij} στην *L*. Μετάβαση στο βήμα 2.



Σχήμα 2. 9 Διάγραμμα ροής μεθόδου Branch & Bound

Προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος Περιορισμού και Διακλάδωσης (Branch and Bound) πρέπει να καθοριστούν:

- Μια στρατηγική υπολογισμού κάτω φράγματος (lower bounding strategy)
- Μια στρατηγική διακλάδωσης ή επιλογής μεταβλητής (branching strategy ή variable selection strategy)
- Μια στρατηγική αναζήτησης ή επιλογής προβλήματος (search strategy ή problem selection strategy)

2.4.4 Δυναμικός Προγραμματισμός

Ο όρος «Δυναμικός Προγραμματισμός» χρησιμοποιήθηκε από τον Αμερικανό μαθηματικό Bellman. Είναι μια 'μαθηματική τεχνική' που παρέχει μια συστηματική προσέγγιση για τον προσδιορισμό των ενδιάμεσων αποφάσεων που βελτιστοποιούν τη λειτουργία του συστήματος με βάση κάποιο επιλεγμένο κριτήριο που είναι η συνάρτηση κόστους ή η αντικειμενική συνάρτηση. Διαμορφώθηκε σαν μια τεχνική

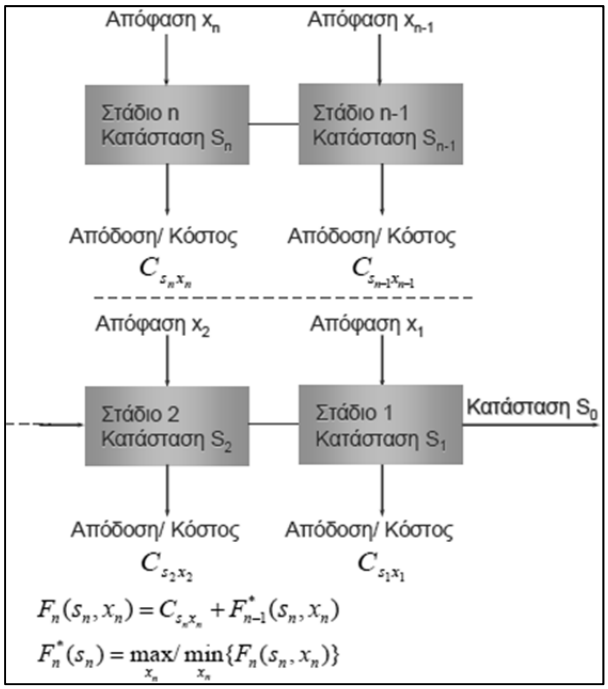
επιλύσεως προβλημάτων, στα οποία χρειάζεται να πάρουμε μια σειρά αποφάσεων και η κάθε απόφαση επηρεάζει τις επόμενες της και που όλες μαζί θέλουμε να δημιουργούν ένα βέλτιστο αποτέλεσμα. Εφαρμόζεται για: προγραμματισμό επενδύσεων, προβλήματα διαχείρισης αποθεμάτων, προβλήματα χρονοπρογραμματισμού, προβλήματα κατανομής, προβλήματα βέλτιστης διαδρομής, αντικατάστασης – συντήρησης εξοπλισμού.

Την κεντρική ιδέα της μεθόδου αποτελεί η αρχή του βέλτιστου (principle of optimality) σύμφωνα με την οποία σε ένα πρόβλημα λήψης διαδοχικών αποφάσεων, η βέλτιστη ακολουθία αποφάσεων πρέπει να περιέχει μόνον βέλτιστες υποακολουθίες αποφάσεων. Συγκεκριμένα, η βέλτιστη στρατηγική λήψης N διαδοχικών αποφάσεων είναι τέτοια ώστε, για κάθε αρχική απόφαση και κάθε αρχικό σύνολο επιτρεπτών αποφάσεων, οι επόμενες αποφάσεις να συνιστούν μία βέλτιστη ακολουθία N – 1 αποφάσεων για ένα νέο πρόβλημα παρόμοιο με (αλλά μικρότερο από) το αρχικό.

Το πρόβλημα χωρίζεται σε διαδοχικά στάδια και για κάθε στάδιο απαιτείται η λήψη μιας απόφασης. Με τιμές μιας μεταβλητής ή ενός διανύσματος καθορίζονται οι διάφορες καταστάσεις που υπάρχουν σε κάθε στάδιο. Η απόφαση που λαμβάνεται σε κάθε στάδιο έχει αποτέλεσμα τη ‘μεταφορά’ του συστήματος από την παρούσα κατάσταση σε μια άλλη που συνδέεται με το επόμενο στάδιο. Η πολιτική που ακολουθείται για τα επόμενα στάδια είναι ανεξάρτητη από αυτή που ακολουθήθηκε στα προηγούμενα.

Συνήθως γνωρίζουμε ή μπορούμε να καθορίσουμε την τελική κατάσταση της διαδικασίας που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε και για το λόγο αυτό η αρίθμηση των σταδίων της διαδικασίας γίνεται κατά την αντίστροφη φορά, δηλαδή από το τέλος προς την αρχή. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που μπορούμε να εφαρμόσουμε τη μέθοδο ξεκινώντας από την αρχή (π.χ. στο πρόβλημα προσδιορισμού ελαχίστου χρόνου διαδρομής).

Επισημαίνεται ότι η επίλυση των υπο-προβλημάτων κατά στάδια επιφέρει σημαντικό υπολογιστικό κόστος, που θεωρείται όμως αρκετά μικρότερο από το αντίστοιχο κόστος που θα επέφεραν οι εξαντλητικές μέθοδοι πλήρους απαρίθμησης. Σε κάθε περίπτωση, όμως, δεν συνίσταται ο δυναμικός προγραμματισμός για μεσαίας ή μεγάλης διάστασης προβλήματα εκτός αν δεν είναι εφικτό δυνατή η επίλυσή τους με άλλες μεθόδους Μαθηματικού Προγραμματισμού (Γραμμικού ή Ακέραιου Προγραμματισμού).



Σχήμα 2. 10 Απεικόνιση Σταδιακής Διαδικασίας Λήψης Αποφάσεων – Δυναμικός Προγραμματισμός

Πηγή: (Ψαρράς, Συστήματα Αποφάσεων - Σημειώσεις Μαθήματος, 2010)

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου συνοψίζονται ως ακολούθως (Δατσέρης, 2007):

- Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις και κατηγορίες ακόμα και δύσκολων μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ακόμα και σε προβλήματα στοχαστικού βέλτιστου ελέγχου.
- Καταλήγει σε βέλτιστο έλεγχο κλειστού βρόχου. Δυνατότητα off-line υπολογισμών.
- Εγγυάται για το ολικό ελάχιστο.
- Μειωμένο υπολογιστικό κόστος σε σχέση με αυτό της μεθόδου άμεσης απαρίθμησης.

Όμως, παρουσιάζει τα μειονεκτήματα ως προς τον παράγοντα της διαστατικότητας, των υπολογιστικών απαιτήσεων ακόμα και για μικρής τάξεως προβλήματα, αλλά και της πιθανότητας -κατά περίπτωση- μη εύρεσης αναλυτικής λύσης.

2.4.5 Βελτιστοποίηση με Αποικίες Μυρμηγκιών

Ο Dorigo και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν έναν καινοτόμο αλγόριθμο (Dorigo, Maniezzo, & Colorni, 1991), (M. Dorigo, 1996) βασισμένο στον τρόπο έμμεσης επικοινωνίας των μυρμηγκιών κατά την αναζήτηση και συλλογή τροφής μέσω της

φερομόνης, μιας χημικής ουσίας την οποία εκλύουν τα ζώα και τα έντομα για να επικοινωνήσουν με τα άλλα μέλη του είδους τους.

Τα μυρμήγκια κατά την αναζήτηση και συγκομιδή τροφής αφήνουν φερομόνη στο πέρασμά τους. Η φερομόνη αυτή ανιχνεύεται από τα υπόλοιπα μυρμήγκια της αποικίας τους τα οποία αποφασίζουν με κάποια πιθανότητα αν θα ακολουθήσουν το ίχνος αυτό. Η ιδιότητα αυτή των μυρμηγκιών, στην εύρεση της συντομότερης διαδρομής μεταξύ της φωλιάς τους και της τοποθεσίας της τροφής.

Ο αλγόριθμος βασίζεται στο υπολογιστικό ανάλογο της παραπάνω διαδικασίας και επιλύει διακριτά προβλήματα (με πρώτη και συνηθέστερη εφαρμογή το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή) με πάρα πολύ καλά αποτελέσματα οπότε και δημιουργήθηκε μια σειρά βελτιωμένων εκδοχών του που βρίσκουν πολλαπλές εφαρμογές σε πληθώρα θεωρητικών και τεχνικών προβλημάτων όπως (Dorigo, Caro, & Gambardella, Ant algorithms for discrete optimization, 1999), (Bonabeau, Dorigo, & Theraulaz, 1999):

- Το Πρόβλημα Προγραμματισμού Εργασιών (Job-Shop Scheduling Problem – JSP)
- Το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή (Traveling Salesman Problem – TSP)
- Το Πρόβλημα της Τετραγωνικής Ανάθεσης (Quadratic Assignment Problem – QAP)

2.4.6 Αναζήτηση βάσει Απαγορευμένων κινήσεων

Η αναζήτηση βάσει απαγορευμένων κινήσεων (Tabu Search) είναι μία επαναληπτική διαδικασία για την επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων. Προτάθηκε από τον Glover αρχικά το 1986 (Glover F. , 1986), στην συνέχεια τυποποιήθηκε το 1989-1990 (Glover F. , 1989), (Glover F. , 1990) και χρησιμοποιείται ευρέως από τότε. Εφαρμόζεται επιτυχώς για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως προγραμματισμός, δρομολόγηση, το πρόβλημα του πλανοδίου πωλητή που ταξιδεύει και της βελτιστοποίησης σχεδιασμού.

Ανήκει στους αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης που λαμβάνοντας μία υποψήφια λύση ενός προβλήματος εξετάζουν τις γειτονικές/κοντινές σε αυτή λύσεις στην προσπάθεια βελτιστοποίησής της. Η βασική ιδέα είναι να ερευνηθεί το πεδίο αναζήτησης των εφικτών λύσεων μέσα από μία διαδοχή ‘μετακινήσεων’. Η αναζήτηση tabu τροφοδοτείται αρχικά με μία εφικτή λύση που είτε υπολογίστηκε τυχαία είτε με κάποια άλλη τεχνική. Ορίζεται μία συνάρτηση που παράγει γειτονικές λύσεις και μία συνάρτηση που υπολογίζει το κόστος της κάθε λύσης, το πόσο καλή ή κακή είναι. Η αναζήτηση tabu αρχίζει να «επισκέπτεται» και να εξετάζει ένα υποσύνολο των γειτονικών λύσεων. Η λύση που ανήκει στο υποσύνολο αυτό και που έχει το καλύτερο

κόστος γίνεται η νέα αποδεκτή λύση ανεξάρτητα βέβαια από το εάν το σκορ αυτό είναι καλύτερο ή χειρότερο από την αρχική λύση.

Για την αποφυγή τοπικών βέλτιστων λύσεων και εγκλωβισμού, μερικές μετακινήσεις ορίζονται ως απαγορευμένες ή tabu (taboo). Η μέθοδος χρησιμοποιεί δομές μνήμης που περιγράφουν τις λύσεις που έχει ήδη εξετάσει ο αλγόριθμος ή που ικανοποιούν κανόνες που έχει θέσει ο χρήστης.

Αυτές οι δομές μνήμης ονομάζονται απαγορευμένη λίστα (tabu list) και είναι ουσιαστικά ένα σύνολο κανόνων και απαγορευμένων λύσεων που καθορίζουν τις λύσεις που θα αποτελέσουν τη νέα γειτονιά μέσα στην οποία ο αλγόριθμος αναζητά τη νέα λύση. Στην απλούστερή της μορφή η απαγορευμένη λίστα είναι απλά οι λύσεις που έχει ήδη επισκεφθεί στο παρελθόν ο αλγόριθμος. Γενικά, η απαγορευμένη λίστα αναλόγως με τα κριτήριά της και το πώς λειτουργεί κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες:

- Βραχυπρόθεσμη: Στην απαγορευμένη λίστα αποθηκεύεται συγκεκριμένος αριθμός πρόσφατων λύσεων και θεωρούνται απαγορευμένες
- Μεσοπρόθεσμη: Υπάρχουν κάποιοι κανόνες που τείνουν να οδηγήσουν τον αλγόριθμο προς πολλά υποσχόμενες περιοχές λύσεων
- Μακροπρόθεσμη: Υπάρχουν κανόνες που τείνουν να οδηγήσουν τον αλγόριθμο προς ποικίλες λύσεις μεταξύ τους.

Συνήθως, χρησιμοποιείται μία ουρά στην οποία τοποθετούνται λύσεις που επισκέπτεται ο αλγόριθμος και με κάθε νέα λύση που μπαίνει αφαιρείται η παλαιότερη (βραχυπρόθεσμη) λύση. Αυτή η προσέγγιση επαρκεί για να βρούμε μία τοπικά βέλτιστη λύση καλύτερη απ’ ότι με άλλες τεχνικές τοπικής αναζήτησης, αλλά για επίλυση δυσκολότερων προβλημάτων χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί κι ένας συνδυασμός των άλλων δύο ειδών.

Η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται και σταματά είτε μετά από έναν ορισμένο αριθμό επαναλήψεων είτε όταν τα κόστος της εκάστοτε λύσης αγγίξει ένα συγκεκριμένο όριο.

Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζει η Tabu Search είναι ότι είναι αποδοτική μόνο σε διακριτούς χώρους. Σε συνεχείς χώρους είναι απίθανο να επισκεφτούμε την ίδια τιμή-λύση με αποτέλεσμα η απαγορευμένη λίστα να μην μπορεί να λειτουργήσει όπως πρέπει. Ακόμα όμως και σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να αποκλείουμε ως απαγορευμένες λύσεις που είναι παραπλήσιες με αυτές της απαγορευμένης λίστας.

Επίσης, σε προβλήματα όπου το πεδίο αναζήτησης λύσεων είναι ιδιαίτερα μεγάλο και με πολλές διαστάσεις είναι πολύ εύκολο ο αλγόριθμος αυτός να αναζητά λύσεις μονάχα σε μία μικρή περιοχή του χώρου λύσεων. Για να το αντιμετωπίσουν αυτό, μερικές υλοποιήσεις της αναζήτησης tabu αποθηκεύουν στη απαγορευμένη λίστα όχι λύσεις αλλά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των λύσεων που έχουν ήδη επισκεφτεί. Οι

απαγορευμένες λίστες με γνωρίσματα αντί για ολόκληρες λύσεις είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές σε κάποια προβλήματα αλλά δημιουργούν με τη σειρά τους ένα νέο πρόβλημα. Όταν ένα γνώρισμα (δηλαδή ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό των λύσεων) έχει χαρακτηριστεί απαγορευμένο (tabu), περισσότερες από μία λύση γίνονται tabu με τη σειρά τους. Κάποιες όμως από αυτές τις λύσεις μπορεί να μας έδιναν ιδιαίτερα καλά αποτελέσματα κόστους και τώρα δε θα εξεταστούν καν. Γι αυτό το λόγο ορίζουμε μία συνάρτηση προσδοκίας η οποία για κάθε τιμή κόστους λύσης υπολογίζει την τιμή που ο αλγόριθμος προσδοκά να φτάσει. Με αυτό τον τρόπο ο χαρακτηρισμός tabu παρακάμπτεται εάν η απαγορευμένη λύση μπορεί να μας οδηγήσει σε μία πολύ καλύτερη λύση.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων σχεδιασμού, προγραμματισμού, τηλεπικοινωνιών, λογιστικών, οικονομικής ανάλυσης, βελτιστοποίησης γραφημάτων, διαστημικού σχεδιασμού, διανομής ενέργειας, ταξινόμησης δειγμάτων, ικανοποίησης περιορισμών κλπ

2.4.7 Προσομοίωση Ανόπτησης

Η Προσομοίωση Ανόπτησης (Simulated Annealing) είναι μία μέθοδο που περιγράφηκε ανεξάρτητα από τους Scott Kirkpatrick, C. Daniel Gelatt και Mario P. Vecchi το 1983 (Kirkpatrick, Gelatt Jr, & Vecchi, 1983), και από τον Vlado Černý το 1985 (Černý, 1985). Πρόκειται για μία στοχαστική υπολογιστική τεχνική, που παράγεται από στατιστικούς μηχανισμούς, για την εύρεση σχεδόν βέλτιστων λύσεων σε μεγάλα προβλήματα. Σε πολλές περιπτώσεις, το να βρεθεί η ολικά βέλτιστη τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης υπόκειται σε συγκρουόμενους περιορισμούς, είναι ένα NP-πρόβλημα, αφού η αντικειμενική συνάρτηση τείνει να έχει πολλά τοπικά βέλτιστα. Μια διαδικασία για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων θα εξέταζε το πεδίο έρευνας με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει μεγάλη πιθανότητα εύρεσης της βέλτιστης ή κοντά στη βέλτιστη λύση σε λογικό χρόνο.

Η μέθοδος έχει αναλογία με την θερμοδυναμική, ειδικά με τον τρόπο που τα υγρά παγώνουν και κρυσταλλοποιούνται ή των μετάλλων που ψύχονται. Σε μεγάλες θερμοκρασίες τα μόρια ενός υγρού κινούνται ελεύθερα μεταξύ τους. Αν το υγρό ψύχεται αργά, η θερμική ευκινησία περιορίζεται. Τα άτομα είναι ικανά να δημιουργούν ένα κρύσταλλο που είναι η κατάσταση της ελάχιστης ενέργειας του συστήματος και η οποία ανταποκρίνεται στη βέλτιστη λύση σε ένα μαθηματικό πρόβλημα. Ωστόσο, αν ένα υγρό ψύχεται απότομα, δεν φτάνει την ελάχιστη κατάσταση ενέργειας αλλά κάποια υψηλότερη κατάσταση ενέργειας, που ανταποκρίνεται, μαθηματικά, σε μια βέλτιστη λύση που βρίσκεται από επαναληπτική βελτίωση ή για να χρησιμοποιήσουμε την αναλογία αυτή με τα θερμοδυναμικά

συστήματα για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, έχουμε τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Διαμόρφωση παραμέτρων X = {x_1, x_2,…,x_n} που αναπαριστούν μία λύση.
2. Μια γεννήτρια τυχαίων αλλαγών σε μία διαμόρφωση. Οι αλλαγές αυτές είναι τυπικά λύσεις στην 'γειτονιά' της τρέχουσας διαμόρφωσης. Για παράδειγμα, μια αλλαγή σε μια από τις παραμέτρους x_i.
3. Μια αντικειμενική ή συνάρτηση κόστους *E(X)* (ανάλογη της ενέργειας) της οποίας η ελαχιστοποίηση είναι ο σκοπός της διαδικασίας.
4. Μια παράμετρο ελέγχου *t* (ανάλογη με την θερμοκρασία) και ένα πρόγραμμα (annealing program) που φανερώνει πως η t μειώνεται από τις υψηλές τιμές στις χαμηλές.

Υποθέτουμε ότι ένα θερμοδυναμικό σύστημα αλλάζει την ενεργειακή διαμόρφωσή του από E_{old} σε E_{new} με πιθανότητα prob =$e^{(-\frac{E_{new}-E_{old}}{\mathrm{B\,t}})}$για ορισμένο t και B η σταθερά του Boltzmann. Αν $E_{new} < E_{old}$ τότε η νέα διαμόρφωση έχει χαμηλότερη κατάσταση ενέργειας από την παλαιότερη και καθορίζεται prob = 1 και το σύστημα πάντα δέχεται αυτή την μετακίνηση. Αν $E_{new} > E_{old}$ τότε η νέα διαμόρφωση έχει μεγαλύτερη ενέργεια από την παλιά αλλά μπορεί να γίνει αποδεκτή με πιθανότητα prob (0<prob<1) και έτσι βοηθά το σύστημα να βγει από το τοπικό ελάχιστο. Αυτό το γενικό σχήμα είναι γνωστό Αλγόριθμος Μετρόπολις.

Τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζουμε χρησιμοποιώντας την μέθοδο έχουν να κάνουν με τις γειτονικές λύσεις. Όταν σχεδιάζουμε το πώς θα υπολογίζεται η γειτονική λύση και η συνάρτηση κόστους, πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη ότι μετά από κάποιες επαναλήψεις το κόστος της παρούσας λύσης θα είναι αρκετά μικρότερο (και άρα η λύση θα είναι καλύτερη) από μία άλλη τυχαία λύση με αποτέλεσμα να μην αλλάζει. Επομένως πρέπει κατά την παραγωγή γειτονικών λύσεων να ευνοούμε τις αλλαγές που οδηγούν σε λύσεις με κόστος παρόμοιο με το τωρινό. Με αυτό τον τρόπου αποκλείουμε τις ιδιαίτερα καλές και τις ιδιαίτερα άσχημες λύσεις αλλά δεδομένου ότι οι πολύ καλές είναι πολύ σπανιότερες από τις πολύ κακές, η τεχνική αυτή δίνει καλά αποτελέσματα.

Επίσης, σε περίπτωση που υπάρχουν στο πεδίο λύσεων λύσεις με πολύ χαμηλότερο κόστος από τις γειτονικές τους, είναι πολύ πιθανό (ανάλογο του συνολικού αριθμού λύσεων) ο αλγόριθμος να παγιδευτεί σε αυτές τις χαράδρες κόστους.

Τέλος, το σημαντικότερο ίσως πρόβλημα είναι ότι δεν υπάρχει τρόπος να γνωρίζουμε εάν το αποτέλεσμα που προέκυψε είναι και το καλύτερο.

2.4.8 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (Enew Algorithms) προτάθηκαν από τον Holland αρχικά την δεκαετία του ’60 και αναπτύχθηκαν περαιτέρω από τον ίδιο και τους συνεργάτες του και την δεκαετία του ’70. Στο βιβλίο του το 1975 «Adaptation in Natural and Artificial Systems», ο Holland παρουσίασε την λογική των γενετικών αλγορίθμων.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι μιμούνται τις φυσικές διαδικασίες εξέλιξης και επιλογής. Σε αντίθεση με την αναζήτηση tabu και την προσομοίωση ανόπτησης, δεν είναι αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης αλλά τεχνητής νοημοσύνης που χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε προβλήματα βελτιστοποίησης λύσης και ονομάζονται έτσι γιατί μιμούνται τη διαδικασία της εξέλιξης και της φυσικής επιλογής.

Στους γενετικούς αλγορίθμους ένας πληθυσμός από υποψήφιες λύσεις εξελίσσεται προς καλύτερες λύσεις. Κάθε υποψήφια λύση έχει ένα σύνολο από χαρακτηριστικές ιδιότητες που μπορούν να «εξελιχθούν» και να «μεταλλαχθούν». Το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού έχει σαφώς να κάνει με το είδος του προβλήματος και κάποιες φορές η δημιουργία του μπορεί να μην είναι απολύτως τυχαία αλλά στοχευόμενη προς περιοχές που περιμένουμε ότι θα δώσουν καλά αποτελέσματα.

Στη φύση, τα διάφορα είδη υιοθετούν διάφορες αλλαγές του περιβάλλοντός τους έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουν την πιθανότητα επιβίωσης. Η γνώση αυτή αποθηκεύεται στα χρωμοσώματα τα οποία υφίστανται αλλαγές κατά την αναπαραγωγή. Οι αλλαγές που είναι προς το καλύτερο διατηρούνται ενώ οι άλλες με τον καιρό εξαλείφονται.

Τα βήματα που ακολουθούνται είναι καταρχήν η δημιουργία μιας σειράς από *γονίδια*, που αναπαριστούν μια λύση γνωστή ως *χρωμόσωμα*. Κατόπιν δημιουργείται ένας τυχαίος πληθυσμός χρωμοσωμάτων, και υπολογίζεται η ‘υγεία’ (fitness) του καθενός. Τα πιο υγιή, δηλαδή αυτά που ανταποκρίνονται σε καλύτερες λύσεις, επιλέγονται και δημιουργείται έτσι η επόμενη γενιά, που περιέχει τα καλύτερα χαρακτηριστικά.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι περιέχουν τα ακόλουθα στοιχεία:

(Κωδικοποίηση) Αναπαράσταση Χρωμοσωμάτων

Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από σειρές γονιδίων, τα οποία γονίδια αναπαρίστανται συνήθως με το δυαδικό σύστημα, τους ακέραιους ή τους πραγματικούς αριθμούς.

Αρχικός πληθυσμός

Είναι το σημείο έναρξης του γενετικού αλγορίθμου και δημιουργείται είτε τυχαία είτε ακολουθώντας κάποιους κανόνες. Συνήθως το μέγεθος είναι μεταξύ 15 και 100.

Αξιολόγηση της 'υγείας'

Δημιουργείται μια αντικειμενική συνάρτηση που εκφράζει την καταλληλότητα (υγεία) κάθε χρωμοσώματος. Κατά την διαδικασία του αλγορίθμου αναμένεται η αύξηση της 'υγείας' του καλύτερου χρωμοσώματος, όπως και του πληθυσμού συνολικά.

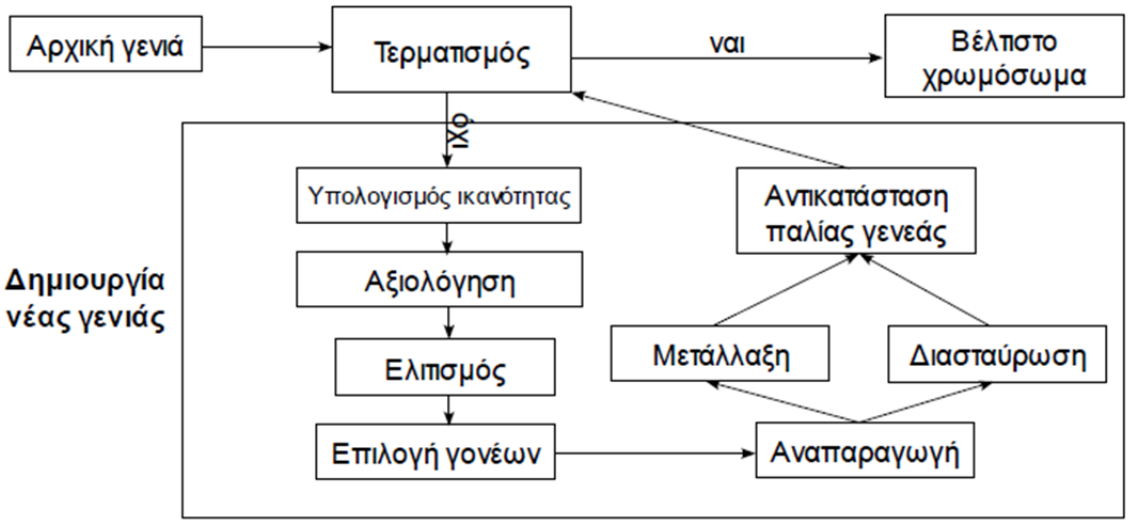
Επιλογή

Επιλέγονται δύο χρωμοσώματα γονείς για αναπαραγωγή, βάσει των τιμών τους, και τα οποία δημιουργούν δύο βλαστούς για το νέο πληθυσμό. Η επιλογή επαναλαμβάνεται μέχρι ο νέος πληθυσμός να έχει το αρχικό μέγεθος π.χ. *2n*. Η πιθανότητα επιλογής ενός χρωμοσώματος x είναι:

(υγεία του x)/(συνολική υγεία του πληθυσμού)

Διασταύρωση (συνδυασμός) και μετάλλαξη

Ο *συνδυασμός* των χρωμοσωμάτων ξεκινά από την στιγμή που αυτά επιλεγούν και η πιθανότητα να παραμείνουν ίδια - χωρίς να υποστούν αλλαγές – πρακτικά είναι μεταξύ 0,15 και 0,35.



Σχήμα 2. 11 Δομή της φιλοσοφίας των γενετικών αλγορίθμων

Πηγή: (Σακελλαρίου, 2007)

Για την αποφυγή του προβλήματος όλα τα χρωμοσώματα του αρχικού πληθυσμού να έχουν την ίδια τιμή (π.χ 0) στην ίδια θέση (οπότε οι βλαστοί θα έχουν την ίδια τιμή στην ίδια θέση), χρησιμοποιείται η *μετάλλαξη*. Κατά την μετάλλαξη συμβαίνει τυχαία αλλαγή μεταξύ των γόνων (π.χ το 0 σε 1 και αντίθετα). Πρόκειται όμως για γεγονός που συμβαίνει σπάνια (π.χ 1 bit στα 1000). Κάθε bit του χρωμοσώματος ελέγχεται για πιθανή μετάλλαξη με το να δημιουργήσει ένα τυχαίο αριθμό μεταξύ 0 και 1 και αν αυτός είναι μικρότερος ή ίσος με την πιθανότητα μετάλλαξης τότε η τιμή του bit αλλάζει.

Η διαδικασία τερματίζεται όταν ικανοποιηθούν συνθήκες που έχουν καθοριστεί για τον σκοπό αυτό. Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένες συνθήκες περάτωσης της διαδικασίας που χρησιμοποιούνται συχνά.

- Εύρεση λύσης που ικανοποιεί ορισμένο επίπεδο υγείας (κόστους/κέρδους)
- Υπέρβαση μέγιστου πλήθους σταδίων (γενεών)
- Υπέρβαση μέγιστου αποδεκτού χρόνου υπολογισμού
- Η μεταβολή από γενιά σε γενιά είναι συστηματικά μικρότερη του καθορισμένου περιθωρίου, οπότε κρίνεται ότι η περαιτέρω διερεύνηση του χώρου αναζήτησης δεν θα επιφέρει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι παρόλο που είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού, παρουσιάζουν μια σειρά από μειονεκτήματα τα οποία αξίζει να επισημανθούν

- Ο υπολογισμός της υγείας της κάθε γενιάς λύσεων είναι αρκετά χρονοβόρος και ενεργοβόρος υπολογιστικά διαδικασία, γεγονός που γίνεται έντονο σε πολυδιάστατα, δύσκολα και μεγάλης κλίμακας προβλήματα.
- Σε περιπτώσεις προβλημάτων που είναι μεγάλο το πλήθος των γονιδίων (χαρακτηριστικών) που μπορούν να διασταυρωθούν και να μεταλλαχθούν στα χρωμοσώματα (λύσεις), το εύρος του πεδίου αναζήτησης είναι ιδιαίτερα μεγάλο και ο αλγόριθμος συχνά περιορίζεται σε τμήματα του εύρους λύσεων.
- Μη γνωρίζοντας πώς να «θυσιάσει» καλύτερες λύσεις και να χρησιμοποιήσει χειρότερες λύσεις για να προωθηθεί προς μία καλύτερη κατεύθυνση, τείνει να καταλήξει σε τοπικά καλύτερες λύσεις.
- Η διαδικασία δεν εγγυάται ότι η προκύπτουσα λύση είναι η βέλτιστη, απλά ότι είναι η καλύτερη από όσες έχουν διερευνηθεί μέχρι το στάδιο τερματισμού.

Ο Α. Μπότσικας στην διατριβή του (Μπότσικας, 2009) παρουσιάζει αναλυτικά τον τρόπο αξιοποίησης των γενετικών αλγορίθμων σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, ενώ προτείνει πολύ ενδιαφέρουσα μέθοδο γενετικών αλγορίθμων σε πολυκριτηριακό πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού εργασιών.

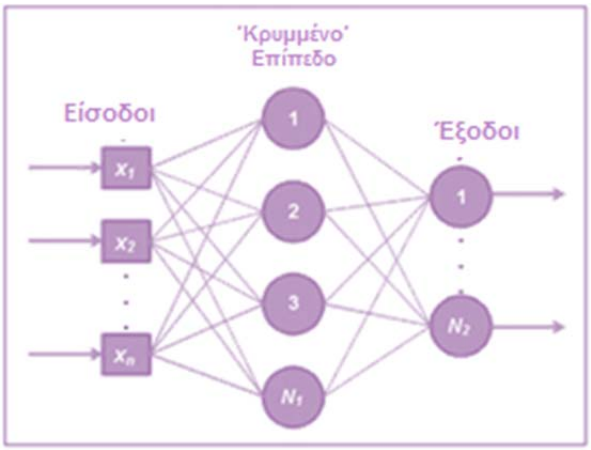
2.4.9 Νευρωνικά δίκτυα

Το νευρωνικό δίκτυο (Neural Network) είναι ένα δίκτυο από απλούς υπολογιστικούς κόμβους (νευρώνες), διασυνδεδεμένους μεταξύ τους. Είναι εμπνευσμένο από το Κεντρικό Νευρικό Σύστημα (ΚΝΣ), το οποίο προσπαθεί να προσομοιώσει.

Οι νευρώνες είναι τα δομικά στοιχεία του δικτύου. Κάθε τέτοιος κόμβος δέχεται ένα σύνολο αριθμητικών εισόδων από διαφορετικές πηγές (είτε από άλλους νευρώνες,

είτε από το περιβάλλον), εκτελεί έναν υπολογισμό με βάση αυτές τις εισόδους και παράγει μία έξοδο. Η εν λόγω έξοδος είτε κατευθύνεται στο περιβάλλον, είτε τροφοδοτείται ως είσοδος σε άλλους νευρώνες του δικτύου. Υπάρχουν τρεις τύποι νευρώνων: οι νευρώνες εισόδου, οι νευρώνες εξόδου και οι υπολογιστικοί νευρώνες ή κρυμμένοι νευρώνες. Οι νευρώνες εισόδου δεν εκτελούν κανέναν υπολογισμό, μεσολαβούν απλώς ανάμεσα στις περιβαλλοντικές εισόδους του δικτύου και στους υπολογιστικούς νευρώνες. Οι νευρώνες εξόδου διοχετεύουν στο περιβάλλον τις τελικές αριθμητικές εξόδους του δικτύου. Οι υπολογιστικοί νευρώνες πολλαπλασιάζουν κάθε είσοδό τους με το αντίστοιχο βάρος και υπολογίζουν το ολικό άθροισμα των γινομένων. Το άθροισμα αυτό τροφοδοτείται ως όρισμα στη συνάρτηση ενεργοποίησης, την οποία υλοποιεί εσωτερικά κάθε κόμβος. Η τιμή που λαμβάνει η συνάρτηση για το εν λόγω όρισμα είναι και η έξοδος του νευρώνα για τις τρέχουσες εισόδους και βάρη.

Στον ν-οστό νευρώνα υπάρχει ένα συναπτικό βάρος με ιδιαίτερη σημασία, το οποίο καλείται πόλωση ή κατώφλι (bias, threshold). Η τιμή της εισόδου του είναι πάντα η μονάδα. Εάν το συνολικό άθροισμα από τις υπόλοιπες εισόδους του νευρώνα είναι μεγαλύτερο από την τιμή αυτή, τότε ο νευρώνας ενεργοποιείται. Εάν είναι μικρότερο, τότε ο νευρώνας παραμένει ανενεργός. Η ιδέα προέκυψε από τα βιολογικά νευρικά κύτταρα.



Σχήμα 2. 12 Απεικόνιση της λογικής των νευρωνικών δικτύων

Όπως είναι φανερό, οι αριθμοί οι οποίοι συναποτελούν το διάνυσμα εισόδου (κάθε στοιχείο του διανύσματος τροφοδοτείται κατά τη λειτουργία του δικτύου σε έναν νευρώνα εισόδου), αλλά και οι αριθμοί οι οποίοι συναποτελούν το διάνυσμα εξόδου (κάθε στοιχείο του οποίου εμφανίζεται, μετά το πέρας του ολικού υπολογισμού, σε έναν νευρώνα εξόδου), περιγράφουν χαρακτηριστικά του προς επίλυση προβλήματος. Συνήθως αυτό που μας ενδιαφέρει είναι το δίκτυο να απεικονίζει με ορθό τρόπο διανύσματα εισόδου σε κατάλληλα διανύσματα εξόδου, το πρόβλημα δηλαδή είναι η υλοποίηση μίας συνάρτησης πολλαπλών μεταβλητών, κατά κανόνα

περίπλοκης και με άγνωστο ακριβή τύπο. Τέτοιες απεικονίσεις έχουν εφαρμογή σε ποικιλία τομέων της επιστήμης και της τεχνολογίας, αφού λειτουργούν ως αριθμητικά μοντέλα για πολλά διαφορετικά ζητήματα. Το ίδιο δίκτυο μπορεί να υλοποιήσει άπειρες διαφορετικές απεικονίσεις, μία για κάθε διαφορετική επιλογή συνόλου συναπτικών βαρών.

Το κύριο χαρακτηριστικό των νευρωνικών δικτύων είναι η εγγενής ικανότητα μάθησης. Η μάθηση επιτυγχάνεται μέσω της εκπαίδευσης, μίας επαναληπτικής διαδικασίας σταδιακής προσαρμογής των παραμέτρων του δικτύου (συνήθως των βαρών και της πόλωσής του) σε τιμές κατάλληλες ώστε να επιλύεται με επαρκή επιτυχία το προς εξέταση πρόβλημα. Αφού ένα δίκτυο εκπαιδευτεί, οι παράμετροί του συνήθως «παγώνουν» στις κατάλληλες τιμές και από εκεί κι έπειτα είναι σε λειτουργική κατάσταση. Το ζητούμενο είναι το λειτουργικό δίκτυο να χαρακτηρίζεται από μία ικανότητα γενίκευσης: αυτό σημαίνει πως δίνει ορθές εξόδους για εισόδους καινοφανείς και διαφορετικές από αυτές με τις οποίες εκπαιδεύτηκε.

Τα νευρωνικά δίκτυα είναι πολύ εξελιγμένες τεχνικές μη γραμμικής μοντελοποίησης, ικανές να μοντελοποιήσουν εξαιρετικά πολύπλοκες λειτουργίες. Η γραμμική μοντελοποίηση υπήρξε ευρέως διαδεδομένη για πολύ καιρό, δεδομένου ότι στα γραμμικά μοντέλα εφαρμόζονται πολύ γνωστές στρατηγικές βελτιστοποίησης. Στις συνήθεις, όμως, περιπτώσεις όπου η γραμμική προσέγγιση δεν ήταν έγκυρη, τα μοντέλα αυτά αποτύγχαναν αναλόγως. Τα νευρωνικά δίκτυα βέβαια, αν και επιτρέπουν τη μη γραμμικότητα μέσω χρήσης μη γραμμικών συναρτήσεων ενεργοποίησης, μεταθέτουν με τη σειρά τους το πρόβλημα στο ζήτημα της διάστασης (του πλήθους των διαφορετικών εισόδων και εξόδων), το οποίο αποτελεί αγκάθι στις προσπάθειες μοντελοποίησης μη γραμμικών συναρτήσεων με μεγάλο αριθμό μεταβλητών.

Η προσέγγιση των νευρωνικών δικτύων έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την επίλυση πολλών συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Τέλος, αξιοσημείωτη είναι η ολοκληρωμένη επισκόπηση της εφαρμογής των νευρωνικών δικτύων σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού που πραγματοποιήθηκε από τον Sabuncuoglu ο οποίος παραθέτει στο τέλος της εργασίας του μια σειρά από κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα (Sabuncuoglu, 1998).

2.5 Το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού εργασιών παραγωγής σε Just-In-Time Γραμμές Συναρμολόγησης Μεικτού Μοντέλου

2.5.1 Γενικά

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής επικεντρωνόμαστε στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και στον τρόπο αντιμετώπισής τους για προβλήματα που αφορούν Just-In-Time Γραμμές Συναρμολόγησης, μικτού μοντέλου προϊόντων. Η ιδέα του Just-In-Time (JIT), που χρησιμοποιείται στην παραγωγική διαδικασία και στοχεύει στη βελτίωση της παραγωγικότητας και μείωση του κόστους, έχει υιοθετηθεί ευρέως στη βιομηχανία, για την κατασκευή μεγάλης ποικιλίας προϊόντων. Ένα πρωταρχικό χαρακτηριστικό που το κάνει να διαφέρει από τη συμβατική κατασκευαστική διαδικασία είναι ότι οι μετέπειτα διεργασίες εντός του συστήματος παραγωγής ασκούν μία "πίεση" στις προηγούμενες διεργασίες ως προς τις απαιτήσεις διαφορετικών τμημάτων τους. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή των απαιτούμενων τμημάτων στις απαιτούμενες ποσότητες στους απαιτούμενους χρόνους (Monden, Y., 1993). Έτσι, μειώνεται η απαίτηση σε κεντρικό έλεγχο της παραγωγής και το κόστος της επιτήρησης, που τον συνόδευε.

Ένα από τα πιο κρίσιμα προβλήματα παραγωγής που ακολουθούν Just – in – time φιλοσοφία είναι η δρομολόγηση των προϊόντων που θα παραχθούν σε μια εργοστασιακή μονάδα, σε γραμμές συναρμολόγησης/παραγωγής. Η γραμμή συναρμολόγησης, όντας ένα first-in-first-out συνεχές σύστημα, πρέπει κατά την επιλογή της δρομολόγησης των εργασιών να λαμβάνει υπ’ όψιν έναν πολύ μεγάλο αριθμό περιορισμών, ώστε να εξασφαλίσει τη συνεχή ροή των παραγόμενων αντικειμένων.

Ο γενικός στόχος-πρόκληση είναι να διοχετεύσουμε κάθε εργασία σε ένα συγκεκριμένο σημείο-ημέρα στο πρόγραμμα παραγωγής της κατάλληλης γραμμής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής και τις καθυστερήσεις σεβόμενοι τους εμπορικούς και βιομηχανικούς περιορισμούς.

Η ιδέα του μοντέλου Just-In-Time (JIT) είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για Γραμμές Συναρμολόγησης Μικτού Μοντέλου (Mixed Model Assembly Lines), όπου μια ποικιλία μοντέλων προϊόντων, με παρόμοια χαρακτηριστικά, συναρμολογούνται, προκειμένου να μπορέσει η επιχείρηση να ανταποκριθεί στη διαφοροποιημένη ζήτηση της αγοράς, χωρίς να διατηρεί μεγάλα αποθέματα (Monden, Y., 1993). Αυτό το είδος γραμμών συναρμολόγησης διαδίδεται όλο και περισσότερο στη βιομηχανία, για να αντιμετωπίσει την αυξανόμενη τάση που παρατηρείται από τη διαφοροποίηση των απαιτήσεων των πελατών (Boysen, Fliedner, & Scholl, 2009). Η ευρεία χρήση τους

στην κατασκευαστική διαδικασία μπορεί να αποδοθεί στην αυξημένη ποικιλία των προϊόντων και τα δυνητικά οφέλη του JIT (Miltenburg J. , 1993). Η σωστή διαχείριση των γραμμών συναρμολόγησης μικτού μοντέλου μπορεί να βοηθήσει τους κατασκευαστές να πετύχουν μία ισορροπία στο φόρτο εργασίας της γραμμής παραγωγής, καθώς και την ομαλή παραγωγή των τελικών προϊόντων και τη χρήση των εξαρτημάτων.

Η γραμμή συναρμολόγησης μιας βιομηχανίας, τυπικά παράγει πολλά διαφορετικά μοντέλα, τα οποία όλα ανήκουν σε μικρές οικογένειες αντικειμένων. Αναφερόμαστε σε αυτή την περίπτωση σε γραμμές μικτού μοντέλου. Για παράδειγμα, τα μοντέλα μιας αυτοκινητο-βιομηχανίας που ανήκουν στην ίδια οικογένεια μπορεί να περιέχουν μία δίπορτη έκδοση, μία τετράπορτη και μία station wagon, όλες με οχήματα διαφορετικών χρωμάτων και άλλων χαρακτηριστικών. Υπάρχουν οχήματα αυτόματα και άλλα με χειροκίνητο κιβώτιο ταχυτήτων, οχήματα με ηλιοροφή και άλλα χωρίς.

Στο παραπάνω σύστημα δημιουργούνται πολλές καθυστερήσεις, κυρίως στα σημεία όπου η παραγωγή μιας συγκεκριμένης μηχανής υπαγορεύει το συνολικό ρυθμό παραγωγής. Ένα τέτοιο σημείο είναι το σημείο βαφής, καθώς, κάθε φορά που το χρώμα αλλάζει, τα πιστόλια βαφής πρέπει να πλυθούν, διαδικασία που είναι αρκετά χρονοβόρα.

Ο στόχος τελικά είναι η μεγιστοποίηση της παραγωγής, δρομολογώντας τα οχήματα με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει εξισορρόπηση εργασίας σε κάθε σταθμό παραγωγής, ανά πάσα στιγμή.

Σε πολλά περιβάλλοντα τέτοιου τύπου, τα αποτελέσματα του προγραμματισμού μπορεί να μην είναι ορατά από την πρώτη στιγμή, έχουν, όμως, αισθητή επίδραση στην απόδοση του συστήματος. Τελικά, ένας καλός προγραμματισμός μπορεί να μειώσει τόσο το άμεσο όσο και το έμμεσο κόστος κατά ένα σημαντικό ποσοστό, κυρίως, μάλιστα, στα πιο σύνθετα περιβάλλοντα παραγωγής.

Ο προγραμματισμός σε JIT περιβάλλον παραγωγής, βέβαια, δεν είναι πάντοτε εύκολο να σχεδιασθεί και να εφαρμοστεί. Οι τεχνικές δυσκολίες, μοιάζουν πολλές φορές με αυτές που συναντάμε και σε άλλους τομείς της συνδυαστικής βελτιστοποίησης, ενώ οι δυσκολίες ως προς την εφαρμογή έχουν να κάνουν με τη μοντελοποίηση πραγματικών προβλημάτων προγραμματισμού και τη διαχείριση των πληροφοριών. Για να ξεπεραστούν οι δυσκολίες αυτές, χρειάζονται προσόντα και εμπειρία, αλλά τόσο λειτουργικά όσο και οικονομικά, σίγουρα αξίζει τον κόπο.

2.5.2 Προσεγγίσεις Μοντελοποίησης και Βελτιστοποίησης

Ορισμένα προβλήματα προγραμματισμού είναι από τη φύση τους εύκολα. Πολλά από αυτά μπορούν να μορφοποιηθούν σαν γραμμικά προβλήματα που λύνονται εύκολα με τη χρήση έτοιμων αλγορίθμων. Αυτοί οι αλγόριθμοι συνήθως αναφέρονται σαν πολυωνυμικοί χρονοαλγόριθμοι. Το ότι ένα πρόβλημα μπορεί να λυθεί από έναν αποδοτικό πολυωνυμικό χρονοαλγόριθμο σημαίνει πρακτικά ότι σημαντικά κομμάτια του παραπάνω προβλήματος με εκατοντάδες ή ακόμη και χιλιάδες υπό-εργασίες, μπορούν να λυθούν από έναν υπολογιστή σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα.

Υπάρχουν, όμως, και πολλά προβλήματα προγραμματισμού που είναι πραγματικά δύσκολα. Τα προβλήματα αυτά δε μπορούν να μορφοποιηθούν σαν γραμμικά προβλήματα και δεν υπάρχουν απλοί κανόνες και αλγόριθμοι που να δίνουν ικανοποιητικές λύσεις σε περιορισμένο χρονικό διάστημα. Αυτά τα προβλήματα μπορούν, ορισμένες φορές, να μορφοποιηθούν σαν προβλήματα ακεραίων ή διαζευκτικά προβλήματα, χωρίς να παύει να απαιτείται υπερβολικά πολύς χρόνος μέχρι να μας αποδώσουν μια ικανοποιητική λύση. Επειδή, όμως, η καθυστέρηση είναι κάτι ανεπιθύμητο, πολλές φορές μένουμε ικανοποιημένοι με μια αποδεκτή, εφικτή λύση ή οποία μπορεί και να μην απέχει πολύ από τη βέλτιστη.

Διάφορες θεωρητικές και ερευνητικές προσεγγίσεις υπάρχουν για την επίλυση του προγραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου (MMALS-problem) (Boysen, Fliedner, & Scholl, 2009). Σε μοντέλα που θεωρούν τη βελτιστοποίηση ενός και μόνο κριτηρίου, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι μαθηματικού προγραμματισμού, συνεχών ή διακριτών μεταβλητών (ακέραιος και μικτός-ακέραιος προγραμματισμός), δυναμικός προγραμματισμός κλπ. Σχετικές ερευνητικές προσεγγίσεις και υλοποιήσεις μπορεί ο αναγνώστης να βρει στις εργασίες των (Ng & Mak, 1994), (Bolat, Savsar, & Al-Fawzan, 1994), (Sabuncuoğlu, Gocgun, & Erel, 2008), (Ponnambalam, Aravindan, & Rao, 2003), (Fliedner, Boysen, & Scholl, 2010), (Akpınar, G. Bayhan, & Baykasoglu, 2013) (Emde & Boysen, 2012). Σε προβλήματα προγραμματισμού παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης που είναι μη γραμμικά ή μεγάλης κλίμακας, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες και τις δυσκολίες που μπορεί να τα χαρακτηρίζουν, αντιμετωπίζονται συχνά στην βιβλιογραφία με προσεγγιστικό τρόπο, βρίσκοντας προσεγγιστικά βέλτιστες λύσεις (near optimal solutions) με τη βοήθεια των heuristics ή metaheuristics βάσει εξελικτικών αλγορίθμων, ήτοι γενετικοί αλγόριθμοι, για παράδειγμα (Yolmeh & Kianfar, 2012), (Celano, Fichera, Grasso, La Commare, & Perrone, 1999), (Palencia & Delgadillo, 2012) (Guo, Wong, Leung, Fan, & Chan, 2006) ή αλγόριθμων γειτονικής αναζήτησης (αλγόριθμοι αναζήτησης διασποράς, κλπ.), (Liu, Sun, Yan, & Kang, 2011), (Sabuncuoğlu, Gocgun, & Erel, 2008), (Prot & Bellenguez-Morineau, 2012), (Manavizadeh, Hosseini, Rabbani, & Jolai, 2013),

(Navaei, Ghomi, & Jolai, 2014). Η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του προβλήματος, τον αριθμό και τη διάταξη των μηχανημάτων, το σύστημα παραγωγής, το σύστημα γραμμή συναρμολόγησης και την στατική ή δυναμική φύση της εργασίας / αφίξεις παραγγελιών (βλέπε (Kubiak, 1993), (T'Kindt & Billaut, 2005) και (Boysen, Fliedner, & Scholl, 2009).

2.5.3 Η πολυκριτήρια φύση του προβλήματος

Ωστόσο, όταν προσπαθεί κάποιος να διαμορφώσει και να λύσει πραγματικά προβλήματα προγραμματισμού μιας γραμμής συναρμολόγησης, συνήθως υπάρχει κάποιος αποφασίζων (Decision Maker - DM) ο οποίος καθορίζει περισσότερα από ένα κριτήρια (στόχους) για την αξιολόγηση και την επιλογή των λύσεων πλάνου παραγωγής. Έτσι, η απαίτηση ενός συστήματος προγραμματισμού παραγωγής είναι οι λύσεις που εξάγονται να ικανοποιήσουν τις προτιμήσεις του αποφασίζοντος με ένα συνολικό τρόπο, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του σε όλους τους στόχους, που τέθηκαν. Το μειονέκτημα των προσεγγίσεων με πολλαπλούς στόχους (Multiple Objectives), είναι ότι τα κριτήρια αυτά σπάνια βελτιστοποιούνται ταυτόχρονα με μία μόνο λύση, γιατί από τη φύση τους οι λύσεις είναι αλληλοσυγκρουόμενες, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε μεγάλο βαθμό να κλιμακώνεται η δυσκολία επίλυσης του προβλήματος. Η ανάλυση αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων απόφαση έχει αντιμετωπίσει αυτό το γεγονός σε πολλές πτυχές του, προσπαθώντας να βοηθήσει τον αποφασίζοντα να ενσωματώσει τις προτιμήσεις του στα κριτήρια αυτά κατά τη διαδικασία αναζήτησης, ώστε στη συνέχεια να προκύψουν αποδεκτές λύσεις για αυτόν. Μια εμπεριστατωμένη επανεξέταση για τον προγραμματισμό που αφορά πολλαπλά κριτήρια προτείνεται από (T'Kindt & Billaut, 2005).

Για την ειδική περίπτωση των πολυκριτηριακών προβλημάτων προγραμματισμού εργασιών σε περιβάλλον γραμμών συναρμολόγησης, αναφέρεται χαρακτηριστικά η περίπτωση της συναρμολόγησης οχημάτων σε εργοστάσιο αυτοκινητοβιομηχανίας. Το πρόβλημα συνίσταται στον καθορισμό της κατανομής των πόρων και του ημερήσιου προγράμματος δρομολόγησης οχημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες επιλογές μοντέλων, τους περιορισμούς και τους στόχους του περιβάλλοντος παραγωγής. Στη βιβλιογραφία, το πρόβλημα, παρά την πολυκριτηριακή του φύση, έχει αντιμετωπιστεί είτε ως ένα πρόβλημα με ένα και μοναδικό στόχο (κριτήριο) είτε με διάφορους στόχους λεξικογραφικά διατεταγμένους (Benoit, 2007), (Briant, Naddef, & Mounié, 2007), (Cordeau, Laporte, & Pasin, 2007), (Estellon, Gardi, & Nouioua, 2008), (Ribiero, Aloise, & Urrutia, 2007).

Ακόμα και στην περίπτωση σχετικού προβλήματος που προτάθηκε από τον κατασκευαστή αυτοκινήτων Renault για τον διαγωνισμό ROADEF Challenge 2005

(Nguyen, 2005), ενώ καθορίζονται τρία κριτήρια –στόχοι βελτιστοποίησης, χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της λύσης ανάλογα με την πολιτική της εταιρείας με τις απλοϊκές μεθόδους:

- *μονοσήμαντου σταθμισμένου αθροίσματος, της μορφής :*

  $F(X)=w_1 * obj_1 + w_2 * obj_2 + w_3 * obj_3$

  όπου obj_1, obj_2 και obj_3 αντιστοιχούν στην αξία του X για κάθε στόχο (κριτήριο). Τα βάρη w_1, w_2 και w_3 δίνονται από την εταιρεία.

- *λεξικογραφικής ιεράρχησης της σημαντικότητας των κριτηρίων*

Στον συγκεκριμένο διαγωνισμό, έμφαση δόθηκε στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και όχι στην πολυκριτηριακή προσέγγιση του τρόπου επίλυσης και επιλογής βέλτιστης λύσης, γεγονός που αντανακλά το γεγονός ότι η εταιρεία ανέμενε βελτίωση των οικονομικών της μεγεθών μόνο από την βελτίωση των αλγορίθμων αναζήτησης λύσης στο πρόβλημα και όχι από την βελτίωση της διαμόρφωσης του προβλήματος προς επίλυση. Για μια πιο λεπτομερή περιγραφή του συγκεκριμένου προβλήματος αυτού, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο (Nguyen, 2005) και (Solnon, Cung, & Artigues, 2007).

Εξ' όσων γνωρίζουμε, οι μόνες αναφορές που θεραπεύουν την συγκεκριμένη κατηγορία προβλήματος της αυτοκινητοβιομηχανίας από μια καθαρά πολυκριτηριακή άποψη είναι εκείνες του (Zinflou A. , Gagné, Gravel, & Price, 2006) και του (Reis, 2007) οι οποίες όμως εξετάζουν μόνο μικρές περιπτώσεις προβλημάτων (λιγότερες από 60 αυτοκίνητα).

Όπως θα δούμε αναλυτικά και στο επόμενο κεφάλαιο, οι περισσότεροι από τους αλγορίθμους που προτείνονται σχετικά πρόσφατα για πολυκριτηριακά προβλήματα είναι χρησιμοποιούν εξελικτικοί αλγόριθμοι (EA) (Deb, 2000), (Knowles & Corne, 2000a), (Knowles & Corne, 2000b). Αυτό συμβαίνει, επειδή χωρίς αμφιβολία οι EA μπορούν να διασχίσουν μεγάλο χώρο αναζήτησης σε κάθε στάδιο βελτιστοποίησης.

Είναι χαρακτηριστικό όμως ότι, λίγοι ερευνητές και βιομηχανίες έχουν καταφέρει ή επιδιώξει να χρησιμοποιήσουν αυτή την κατηγορία αλγορίθμων ή άλλους αλγορίθμους που προσεγγίζουν πολυκριτηριακά την επίλυση, για την αντιμετώπιση προβλημάτων στον συγκεκριμένο χώρο ενδεικτικά, των αυτοκινητοβιομηχανιών. Η κατάσταση αυτή μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι π.χ. το πρόβλημα προγραμματισμού οχημάτων στην αυτοκινητοβιομηχανία εθεωρείτο μέχρι πριν λίγα χρόνια ως ένα πρόβλημα με έντονα λεξικογραφικό χαρακτήρα κριτηρίων βελτιστοποίησης. Ωστόσο, είναι πλέον αποδεκτό και κατανοητό ότι η λεξικογραφική θεώρηση των κριτηρίων είναι τέτοια ώστε να μπορεί να εξαλείψει πολλές «ενδιαφέρουσες» λύσεις για τον αποφασίζοντα (-βιομηχανία) (Zinflou, Gagné, & Gravel, 2008). Πράγματι, η χαλάρωση της απόλυτης προτεραιότητας που αποδίδεται λεξικογραφικά στο κύριο κριτήριο είναι δυνατόν να αναδείξει και άλλες ελκυστικές

λύσεις που αποτυπώνουν συμβιβασμό ανάμεσα στα κριτήρια. Οι νέες αυτές λύσεις δίνουν νέο ορίζοντα στην υποστήριξη αποφάσεων από την εταιρεία με οικονομικό, εμπορικό, κοινωνικό αντίκτυπο.

Έτσι, με μια κατάλληλη πολυκριτηριακή προσέγγιση, αντί για μια μεμονωμένη λύση (μη ισορροπημένα ορισμένης ποιότητας) σε συνάρτηση μιας εκ των προτέρων διάταξης των κριτηρίων, είναι θεμιτό να δοθεί στον αποφασίζοντα ένα σύνολο από λύσεις από τις οποίες μπορεί να επιλέξει ανάλογα με τις προτιμήσεις.

Πολλές τεχνικές έχουν προταθεί για την επίλυση προβλημάτων απόφασης πολλαπλών κριτηρίων λαμβάνοντας υπόψη το γνωστικό στυλ του αποφασίζοντος και τις ικανότητες, όπως μέθοδοι υπεροχής, πολύ-χαρακτηριστικές συναρτήσεις χρησιμότητας, μέθοδοι παλινδρόμησης ή επιμερισμού και πολυκριτήριες μαθηματικές τεχνικές προγραμματισμού (βλέπε (Eds: Figueira, Greco, & Ehrgott, 2005) και (Eds: Ehrgott, Figueira, & Greco, 2010) για περαιτέρω εμβάθυνση στην state of the art κατάσταση στο συγκεκριμένο πεδίο). Οι τεχνικές όμως αυτές συνήθως εξαντλούνται σε ανάλυση ακαδημαϊκού επιπέδου, σε εφαρμογή σε προβλήματα περιορισμένων διαστάσεων και τυποποιημένων μορφών, ενώ σπάνια περνούν -υπό προϋποθέσεις κι παραδοχές- σε εφαρμογές πραγματικών προβλημάτων.

Τα πραγματικά προβλήματα είναι συνήθως πολύ μεγάλα και σύνθετα, με την έννοια ότι εμπλέκονται πολλές μεταβλητές και περιορισμοί, ενώ επικρατούν μεταξύ τους πολύπλοκες σχέσεις. Στην περίπτωση των προβλημάτων πολλαπλών κριτηρίων για δρομολόγηση εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης, οι περισσότεροι ερευνητές υποβαθμίζουν το τμήμα υποστήριξης αποφάσεων του προβλήματος ή θεωρούν μια έναν εικονικό αποφασίζοντα που ορίζει τα βάρη ή τους στόχους των κριτηρίων και επικεντρώνονται στην πτυχή της βελτιστοποίησης του προβλήματος. Έτσι, βρίσκουν είτε μια ενιαία βέλτιστη λύση ή ένα σύνολο των βέλτιστων ή προσεγγιστικά βέλτιστες λύσεις (βλέπε (Miltenburg G. , 1990; Miltenburg & Goldstein, 1991) για παράδειγμα). Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ερευνητές αναπτύσσουν heuristics ή metaheuristics για την προσέγγιση του μετώπου Pareto του προβλήματος, από την οποία ο αποφασίζων θα επιλέξει θεωρητικά τη λύση που ανταποκρίνεται καλύτερα στις προτιμήσεις του. Ωστόσο, αν και αυτές οι προσεγγίσεις παρουσιάζουν στον αποφασίζοντα ένα μεγάλο αριθμό καλών λύσεων για να επιλέξει από αυτές, μπορεί να του προκαλέσουν σύγχυση στην επιλογή της λύσης που ταιριάζει καλύτερα στις προτιμήσεις του, ειδικά όταν περισσότερα από δύο κριτήρια λαμβάνονται υπόψη (Miettinen, 1999), (Ehrgott, 2000).

2.6 Συμπεράσματα και ερευνητικές προκλήσεις

Από την ανάλυση που έγινε στο παρόν κεφάλαιο, είμαστε πλέον σε θέση να εκτιμήσουμε την σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα στην μοντελοποίηση και την επίλυση επιμέρους προβλημάτων διαχείρισης παραγωγής αλλά και στην ανάπτυξη αλγορίθμων για την βελτιστοποίηση δομημένων και καλά ορισμένων σχετικών προβλημάτων. Στόχος μας ήταν να διερευνήσουμε και να αναγνωρίσουμε τις ερευνητικές προκλήσεις που θεωρούμε ότι δεν έχουν απαντηθεί επαρκώς από την επιστημονική κοινότητα προκειμένου να στοχευθεί καλύτερα η κατεύθυνση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Θεωρούμε, ότι, ενώ η βιβλιογραφία είναι πραγματικά πλούσια (και σίγουρα δεν εξαντλείται στις αναφορές που γίνονται στο παρόν κεφάλαιο, οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές) και οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες απαντούν με ευρηματικότητα και αποτελεσματικότητα σε επιμέρους ερευνητικά προβλήματα, ιδιαίτερα στον χώρο της βελτιστοποίησης, αφορούν κυρίως σε θεωρητικές προσεγγίσεις με εφαρμογή σε πειραματικά προβλήματα αναφοράς και δεν αποτελούν ολοκληρωμένη πρόταση για την προσέγγιση του συνόλου των προκλήσεων που απαντώνται στα πραγματικά προβλήματα. Ειδικότερα, πιστεύουμε ότι η φύση των πραγματικών προβλημάτων στον χώρο του χρονοπρογραμματισμού εργασιών χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο από ιδιαιτερότητες η συνδυαστική αντιμετώπιση των οποίων απαιτεί βέβαια την αξιοποίηση των κατάλληλων – κατά περίπτωση- μεθόδων και τεχνικών της επιχειρησιακής έρευνας ή και της τεχνητής νοημοσύνης στο τμήμα του προβλήματος που αφορά στην βελτιστοποίηση όμως σίγουρα απαιτείται η ταυτόχρονη αξιοποίηση και προσαρμογή τεχνικών και μεθόδων της επιστήμης υποστήριξης λήψης αποφάσεων για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση επίλυσης που θα είναι και πρακτικά εφαρμόσιμη. Τονίζεται ότι, προκειμένου να είναι πρακτικά εφαρμόσιμη μια προσέγγιση επίλυσης σε ένα πραγματικό πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής πρέπει να έχει στις μεθόδους και τα μοντέλα που χρησιμοποιεί την κατάλληλη ισορροπία

- Εξειδίκευσης: για να μπορεί να ανταποκρίνεται με ακρίβεια στις ανάγκες του συγκεκριμένου προβλήματος χωρίς περιττές δυνατότητες, εργαλεία, παραμέτρους που θα φορτώσουν το μοντέλο, θα αυξήσουν την πολυπλοκότητα, τον χρόνο απόκρισης, την πιθανότητα λαθών και θα δυσχεράνουν τον χρήστη, και
- Ευελιξίας: για να μπορεί να απορροφήσει ή να εκφράσει αλλαγές που ενδέχεται να γίνονται σε κάποιο βαθμό είτε στο μοντέλο του περιβάλλοντος παραγωγής είτε στο μοντέλο τρόπου λήψης απόφασης.

Συμπερασματικά, εντοπίζεται, κατά την γνώμη μας, σημαντικό ερευνητικό κενό στην ολοκληρωμένη αντιμετώπιση των ιδιαίτερων ερευνητικών προκλήσεων που αφορούν σε κατηγορία των πραγματικών προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού εργασιών παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης. Τα σχετικά προβλήματα εμφανίζουν τα ακόλουθα ιδιαίτερα έντονα χαρακτηριστικά ο συνδυασμός των οποίων αποτελεί ακόμα πρόκληση για την ερευνητική κοινότητα:

- Μεγάλη κλίμακα προβλήματος που αποτυπώνεται τόσο στον μεγάλο όγκο δεδομένων όσο και στον μεγάλο αριθμό περιορισμών και μεταβλητών απόφασης. Το γεγονός της μεγάλης κλίμακας, αυξάνει συνήθως τον χρόνο επίλυσης των προβλημάτων ιδιαίτερα σε προβλήματα μη γραμμικά που εμφανίζουν μεγάλη πολυπλοκότητα. Στόχος είναι, κατά την αποτύπωση και μοντελοποίηση ενός προβλήματος χρονοπρογραμματισμού παραγωγής να διαμορφώνεται ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο να επιτρέπει κατά το δυνατό την αξιοποίηση προσεγγίσεων επίλυσης που έχουν αποδειχθεί ότι προσφέρουν άριστα αποτελέσματα σε πολύ καλό χρόνο. Για παράδειγμα, αν ένα πρόβλημα μπορεί να αποτυπωθεί επιτυχώς και με συνέπεια με ένα γραμμικό μοντέλο, οι διαθέσιμοι λύτες μπορούν να εξασφαλίσουν αποτελέσματα σε χρόνο τέτοιο που δεν προβληματίζει ούτε τον αναλυτή ούτε τους τελικούς χρήστες της εφαρμογής που θα αξιοποιήσει τον αλγόριθμο σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον.
- Στο πλαίσιο αντιμετώπισης πραγματικών και όχι θεωρητικών προβλημάτων, θεωρούμε ότι είναι πολύ σημαντικό να επιτευχθεί από τον αναλυτή η μοντελοποίηση του προβλήματος και του αλγορίθμου επίλυσης με τρόπο που να μπορεί να γίνει κατανοητό από τον «ιδιοκτήτη» του προβλήματος και μετέπειτα χρήστη της εκάστοτε προτεινόμενης μεθόδου επίλυσης. .Η δυνατότητα κατανόησης του μοντέλου και του τρόπου επίλυσης από τον τελικό χρήστη της μεθόδου είναι κρίσιμη προκειμένου να καταστεί εφικτή η διαχείριση και σωστή ρύθμιση της μεθόδου ως προς τις παραμέτρους που εκφράζουν συνθήκες του περιβάλλοντος ή συνθήκες/κριτήρια απόφασης που μπορεί να μεταβάλλονται, και η μεταβολή αυτή πρέπει να αποτυπώνεται σωστά και με λογικό/κατανοητό –για τον χρήστη- τρόπο στο μοντέλο επίλυσης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Συχνά, ενώ η μοντελοποίηση ενός προβλήματος είναι ακριβής και ο αλγόριθμος επίλυσης αποτελεσματικός, η μέθοδος πρακτικά δεν αξιοποιείται καθώς ο χρήστης της εφαρμογής δεν είναι σε θέση να διαχειριστεί την αλλαγή παραμέτρων που μπορεί να απαιτηθεί σε αλλαγές συνθηκών σε τακτική βάση.
- Στα πραγματικά βιομηχανικά προβλήματα προγραμματισμού παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης η συνήθης περίπτωση είναι τα πολλαπλά και

αντικρουόμενα κριτήρια απόφασης, που εκφράζουν διαφορετικές εκφάνσεις/μορφές προτιμήσεων, κόστους ή κέρδους για την επιχείρηση. Το μοντέλο του προβλήματος και η μέθοδος επίλυσης αυτού πρέπει να μπορούν να αποδώσουν και να εκφράσουν αποτελεσματικά και με συνέπεια την ύπαρξη πολλαπλών κριτηρίων αλλά και την προτιμησιακή συμπεριφορά του αποφασίζοντος (χρήστη της εφαρμογής) σε σχέση με αυτά. Οι μέθοδοι/αλγόριθμοι επίλυσης που περιγράφηκαν παραπάνω αφορούν στον σχεδιασμό τους σε μοντέλα ενός αντικειμενικού κριτηρίου και απαιτούνται προσαρμογές προκειμένου να μπορούν να αξιοποιηθούν σε πολυκριτηριακά προβλήματα.

- Σε συνδυασμό με τις παραπάνω προκλήσεις, είναι φανερή η ανάγκη ενεργού συμμετοχής του αποφασίζοντος (θεωρούμενου ιδιοκτήτη του προβλήματος και χρήστη της εφαρμογής) τόσο στην διαδικασία μοντελοποίησης του προβλήματος προκειμένου να επικυρωθεί η συνέπεια του μαθηματικού μοντέλου ως προς την προσομοίωση του βιομηχανικού περιβάλλοντος και του προτιμησιακού μοντέλου απόφασης, όσο και στην διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, ήτοι, στην διαδικασία επίλυσης αναζήτησης βέλτιστης λύσης. Συγκεκριμένα, το προτιμησιακό μοντέλο δεν είναι δυνατόν να αποτυπωθεί εκ των προτέρων, αλλά διαμορφώνεται στην πορεία απαιτείται ευελιξία άμεσης καθοδήγησης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης από τον αποφασίζοντα, χωρίς να παρεμβάλλεται η ανελαστικότητα ενός πλήρως καθορισμένου μοντέλου απόφασης. Το δυναμικό περιβάλλον και ανταγωνιστική οικονομία κάνουν αναγκαίο ένα ευέλικτο εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων για την δημιουργία βέλτιστου πλάνου παραγωγής, εκτιμώντας το γεγονός ότι σε κάθε τρέξιμο δύναται να είναι διαφορετική η θεώρηση και συσχέτιση των κριτηρίων λόγω αλλαγής εποχιακών ή εμπορικών παραμέτρων του περιβάλλοντος.
- Απαίτηση για εύρεση ικανοποιητικής «βέλτιστης» λύσης (ή συνόλου βέλτιστων λύσεων) σε χρονικά αποδεκτό χρόνο, γεγονός που αποκλείει την εφαρμογή εξαντλητικών μεθόδων αναζήτησης στον χώρο των λύσεων ή/και στον χώρο των κριτηρίων.

Η διατριβή στοχεύει να απαντήσει συνολικά στις ερευνητικές προκλήσεις που αναδείχθηκαν με μια πρόταση που αξιοποιεί συνδυαστικά, προσαρμόζει και επεκτείνει μεθόδους της πολυκριτήριας ανάλυσης και του μαθηματικού προγραμματισμού.

Προκειμένου να μπορέσουν να επιλεγούν, προσαρμοστούν και αξιοποιηθούν οι κατάλληλες τεχνικές και μέθοδοι της πολυκριτήριας ανάλυσης, στο ακόλουθο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αποτύπωση του σχετικού χώρου και των προσεγγίσεων που υπάρχουν. Στόχος είναι να εντοπιστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα

που παρουσιάζουν οι μέθοδοι που προσφέρει η περιοχή της πολυκριτήριας ανάλυσης, να εκτιμηθεί η καταλληλότητα και η αποτελεσματικότητά τους σε προβλήματα προγραμματισμού παραγωγής και να διερευνηθούν προηγούμενες σχετικές προσπάθειες.

3

Πολυκριτηριακή Ανάλυση και Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός

Κεφάλαιο 3

Πολυκριτηριακή Ανάλυση και Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός

- Εισαγωγή
- Πολυκριτήρια ανάλυση και λήψη αποφάσεων
- Πολυκριτήριος μαθηματικός προγραμματισμός
- Μέθοδοι επίλυσης Πολυκριτήριου Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού
- Μεθοδολογικό πλαίσιο επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής
- Πολυκριτηριακές προσεγγίσεις σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού σε γραμμές συναρμολόγησης
- Ερευνητική στόχευση της διατριβής

3.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι υπάρχουσες επιστημονικές προσεγγίσεις στο πεδίο της πολυκριτήριας ανάλυσης σε προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού και βελτιστοποίησης, σαν αυτό το οποίο πραγματεύεται η διδακτορική διατριβή. Στόχος είναι να παρουσιαστούν:

- μια σύντομη εισαγωγή στην πολυκριτήρια ανάλυση και λήψη αποφάσεων,
- ο πολυκριτήριος μαθηματικός προγραμματισμός,

- προσεγγίσεις και μέθοδοι επίλυσης πολυκριτήριου μαθηματικού προγραμματισμού,
- η περίπτωση των πολυκριτήριων προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής. Στο πλαίσιο αυτό αναδεικνύονται οι υπάρχουσες θεωρητικές προσεγγίσεις για την ανάλυση και επίλυση σχετικών προβλημάτων, και επισημαίνονται οι μέχρι σήμερα προσεγγίσεις επίλυσης πολυκριτήριων προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού σε γραμμές συναρμολόγησης, ήτοι μορφών παρόμοιων του προβλήματος που πραγματεύεται η διατριβή,
- χρήσιμα συμπεράσματα που οδήγησαν στην διαμόρφωση της προτεινόμενης προσέγγισης, προκειμένου να καλυφθούν ερευνητικά κενά στο συγκεκριμένο πεδίο και να αντιμετωπιστούν οι ερευνητικές προκλήσεις. Προς την κατεύθυνση αυτή, λαμβάνονται υπόψιν οι ερευνητικές προκλήσεις των προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής που επισημάνθηκαν στο κεφάλαιο 2 και αναδεικνύονται κατάλληλα χαρακτηριστικά των προσεγγίσεων που παρέχει το πεδίο της πολυκριτήριας ανάλυσης και μπορούν – προσαρμοσμένες- να αξιοποιηθούν, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις του προβλήματος της διατριβής.

3.2. Πολυκριτήρια ανάλυση και λήψη αποφάσεων

Η διαδικασία λήψης απόφασης είναι η διαδικασία που στοχεύει στην επιλογή μιας λύσης από ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών. Η απόφαση λαμβάνεται από τον αποφασίζοντα ο οποίος επιλέγει τελικά την καταλληλότερη λύση για το πρόβλημα που αντιμετωπίζει, αφού κάνει σύγκριση και αξιολόγηση των διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων. Η Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων είναι ο κλάδος της Επιχειρησιακής Έρευνας που πραγματεύεται την επίλυση προβλημάτων με την θεώρηση περισσότερων του ενός κριτηρίων απόφασης.

Η χρήση περισσοτέρων του ενός κριτηρίων στη διαδικασία λήψης απόφασης διευκολύνει και επιτρέπει την ρεαλιστική απεικόνιση πραγματικών προβλημάτων, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία και καλύτερη αντιμετώπιση των προβλημάτων καθώς εξετάζονται με τον τρόπο αυτό περισσότερες διαστάσεις. Από την άλλη, η πολυδιάστατη αυτή εξέταση οδηγεί σε ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα, σχετικά με τον τρόπο σύνθεσης των παραμέτρων αυτών ώστε να επιτευχθεί η λήψη ορθολογικών αποφάσεων.

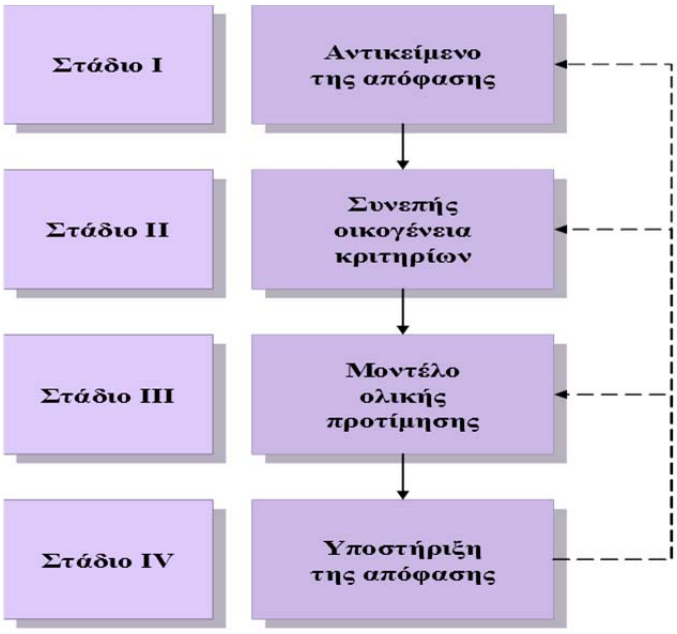
Η πολυκριτήρια ανάλυση υπερτερεί άλλων προσεγγίσεων επίλυσης στο γεγονός ότι η σύνθεση των κριτηρίων αξιολόγησης λύσεων γίνεται κάτω από την οπτική του συστήματος προτιμήσεων και αξιών που έμμεσα ή άμεσα (ήτοι, συνειδητά ή ασυνείδητα) εκφράζει την πολιτική λήψης αποφάσεων του αποφασίζοντος.

Συγκεκριμένα, στα μονο-κριτηριακά προβλήματα ο αποφασίζων εμπλέκεται μόνο στην φάση μοντελοποίησης/αποτύπωσης του προβλήματος και του κριτηρίου απόφασης. Στην συνέχεια δεν προβλέπεται η περαιτέρω συμμετοχή του, καθώς αναλαμβάνει εξ' ολοκλήρου ο αναλυτής να βρει μονοσήμαντα την βέλτιστη λύση του προβλήματος. Υπό το πρίσμα αυτό, θεωρείται ότι τα μονο-κριτηριακά προβλήματα δεν αποτελούν ουσιαστικά προβλήματα λήψης απόφασης, αλλά προβλήματα βελτιστοποίησης.

Αντίθετα, στην Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων ο αποφασίζων συμμετέχει υποχρεωτικά στην διαδικασία καθορισμού της λύσης καθώς, στο πλαίσιο της διαδικασίας, πρέπει να παράσχει, έμμεσα ή άμεσα ανάλογα με την τεχνική, τις προτιμήσεις του σε σχέση με την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων ως προς τα διαφορετικά κριτήρια και, τέλος, να επιλέξει την λύση, ήτοι να λάβει την τελική απόφαση. Στην περίπτωση που μία λύση υπερτερεί των υπόλοιπων λύσεων ως προς όλα τα κριτήρια τότε αποτελεί μονοσήμαντα την βέλτιστη λύση του προβλήματος κα ο αποφασίζων λαμβάνει εύκολα την τελική του απόφαση. Η συνήθης περίπτωση όμως είναι τα κριτήρια απόφασης να αλληλοσυγκρούονται με αποτέλεσμα να μην είναι προφανές ποια λύση αποτελεί την βέλτιστη επιλογή.

Προβλήματα λήψης απόφασης με πολλαπλά κριτήρια συναντάμε σε πλείστα επιχειρησιακά αλλά και ερευνητικά πεδία. Ενδεικτικά αναφέρονται τα: η διαμόρφωση της στρατηγικής μιας επιχείρησης (βελτίωση κερδοφορίας, η αύξηση της ποιότητας των προϊόντων, η βελτίωση παροχών στους εργαζομένους), ο προσδιορισμός ενός πλάνου παραγωγής, τα προβλήματα σχεδιασμού ενεργειακών συστημάτων (Ψαρράς, 1989), η ομαδοποίηση και επιλογή μεταξύ διαφόρων επενδυτικών προτάσεων και η κατάταξη υποψήφιων υπαλλήλων για συγκεκριμένες θέσεις σε μια επιχείρηση, κ.α.

Ο Roy, εκ των θεμελιωτών της σύγχρονης θεωρίας της πολυκριτήριας ανάλυσης, παρουσίασε ένα γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο αντιμετώπισης πολυδιάστατων προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Το πλαίσιο αυτό (Σχήμα 4.1) ουσιαστικά αποτελεί τη ραχοκοκαλιά κάθε πολυκριτήριας προσέγγισης και χαρακτηρίζει απόλυτα τη φιλοσοφία των μεθοδολογιών του χώρου.



Σχήμα 3. 1 Το μεθοδολογικό πλαίσιο της πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων

Πηγή: Roy (1985)

Η διαδικασία ανάλυσης των προβλημάτων λήψης αποφάσεων στο πλαίσια της πολυκριτήριας προσέγγισης περιλαμβάνει τέσσερα στάδια, μεταξύ των οποίων είναι δυνατόν να αναπτύσσονται αναδράσεις.

- **Στάδιο 1: Αντικείμενο της απόφασης**

Αφορά στον καθορισμό του συνόλου Α των εναλλακτικών λύσεων (δραστηριοτήτων ή δράσεων) του προβλήματος. Ως εναλλακτική δράση ορίζεται κάθε πιθανή επιλογή (απόφαση) η οποία αποτελεί λύση του εξεταζόμενου προβλήματος και πρέπει να αξιολογηθεί ως προς την καταλληλότητά της. Το σύνολο Α των εναλλακτικών δράσεων μπορεί να είναι συνεχές ή διακριτό.

Μετά τον προσδιορισμό του συνόλου Α των εναλλακτικών δράσεων, καθορίζεται η προβληματική της απόφασης. Ο Roy πρότεινε τις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες διακριτών προβλημάτων:

1. *Προβληματική τύπου α*: επιλογή μιας μόνο εναλλακτικής από το σύνολο Α
2. *Προβληματική τύπου β*: ταξινόμηση των εναλλακτικών σε ομογενείς προκαθορισμένες κατηγορίες, οι οποίες είναι διατεταγμένες ως προς τις προτιμήσεις του αποφασίζοντος.
3. *Προβληματική τύπου γ:* κατάταξη των εναλλακτικών του συνόλου Α από τις καλύτερη προς τη χειρότερη.
4. *Προβληματική τύπου δ*: περιγραφή των εναλλακτικών και των συνεπειών τους στη γλώσσα των εμπλεκομένων στη διαδικασία της απόφασης, με βάση την επίδοσή του στα επιμέρους κριτήρια αξιολόγησης.

Η επιλογή της κατάλληλης προβληματικής, σχετίζεται αποκλειστικά και μόνο με το πρόβλημα που εξετάζεται. Σε αρκετές περιπτώσεις, για την καλύτερη αντιμετώπιση ενός προβλήματος, είναι πιθανόν να απαιτείται ο συνδυασμός δυο διαφορετικών προβληματικών.

- **Στάδιο 2: Συνεπής οικογένεια κριτηρίων**

Αφορά στον εντοπισμό των παραγόντων εκείνων που επιδρούν στο αποτέλεσμα της ανάλυσης των εναλλακτικών δραστηριοτήτων του συνόλου Α. Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν τα κριτήρια της προβληματικής. Ως κριτήριο ορίζεται μια μονότονη συνάρτηση δηλωτική των προτιμήσεων του αποφασίζοντος. Κάθε δράση από το σύνολο Α δημιουργεί ένα «νέφος στοιχειωδών επιπτώσεων» (Roy, 1985). Ως στοιχειώδης επίπτωση μιας δράσης ονομάζεται κάθε ιδιότητα ή χαρακτηριστικό που σχετίζεται με τη δράση αυτή και πληροί τις εξής δυο ιδιότητες:

α) είναι επαρκώς καθορισμένη ως προς το περιεχόμενό της ώστε οι διάφοροι εμπλεκόμενοι να αντιλαμβάνονται τη σημασία της,

β) επιτρέπει την περιγραφή κάποιου συγκεκριμένου αποτελέσματος το οποίο έπεται της επιλογής της δράσης αυτής (Σίσκος, 2008).

Ο ρόλος του αναλυτή συνίσταται στη διασαφήνιση των επιπτώσεων των διαφόρων δράσεων του συνόλου Α και στη συνέχεια, στην επινόηση και προτυποποίηση των κριτηρίων στη βάση των οποίων θα ληφθεί η απόφαση. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η κατασκευή ενός συστήματος κριτηρίων το οποίο ονομάζεται συνεπής οικογένεια κριτηρίων.

- **Στάδιο 3: Μοντέλο ολικής προτίμησης**

Αφορά στην κατασκευή και χρήση ενός μοντέλου ολικής προτίμησης, ήτοι στην σύνθεση των κριτηρίων έτσι ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της ανάλυσης ανάλογα με την προβληματική που έχει καθοριστεί. Το μοντέλο ολικής προτίμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για:

α) τον προσδιορισμό συνολικής αξιολόγησης κάθε εναλλακτικής,

β) την πραγματοποίηση διμερών συγκρίσεων μεταξύ των εναλλακτικών,

γ) τη διερεύνηση του συνόλου των εναλλακτικών λύσεων, όταν αυτό είναι συνεχές.

- **Στάδιο 4: Υποστήριξη της απόφασης**

Αφορά στις ενέργειες που θα υποστηρίξουν τον αποφασίζοντα να κατανοήσει τα αποτελέσματα του μοντέλου σύνθεσης των κριτηρίων που επελέγη κατά το προηγούμενο στάδιο, καθώς και τη διαδικασία με την οποία εξήχθησαν τα αποτελέσματα αυτά.

Στο στάδιο αυτό ο ρόλος του αναλυτή είναι ιδιαίτερα καθοριστικός, καθώς, μεταξύ άλλων, καλείται να εντοπίσει και να οργανώσει τα στοιχεία των απαντήσεων σε συγκεκριμένα ερωτήματα τα οποία ενδέχεται να θέσουν οι διάφοροι εμπλεκόμενοι στη διαδικασία της απόφασης.

Ο χώρος της πολυκριτήριας ανάλυσης είναι ιδιαίτερα ευρύς ως προς τη φύση των μεθοδολογικών προσεγγίσεων που έχουν αναπτυχθεί εντός αυτού για την αντιμετώπιση προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Μεταξύ των προσεγγίσεων αυτών εντοπίζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις τόσο στη μορφή των μοντέλων που αναπτύσσονται, όσο και στη διαδικασία που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη των μοντέλων. Διάφορες ομαδοποιήσεις των μεθοδολογικών προσεγγίσεων της πολυκριτήριας ανάλυσης έχουν προταθεί.

Ο Σίσκος (2008), ταξινομεί τα μοντέλα σύνθεσης κριτηρίων σε δυο βασικές ομάδες:

1. *Αντισταθμιστικά μοντέλα:* Μοντέλα στα οποία η υποβάθμιση ενός κριτηρίου είναι δυνατόν να αποζημιωθεί από τη βελτίωση της τιμής ενός άλλου κριτηρίου.
2. *Μη αντισταθμιστικά μοντέλα (non compensatory models):* Μοντέλα στα οποία η αντιστάθμιση ενός κριτηρίου με ένα άλλο, δεν είναι επιτρεπτή.

Οι (Pardalos, Siskos, & Zopounidis, 1995) πρότειναν μια διαφορετική κατηγοριοποίηση που λαμβάνει υπόψη και τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η ανάπτυξη των μοντέλων. Η ομαδοποίηση αυτή περιλαμβάνει τις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες προσεγγίσεων.

1. Πολυκριτήριος μαθηματικός προγραμματισμός

2. Πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας

3. Θεωρία των σχέσεων υπεροχής

4. Αναλυτική-συνθετική προσέγγιση

Μεταξύ των βασικών αυτών προσεγγίσεων της πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων, οι τρεις τελευταίες, δηλαδή η πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας, η θεωρία των σχέσεων υπεροχής και η αναλυτική-συνθετική προσέγγιση, προσανατολίζονται προς την αντιμετώπιση διακριτών προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Απώτερος στόχος τους, είναι η σύνθεση των κριτηρίων με σκοπό την αξιολόγηση ενός πεπερασμένου συνόλου εναλλακτικών δραστηριοτήτων σύμφωνα με τις προβληματικές της επιλογής, κατάταξης ή ταξινόμησης.

Αντίθετα, ο πολυκριτήριος μαθηματικός προγραμματισμός αποτελεί γενίκευση της γνωστής θεωρίας του μαθηματικού προγραμματισμού σε περιπτώσεις όπου πρέπει να βελτιστοποιηθούν πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις.

3.3. Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός

Ο Πολυκριτηριακός ή Πολυκριτήριος Μαθηματικός Προγραμματισμός ή Μαθηματικός Προγραμματισμός με πολλαπλά κριτήρια (Multiple Objective Mathematical Programming) είναι η τομή δύο πεδίων της Επιχειρησιακής Έρευνας: του Μαθηματικού Προγραμματισμού και της Πολυκριτηριακής Λήψης Αποφάσεων (Multiple Criteria Decision Making) η οποία ασχολείται με προβλήματα λήψης απόφασης όπου εμπλέκονται περισσότερα του ενός κριτηρίων απόφασης και πολλαπλές μεταβλητές προς αριστοποίηση. Οι μαθηματικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών απόφασης που πρέπει να ικανοποιούνται αποτελούν τους περιορισμούς του προβλήματος, ενώ οι συναρτήσεις εκείνες των μεταβλητών απόφασης που πρέπει να βελτιστοποιηθούν ονομάζονται αντικειμενικές συναρτήσεις. Με τον όρο λύση του προβλήματος εννοείται κάθε συνδυασμός τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές απόφασης. Η λήψη απόφασης γίνεται από τον αποφασίζοντα, ο οποίος συγκρίνει και αξιολογεί τις εναλλακτικές λύσεις (επιλογές) ώστε να επιλεχθεί τελικά η καταλληλότερη λύση για κάποιο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Το μεγάλο ενδιαφέρον που παρουσίασε στις τάξεις των επιστημόνων της επιχειρησιακής έρευνας από πολύ νωρίς, οφείλεται στην αβίαστη διαπίστωση ότι τα περισσότερα προβλήματα λήψης απόφασης που εκφράζονται με μοντέλα Μαθηματικού Προγραμματισμού είναι στην ουσία πολυκριτηριακά. Τα περισσότερα του ενός κριτήρια εκφράζουν μια πιο ρεαλιστική εκδοχή των σύγχρονων μοντέλων λήψης απόφασης. Αυτό ενισχύεται και από το γεγονός ότι στα σημερινά προβλήματα υπάρχουν περισσότεροι του ενός εμπλεκόμενοι φορείς, με διαφορετικές οπτικές γωνίες, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά, πολλές φορές αλληλοσυγκρουόμενα, κριτήρια.

Η ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών συρρίκνωσε τους χρόνους επίλυσης, καθιστώντας τις μεθόδους πρακτικά εφαρμόσιμες αλλά και πιο δεκτικές στον πειραματισμό. Προβλήματα που μπορεί να θεωρούνταν ουσιαστικά άλυτα λόγω του απαιτούμενου χρόνου επίλυσης πλέον λύνονται σε δευτερόλεπτα.

3.4.1. Σύντομη Ιστορική Αναδρομή

Η θεώρηση πολλαπλών κριτηρίων – με άμεσο ή έμμεσο τρόπο- αποτελούσε ανέκαθεν στοιχείο της διαδικασίας λήψης αποφάσεων για τον άνθρωπο. Η πολυκριτηριακή ανάλυση, ως επιστημονική περιοχή, αποτελεί ανάπτυξη και εξέλιξη απλούστερων μεθόδων και τεχνικών που συναντάμε από το παρελθόν. Η σύγκριση κατά ζευγάρια

(pairwise comparison) του Ramon Llull (1232-1316), η μέθοδος βαθμολόγησης (scoring method) του Nicolaus Cusanus (1401-1464) αλλά και τα συστήματα ψηφοφορίας του Marie Jean Antoine Nicolas se Caritat (1743-1794) αποτελούν καθοριστικούς πρόδρομους της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Ουσιαστικά επιστημονικά βήματα του πεδίου αυτού χάραξαν τον 18^{ο} -19^{ο} αιώνα οι Jeremy Bentham και ο Francis Edgeworth στο πλαίσιο των μελετών τους πάνω σε θέματα συμπεριφορικής οικονομικής και κοινωνικής ανάλυσης. Καθοριστικός στην διαμόρφωση των επιστημονικών αρχών της πολυκριτηριακής ανάλυσης ήταν ο Vilfredo Pareto ο οποίος, στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, συμπληρώνοντας το έργο του Edgeworth, εισάγει την έννοια της ωφέλειας (ophelimity) για μία κοινωνία στο σύνολό της. Σύμφωνα με τον Pareto, τα μέλη μίας κοινωνίας απολαμβάνουν μέγιστη ωφέλεια σε μία συγκεκριμένη κατάσταση αν οποιαδήποτε μεταβολή από τη κατάσταση μέγιστης ωφέλειας οδηγεί οπωσδήποτε στην αύξηση της ωφέλειας σε ορισμένα μέλη καθώς και την ταυτόχρονη μείωση της σε κάποια άλλα μέλη. Παράλληλα, η ανάπτυξη της πολυκριτηριακής ανάλυσης επωφελήθηκε και από την εξέλιξη της θεωρίας παιγνίων κυρίως από τους Felix Edouard Justin Emile Borel (1871-1956) και ο John von Neumann (1903-1957). Το 1951 ο Koopmans (Koopmans, 1951) χρησιμοποιεί τον όρο της «αριστοποίησης κατά Pareto» εισάγει την έννοια της ικανότητας των λύσεων σε πολυκριτηριακά προβλήματα. Επίσης το 1951, ο Harold William Kuhn (1925-σήμερα) και ο Albert William Tucker (1905-1995) εισήγαγαν την έννοια του διανύσματος βελτιστοποίησης (vector maximum problem) μαζί με τις ικανές και αναγκαίες συνθήκες ύπαρξης ικανών λύσεων.

Στις δεκαετίες του 60’, ’70 ως αξιόλογοι σταθμοί στην εξέλιξη του υποβάθρου της Πολυκριτήριας Ανάλυσης και του Πολυκριτήριου Μαθηματικού Προγραμματισμού αναφέρονται οι: η ανάπτυξη του Προγραμματισμού Στόχων (goal programming) από τους Charnes και Cooper το 1957 και το 1961, η θεωρία της διανυσματικής βελτιστοποίησης των Kuhn-Tucker, η πολυκριτηριακή θεωρία της χρησιμότητας (multiattribute utility theory) με πιο χαρακτηριστική την εργασία του H. Raiffa (Raiffa, 1969).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970 ο πολυκριτηριακός προγραμματισμός εμφανίζει ιδιαίτερη κινητικότητα κυρίως με τις εργασίες των Geoffrion (Geoffrion A. , 1968), Benayoun κ.ά. (μέθοδος STEM) (Benayoun, Montgolfier, Tergny, & Laritchev, 1971), (Benayoun & Tergny, 1969) και την ανάπτυξη μεθόδων παραγωγής του συνόλου των ικανών λύσεων για προβλήματα Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού από τους Philip (Philip, 1972), Evans και Steuer (Evans & Steuer, 1973) και Zeleny (Zeleny, 1974).

Τη δεκαετία του 1980 και του 1990 υπήρξε μεγάλη εξέλιξη στην ανάπτυξη τεχνικών επίλυσης προβλημάτων Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού, με έμφαση στην ανάπτυξη τεχνικών για την αντιμετώπιση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, όπως η ύπαρξη ακεραίων μεταβλητών, ασαφών ή στοχαστικών παραμέτρων κλπ. Η ραγδαία πρόοδος στον τεχνολογικό τομέα και η εξέλιξη στις δυνατότητες/ισχύ των υπολογιστών επέτρεψαν την εφαρμογή μεθόδων Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού σε προβλήματα μεγαλύτερων διαστάσεων, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες αξιοποίησής τους και σε πραγματικά προβλήματα. Σε αυτό συνέβαλε και η σημαντική βελτίωση στις δυνατότητες αλληλεπίδρασης μεταξύ υπολογιστή – αποφασίζοντα ώστε ο τελευταίος να συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία λήψης της τελικής απόφασης.

3.4.2. Βασικές Έννοιες - Χαρακτηριστικά

Τα προβλήματα του Πολυκριτηριακού προγραμματισμού, είναι χαμηλού βαθμού δόμησης, δηλαδή η ορθολογική λύση δεν καθορίζεται από το ίδιο το πρόβλημα (όπως όταν υπάρχει μόνο ένα κριτήριο απόφασης) αλλά αποτελεί αντικείμενο αναζήτησης με την άμεση εμπλοκή του αποφασίζοντος στη διαδικασία αυτή, ο οποίος εκφράζει τις υποκειμενικές του προτιμήσεις.

Είναι φανερό ότι οι μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού πρέπει να περιλαμβάνουν στοιχεία αλληλεπίδρασης μεταξύ της μεθόδου και του αποφασίζοντος, προκειμένου ο τελευταίος να οδηγήσει την αναζήτηση προς τη σχετικά «βέλτιστη» λύση εκφράζοντας τις προτιμήσεις του. Σε αντίθεση με το Μαθηματικό Προγραμματισμό, οι μέθοδοι Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού δεν έχουν ως αποκλειστικό σκοπό τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης, διότι, όπως αναφέρθηκε, αυτή δεν υφίσταται λόγω της πολυκριτηριακής φύσης του προβλήματος. Οι μέθοδοι Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού επιδιώκουν την παροχή όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών σχετικά με τις υποψήφιες λύσεις (ικανές λύσεις) στον αποφασίζοντα, έτσι ώστε να υποστηριχθεί στη λήψη της δικής του απόφασης για την προτιμότερη λύση. Πρέπει, συγχρόνως, να έχουν τη δυνατότητα να αποτυπώνουν όσο γίνεται καλύτερα τις προτιμήσεις του αποφασίζοντος κατά την διαλογική διαδικασία επιλογής της τελικής λύσης.

Για τους λόγους αυτούς οι ολοκληρωμένες μέθοδοι Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού αποτελούν ουσιαστικά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για την επίλυση προβλημάτων χαμηλού βαθμού δόμησης.

Η διαφοροποίηση μεταξύ των μεθόδων Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού αφορά κυρίως τον **τρόπο υπολογισμού των ικανών λύσεων**, το

πλήθος και τα χαρακτηριστικά των ικανών λύσεων που παράγουν και **τη διαδικασία αλληλεπίδρασης με τον αποφασίζοντα**.

Είναι χαρακτηριστικό ότι στα 40 περίπου χρόνια ζωής του Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού δεν υπήρξε κάποια μέθοδος που να επικράτησε, όπως για παράδειγμα στον Γραμμικό Προγραμματισμό η μέθοδος Simplex. **Η καταλληλότητα της εφαρμογής μιας μεθόδου Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του προβλήματος, τα χαρακτηριστικά του αποφασίζοντος, την εμπειρία του αναλυτή και τα διαθέσιμα υπολογιστικά εργαλεία** (Μαυρωτάς Γ. , 2000).

Στα προβλήματα Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού, επειδή υπάρχουν περισσότερες από μία αλληλοσυγκρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις, δεν υπάρχει μία λύση που να τις αριστοποιεί συγχρόνως όλες. Η έννοια λοιπόν της άριστης λύσης του Μαθηματικού Προγραμματισμού αντικαθίσταται στον Πολυκριτηριακό Γραμμικό Προγραμματισμό από αυτήν της *ικανής λύσης.*

Ικανή λύση (efficient, non-dominated solution):

Μία λύση x' ενός προβλήματος Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού λέγεται **ικανή** (ή κατά Pareto άριστη, ή αποτελεσματική ή πιο σύντομα λύση Pareto)

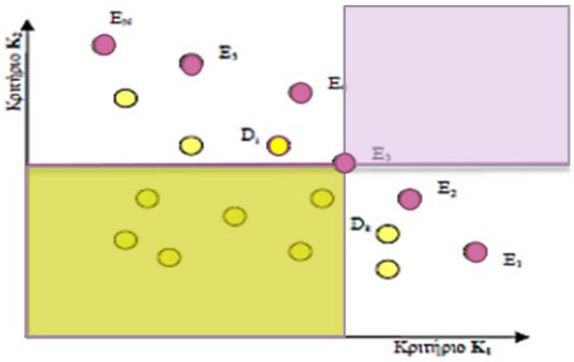
> *αν και μόνο αν $x' \in S$ και δεν υπάρχει άλλη λύση $x \in S$ τέτοια ώστε $f_i(x) \geq f_i(x')$ για κάθε $i=1,2,\ldots,p$ και $f_i(x) > f_i(x')$ για τουλάχιστον ένα i.*

Με απλά λόγια μια κατά Pareto άριστη λύση δεν είναι αντικειμενικά χειρότερη από καμία άλλη εφικτή λύση του προβλήματος. Επίσης, κάθε κατά Pareto άριστη λύση αντιστοιχεί σε ένα μη βελτιώσιμο διάνυσμα στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων, με την έννοια ότι δεν μπορούμε να βελτιώσουμε την τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης χωρίς να χειροτερεύσουμε τουλάχιστον μία από τις άλλες. Ο όρος κατά Pareto άριστη λύση χρησιμοποιείται επίσης για να εκφράσει και το αντίστοιχο διάνυσμα τιμών των κριτηρίων $z' = (f_1(x'), \ldots, f_p(x'))$ στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων R^p.

> *Όταν υπάρχει λύση $x \in S$ τέτοια ώστε $f_i(x) \geq f_i(x')$ για $i = 1, 2, \ldots, p$ με τουλάχιστον μία αυστηρή ανισότητα τότε η λύση x υπερτερεί (dominates) της x' και η x' κυριαρχείται από την x.*

Το σύνολο των κατά Pareto άριστων λύσεων ορίζεται ως το σύνολο Pareto (Pareto set). Όπως είναι κατανοητό, οι λύσεις που ενδιαφέρουν τον αποφασίζοντα στη διαδικασία εύρεσης της προτιμότερης λύσης είναι οι λύσεις που περιλαμβάνονται στο σύνολο Pareto.

Στην περίπτωση προβλήματος με δύο κριτήρια (σχήμα 4.3), ο αποφασίζων θα πρέπει να αναζητήσει τη λύση του μεταξύ των επιλογών που αποτελούν τις αποτελεσματικές λύσεις του προβλήματος.



Σχήμα 3. 2 Ικανές (E_i) και κυριαρχούμενες λύσεις (D_i) σε πρόβλημα 2 κριτηρίων

Πηγή: *Σίσκος(2008)*

Υποθέτοντας ότι επιδιώκεται η μεγιστοποίηση των επιδόσεων και στα δύο κριτήρια, K_1 και K_2, η λύση E_3 υπερέχει των λύσεων E_2 και E_1, ως προς το κριτήριο K_2, ενώ είναι κατώτερη ως προς το κριτήριο K_1. Αντίστοιχα, σε σχέση με τις επιλογές E_4, E_5 και E_N, η λύση E_3 υπερέχει ως προς το κριτήριο K_1, ενώ είναι κατώτερη ως προς το κριτήριο K_2. Επομένως, κάθε μία από τις λύσεις E_i, αποτελεί εν δυνάμει μία πιθανή λύση του προβλήματος ή μία κατά Pareto άριστη λύση. Η επιλογή μίας λύσης E_i έναντι μίας άλλης ικανής λύσης εξαρτάται από τη σχετική σημαντικότητα που αποδίδεται στα κριτήρια K_1 και K_2. Αντίθετα, ο αποφασίζων δεν έχει λόγο να επιλέξει ή να εξετάσει μία κυριαρχούμενη λύση D_i, καθώς υπάρχει τουλάχιστον μία ικανή λύση E_i, που υπερέχει και ως προς τα δύο κριτήρια αξιολόγησης.

Αντικειμενικός σκοπός της επίλυσης των προβλημάτων Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού είναι, αρχικά, ο προσδιορισμός των ικανών λύσεων και στη συνέχεια η υποστήριξη του αποφασίζοντος ώστε να επιλέξει εκείνη την ικανή λύση που εκφράζει καλύτερα τις προτιμήσεις του. **Απαραίτητη προϋπόθεση για να είναι μία λύση ενός προβλήματος Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού αποδεκτή είναι να πρόκειται για ικανή λύση.**

Τελική ή σχετικά βέλτιστη λύση (final or best compromise solution):

Η ικανή εκείνη λύση που τελικά επιλέγει από το σύνολο των ικανών λύσεων ο αποφασίζων, λέγεται τελική ή σχετικά βέλτιστη λύση. Ο όρος «σχετικά» σημαίνει ακριβώς ότι αποτελεί υποκειμενική επιλογή του αποφασίζοντος σε αντίθεση με τη βέλτιστη λύση σε ένα πρόβλημα Μαθηματικού Προγραμματισμού που είναι αντικειμενικά προσδιοριζόμενη.

Ικανή ακραία λύση (efficient extreme solution):

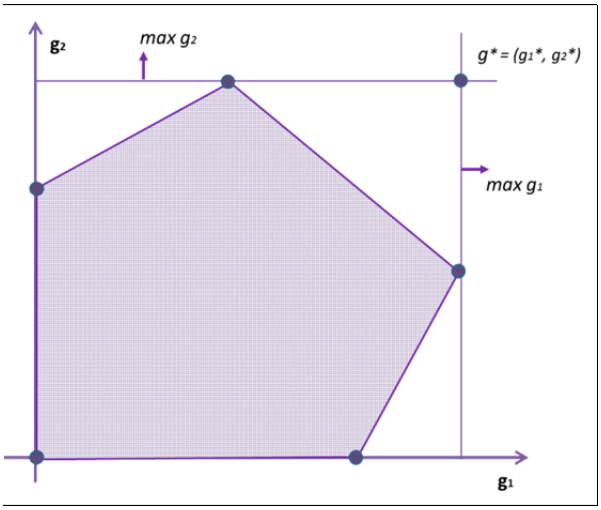
Μια ικανή λύση ενός προβλήματος Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού που αντιστοιχεί σε ένα ακραίο σημείο του εφικτού χωρίου του προβλήματος (κορυφή) λέγεται ικανή ακραία λύση.

Διάνυσμα τιμών των κριτηρίων (criterion vector):

Κάθε λύση **x** = (x_1, x_2, …,x_n) που ανήκει στο χώρο των μεταβλητών απόφασης R_n απεικονίζεται μέσω των αντικειμενικών συναρτήσεων στο χώρο των κριτηρίων R_p σ' ένα διάνυσμα (σημείο) **z** = (z_1, z_2, …, z_p) όπου z_1=$\mathbf{c_{1x}}$, z_2=$\mathbf{c_{2x}}$ κλπ. Το διάνυσμα **z** ορίζεται ως διάνυσμα τιμών των κριτηρίων.

Ιδεώδες σημείο (ideal point):

Ιδεώδες σημείο (ή ιδεώδες διάνυσμα, ideal vector) στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων R_p, ορίζεται το σημείο εκείνο που έχει ως συντεταγμένες τα άριστα των αντικειμενικών συναρτήσεων όπως αυτά προκύπτουν από τις μεμονωμένες αριστοποιήσεις. Φυσικά δεν πρόκειται για δυνατή λύση, αφού το σημείο g* βρίσκεται έξω από το επιτρεπτό σύνολο τιμών g_i. (δεν υπάρχει εφικτή λύση που να αριστοποιεί συγχρόνως όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις). Συχνά αναφέρεται και ως σημείο ουτοπίας (utopia point). Το ιδεώδες σημείο χρησιμοποιείται συνήθως ως σημείο αναφοράς για να διερευνηθεί η προσέγγιση σε αυτό των ικανών λύσεων.



Σχήμα 3. 3 Ο γραμμοσκιασμένος χώρος είναι η απεικόνιση του συνόλου S των δυνατών λύσεων

Πηγή: Σίσκος (1998)

Εναλλακτικές άριστες λύσεις (alternative optima):

Όταν η άριστη τιμή z* μιας αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει από διαφορετικές λύσεις x_{1*}, x_{2*}, … x_{k*} τότε λέμε ότι η συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση έχει k εναλλακτικές άριστες λύσεις.

Πίνακας πληρωμών ή πίνακας τιμών (payoff table):

Μία βασική έννοια, αλλά και αναπαράσταση του ανταγωνισμού μεταξύ των πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, είναι ο Πίνακας Πληρωμών ή Κερδών (pay-off table). Συνίσταται στη βελτιστοποίηση καθεμιάς χωριστά αντικειμενικής συνάρτησης: $g_i(x)$, i= 1, 2, …, n και την αντικατάσταση της εκάστοτε βέλτιστης λύσης στις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις.

Τα στοιχεία των ενεργειών αυτών, μεταφέρονται σε έναν πίνακα, ο οποίος περιέχει σε κάθε γραμμή τη βελτιστοποίηση που πραγματοποιείται, τις τιμές της βέλτιστης λύσης πάνω σε όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις και τις τιμές των μεταβλητών απόφασης, εφόσον το πλήθος τους είναι μικρό, αλλιώς παραλείπονται (πίνακας 3.1).

Ο πίνακας πληρωμών παρέχει πολύ χρήσιμα στοιχεία, τόσο για την ποιότητα των λύσεων στις οποίες οδηγούν οι αντικειμενικές συναρτήσεις, όσο και για το ανταγωνιστικό καθεστώς που υπάρχει ανάμεσα τους. Όσον αφορά αυτό το τελευταίο, αρκεί να παρατηρήσει κανείς μια-μια τις στήλες του τετραγωνικού πίνακα (g_{ij}) : οι συναρτήσεις g_j και g_k θεωρούνται 'ανταγωνιστικές' όταν οι διαφορές (g_{ij}–g_{ik}) είναι συστηματικά υψηλές για διάφορους δείκτες συναρτήσεων i, ενώ θεωρούνται μη ανταγωνιστικές όταν οι διαφορές είναι μικρές. Στη διαγώνιο του πίνακα τιμών μπορούν να διαβαστούν οι συντεταγμένες του ιδεώδους σημείου (Σίσκος Ι. , 1998).

Τύπος Λύσης	g_1	g_2	…	g_i	…	g_n	*αντιστοιχούσα λύση*			
max $g_1(x)$	g_1^*	g_{12}	…	g_{1i}	…	g_{1n}	x_1^1	x_2^1	…	x_i^1
max $g_2(x)$	g_{21}^*	g_2^*	…	g_{2i}	…	g_{2n}	x_1^2	x_2^2	…	x_i^2
…			…		,,,					
max $g_i(x)$	g_{i1}	g_{i2}	…	g_i^*	…	g_{in}	x_1^i	x_2^i	…	x_i^i
…			…		…					
max $g_n(x)$	g_{n1}	g_{n2}	…	g_{ni}	…	g_n^*	x_1^n	x_2^n	…	x_i^n

Πίνακας 3. 1 Πίνακας Πληρωμών

Πηγή: (Σίσκος Ι. , 1998)

3.4.3. Πολυκριτηριακός Γραμμικός Προγραμματισμός

Ο πολυστοχικός γραμμικός προγραμματισμός ή αλλιώς πολυκριτήριος ή πολυκριτηριακός γραμμικός προγραμματισμός (ΠΓΠ) αποτελεί επέκταση αλλά και αναπόσπαστο κομμάτι του γραμμικού προγραμματισμού και η συνεισφορά του στην επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης κρίνεται σημαντική από την κοινότητα της επιχειρησιακής έρευνας. Ο ΠΓΠ αναπτύχθηκε αλματωδώς μέσα στη δεκαετία του ’70 και το χαρακτηριστικό του είναι η ύπαρξη πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων προς βελτιστοποίηση. Χαρακτηριστικό επίσης του ΠΓΠ είναι ότι δεν αμφισβητεί ως φιλοσοφία κανένα αποτέλεσμα του κλασικού ΓΠ αλλά έρχεται για να εμπλουτίσει το δεύτερο με περισσότερα αποτελέσματα (Σίσκος Ι. , 1998). Έτσι, εξετάζοντας ένα πρόβλημα πολυκριτηριακά, στην ουσία το εξετάζουμε και το βελτιστοποιούμε πιο σφαιρικά και ρεαλιστικά, λαμβάνοντας υπόψη περισσότερα του ενός κριτήρια αξιολόγησης.

Ένα ΠΓΠ μεγιστοποίησης γράφεται και μοντελοποιείται ως εξής:

Να μεγιστοποιηθούν οι n παρακάτω αντικειμενικές συναρτήσεις g_i:

$g_1(x) = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \dots c_{1k}x_k$

$g_2(x) = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + \dots c_{2k}x_k$

……

$g_n(x) = c_{n1}x_1 + c_{n2}x_2 + \dots c_{nk}x_k$

Υπό τους περιορισμούς:

$x \in A = \{ x \in R^k / Ax \leq b, x \geq 0 \}$

Όπου *A* η επιτρεπτή περιοχή των λύσεων που οριοθετείται από το σύστημα των ανισοεξισωτικών περιορισμών και A, x και b είναι αντίστοιχα μήτρες διαστάσεων *m* x *k*, *k* x 1 και *m* x 1.

Στα προβλήματα ΠΓΠ, επειδή υπάρχουν περισσότερες από μία αλληλοσυγκρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις, δεν υπάρχει μία λύση που να τις αριστοποιεί συγχρόνως όλες. Η έννοια λοιπόν της άριστης λύσης του ΓΠ αντικαθίσταται στον ΠΓΠ από αυτήν της ικανής λύσης (efficient, non-dominated solution).

Ικανή λύση:

Μία λύση x’ ενός προβλήματος ΠΚΓΠ λέγεται ικανή (ή κατά Pareto άριστη, ή αποτελεσματική) αν και μόνο αν $x' \in S$ και δεν υπάρχει άλλη λύση $x \in S$ τέτοια ώστε $c_i x \geq c_i x'$ για κάθε i = 1, 2, …, p και $c_i x > c_i x'$ για τουλάχιστον ένα i. Κάθε ικανή λύση αντιστοιχεί σε ένα μη βελτιώσιμο διάνυσμα στο χώρο των αντικειμενικών

συναρτήσεων, με την έννοια ότι δεν μπορούμε να βελτιώσουμε την τιμή μίας αντικειμενικής συνάρτησης χωρίς να χειροτερεύσουμε τουλάχιστον μία από τις άλλες.

Αντικειμενικός σκοπός της επίλυσης των προβλημάτων ΠΓΠ είναι αρχικά ο προσδιορισμός των ικανών λύσεων και στη συνέχεια η υποστήριξη του αποφασίζοντος ώστε να επιλέξει εκείνη την ικανή λύση που εκφράζει καλύτερα τις προτιμήσεις του. Απαραίτητη προϋπόθεση για να είναι μία λύση ενός προβλήματος ΠΓΠ αποδεκτή είναι να πρόκειται για ικανή λύση.

Οι ***μεταβλητές απόφασης*** εκφράζουν τα μεγέθη εκείνα του προβλήματος για τα οποία πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές τους. Τα ήδη γνωστά μεγέθη του προβλήματος (μήτρα A, διανύσματα b και c_i) ονομάζονται και ***παράμετροι*** του προβλήματος. *Οι* ***αντικειμενικές συναρτήσεις*** είναι συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης, των οποίων επιδιώκεται η βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση). *Οι* ***περιορισμοί*** είναι οι διάφορες σχέσεις (ισότητες ή ανισότητες '≤' και '≥') που πρέπει να πληρούν οι μεταβλητές απόφασης σύμφωνα με το πρόβλημα και οριοθετούν το εφικτό χωρίο *S*. Με τον όρο ***λύση*** ενός προβλήματος Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού ή Γραμμικού Προγραμματισμού, εννοείται ο συνδυασμός των τιμών που λαμβάνουν οι μεταβλητές απόφασης. Αν η λύση αυτή ανήκει στο *S* (οι τιμές των μεταβλητών απόφασης ικανοποιούν τους περιορισμούς) τότε πρόκειται για ***εφικτή λύση*** του προβλήματος αλλιώς χαρακτηρίζεται ως ***μη εφικτή λύση***. Οι παραπάνω ορισμοί εξηγούνται αναλυτικά παρακάτω:

Μεταβλητές απόφασης:

Εκφράζουν ουσιαστικά τους αγνώστους του προβλήματος και είναι οι μεταβλητές που ελέγχει ο αποφασίζων, δηλαδή εκείνες των οποίων τις τιμές μπορεί να καθορίσει. Το σύνολο των μεταβλητών απόφασης αποτελεί ουσιαστικά το αντικείμενο της διαδικασίας λήψης απόφασης. Η διαδικασία αριστοποίησης αποσκοπεί στο να βρεθούν οι τιμές εκείνες για τις μεταβλητές απόφασης οι οποίες βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση.

Αντικειμενική συνάρτηση:

Αποτελεί τη μαθηματική σχέση των μεταβλητών απόφασης που εκφράζει το κριτήριο βελτιστοποίησης. Επιδιώκεται είτε η ελαχιστοποίηση είτε η μεγιστοποίησή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Στα προβλήματα Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού υπάρχουν περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις (κριτήρια απόφασης), γι αυτό και τα προβλήματα αυτά αναφέρονται και ως προβλήματα διανυσματικής βελτιστοποίησης (vector optimization).

Περιορισμοί:

Είναι οι μαθηματικές σχέσεις που καθορίζουν τις τιμές που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές απόφασης στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Καθορίζουν δηλαδή το πεδίο ορισμού (εφικτό χωρίο) του προβλήματος. Οι περιορισμοί μπορεί να είναι ισότητες ή ανισότητες.

Παράμετροι:

Είναι τα εξωγενώς οριζόμενα (εκτός του ελέγχου του αποφασίζοντος) μεγέθη του προβλήματος. Πρόκειται ουσιαστικά για τους γνωστούς όρους του προβλήματος οι οποίοι έχουν σταθερή τιμή στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Συνήθως είναι συντελεστές των μεταβλητών απόφασης ή εκφράζουν ποσότητες απαραίτητες στη διαμόρφωση των περιορισμών (π.χ. την απαιτούμενη ζήτηση μιας δραστηριότητας).

Σε αντίθεση με το Γραμμικό Προγραμματισμό, όπου η διαδικασία επίλυσης επικεντρώνεται στην εξέταση του χώρου των μεταβλητών απόφασης R^n, στον Πολυκριτηριακό Γραμμικό Προγραμματισμό έχει ιδιαίτερη σημασία ο χώρος των αντικειμενικών συναρτήσεων R^p. Αυτό συμβαίνει διότι η διαδικασία επίλυσης στα προβλήματα του Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού αφορά την εξέταση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων που προκύπτουν από κάθε λύση. Συνεπώς, είναι αρκετά βοηθητική η απεικόνιση του προβλήματος στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων R^p αντί του χώρου των μεταβλητών απόφασης R^n. Εξάλλου, το p, δηλαδή ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων, είναι συνήθως πολύ μικρότερο του n που εκφράζει το πλήθος των μεταβλητών απόφασης, κι έτσι η γραφική απεικόνιση της κατάστασης του προβλήματος είναι πιο εύκολη.

Ενώ στον απλό ΓΠ καθιερώθηκε ως βασική μέθοδος επίλυσης η μέθοδος Simplex, που ανακαλύφθηκε πριν από 50 σχεδόν χρόνια από τον Dantzig, στον ΠΓΠ δεν υπάρχει μία τεχνική που να δείχνει ότι επικράτησε με το πέρασμα των χρόνων. Αν και το βασικό υπολογιστικό υπόβαθρο όλων των τεχνικών ΠΓΠ απορρέει από τη μέθοδο Simplex (με τις διάφορες παραλλαγές της), εν τούτοις οι διάφορες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί διαφέρουν μεταξύ τους, (Μαυρωτάς Γ. , 2000). Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται συνήθως τόσο από τα χαρακτηριστικά του προβλήματος (μέγεθος, είδος μεταβλητών κλπ), όσο και από τις απαιτήσεις και προτιμήσεις του αποφασίζοντος ο οποίος συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία επίλυσης και εύρεσης της τελικής λύσης (Evans G. , 1984), (Shin & Ravindrav, 1991).

Η δυσκολία μεγαλώνει σε προβλήματα Πολυκριτηριακού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού.

3.4.4. Πολυκριτηριακός Ακέραιος Προγραμματισμός

Οι μεταβλητές απόφασης στα προβλήματα Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού μπορεί να είναι αποκλειστικά συνεχείς ή αποκλειστικά ακέραιες ή συνεχείς και ακέραιες μαζί. Στην περίπτωση που είναι αποκλειστικά ακέραιες, το αντίστοιχο πρόβλημα ανήκει στον Ακέραιο Πολυκριτηριακό Γραμμικό Προγραμματισμό. Αν τα προβλήματα περιέχουν και συνεχείς μεταβλητές τότε αναφέρονται ως προβλήματα Μικτού Ακέραιου Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed Integer MOLP).

Ο Μικτός Ακέραιος Πολυκριτηριακός Γραμμικός Προγραμματισμός είναι μία σχετικά νέα και αρκετά ενδιαφέρουσα περιοχή του Μαθηματικού Προγραμματισμού. Οι πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις μαζί με τη δυνατότητα εισαγωγής ακεραίων μεταβλητών προσφέρουν μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση των προβλημάτων και των συνθηκών λήψης απόφασης. Αρκετά γνωστά προβλήματα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, όπως το πρόβλημα της επέκτασης δυναμικότητας, της χωροθέτησης δραστηριοτήτων, του προγραμματισμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της επιλογής δημοσίων επενδύσεων, που χρησιμοποιούν δυαδικές ή ακέραιες μεταβλητές σε μοντέλα Γραμμικού Προγραμματισμού, θα εξέφραζαν πιο πιστά τη διαδικασία λήψης απόφασης αν περιείχαν περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις. Επίσης ο Μικτός Ακέραιος Πολυκριτηριακός Γραμμικός Προγραμματισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν επιδιώκεται η ενσωμάτωση σ’ ένα πρόβλημα Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού διακριτών μεγεθών (λογικές συνθήκες, σταθερά κόστη, οικονομίες κλίμακας, διαζευκτικούς περιορισμούς κλπ.), οπότε ο απλός Πολυκριτηριακός Γραμμικός Προγραμματισμός δεν επαρκεί. Τα προβλήματα MOLP αποτελούν ακόμα και σήμερα πρόκληση σε θεωρητικό ερευνητικό επίπεδο, καθώς, ακόμα και οι μονο-κριτηριακές εκδοχές τους εμπίπτουν στα υπολογιστικά δυσεπίλυτα προβλήματα από πλευράς πολυπλοκότητας (Özlen & Azizog, 2009).

Όσον αφορά τον Πολυκριτηριακό Ακέραιο Προγραμματισμό, προβλήματα όπου συναντάμε την εφαρμογή του και όπου η επιλογή των έργων και των δράσεων γίνεται με βάση διάφορα κριτήρια μετατρέποντας το πρόβλημα σε πολυκριτηριακό είναι τα παρακάτω (Σίσκος Ι. , 2008):

- Σχεδιασμός παραγωγής
- Χρονοπρογραμματισμός παραγωγής
- Ενεργειακός σχεδιασμός

- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Τηλεπικοινωνιακά συστήματα
- Η επιλογή προμηθευτών
- Η χωροθέτηση εγκαταστάσεων
- Ο καθορισμός διατροφής-δίαιτας
- Το πρόβλημα μεταφοράς
- Η κατανομή προσωπικού
- Η απόρριψη αποβλήτων

Αναλογικά με την έρευνα που έχει γίνει για τον Πολυκριτηριακό Γραμμικό Προγραμματισμό η έρευνα που έχει γίνει για τον Ακέραιο Πολυκριτηριακό Γραμμικό Προγραμματισμό είναι αρκετά περιορισμένη. Αν και η συνδυαστική αριστοποίηση, στην οποία ανήκει και ο Πολυκριτηριακός Γραμμικός Προγραμματισμός με ακέραιες μεταβλητές, αποτελεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την αντιμετώπιση πολλών πραγματικών προβλημάτων, ο συνδυασμός πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων και ακεραίων μεταβλητών δεν έχει βρει την ανάλογη ανταπόκριση τόσο στην ανάπτυξη μεθόδων όσο και στις εφαρμογές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην πολυπλοκότητα και δυσκολία επίλυσης αυτών των προβλημάτων.

Ακόμα και οι περιπτώσεις του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού είναι υπολογιστικά δύσκολα προβλήματα. *Μια από τις προϋποθέσεις εφαρμογής των μεθόδων για επίλυση προβλημάτων συνεχούς Γ.Π. είναι η διαιρετότητα των μεταβλητών απόφασης.* Σε ένα κλασικό (συνεχές) γραμμικό πρόγραμμα, οι μεταβλητές μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε πραγματική τιμή. Υπάρχει όμως σημαντικός αριθμός προβλημάτων Γ.Π. στα οποία όλες οι μεταβλητές, ή μερικές από αυτές, υποχρεούνται να πάρουν μόνο ακέραιες τιμές. Τέτοιες μεταβλητές είναι, για παράδειγμα, αυτές που δηλώνουν αριθμό εργατών, αριθμό εργοστασιακών μονάδων, αποφάσεις χρηματοδότησης ή μη χρηματοδότησης ενός έργου, κ.λπ.

Μια απλή μέθοδος επίτευξης «ακέραιης λύσης» σε ένα πρόβλημα ακέραιου Γ.Π. συνίσταται στο να επιλυθεί αυτό με τη συνηθισμένη μέθοδο simplex για συνεχή Γ.Π. και εν συνεχεία, να στρογγυλευθούν στον πλησιέστερο ακέραιο οι τιμές των μεταβλητών οι οποίες παίρνουν ρητές τιμές (μη ακέραιες). Μία τέτοια διαδικασία είναι πολύ επικίνδυνη, όσο απλή κι αν φαίνεται, γιατί μπορεί να καταλήξει είτε σε υποβέλτιστες λύσεις, κατώτερες δηλαδή της πραγματικά βέλτιστης ακέραιης λύσης, είτε σε λύσεις μη πραγματοποιήσιμες, που παραβιάζουν δηλαδή τουλάχιστον έναν από τους περιορισμούς του προβλήματος.

Σε περιπτώσεις που οι μεταβλητές απόφασης ενός Γ.Π. είναι φραγμένες, παίρνουν δηλαδή περιορισμένο αριθμό ακέραιων τιμών, οι ιδεώδεις μέθοδοι επίλυσης ακέραιων Γ.Π. είναι οι μέθοδοι τύπου διακλάδωσης και περιορισμού οι οποίες

στηρίζονται σε μια έμμεση απαρίθμηση των δυνατών ακέραιων λύσεων που επιδέχεται το πρόβλημα. Φυσικά, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι ακέραιου Γ.Π., για παράδειγμα οι δυο μέθοδοι των τεμνόντων επιπέδων του Gomory (cutting plane methods). Για περισσότερη εμβάθυνση, ο αναγνώστης παραπέμπεται στη βιβλιογραφία, ενδεικτικά (Gass, 2003), (Garfunkel & Nemhauser, 1972), (Taha, 1975), (Σίσκος Ι. , 1998).

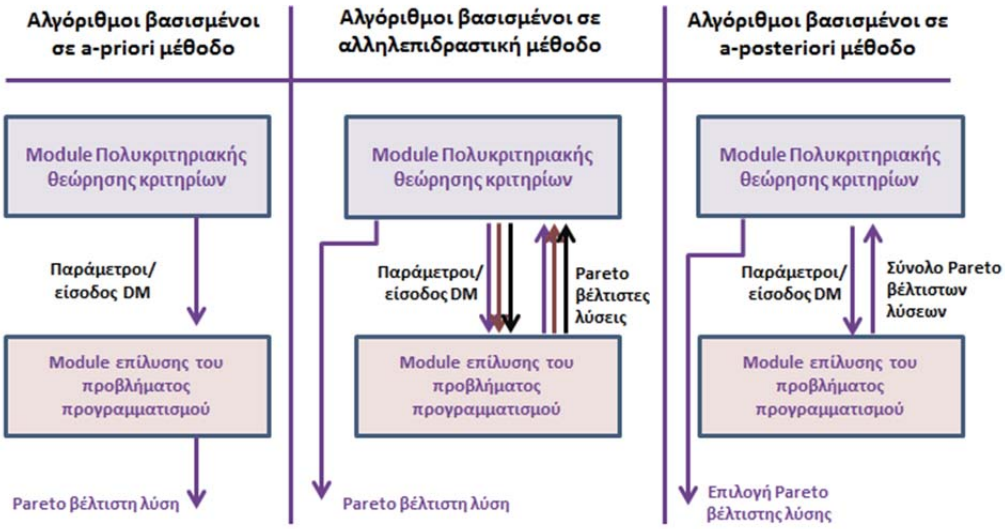
Επιγραμματικά, μέθοδοι για την επίλυση προβλημάτων ακέραιου και μικτού ακέραιου προγραμματισμού παρουσιάζονται, επίσης, στο κεφάλαιο 2.

3.4. Μέθοδοι επίλυσης πολυκριτήριων προβλημάτων Γραμμικού και Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού

Ενώ στον απλό Γραμμικό Προγραμματισμό (ΓΠ) και στον απλό Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό (ΑΓΠ) καθιερώθηκαν ως βασικές μέθοδοι επίλυσης η μέθοδος Simplex, η μέθοδος Διακλάδωση και Περιορισμού αλλά και προσεγγιστικές μέθοδοι που αναφέρονται ενδεικτικά στο Κεφάλαιο 2, στις πολυκριτήριες εκδοχές των προβλημάτων αυτών δεν έχει επικρατήσει μέχρι σήμερα καμία τεχνική. Ειδικά για την περίπτωση των προβλημάτων πολυκριτηριακών ΓΠ, αν και το βασικό υπολογιστικό υπόβαθρο όλων των τεχνικών πολυκριτηριακού ΓΠ απορρέει από τη μέθοδο Simplex (με τις διάφορες παραλλαγές της), εν τούτοις οι διάφορες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί διαφέρουν μεταξύ τους (Μαυρωτάς Γ. , 2000). Οι ιδιαιτερότητες και η δυσκολία μεγαλώνει σε προβλήματα Πολυκριτηριακού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων προκύπτουν κυρίως από τους διαφορετικούς τρόπους εμπλοκής του αποφασίζοντος στη διαδικασία επίλυσης και από τη διαφορετική υποστήριξη αποφάσεων που παρέχουν.

Στο πλαίσιο αυτό, μπορούμε να διακρίνουμε τις μεθόδους ανάλογα με το στάδιο στο οποίο ο αποφασίζων συμμετέχει παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τις προτιμήσεις του και την κατά περίπτωση σχετικά με την επιθυμητή κατεύθυνση αναζήτησης λύσης. Ο αποφασίζων μπορεί να συμμετέχει είτε πριν την έναρξη της διαδικασίας υπολογισμού λύσεων, είτε κατά την διαδικασία υπολογισμού λύσεων είτε μετά το τέλος της διαδικασίας υπολογισμού λύσεων (Hwang & Masud, 1979), (Evans G. , 1984).

Το ακόλουθο σχήμα αποτυπώνει την φιλοσοφία των αντίστοιχων αλγοριθμικών μεθόδων, ως προς τον ρόλο του αποφασίζοντα στα στάδια επίλυσης ενός πολυκριτηριακού προβλήματος:



Σχήμα 3. 4 Ρόλος και εμπλοκή του αποφασίζοντος στα στάδια επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων

Στην συνέχεια παρουσιάζονται εν συντομία οι τρεις αυτές προσεγγίσεις πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού:

- **Έκφραση προτίμησης πριν την επίλυση (a priori)**

  Αφορά στις μεθόδους στις οποίες ο αποφασίζων είναι σε θέση να καθορίσει τις προτιμήσεις του στην αρχή της διαδικασίας επίλυσης. Αυτό γίνεται είτε καθορίζοντας a priori τη σημαντικότητα των κριτηρίων είτε καθορίζοντας κάποιες τιμές – στόχους για τα κριτήρια. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν η δημοφιλής μέθοδος των σταθμισμένων βαρών (weighted sums approach), η μέθοδος του προγραμματισμού στόχων (goal programming), αλλά και η λεξικογραφική βελτιστοποίηση.

- **Έκφραση προτίμησης κατά τη διάρκεια της επίλυσης (interactive)**

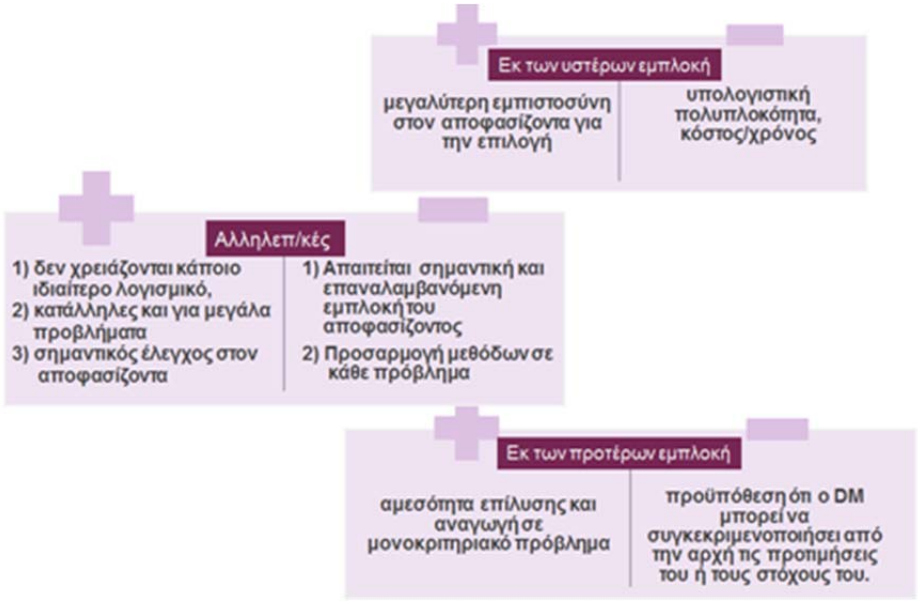
  Αφορά στις μεθόδους που αλληλεπιδρούν με τον αποφασίζοντα κατά την διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης. Οι μέθοδοι αυτές αποτελούνται από εναλλασσόμενα στάδια συνεργασίας και ανταλλαγής πληροφοριών με τον αποφασίζοντα και στάδια υπολογισμών από τον αναλυτή. Πρόκειται επαναληπτικές διαδικασίες όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ αποφασίζοντα και μεθόδου συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί το ορισμένο σε συνεργασία με τον αποφασίζοντα κριτήριο τερματισμού και επιλογής της τελικά βέλτιστης λύσης.

  Χαρακτηριστικές μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι η μέθοδος STEM (Step Method), (Benayoun, Montgolfier, Tergny, & Laritchev, 1971), η μέθοδος Zionts-Wallenius, (Zionts & Wallenius, 1976), (Zionts & Wallenius, 1983) και η μέθοδος Interval Criterion Weights, (Steuer R. , 1977), κ.α.

- **Έκφραση προτίμησης μετά την επίλυση (a posteriori)**

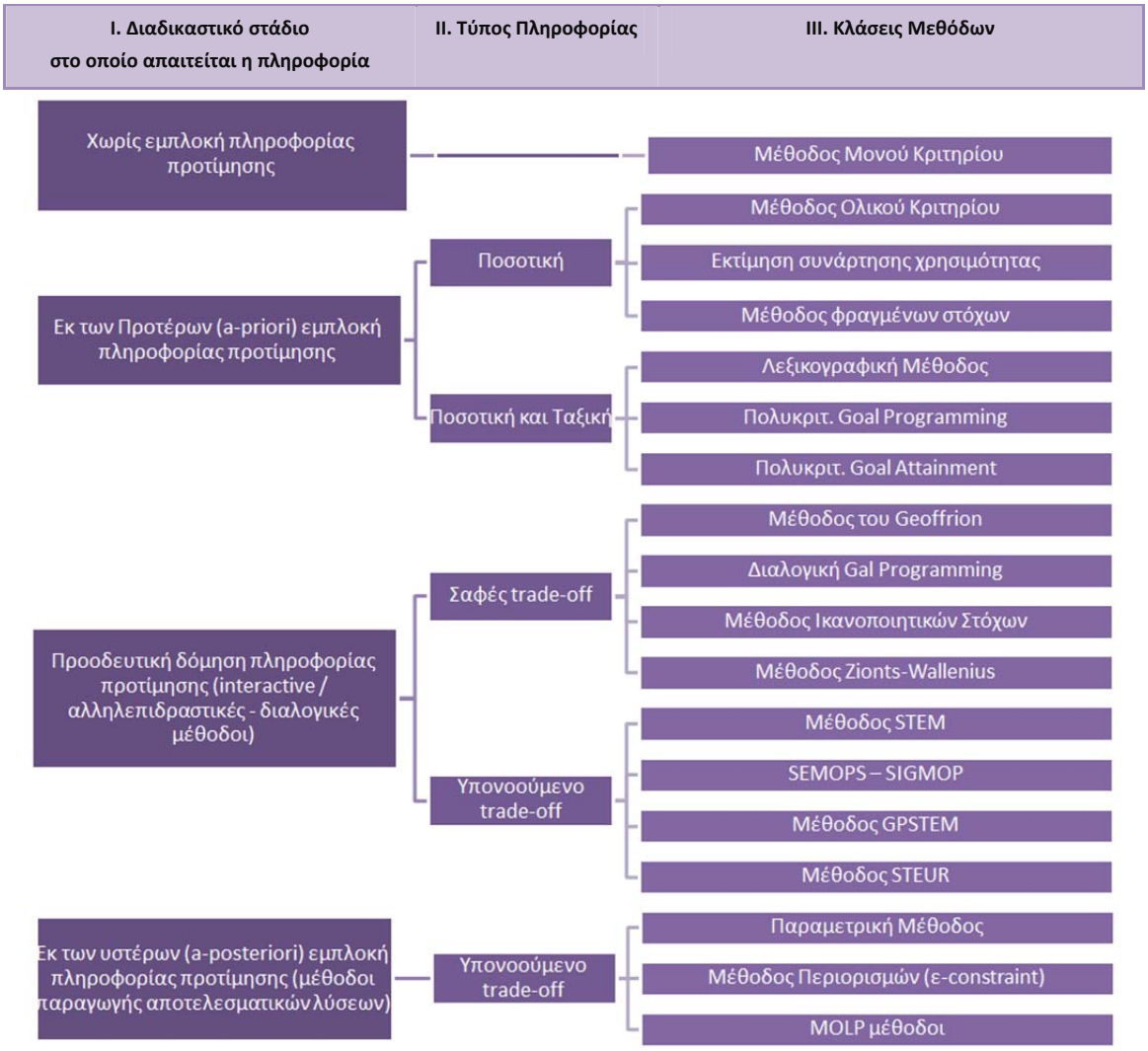
  Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι λεγόμενες *μέθοδοι παραγωγής* (generation methods) των ικανών λύσεων. Οι μέθοδοι αυτοί έχουν ως αντικείμενο τον υπολογισμό - παραγωγή του συνόλου (Pareto front) ή κάποιου αντιπροσωπευτικού υποσυνόλου των ικανών λύσεων. Στην συνέχεια ο αποφασίζων καλείται να αξιολογήσει τις λύσεις που έχουν παραχθεί και να επιλέξει την προτιμότερη σύμφωνα με την προτιμησιακή του στρατηγική. Τέτοιες μέθοδοι είναι η παραμετρική μέθοδος των συντελεστών στάθμισης (weighting method), η μέθοδος των περιορισμών (e-constraint method) και οι μέθοδοι πολυκριτηριακής Simplex που παραλλάσουν τη μέθοδο Simplex ώστε να μπορεί αν διαχειριστεί περισσότερες της μίας αντικειμενικές συναρτήσεις.

Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν εν γένει τις προσεγγίσεις της κάθε κατηγορίας παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3. 5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα ανάλογα με το στάδιο εμπλοκής του αποφασίζοντος

Το παρακάτω σχήμα συνοψίζει την τυπολογία των μεθόδων πολυκριτήριου μαθηματικού προγραμματισμού, ταξινομημένων ανάλογα με το στάδιο στο οποίο εμπλέκεται ο αποφασίζων στη διαδικασία λήψης απόφασης. Στο σχήμα δεν γίνεται εξαντλητική αλλά αντιπροσωπευτική/ ενδεικτική παράθεση μεθόδων σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 3. 6 Τυπολογία μεθόδων Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού
(Hwang C.-L. , Masud, Paidy, & Yoon, 1979), (Goicoechea, Hansen, & Duckstein, 1982) (Zeleny, 1982)

Ακολούθως παρουσιάζονται ενδεικτικά οι πιο σημαντικές μέθοδοι κάθε κατηγορίας.

3.5.1 Μέθοδοι επίλυσης με έκφραση προτίμησης εκ των προτέρων

Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι μέθοδοι Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού στις οποίες ο αποφασίζων είναι σε θέση να καθορίσει ρητά τις προτιμήσεις του **<u>πριν τη διαδικασία επίλυσης</u>**.

3.5.1.1 Η μέθοδος Λεξικογραφικής Βελτιστοποίησης

Πρόκειται μια μέθοδο που προβλέπει την σταδιακή βελτιστοποίηση ενός πολυκριτηριακού προβλήματος Μαθηματικού Προγραμματισμού, ακολουθώντας την ιεράρχηση των κριτηρίων/αντικειμενικών συναρτήσεων που έχει ορίσει ο αποφασίζων.

Η διαδικασία έχει ως ακολούθως:

1. Ιεράρχηση από τον αποφασίζοντα των n κριτηρίων από το σημαντικότερο στο υποδεέστερο: g_1, g_2, …, g_n.
2. Βελτιστοποίηση του σημαντικότερου κριτηρίου g_1 πάνω στο αρχικό σύνολο A, και έστω $A_1 \subseteq A$ το σύνολο των βέλτιστων λύσεων για το πρώτο στην ιεραρχία κριτήριο (i=1).
3. Ορίζουμε και υπολογίζουμε $A_i \subseteq A_{i-1} \subseteq A_{i-2} \subseteq \cdots \subseteq A_1 \subseteq A$ το σύνολο των βέλτιστων λύσεων του i-οστού στην ιεραρχία κριτηρίου (έστω προς μεγιστοποίηση) πάνω στο σύνολο A_{i-1}([max] $g_i(x)$, x∈ A_{i-1}

Ήτοι, αρχικά βελτιστοποιείται το πρόβλημα ως προς το πρώτο (πιο σημαντικό) κριτήριο. Στην περίπτωση που προκύπτουν εναλλακτικές βέλτιστες λύσεις, αναζητούνται εκείνες που βελτιστοποιούν το δεύτερο κριτήριο. Στην συνέχεια αναζητούνται οι λύσεις που με σταθερές τις τιμές του πρώτου και του δεύτερου κριτηρίου βελτιστοποιούν το κριτήριο κ.ο.κ. μέχρι το τελευταίο κριτήριο.

Στην περίπτωση που σε οποιοδήποτε στάδιο δεν υπάρχουν εναλλακτικά βέλτιστα τότε το αποτέλεσμα της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης ταυτίζεται με αυτό της απλής βελτιστοποίησης.

Επισημαίνεται ότι θεωρείται ότι η μέθοδος υποβαθμίζει τον πολυκριτηριακό χαρακτήρα του προβλήματος, καθώς πολύ καθοριστικός είναι ο ορισμός του πρώτου στην ιεραρχία κριτηρίου.

Εφαρμογές της λεξικογραφικής μεθόδου αναφέρουν ενδεικτικά οι (Prats, Puig, Joseba, & Fatiha, 2010), (Punnen & Aneja, 2004), (Teodorovića & Stojkovića, 1990), (Sawik T. , 2007), (Sawik T. , 1998).

3.5.1.2 Η μέθοδος Ολικού Κριτηρίου

Ως Μέθοδος Ολικού Κριτηρίου (Global criterion method) νοείται κάθε μέθοδος, που αποσκοπεί στη σύνθεση των αντικειμενικών συναρτήσεων σε μία, μετατρέποντας τον Πολυκριτηριακό Μαθηματικό Προγραμματισμό σε πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Η νέα συνάρτηση είναι μία συνάρτηση αξιών (value function):

$u(x) = u\,[(g_1(x), g_2(x), ..., g_n(x)]$

Πέραν των τεχνικών δυσκολιών που ενδέχεται να θέσει το νέο πρόβλημα:

[max] u(x) υπό τον περιορισμό x € S, δεδομένου ότι η συνάρτηση αξιών μπορεί να είναι μη γραμμική, τίθεται και θέμα θεμιτότητας της συγκεκριμένης συνάρτησης ως μοντέλου ολικής προτίμησης του αποφασίζοντος. Το τελευταίο πρόβλημα καθορισμού της συνάρτησης αξιών ενός αποφασίζοντος παραπέμπει στην πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας (multi-attribute utility theory).

Ως μοντέλο ολικής προτίμησης ενός αποφασίζοντος η συνάρτηση αυτή οφείλει να σέβεται τις εξής σχέσεις:

$u(x) > u(y) \leftrightarrow$ η λύση x προτιμάται της y

$u(x) = u(y) \leftrightarrow$ η λύση x κρίνεται ισοδύναμη της y

Η συνάρτηση αξιών ενός αποφασίζοντος είναι γραμμική (σταθμισμένος μέσος) όταν για κάθε ζεύγος συναρτήσεων (g_1, g_i), i=1, ..., n συντελεστές αντιστάθμισης (βάρη) είναι ανεξάρτητοι των τιμών, που παίρνουν οι υπόλοιπες συναρτήσεις στο χώρο συναρτήσεων και σταθεροί. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι συντελεστές στάθμισης των κριτηρίων σε ένα μοντέλο σταθμισμένου μέσου ουσιαστικά περιγράφουν τις παραχωρήσεις (trade-offs) που ο αποφασίζοντας είναι διατεθειμένος να κάνει στα κριτήρια. Ο τρόπος σύνθεσης της είναι με τη δημιουργία του σταθμισμένου αθροίσματος των αντικειμενικών συναρτήσεων προκειμένου να διατηρείται και η γραμμικότητα του προβλήματος.

Δεδομένου ότι οι συντελεστές της μιας αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να διαφέρουν τάξεις μεγέθους από τους συντελεστές μιας άλλης, η αναγωγή στην ίδια κλίμακα είναι αναγκαία προκειμένου το σταθμισμένο άθροισμα να εκφράζει την εκτίμηση του αποφασίζοντος για την προτίμηση/σημαντικότητα των αντικειμενικών συναρτήσεων και να μην στρεβλώνεται λόγω των διαφορετικών μονάδων μέτρησης των αντικειμενικών συναρτήσεων. Ουσιαστικά, με την απόδοση συντελεστών βαρύτητας στα διάφορα κριτήρια ο αποφασίζων δημιουργεί μια συνάρτηση πολυκριτηριακής χρησιμότητας (Keeney & Raiffa., 1976). Η βέλτιστη λύση του μετασχηματισμένου προβλήματος Γραμμικού Προγραμματισμού αποτελεί και «ικανή» λύση για το αρχικό πρόβλημα Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού όταν όλοι οι συντελεστές βαρύτητας είναι διάφοροι του μηδενός (Steuer R. E., Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application, 1989).

Σχετικές πρόσφατες ερευνητικές υλοποιήσεις αναφέρονται στις εργασίες (Ammari, 2013), (Satoshi Kitayama, 2012), (Naidu, Mokhlis, & Bakar, 2014), (Fondrevelle, Oulamara, & Portmann, 2008), (Gomes, Júnior, Paiva, Ferreira, Costa, & Balestrassi, 2012).

3.5.1.3 Η μέθοδος Προγραμματισμού Στόχων

Ο Προγραμματισμός Στόχων πρωτοεμφανίστηκε με τις εργασίες των Charnes και Cooper το 1955 και το 1961 (Charnes, Cooper, & Ferguson, 1955), (Charnes & Cooper, 1961) και υποστηρίχθηκε πρώτα από τους Lee (Lee, 1972), Ignizio (Ignizio, 1976), Cavalier (JP Ignizio, 1994) και Romero (Romero, 1991). Στο πλαίσιο αυτής της μεθόδου, ο αποφασίζων καθορίζει a priori για όλα κριτήρια τιμές-στόχους. Ο αποφασίζων μπορεί επίσης να θέσει προτεραιότητες ή και βάρη στην επίτευξη των στόχων αυτών (preemptive goal programming) (Martel & Aouni, 1990) έτσι ώστε αφού να προσεγγίζονται κατά προτεραιότητα όσο είναι δυνατόν ο πρώτος στόχος, στην συνέχεια ο δεύτερος στόχος κ.ο.κ. Η μέθοδος αποτελεί μία εναλλακτική εκδοχή του Γραμμικού Προγραμματισμού (ΓΠ) που αποβλέπει στο να συμπεριλάβει στο μοντέλο του συμβατικού ΓΠ περισσότερα του ενός κριτήρια. Ειδικότερα, η μέθοδος έχει στόχο την ελαχιστοποίηση των αποστάσεων των κριτηρίων (αντικειμενικών συναρτήσεων) από τις προκαθορισμένες τιμές- στόχους. Η ολοκλήρωση των κριτηρίων σε μία αντικειμενική συνάρτηση γίνεται συνήθως μέσω έκφρασης σταθμισμένου αθροίσματος των αποκλίσεων αυτών.

Η διαδικασία συνοψίζεται ως ακολούθως:

Για κάθε κριτήριο, ο αποφασίζων θέτει έναν στόχο τον οποίο επιδιώκει να επιτύχει. Ορίζονται , έτσι, οι τιμές – στόχοι s_1, s_2, …, s_n.

Στην γενική περίπτωση το μοντέλο γράφεται:

$$[min]z = \sum_{i=1}^{n} p_i \times f_i\,(d_1^-, d_1^+, d_2^-, d_2^+, \dots, d_n^-, d_n^+)$$

υ.π.

$$\sum_{j=1}^{l} c_{ij}x_j + d_i^- + d_i^+ = s_i, i = 1,2, \dots, n$$

$$x \in A$$

$$d_i^- \geq 0, d_i^+ \geq 0, i = 1,2, \dots, n$$

Όπου

s_i: η αριθμητική τιμή του στόχου i

p_i: ο βαθμός προτεραιότητας (βάρος) του στόχου i

d_i^+: το πλεόνασμα του αγαθού ή μέσου ως προς τον στόχο s_i

d_i^-: το έλλειμμα του αγαθού ή μέσου ως προς τον στόχο s_i

f_i: μια γραμμική συνάρτηση των μεταβλητών d_i^- και d_i^+

Ο Προγραμματισμός Στόχων μια αρκετά δημοφιλής μέθοδος καθώς παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα: α) λαμβάνει υπόψιν περισσότερα του ενός κριτήρια στη διαδικασία επίλυσης, β) είναι εύκολη ως μέθοδος στην κατανόηση και στην επικοινωνία με τον αποφασίζοντα και γ) η εφαρμογή είναι εύκολη καθώς δεν απαιτεί εξειδικευμένο λογισμικό, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί λογισμικό συμβατικού ΓΠ.

Το βασικό μειονέκτημα του Προγραμματισμού Στόχων είναι η απαίτηση προσδιορισμού τιμών-στόχων για τα κριτήρια, με βάση τις οποίες υπολογίζονται οι «βέλτιστες» λύσεις, που μπορεί τελικά να μην είναι ικανές κατά Pareto λύσεις. Η μέθοδος δέχεται έντονη κριτική για τον λόγο ότι σε πραγματικά προβλήματα συχνά είναι αδύνατο (και μη επιθυμητό) για τον αποφασίζοντα να εκφράσει εξ' αρχής προτιμήσεις για την σημαντικότητα ή τις τιμές στόχους των κριτηρίων, καθώς θεωρεί ότι με τον τρόπο αυτό θα αποκρύψει/αποκλείσει, από τα αρχικά στάδια, σημαντικές πτυχές του χωρίου των δυνατών λύσεων.

Επισημαίνεται ότι στην λογική της μεθόδου προγραμματισμού στόχων έχουν αναπτυχθεί διάφορες ενδιαφέρουσες παραλλαγές που αφορούν τόσο σε γραμμικά όσο και σε μη γραμμικά μοντέλα προγραμματισμού στόχων. Ενδεικτικά αναφέρονται οι: η μέθοδος Tchebycheff (Min-Max) Προγραμματισμού Στόχων, η μέθοδος ασαφούς προγραμματισμού Στόχων κ.α. Σχετικές ερευνητικές εργασίες και υλοποιήσεις έχουν γίνει πρόσφατα από τους (Güray Güler, 2013), (Shahnazari-Shahrezaei, Tavakkoli-Moghaddam, & Kazemipoor, 2013), (Kamran, 2013), (Gharehgozli, Tavakkoli-Moghaddam, & Zaerpour, 2009). Το 2010 οι Jones & Tamiz έκαναν μια πολλή ενδιαφέρουσα επισκόπηση και ανάλυση της μεθόδου και των εφαρμογών της (Jones & Tamiz, 2010), στην οποία παραπέμπουμε για περισσότερη εμβάθυνση.

3.5.2 Μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων με έκφραση προτίμησης κατά την επίλυση

Οι μέθοδοι που ανήκουν στην κατηγορία αυτή ονομάζονται αλληλεπιδραστικές ή διαδραστικές (interactive methods) λόγω της άμεσης εμπλοκής και καθοδήγησης του αποφασίζοντος στη διαδικασία επίλυσης. Οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: α) ο διαδραστικός και επαναληπτικός χαρακτήρας τους επιτρέπει στον αποφασίζοντα να εξερευνήσει και να κατανοήσει καλύτερα τον χώρο των δυνατών λύσεων γεγονός που τον βοηθάει να διαμορφώσει καλύτερα την προτιμησιακή του στρατηγική αλλά και να την μεταβάλει κατά την πορεία αναζήτησης, αν το επιθυμεί, β) δεν απαιτείται για την εφαρμογή τους εξειδικευμένο λογισμικό δεδομένου ότι κατά κανόνα χρησιμοποιούν εργαλεία συμβατικού μαθηματικού προγραμματισμού για τις φάσεις βελτιστοποίησης και γ) χαρακτηρίζονται από ελεγχόμενη πυκνότητα παραγωγής λύσεων, γεγονός που

επιτρέπει την επίλυση προβλημάτων μεγαλύτερων διαστάσεων, σταθμίζοντας τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο με την πυκνότητα παραγωγής αντιπροσωπευτικών λύσεων.

Μέχρι σήμερα, έχουν αναπτυχθεί αρκετές αλληλεπιδραστικές μέθοδοι για Πολυκριτηριακό Μαθηματικό Προγραμματισμό. Οι μέθοδοι αυτές διαφέρουν μεταξύ τους κυρίως ως προς τη μορφή του προβλήματος Μαθηματικού Προγραμματισμού που επιλύουν για να προσδιορίσουν τις αντιπροσωπευτικές ικανές λύσεις σε κάθε επανάληψη και ως προς τον τύπο της πληροφορίας που απαιτείται από τον αποφασίζοντα. Οι περισσότερες αλληλεπιδραστικές μέθοδοι, ανάλογα με τον τρόπο σύγκλισής τους, χαρακτηρίζονται ως:

- *μέθοδοι συρρικνούμενου εφικτού χωρίου (reduced feasible solution region),* Πρόκειται για τις μεθόδους που «πορεύονται» με την σταδιακή μείωση του χώρου των εφικτών λύσεων. Σε κάθε επαναληπτικό κύκλο, εισάγονται νέοι περιορισμοί στις δυνατές τιμές των κριτηρίων. Με τον τρόπο αυτό, ο χώρος των εφικτών λύσεων που λαμβάνεται υπόψιν στην επόμενη επανάληψη μειώνεται. Δημοφιλείς μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι οι: STEM (Benayoun et al., 1971) καθώς και οι μέθοδοι των [Levine and Pomerol, 1986], [Vanderpooten, 1988], [Lofti and Zionts, 1990], [Jaszkiewicz and Slowinski, 1997], [Ulungu et al., 1998], [Alves and Climaco, 2000].
- *μέθοδοι συρρικνούμενου χώρου συντελεστών στάθμισης (reduced weighting vector space).* Οι μέθοδοι αυτές πορεύονται με την μείωση του συνόλου των δυνατών βαρών που λαμβάνουν τα κριτήρια. Σε κάθε επαναληπτικό κύκλο, οι δυνατές τιμές των βαρών για τα κριτήρια περιορίζονται σύμφωνα με τις οδηγίες/κατευθύνσεις που ορίζει ο αποφασίζων. Σχετικές μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι η μέθοδος Zionts & Wallenius method, [Zionts and Wallenius, 1976], η διαδραστική σταθμισμένη Tchebycheff μέθοδος, και μέθοδοι που προτείνονται από [Steuer and Choo, 1983], [Steuer and Wood, 1986].
- *ως μέθοδοι περιορισμού του κώνου των κριτηρίων.* Ο εν λόγω κώνος μειώνεται σε κάθε επανάληψη. Αν ο αριθμός των επαναλήψεων δεν περιορίζεται τότε ο κώνος συγκλίνει σε ένα μοναδικό διάνυσμα C. Αυτό, μας οδηγεί τελικά στην μετατροπή του πολυκριτηριακού προβλήματος σε μονοκριτήριο για το οποίο η βέλτιστη λύση είναι εκείνη η Pareto βέλτιστη λύση που γίνεται αποδεκτή από τον αποφασίζοντα. Δημοφιλείς σχετικές μέθοδοι είναι η μέθοδος interval criterion weights (Steuer R. , 1977) καθώς και οι μέθοδοι που προτείνονται από τους (Jacquet-Lagrèze, Meziani, & Slowinski, 1987), (Jaszkiewicz & Slowinski, 1997)]
- *ως μέθοδοι αναζήτησης της διεύθυνσης μέγιστης βελτίωσης (direction or line search methods)* (Shin & Ravindran, 1991). Οι μέθοδοι αυτές πορεύονται με

την κατευθυνόμενη αναζήτηση στον χώρο των λύσεων σύμφωνα με τις οδηγίες του αποφασίζοντος. Σε κάθε επανάληψη, ο αποφασίζων επιλέγει μία λύση και υποδεικνύει την κατεύθυνση της νέας αναζήτησης για τον υπολογισμό νέων λύσεων. Για παράδειγμα, η κατεύθυνση αναζήτησης μπορεί να υπολογιστεί από παραμέτρους κατεύθυνσης βελτίωσης των κριτήριων που επιθυμεί ο αποφασίζων, σε σχέση με τις υπάρχουσες λύσεις που έχει ήδη επιλέξει. Σχετικές μέθοδοι είναι οι GDF μέθοδος (Geoffrion, Dyer, & Feinberg., 1972), (Roy B. , From Optimisation to Multicriteria Decision Aid: Three Main Operational Attitudes, 1976), (Vincke, 1976)], η μέθοδος «Achievement scalarizing function» (Wierzbicki, 1981), η μέθοδος VIG (Korhonen & Laakso, 1986), (Lofti, Stewart, & Zionts, 1992), (Kaliszewski, 2000). Επίσης η αλληλεπιδραστική μέθοδος Προγραμματισμού Στόχων (Dyer, 1972) και η Μέθοδος Ικανοποιητικών Στόχων (Benson, 1975).

Στη συνέχεια περιγράφονται μερικές από τις βασικότερες αλληλεπιδραστικές μεθόδους και ο αναγνώστης παραπέμπεται στην βιβλιογραφία για περισσότερη εμβάθυνση (ενδεικτικά: (Ehrgott M. , 2005), (Μαυρωτάς Γ. , 2000), (Cohon, 2004), (Serafini, 1985), κ.α.)

3.5.2.1 Η μέθοδος STEM

Η μέθοδος STEM (Benayoun, Montgolfier, Tergny, & Laritchev, 1971) αναπτύχθηκε ως μια απλή επαναληπτική και αλληλεπιδραστική μέθοδος η οποία ολοκληρώνεται το πολύ σε *k* επαναλήψεις, όπου *k* είναι ο αριθμός των κριτηρίων/ αντικειμενικών συναρτήσεων. Παρόλο που αρχικά αναπτύχθηκε για εφαρμογή για προβλήματα Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού, η μέθοδος STEM μπορεί να εφαρμοσθεί και σε μη-γραμμικά πολυκριτηριακά προβλήματα ή σε προβλήματα Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού με ακέραιες μεταβλητές.

Η STEM ανήκει στις μεθόδους συρρικνούμενου εφικτού χωρίου. Σε κάθε κύκλο επανάληψης επιλύεται ένα πρόβλημα min-max για την εύρεση της πλησιέστερης στο ιδεώδες διάνυσμα λύσης, μέσω της σταθμισμένης απόστασης Tchebycheff. Οι συντελεστές στάθμισης προκύπτουν με κανονικοποίηση των συντελεστών των κριτηρίων και ανάλογα με το εύρος τιμών τους στο αρχικό εφικτό χωρίο όπως αυτά προκύπτουν από τον πίνακα τιμών (payoff table) του προβλήματος. Ειδικότερα, ο υπολογισμός του βάρους του στόχου υπολογίζεται ως εξής:

$$w_i = \frac{a_i}{\sum_{j=1}^{k} a_j}$$

όπου

$$a_i = \frac{f_i^* - f_{i^*}}{f_i^*}\left[\sum_{j=1}^{n}(c_{ij})^2\right]^{-1/2}$$

f_i^*, η βέλτιστη τιμή του κριτηρίου f_i.

f_{i^*}, η ελάχιστη τιμή του κριτηρίου f_i, ήτοι η ελάχιστη τιμή της στήλης i στον πίνακα πληρωμών ($f_{i^*} = \min\{f_{1i}, f_{2i}, \ldots, f_{ki}\}$).

Τα βάρη w_i καθορίζονται ανάλογα με το εύρος των διακυμάνσεων στις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων και της κλίμακας μέτρησής τους. Εάν η διαφορά $f_i^* - f_{i^*}$ είναι μικρή, τότε στον στόχο f_i αποδίδεται μικρό βάρος καθώς δεν αναμένεται να παρουσιάσει ιδιαίτερη ευαισθησία σε μεταβολές της σημαντικότητάς του, και αντίστροφα.

Μετά από τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων επιλύεται το προκύπτον πρόβλημα για τον υπολογισμό της αρχικής ικανής λύσης. Η λύση που προκύπτει ελαχιστοποιεί τη μέγιστη απόκλιση α από την ιδεατή λύση, δεδομένου ότι ο προσδιορισμός της απόκλισης λαμβάνει υπόψη και τη σημαντικότητα κάθε στόχου.

min $z = a$

υ.π. $a - w_i[f_i^* - f_i(x)] \geq 0, \qquad \forall i = 1,2,\ldots,k$

$x \in A, a \geq 0$

Αξιολογώντας την προτεινόμενη λύση, ο αποφασίζων ορίζει ποια κριτήρια μπορούν να «χαλαρώσουν» και ποιά είναι η μέγιστη επιτρεπτή ποσότητα που μπορεί να θυσιασθεί, προκειμένου να βελτιωθεί η τιμή των υπολοίπων κριτηρίων. Έτσι διαμορφώνεται το νέο εφικτό χωρίο για την επόμενη επανάληψη στην οποία συμμετέχουν τα κριτήρια που πρέπει να βελτιωθούν. Η επαναληπτική διαδικασία σταματά όταν ο αποφασίζων είναι ικανοποιημένος από τα επίπεδα των τιμών των κριτηρίων της προτεινόμενης λύσης ή όταν δεν είναι σε θέση να θυσιάσει τις επιδόσεις ούτε ενός κριτηρίου προκειμένου να πετύχει καλύτερες επιδόσεις σε κάποια άλλα.

Τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής: α) Η σημαντικότητα των κριτηρίων υπολογίζεται με αυτόματο/μονοσήμαντο τρόπο από τον πίνακα πληρωμών γεγονός που μπορεί να μην συμβαδίζει /συμφωνεί με την προτιμησιακή στρατηγική του αποφασίζοντος, β) η διαδικασία υποχρεωτικά ολοκληρώνεται το πολύ σε k επαναλήψεις, γ) σε προβλήματα Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού μπορεί να καταλήξει και σε μη ακραίες ικανές λύσεις, υπάρχει όμως περίπτωση η τελική λύση να μην ανήκει στο σύνολο των ικανών λύσεων (Steuer R. E., Multiple

Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application, 1989) και δ) ο προσδιορισμός του εύρους των αντικειμενικών συναρτήσεων μέσω του πίνακα τιμών δεν είναι αξιόπιστος, διότι η χειρότερη τιμή που εμφανίζεται για κάποιο κριτήριο, μεταξύ των ικανών λύσεων, τις περισσότερες φορές δεν ταυτίζεται με αυτήν που δίνεται από τον πίνακα τιμών (Reeves & Reid, 1988).

3.5.2.2 Η μέθοδος GDF

Αποτελεί μια μέθοδο γραμμικής αναζήτησης (line search) της βέλτιστης λύσης, που βασίζεται στην βελτιστοποίηση μιας συνάρτησης χρησιμότητας, χρησιμοποιώντας μεθόδους τοπικών κλίσεων (προτείνεται ο αλγόριθμος Frank-Wolfe, χωρίς να αποκλείεται η χρήση εναλλακτικών μεθόδων). Στο πλαίσιο της μεθόδου, σε κάθε επαναληπτικό κύκλο επιλύεται ένα μονοκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης προκειμένου να βρεθεί η κατεύθυνση μέγιστης βελτίωσης μιας συνάρτησης χρησιμότητας. Η τελευταία δεν είναι σαφώς ορισμένη- αλλά γίνεται παραδοχή ότι είναι διαφορίσιμη και κοίλη- και εκφράζεται με μία τοπική προσέγγισή της με την μορφή σύνθεσης των επιμέρους κριτηρίων. Στην συνθετική αυτή έκφραση οι συντελεστές στάθμισης προκύπτουν από τις τοπικές κλίσεις των κριτηρίων σε συνδυασμό με τα υποκειμενικά βάρη που δηλώνει ο αποφασίζων αναφορικά με την σημαντικότητα των κριτηρίων. Στη συνέχεια επιχειρεί να εντοπίσει κατά μήκος της κατεύθυνσης μέγιστης βελτίωσης το βέλτιστο βήμα, δηλαδή το σημείο εκείνο με τη μεγαλύτερη αποδοχή. Αυτό γίνεται πραγματοποιώντας μια απλή βηματική αναζήτηση (grid search) ως εξής: η κατεύθυνση μέγιστης βελτίωσης χωρίζεται σε ίσα τμήματα μέσω συγκεκριμένου αριθμού πλεγματικών σημείων και ο αποφασίζων καλείται να επιλέξει ένα απ’ αυτά εξετάζοντας τις αντίστοιχες τιμές των κριτηρίων. Το σημείο που βρέθηκε χρησιμοποιείται ως αρχικό σημείο για μία νέα επανάληψη της μεθόδου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, ώσπου να μείνει ικανοποιημένος ο αποφασίζων από την τελική λύση.

Πρακτικά, στην GDF μέθοδο ο αποφασίζων πρέπει να καθορίσει οριακούς λόγους παραχώρησης/αντιστάθμισης και να επιλέξει την προτιμώμενη λύση από ένα σύνολο εναλλακτικές. Το θεωρητικό/μαθηματικό υπόβαθρο της μεθόδου είναι πειστικό μεν, αλλά η πρακτική εφαρμογή αυτού δεν είναι εξίσου υποσχόμενη και ρεαλιστική. Σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας ο αποφασίζων καλείται να ορίσει κ-1 οριακούς λόγους αντιστάθμισης με ένα συνεπή/συνεκτικό και ορθό τρόπο. Από την άλλ, είναι φανερό ότι στην πράξη η διαδικασία επιλογής λύσης σε κάθε βήμα γίνεται όλο και πιο δύσκολο για τον αποφασίζοντα όσο το πλήθος των κριτηρίων αυξάνεται. Ένα άλλο μεινέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί ορισμένες δοκιμαστικές λύσεις, που

παρουσιάζονται στον αποφασίζοντα για να επιλέξει την προτιμότερη, να μην αποτελούν ικανές λύσεις, με κίνδυνο η τελική λύση να μην ανήκει στο σύνολο των ικανών λύσεων.

Η μέθοδος GDF μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μη γραμμικά συνεχή προβλήματα αφού επιλύει ένα μονοκριτηριακό πρόβλημα αριστοποίησης ανά επανάληψη. Οι πληροφορίες που απαιτεί είναι υπό τη μορφή σύγκρισης διανυσμάτων και χρειάζεται συχνή αλληλεπίδραση με τον αποφασίζοντα.

3.5.2.3 Η μέθοδος των Zionts-Wallenius

Πρωτοπαρουσιάσθηκε το 1976 (Zionts & Wallenius, 1976) και μια νεότερη έκδοση της παρουσιάσθηκε το 1983 (Zionts & Wallenius, 1983). Αποτελεί μία τυπική μέθοδο συρρικνούμενου χώρου των συντελεστών στάθμισης κριτηρίων.

Αρχικά, η μέθοδος βελτιστοποιεί ένα γραμμικό πρόβλημα με κάποιους αρχικούς συντελεστές στάθμισης (βάρη) για τα κριτήρια. Στην συνέχεια παρουσιάζονται στον αποφασίζοντα ένα σύνολο από αντισταθμίσεις κριτηρίων και ο αποφασίζων καλείται να τις χαρακτηρίσει. Η πληροφορία που παρέχει ο αποφασίζων για τις παραχωρήσεις μεταξύ των κριτηρίων αφορά σε προτίμηση/ μη προτίμηση αλλά και αδιαφορία. Οι απαντήσεις του αποφασίζοντα χρησιμοποιούνται για την συρρίκνωση του χώρου των συντελεστών στάθμισης εισάγοντας περιορισμούς πάνω στα βάρη/συντελεστές και παράγοντας νέα λύση. Αν ο αποφασίζων είναι ικανοποιημένος με την νέα λύση, δηλαδή δεν επιθυμεί κάποια παραχώρηση, η διαδικασία τερματίζεται. Αλλιώς επαναλαμβάνεται με νέες επιλογές αντιστάθμισης κριτηρίων και παραγωγής νέας λύσης έως την σύγκλιση στην τελικά «βέλτιστη» λύση, όταν έχει συρρικνωθεί αρκετά ο χώρος των συντελεστών στάθμισης και προκύπτει μία ακραία ικανή λύση.

Η μέθοδος συρρικνώνει αποτελεσματικά και γρήγορα τον χώρο των συντελεστών. Λόγω του μαθηματικού υποβάθρου στο οποίο βασίζεται, δεν παράγει μη ακραίες λύσεις. Επιπλέον, οι Malakooti & Ravindran βελτιώνουν την μέθοδο εφαρμόζοντας ανά δύο συγκρίσεις των επιλογών και προσαρμόζοντας την μέθοδο ανάλογα με την ισχύ των προτιμήσεων. Επιπλέον, προτείνουν μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για την αντιμετώπιση της ενδεχόμενης ασυνέπειας ως προς τις προτιμήσεις του αποφασίζοντος.

3.5.2.4 Η μέθοδος Interval Criterion Weights

Αντίστοιχης φιλοσοφίας συρρίκνωσης του χώρου συντελεστών στάθμισης είναι και η μέθοδος Interval Criterion Weights που αναπτύχθηκε και προτάθηκε από τον Steuer το 1977 (Steuer R. , 1977). Αντί σε κάθε επανάληψη να προκύπτει μία ακραία ικανή

λύση με σταθερά βάρη, παράγονται ένα σύνολο από ακραίες ικανές λύσεις και παρουσιάζονται στον αποφασίζοντα. Οι λύσεις αυτές παράγονται από το σταθμισμένο άθροισμα των αντικειμενικών συναρτήσεων, χρησιμοποιώντας κάποιους αρχικούς συντελεστές στάθμισης από των χώρο των συντελεστών που επιλέγονται έτσι ώστε να καλύπτουν αντιπροσωπευτικά τον ισχύοντα χώρο. Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο ο αποφασίζων μέσω αλληλεπίδρασης με τον αναλυτή καλείται να επιλέξει την προτιμότερη. Οι συντελεστές στάθμισης της προτιμώμενης λύσης αποτελούν την βάση για τον καθορισμό του νέου χώρου των συντελεστών στάθμισης. Διευρύνοντας ή περιορίζοντας το διάστημα που αντιστοιχεί στον συντελεστή του κάθε κριτηρίου παράγονται διαφορετικά σύνολα ικανών ακραίων λύσεων. Σε κάθε επανάληψη τα διαστήματα περιορίζονται σταδιακά μέχρι να επιλέξει ο αποφασίζων την τελικά βέλτιστη λύση παραχώρησης.

Επισημαίνεται ότι στην μέθοδο το πλήθος των επαναλήψεων και το πλήθος των αντιπροσωπευτικών σε κάθε στάδιο λύσεων καθορίζονται από την αρχή. Πρακτικά για την εφαρμογή της μεθόδου είναι αναγκαία η χρήση λογισμικού που θα διευκολύνει την παραγωγή πολλαπλών ικανών λύσεων σε κάθε στάδιο.

3.5.2.5 Η μέθοδος Interactive weighted Tchebycheff

Η συγκεκριμένη μέθοδος προτάθηκε από τους Steuer και Choo (Steuer & Choo, 1983). Η μέθοδος παράγει ικανές λύσεις υπολογίζοντας την ικανή λύση (διάνυσμα κριτηρίων) που είναι πλησιέστερη στην ιδεατή λύση (ιδεατό διάνυσμα κριτηρίων) σύμφωνα με μια, τυχαία σταθμισμένη, μετρική απόστασης Tchebycheff. Σε κάθε επανάληψη, χρησιμοποιώντας τεχνικές φιλτραρίσματος, παράγονται όλο και μικρότερα αντιπροσωπευτικά υποσύνολα (μέγιστης όμως διασποράς στο θεωρούμενο χώρο) του συνόλου των ικανών λύσεων. Η μέθοδος παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να συγκλίνει και σε μη ακραίες ικανές λύσεις. Είναι κατάλληλη για προβλήματα πολυκριτηριακού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και εφαρμόζεται και σε ακέραια αλλά και σε μη γραμμικά πολυκριτηριακά προβλήματα.

3.5.2.6 Η μέθοδος Επιπέδων Ικανοποίησης

Η μέθοδος των επιπέδων ικανοποίησης (Satisfactory levels) βασίζεται σε μια διαδραστική μέθοδο υποστήριξης αποφάσεων. Ο αποφασίζων καλείται να θέσει τα ελάχιστα επίπεδα αποδοχής για όλα τα κριτήρια, καθορίζοντας ταυτόχρονα το κριτήριο του οποίου το επίπεδο είναι το λιγότερο ικανοποιητικό και επομένως απαιτείται άμεση βελτίωση. Η μέθοδος είναι επαναληπτική και οδηγεί σε σταδιακή

βελτίωση των τιμών κριτηρίων, σε μια λύση που να ικανοποιεί τον αποφασίζοντα. Σε κάθε στάδιο της μεθόδου, ο αποφασίζων επανακαθορίζει τα επίπεδα, με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα και το βαθμό ικανοποίησής του.

3.5.2.7 Η αλληλεπιδραστική μέθοδος Διακλάδωσης και Περιορισμού

Η αλληλεπιδραστική μέθοδος Διακλάδωσης και Περιορισμού, που παρουσιάστηκε από τους Marcotte and Soland (Marcotte & Soland, 1985), χωρίζει τον χώρο των κριτηρίων σε υποσύνολα. Κάθε υποσύνολο αποτελεί ένα κλαδί του αρχικού χώρου των κριτηρίων. Αν το κλαδί αυτό προβλέπεται υποσχόμενο τότε διαχωρίζεται σε ακόμα μικρότερα υποσύνολα/κλαδιά για περαιτέρω διερεύνηση. Για κάθε υποσύνολο υπολογίζεται μία ιδεατή λύση η οποία χρησιμοποιείται για τον ορισμό ενός άνω ορίου για το υποσύνολο αυτό. Επισημαίνεται ότι η ιδεατή λύση κάθε υποσυνόλου κυριαρχεί όλων των ικανών λύσεων του υποσυνόλου αυτού. Κάθε υποσύνολο αποτελεί ένα κόμβο του δένδρου της διαδικασίας και σε κάθε κόμβο οι λύσεις συγκρίνονται με την τρέχουσα (incumbent) λύση, αλληλεπιδρώντας νε τον αποφασίζοντα. Ένας κόμβος θεωρείται αξιολογημένος (fathomed) αν η ιδεατή λύση του κόμβου αυτού δεν προτιμάται από τον αποφασίζοντα σε σχέση με την τρέχουσα (incumbent) λύση. Η μέθοδος εφαρμόζεται και σε διακριτά προβλήματα και παρουσιάζει αρκετά ενδιαφέροντα στοιχεία όπως οι συγκρίσει των διανυσμάτων από τον αποφασίζοντα, η μη εξάρτηση από την μορφή των κριτηρίων, η μη απαίτηση ανάπτυξης συγκεκριμένης συνάρτησης προτιμήσεων και ο τερματισμός της διαδικασίας σε ικανή λύση. Από την άλλη, η μέθοδος έχει σημαντικό υπολογιστκό κόστος και δεν θεωρείται κατάλληλη για μεσαία ή μεγάλης κλίμακας προβλήματα.

Ακόμα, αξίζει να αναφέρουμε ακόμα κάποιες ακόμα σημαντικές διαδραστικές μεθόδους, τις οποίες μπορεί ο αναγνώστης να αναζητήσει στην βιβλιογραφία:

- Η μέθοδος Interactive Surrogate Worth Tradeoff
- Η μέθοδος Achievement scalarizing function
- Οι μέθοδοι VIG (Korhonen & Laakso, 1986) και Pareto Race (Korhonen & Wallenius, 1988)

3.5.3 Μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων με έκφραση προτίμησης εκ των υστέρων

Οι μέθοδοι εκ-των υστέρων έκφρασης προτίμησης από τον αποφασίζοντα στοχεύουν στην παραγωγή ολόκληρου του Pareto μετώπου (σύνολο ικανών λύσεων) ή

αντιπροσωπευτικού υποσυνόλου αυτού. Διακρίνουμε δύο υποκατηγορίες σχετικών μεθόδων: α) μέθοδοι που παράγουν το σύνολο των ακραίων ικανών λύσεων και β) μέθοδοι που παράγουν και τις ενδιάμεσες (μη ακραίες) ικανές λύσεις, που βρίσκονται στο εσωτερικό των εδρών ή των ακμών του ικανού συνόρου.

Δημοφιλείς μέθοδοι της κατηγορίας αυτή είναι η Παραμετρική Μέθοδος Συντελεστών Στάθμισης, η Μέθοδος των Περιορισμών και παραλλαγές αυτής, η Μέθοδος Normal Boundary Intersection (NBI), η μέθοδος NISE κ.α.

Οι εκ-των-υστέρων μέθοδοι παράγουν πλήθος πληροφοριών με στόχο να δώσουν στον αποφασίζοντα την εικόνα του συνόλου των Pareto λύσεων, ή του εύρους των διαθέσιμων επιλογών και να δώσουν πληροφορίες αναφορικά με τις ισχύουσες παραχωρήσεις μεταξύ των κριτηρίων, προκειμένου να κάνει την καλύτερη δυνατή τελική επιλογή. Το γεγονός αυτό ενισχύει την εμπιστοσύνη του αποφασίζοντος σχετικά με την τελική του απόφαση, καθώς θεωρεί ότι έχει λάβει υπόψη το σύνολο της αναγκαίας πληροφορίας προτού κάνει την επιλογή.

Οι εκ-των-υστέρων μέθοδοι δεν απαιτούν σαφή και άμεση μοντελοποίηση των προτιμήσεων και της κρίσης του αποφασίζοντα επιτρέποντάς του να τις εκφράσει έμμεσα μέσω των επιλογών που κάνει.

Υπάρχουν όμως και προβλήματα/μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τις εκ-των-υστέρων μεθόδους. Πρώτον, είναι αρκετά πολύπλοκες και πιο δυσνόητες αλγοριθμικά για τον αποφασίζοντα. Δεύτερον, το πλήθος των παραγόμενων ικανών λύσεων είναι συχνά πολύ μεγάλο για να μπορέσει ο αποφασίζων να το επεξεργαστεί και να το αναλύσει αποτελεσματικά. Τρίτον, ο υπολογισμός του συνόλου (ή μεγάλου αριθμού) αποτελεσματικών λύσεων είναι συνήθως μια χρονοβόρα διαδικασία οδηγώντας σε μεγάλο υπολογιστικό κόστος προβλήματα με πολλά κριτήρια ή/και πολλές μεταβλητές. Για μεγάλα προβλήματα με εκατοντάδες περιορισμούς και μεταβλητές απόφασης ο αριθμός των ικανών λύσεων είναι τόσο μεγάλος που ο υπολογισμός τους καθίσταται υπολογιστικά ανέφικτος. Με την εξέλιξη όμως της ταχύτητας και της χωρητικότητας των σύγχρονων υπολογιστών όλο και μεγαλύτερα προβλήματα Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού μπορούν να επιλυθούν με τις μεθόδους αυτές.

3.5.3.1 Η παραμετρική μέθοδος των Συντελεστών Στάθμισης

Η πρώτη και περισσότερη απλή διαδικασία παραγωγής των ακραίων ικανών λύσεων είναι μέσω του σταθμισμένου αθροίσματος των αντικειμενικών συναρτήσεων και ονομάζεται **μέθοδος των συντελεστών στάθμισης** (weighting method). Με τη συστηματική παραμετρική μεταβολή των συντελεστών στάθμισης και την επίλυση του αντίστοιχου προβλήματος Γραμμικού Προγραμματισμού, επιτυγχάνεται η «σάρωση»

του συνόλου των ακραίων ικανών λύσεων. Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά απλή χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις σε λογισμικό (αρκεί ένας επιλύτης Γραμμικού Προγραμματισμού). Η συστηματική όμως εξέταση των συνδυασμών των συντελεστών στάθμισης για προβλήματα με περισσότερες από δύο αντικειμενικές συναρτήσεις είναι χρονοβόρα. Σχετικές εργασίες και ερευνητικές εφαρμογές έχουν κάνει οι (Zhang & Yang, 2001), (Zhang & Gao, 2006), (Ahn, 2011), (Chang, Hsieh, & Lin, 2002).

3.5.3.2 Η μέθοδος NISE (Non Inferion Set Estimation)

Η μέθοδος NISE (Non Inferion Set Estimation) προτάθηκε από τον Cohon (1978) ως μια μέθοδος που συγκλίνει γρήγορα σε μια καλή προσέγγιση του συνόλου των ικανών λύσεων για δικριτηριακά προβλήματα. Οι (Balachandran & Gero, 1985) προτείνουν επέκταση της NISE μεθόδου σε προβλήματα τριών κριτηρίων.

Η ακρίβεια της προσέγγισης του συνόλου μη κατώτερων λύσεων μπορεί να ελεγχθεί μέσω του προκαθορισμένου κριτηρίου σφάλματος που συγκρίνεται με το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας.

Η μέθοδος NISE για δυο κριτήρια ξεκινάει με την βελτιστοποίηση του κάθε κριτηρίου ξεχωριστά, παράγοντας έτσι δυο ακραία ικανές λύσεις – σημεία στον χώρο των κριτηρίων. Η κλίση της ευθείας που ενώνει τα δύο σημεία χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν τα βάρη στο σταθμισμένο προκύπτον πρόβλημα. Όταν το νέο πρόβλημα επιλυθεί η προκύπτουσα μη κατώτερη λύση (σημείο) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μέγιστου δυνατού σφάλματος. Ο αλγόριθμος συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο μέχρις ότου το μέγιστο προκύπτον σφάλμα να είναι μικρότερο ή ίσο με το καθορισμένο μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα. Όσο μικρότερο είναι το καθοριζόμενο μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα προσέγγισης τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια προσέγγισης του ικανού συνόρου με τη μέθοδο NISE. Επισημαίνεται ότι, βάσει του μαθηματικού υποβάθρου που χρησιμοποιείται, γίνεται η παραδοχή κυρτότητας του χώρου των κριτηρίων.

3.5.3.3 Η μέθοδος των Περιορισμών

Σύμφωνα με την μέθοδο των περιορισμών (ε-constraint method), ορίζεται ένα από τα κριτήρια ως η αντικειμενική συνάρτηση για το πρόβλημα βελτιστοποίησης σε όλα τα στάδια της μεθόδου. Τα υπόλοιπα κριτήρια συμμετέχουν στο πρόβλημα ως ανισοτικοί περιορισμοί τύπου «μικρότερο ή ίσο» για την περίπτωση κριτηρίων ελαχιστοποίησης και «μεγαλύτερο ή ίσο» για κριτήρια μεγιστοποίησης. Η μέθοδος είναι επαναληπτική. Σε κάθε επαναληπτικό βήμα αυτής, μεταβάλλοντας το δεξί σκέλος των περιορισμών – κριτηρίων με καθορισμένο βήμα, βελτιστοποιείται το προκύπτον πρόβλημα ως προς

την αντικειμενική του συνάρτηση. Με τον τρόπο αυτό, με σταδιακή σάρωση του πεδίου τιμών των κριτηρίων-περιορισμών, παράγονται πολλαπλές λύσεις του προβλήματος λύσεις. Οι περιορισμοί σάρωσης περιορίζουν την αναζήτηση λύσεων σε λύσεις που τηρούν ελάχιστα αποδεκτά επίπεδα ως προς τα κριτήρια - περιορισμούς. Επισημαίνεται ότι η μέθοδος δεν εγγυάται την παραγωγή ικανών λύσεων. λύση που παράγεται σε κάθε στάδιο βελτιστοποίησης δεν είναι εγγυημένη ικανή λύση του μετώπου Pareto. Με την μέθοδο των περιορισμών προκύπτουν και μη ακραίες λύσεις του μετώπου Pareto. Όσο μικρότερο είναι το βήμα της μεταβολής του δεξιού σκέλους των περιορισμών-κριτηρίων τόσο πιο χρονοβόρος και επιβαρυντική σε υπολογιστικό κόστος είναι η διαδικασία αλλά είναι και «πυκνότερο» το αντιπροσωπευτικό υποσύνολο των ικανών λύσεων.

Για προβλήματα με περισσότερα από δύο κριτήρια, και σχετικά μεγάλων διαστάσεων, η παραγωγή του συνόλου των ικανών λύσεων μέσω της μεθόδου των περιορισμών θεωρείται δυσεφάρμοστη, λόγω υπολογιστικών απαιτήσεων.

Πολύ ενδιαφέρουσες υλοποιήσεις αλλά και τροποποιήσεις/επεκτάσεις της μεθόδου συναντάμε στις εργασίες (Mavrotas, Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problemsApplied Mathematics and Computation, 213, pp.455-465, 2009), (Grandinetti, Pisacane, & Sheikhalishahi, 2013), (Marler & Arora, 2004), (Bérubé, Gendreau, & Potvin, 2009), (Becerra & Coello Coello, 2007), (Boulif & Atif, 2006).

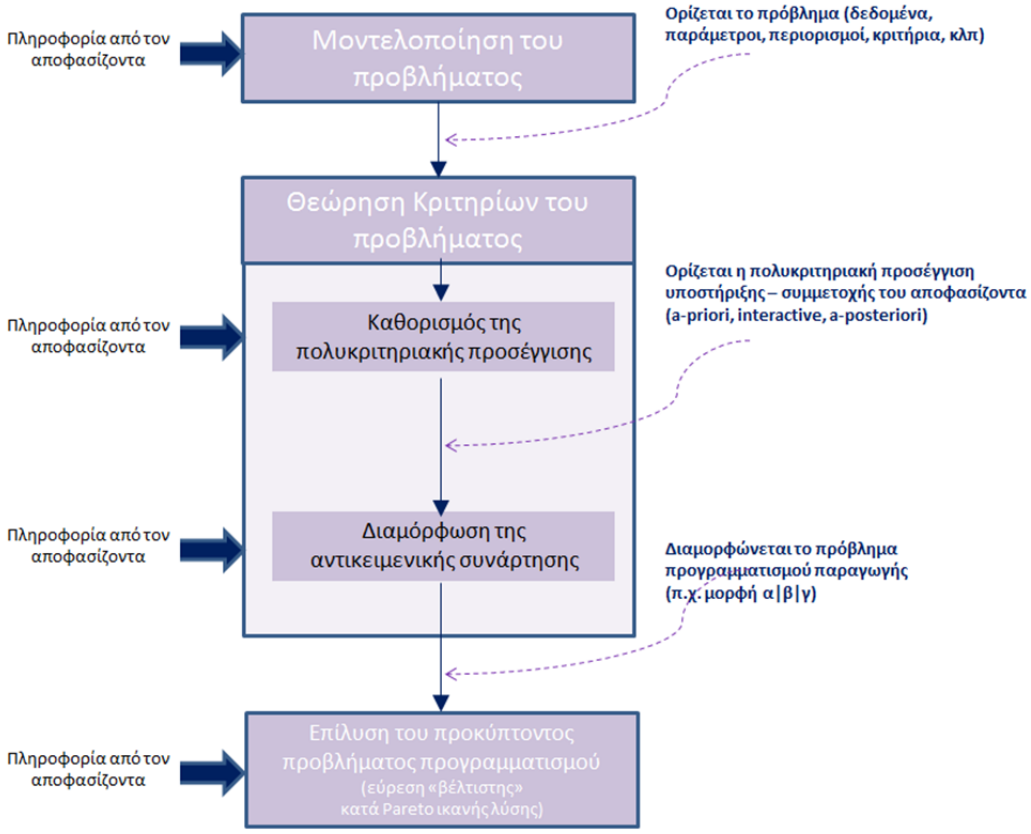
Ειδικά η εξέλιξη της μεθόδου – AUGMECON- που προτείνεται από τον Μαυρωτά (Mavrotas, Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problemsApplied Mathematics and Computation, 213, pp.455-465, 2009), θεωρούμε ότι είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα και παρέχει πλεονεκτήματα και ιδιότητες που την κάνουν δυνητικά αξιοποιήσιμη σε μεγαλύτερης διάστασης προβλήματα.

3.6 Μεθοδολογικό πλαίσιο επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής προϊόντων και υπηρεσιών

3.6.1 Ορισμοί

Αναλύοντας την σχετική βιβλιογραφία, στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται ο διαχωρισμός ενός πολυκριτηριακού προβλήματος προγραμματισμού σε διαφορετικές φάσεις εργασίας που σχετίζονται με τις επιστημονικές περιοχές της Πολυκριτήριας Υποστήριξης Αποφάσεων, της Πολυκριτήριας Βελτιστοποίησης και του χρονοπρογραμματισμού (scheduling).

*Συνοψίζοντας τα όσα αναλύθηκαν παραπάνω, ως πολυκριτηριακό πρόβλημα προγραμματισμού (*multicriteria scheduling problem) ορίζεται το πρόβλημα που συνίσταται στον υπολογισμό ενός αυστηρά Pareto βέλτιστού προγράμματος (*schedule) για έναν αριθμό από αντικρουόμενα κριτήρια.*



Σχήμα 3. 7 Γενική Πολυκριτηριακή Προσέγγιση Προβλημάτων Χρονοπρογραμματισμού Παραγωγής

Το πρόβλημα μπορεί να διαχωριστεί σε τρία υποπροβλήματα – φάσεις:

- ***Μοντελοποίηση του προβλήματος***. Σε αυτή την φάση γίνεται ο καθορισμός της φύσης του προβλήματος προγραμματισμού υπό μελέτη και ορίζονται τα κριτήρια τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψιν.
- ***Θεώρηση των κριτηρίων,*** η οποία οδηγεί στην αποσαφήνιση του τρόπου με τον οποίο μοντελοποιούνται και συμμετέχουν στο πρόβλημα τα κριτήρια. Ο αναλυτής σε αυτή την φάση, έχοντας κατανοήσει τις ανάγκες του προβλήματος, τον τρόπο απόφασης/αξιολόγησης από τον αποφασίζοντα των λύσεων, καθορίζει το μοντέλο υποστήριξης αποφάσεων, στο οποίο αποτυπώνεται η θεώρηση των κριτήριων.
- ***Προγραμματισμός,*** (scheduling) που οδηγεί στην εύρεση της λύσης. Ο αναλυτής καθορίζει τον αλγόριθμο επίλυσης του προβλήματος προγραμματισμού που θα οδηγήσει στην παραγωγή των επιδιωκόμενων λύσεων.

Η μοντελοποίηση του προβλήματος (Roy, 1985) γίνεται σε συνεργασία με τον αποφασίζοντα και έγκειται αρχικά στον καθορισμό των κριτηρίων βελτιστοποίησης

που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Γίνεται η υπόθεση ότι τα κριτήρια αυτά είναι αντικρουόμενα, δηλαδή η ελαχιστοποίηση του ενός κριτηρίου δεν ισοδυναμεί με ελαχιστοποίηση άλλου κριτηρίου. Επιπλέον, σε αυτή την φάση καθορίζεται το περιβάλλον του προβλήματος προγραμματισμού, ήτοι το σύνολο των πόρων (μηχανές, προσωπικό, κλπ), και τον τρόπο οργάνωσης και λειτουργίας του βιομηχανικού περιβάλλοντος. Με λίγα λόγια, αναγνωρίζεται η φύση του προβλήματος παραγωγής. Τέλος, προσδιορίζονται οι περιορισμοί που εκφράζουν το πρόβλημα: προθεσμίες, περιορισμοί δυναμικότητας, περιορισμοί μηχανών κλπ. Πρόκειται για μια αλληλεπιδραστική εργασία που είναι απαραίτητη όταν μια επιχείρηση επιθυμεί να επιλύσει ένα πρόβλημα προγραμματισμού (παραγωγής προϊόντων ή υπηρεσιών). Ο αναλυτής και ο αποφασίζων/αποφασίζοντες συνεργάζονται στενά για τον προσδιορισμό, αποτύπωση του προβλήματος προκειμένου ο αναλυτής να αναπτύξει το κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο.

Η μεγάλη δυσκολία στην επίλυση ενός πολυκριτηριακού προβλήματος συνίσταται στον τρόπο **θεώρησης των κριτηρίων βελτιστοποίησης**. Κατά την διάρκεια αυτής της φάσης, ο αποφασίζων παρέχει πληροφορίες αναφορικά με την αντίληψή του ως προς τα κριτήρια/προτιμήσεις: πρωτίστως, δηλώνει αν επιτρέπει αντιστάθμιση μεταξύ των κριτηρίων. Στην περίπτωση που δεν επιτρέπεται αντιστάθμιση μεταξύ των κριτηρίων, υποδεικνύει την σειρά με την οποία πρέπει να βελτιστοποιηθούν τα κριτήρια. Στην περίπτωση που επιτρέπεται αντιστάθμιση των κριτηρίων, υποδεικνύει αν είναι δυνατόν να αποδοθεί ένα βάρος σε κάθε κριτήριο που να εκφράζει την αντιστάθμιση, και δίνει τα σχετικά βάρη μετά από σχετικό διάλογο (π.χ. μέθοδος ολικού κριτηρίου), υποδεικνύει τους στόχους για κάθε κριτήριο, αν μπορεί να τους εκτιμήσει κλπ. Στην συνέχεια, συμμετέχει στην επιλογή της μεθόδου υποστήριξης λήψης αποφάσεων για την εύρεση λύσης, δηλώνοντας αν προτιμάει έναν αλγόριθμο που θα του δώσει μια μοναδική λύση, λαμβάνοντας υπόψιν τις ληφθείσες πληροφορίες, ή αν επιθυμεί να αλληλεπιδρά/επεμβαίνει στην διαδικασία επίλυσης. Ο τελευταίος τρόπος προκύπτει/επιλέγεται όταν ο αποφασίζων, για παράδειγμα, δεν είναι σίγουρος ή δεν υπάρχει σαφής απάντηση από το στάδιο αυτό στις ερωτήσεις που σχετίζονται με τον τρόπο θεώρησης των κριτηρίων, ή στην περίπτωση που επιθυμεί να αξιολογήσει μια σειρά δυνατών λύσεων προκειμένου να επιλέξει αυτή που φαίνεται πιο ενδιαφέρουσα. Αυτές οι επιλογές οδηγούν την προσέγγιση επίλυσης σε *a priori, αλληλεπιδραστικό και a posteriori αλγόριθμο. Οι πληροφορίες που συλλέγονται σε αυτή την φάση, και ο τρόπος με τον οποίο ο αποφασίζων μπορεί ή επιθυμεί να συνεισφέρει* στην επίλυση, επιτρέπουν στον αναλυτή να αναπτύξει την κατάλληλη προσέγγιση επίλυσης: ένα γραμμικό συνδυασμό των κριτηρίων, μία παραμετρική προσέγγιση, ή άλλη μέθοδο. Ως αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου είναι η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης για το πρόβλημα προγραμματισμού. Αυτή η φάση, οδηγεί

στην οριστικοποίηση ενός αλγορίθμου που θα υλοποιήσει την σχετική συνεργασία με τον αποφασίζοντα του, (π.χ. τον αναγκαίο διάλογο, την αλληλεπίδραση, την a posteriori διαδικασία, *κλπ.).*

Ο προγραμματισμός (Scheduling) έχει ως σκοπό να παράγει πρόγραμμα που θα βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση που έχει οριστεί στο προηγούμενο στάδιο. Η προκύπτουσα λύση είναι Pareto βέλτιστη για το πολυκριτηριακό πρόβλημα προγραμματισμού. Ο αναλυτής πρέπει σε αυτό το στάδιο να αναπτύξει την μέθοδο παραγωγής μίας ή περισσότερων λύσεων, ανάλογα με την προσέγγιση υποστήριξης της λήψης απόφασης που έχει να αποφασιστεί στα προηγούμενα στάδια.

Το σχήμα 3.2 παρουσιάζει την ανάλυση σε φάσεις του πολυκριτηριακού προβλήματος προγραμματισμού όπως ορίζεται στις παραπάνω παραγράφους.

3.6.2 Σημειολογία των πολυκριτηριακών προβλημάτων προγραμματισμού

Κατά την **θεώρηση των πολλαπλών κριτηρίων** και σύμφωνα με τις πληροφορίες που παρέχονται σε αυτή την φάση, ο αναλυτής επιλέγει την προσέγγιση επίλυσης και καθορίζει την φύση του προβλήματος. Λαμβάνοντας υπόψιν το πλήθος των μεθόδων που υπάρχουν για την παραγωγή Pareto βέλτιστων λύσεων, οι συναρτήσεις για την βελτιστοποίηση του προβλήματος μπορεί να πάρουν διάφορες μορφές. Κάθε μορφή εκφράζει μία μέθοδο παραγωγής Pareto βέλτιστης λύσης. Τα κριτήρια δεν αλλάζουν και αντιστοιχούν σε αυτά που έχουν καθοριστεί κατά την φάση *Μοντελοποίηση του Προβλήματος.*

Ένα πολυκριτήριο πρόβλημα προγραμματισμού, μετά την φάση μοντελοποίησης, μπορεί να αποτυπωθεί χρησιμοποιώντας σημειολογία των πεδίων Π/γ. Το πεδίο γ αποτυπώνει την λίστα των κριτηρίων $\Pi/Z_1, Z_2,..., Z_K$. *Ορίζουμε την ακόλουθη σημειολογία για το πεδίο γ και την αποτύπωση του τρόπου θεώρησης των κριτηρίων σε ένα πρόβλημα προγραμματισμού παραγωγής προϊόντων και υπηρεσιών.*

Z, αν στόχος είναι η βελτιστοποίηση ενός μοναδικού κριτηρίου Z (μονοκριτηριακό πρόβλημα). Αφορά την γνωστή περίπτωση προβλημάτων όπου το Z μπορεί να είναι *Cmax ή Tmaxi, κλπ.*

F_I $(Z_1,..., Z_K)$*, αν στόχος είναι η βελτιστοποίηση γραμμικού συνδυασμού* των K κριτηρίων. Αυτή είναι μια περίπτωση αν ο αποφασίζων μπορεί να αποδώσει βάρος σε κάθε ένα από τα κριτήριο.

$\varepsilon(Z_\beta/Z_1, ..., Z_{\beta-1}, Z_{\beta+1},..., Z_\kappa)$, υποδεικνύει ότι γίνεται βελτιστοποίηση μόνο ως προς το κριτήριο Z_β, ενώ τα άλλα κριτήρια συμμετέχουν, ως περιορισμοί δεσμευμένοι με πάνω όριο στην περίπτωση ελαχιστοποίησης, ή κάτω όριο στην περίπτωση μεγιστοποίησης.

Η περίπτωση αυτή αφορά εφαρμογή προσέγγισης στην φιλοσοφία της μεθόδου των περιορισμών.

F_T (Z_1,..., Z_K), υποδεικνύει την χρήση αντικειμενικής *συνάρτησης* που εκφράζει απόσταση από μία γνωστή ιδεατή λύση. Η απόσταση αυτή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την μετρική Tchebycheff. Γίνεται υπόθεση ότι η ιδεατή λύση δεν εφικτή λύση.

F_{WT} (Z_1,..., Z_K), υποδεικνύει την χρήση αντικειμενικής *συνάρτησης* που εκφράζει απόσταση από μία γνωστή ιδεατή λύση. Η απόσταση αυτή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την σταθμισμένη μετρική Tchebycheff. Γίνεται υπόθεση ότι η ιδεατή λύση δεν εφικτή λύση.

F_{WTa} (Z_1,..., Z_K), υποδεικνύει την χρήση αντικειμενικής *συνάρτησης* που εκφράζει απόσταση από μία γνωστή ιδεατή λύση. Η απόσταση αυτή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την επαυξημένη σταθμισμένη μετρική Tchebycheff. Γίνεται υπόθεση ότι η ιδεατή λύση δεν εφικτή λύση.

F_S(Z_1,..., Z_K), υποδεικνύει την χρήση ειδικής αντικειμενικής συνάρτησης που λαμβάνει υπόψη μία γνωστή ιδεατή λύση. Η περίπτωση αυτή αφορά εφαρμογή προσέγγισης στην φιλοσοφία της μεθόδου επίτευξης στόχων (goal attainment approach).

GP(Z_1,..., Z_K), *στην περίπτωση που έχουν τεθεί τιμές – στόχοι για κάθε κριτήριο του προβλήματος.* Η περίπτωση αφορά εφαρμογή προσέγγισης στην φιλοσοφία της μεθόδου προγραμματισμού στόχων (goal programming). Στόχος δεν είναι η βελτιστοποίηση των κριτηρίων αλλά η εύρεση λύσης που ικανοποιεί τους στόχους, ακόμα και αν δεν πρόκειται για Pareto βέλτιστη λύση.

Lex(Z_1,..., Z_K), υποδεικνύει ότι ο αποφασίζων δεν επιτρέπει αντιστάθμιση – παραχώρηση μεταξύ των κριτηρίων. Η σειρά με την οποία εμφανίζονται τα κριτήρια εκφράζει την προτεραιότητα και σημασία τους, με το πρώτο να είναι το πιο σημαντικό. Ο αναλυτής σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιεί την λεξικογραφική βελτιστοποίηση και βελτιστοποιούν το ένα κριτήριο μετά το άλλο.

(Z_1,..., Z_K), υποδεικνύει την περίπτωση προβλήματος απαρίθμησης όλων των Pareto βέλτιστων λύσεων. Ως εκ τούτου, σε αυτή την περίπτωση εφαρμόζεται αλγόριθμος a-posteriori επίλυσης.

Στην βιβλιογραφία, σε προβλήματα προγραμματισμού παραγωγής προϊόντων και υπηρεσιών, αναφέρονται συνηθέστερα οι προσεγγίσεις F_I, Lex, GP και #.

3.7 Πολυκριτηριακές προσεγγίσεις σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού σε γραμμές συναρμολόγησης

Για την αντιμετώπιση των πολυκριτηριακών προβλημάτων προγραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μεικτού μοντέλου που εφαρμόζουν Just –in-time φιλοσοφία, η βιβλιογραφία δεν είναι ιδιαίτερα πλούσια παρόλο που τα τελευταία χρόνια εμφανίζεται σχετική ερευνητική δραστηριότητα (Boysen, Fliedner, & Scholl, 2009), (Leung & Anderson, 2004).

Στις ερευνητικές εργασίες που αφορούν στο συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών, δύο στόχοι είχαν αρχικά προταθεί και έχουν συνήθως θεωρηθεί (Monden, 1983, 1993): Πρώτον, αυτός της *χρησιμοποίησης*, όπου ο στόχος είναι η διατήρηση σταθερού ρυθμού στη χρήση όλων των στοιχείων της εγκατάστασης και δεύτερον, αυτός της *φόρτωσης*, όπου ο στόχος είναι η ομαλοποίηση του φόρτου εργασίας για τη διαδικασία τελικής συναρμολόγησης, ούτως ώστε να μειωθεί η πιθανότητα καθυστερήσεων και διακοπών στην παραγωγή. Η πρώτη στόχευση προσπαθεί να χρονοδρομολογήσει τις εργασίες σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου για την επίτευξη ισορροπημένου φόρτου εργασίας με την πάροδο του χρόνου σε κάθε σταθμό συγκεντρώσεως, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιείται σε μικτά μοντέλα για την ελαχιστοποίηση της μεταβολής στη χρήση των διαφόρων τμημάτων και εξαρτημάτων την πάροδο του χρόνου. Ο Monden σε συνεργασία με την Toyota δημιούργησε μία τοπική ευρετική αναζήτηση, η οποία ονομάζεται the Goal Chasing Method, για να μπορέσει να αντιμετωπίσει το πρόβλημα (Monden, 1983, 1993).

Ο (Miltenburg G. , 1990) ανέπτυξε μια μη γραμμική μοντελοποίηση ακέραιου προγραμματισμού του προβλήματος του Monden και το έλυσε με ένα δυναμικό αλγόριθμο προγραμματισμού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησε μία πολλαπλών κριτηρίων σταθμισμένη συνάρτηση κόστους για να εξετάσει και τους δύο στόχους ταυτόχρονα και πρότεινε δύο ευρετικές μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση μεγαλύτερων προβλημάτων. Οι (Miltenburg & Goldstein, 1991) εξέτασαν από κοινού τα κριτήρια της ελαχιστοποίησης της συνολικής διακύμανσης χρήση εξαρτημάτων σε διαφορετικά επίπεδα και της ανισορροπίας του φόρτου εργασίας σε διάφορους σταθμούς εργασίας, και χρησιμοποίησαν μια σταθμισμένη προσέγγιση για την εξισορρόπηση των μεγεθών των δύο αυτών κριτηρίων. Και στα δύο αυτά papers, τα βάρη θεωρούνται ότι δίνονται ή λαμβάνονται εύκολα και έτσι το πρόβλημα δεν εξετάζεται από την άποψη του αποφασίζοντος.

Ο (Bard, Clayton, & Feo, 1994) ανέπτυξαν μία σταθμισμένη δικριτηριακή φόρμουλα για την εξέταση των trade-offs μεταξύ του μήκους γραμμής και της χρήσης εξαρτημάτων. Ένα μη-γραμμικό πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού λύνεται με ένα συνδυασμό του παρακείμενου ζεύγους σοφής ανταλλαγής και

ευρετικής αναζήτησης Tabu, αλλά και της διαδικασίας branch and bound. (Bautista, Companys, & Corominas, 1996a), (Bautista, Companys, & Corominas, 1996b), (Zhu & Ding, 2000) μετασχημάτισαν το κομμάτι του προβλήματος σχετικά με την ελαχιστοποίηση της μονοεπίπεδης και της διεπίπεδης διακύμανσης στη χρήση εξαρτημάτων σε επίπεδο προϊόντος. Οι ίδιοι πρότειναν επίσης ένα ακριβή αλγόριθμο για την επίλυση του προβλήματος, με βάση τον οριοθετημένο δυναμικό προγραμματισμό.

Οι (Aigbedo & Monden, 1997) ανέπτυξαν μια παραμετρική διαδικασία, για να εξετάσουν από κοινού τις διακυμάνσεις σε ένα πρόβλημα τεσσάρων κριτηρίων που συμπεριελάμβανε την παραγωγή τελικών προϊόντων, τη χρήση εξαρτημάτων, το φόρτο εργασίας της γραμμής συναρμολόγησης, και το φόρτο εργασίας της γραμμής συναρμολόγησης. Ο (Zeramdini, H., & Monden, 2000) πρότεινε μια προσέγγιση δύο σταδίων για την αντιμετώπιση του δικριτηριακού προβλήματος χρονοδρομολόγησης, λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση των εξαρτημάτων και την εξομάλυνση του φόρτου εργασίας. Αφού η αρχική αλληλουχία προσδιοριστεί από μια ευρετική μέθοδο δύο σταδίων μετά την εξέταση της χρήσης εξαρτημάτων, έχουμε τη διαίρεσή της σε έναν αριθμό από υποαλληλουχίες ίσο με την συχνότητα τροφοδοσίας. Κάθε υποαλληλουχία ακολούθως ξαναδρομολογείται για την εξομάλυνση του φόρτου εργασίας με την εφαρμογή της σε όλες τις υπο-αλληλουχίες, είτε με τη μέθοδο εσωτερικού κανόνα, είτε με τη μέθοδο εξάπλωσης εκτεταμένου χρόνου.

Οι (Korkmazel & Meral, 2001) από την άλλη πλευρά, ενοποίησαν τα δύο κριτήρια σε μία αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του σταθμισμένου αθροίσματος. Οι (Kostaras, Makarouni, Mitrou, & Psarras, 2000) ασχολήθηκαν με ένα πρόβλημα πολλαπλών κριτηρίων προγραμματισμού εργασιών και πιο συγκεκριμένα χρονοδρομολόγησης στην αυτοκινητοβιομηχανία, και επίσης χρησιμοποίησαν μία αντικειμενική συνάρτηση σταθμισμένου αθροίσματος. Κατάφεραν να επιτύχουν τη βελτιστοποίηση μέσω τεχνικών διάδοσης περιορισμών (constraint propagation techniques) αλλά και ευρετικών τεχνικών, που αντιπροσωπεύουν εμπειρικά καθορισμένους κανόνες προτεραιότητας στο βιομηχανικό περιβάλλον.

Ο (Hyun, 1998) ήταν ο πρώτος που προσέγγισε τις βέλτιστες λύσεις του προβλήματος χρονοδρομολόγησης MMAL αλληλουχίας με πολλαπλά κριτήρια, χρησιμοποιώντας ένα γενετικό αλγόριθμο. Λαμβάνοντας υπόψη του τρία κριτήρια :

α. την ελαχιστοποίηση του συνολικού έργου κοινής ωφελείας,

β. τη διατήρηση ενός σταθερού ρυθμού της χρήσης εξαρτημάτων και

γ. την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εγκατάστασης,

πρότεινε ένα γενετικό μηχανισμό αξιολόγησης και επιλογής, που ονομάζεται Pareto stratum–niche cubicle. Οι (Tavakkoli-Moghaddam & Rahimi-Vahed, 2006) διατύπωσαν

το ίδιο πρόβλημα χρησιμοποιώντας ένα μιμητικό γενετικό αλγόριθμου (MA), ενώ ένας πολυκριτηριακός γενετικός αλγόριθμος αναπτύχθηκε επίσης για την αντιμετώπιση του δικριτηριακού MMALS προβλήματος (Mansouri, 2005) προσπαθώντας να ελαχιστοποιήσουν τη διακύμανση των ποσοστών παραγωγής και τον αριθμό των ρυθμίσεων.

Ο (McMullen, 1998) χρησιμοποίησε τη δικριτηριακή μοντελοποίηση, που πρότεινε ο (Miltenburg J. , 1989), ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των ρυθμίσεων και κρατώντας ένα σταθερό ρυθμό χρησιμοποίησης εξαρτημάτων, λύνοντας τελικά το πρόβλημα με τη μέθοδο Tabu Search (TS). Οι (McMullen & Frazier, 2000) και συνέκριναν τα αποτελέσματά της με αυτά που εξάγονται από τη μέθοδο TS. Ο McMullen προσέγγισε τις βέλτιστες λύσεις για το ίδιο πρόβλημα με τη χρήση χάρτη αυτο-οργάνωσης Kohonen (τεχνητό νευρωνικό δίκτυο) και εξελεγκτική τεχνική βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (McMullen, 2001a), (McMullen, 2001b), (McMullen, 2001) και σύγκρινε τις επιδόσεις των μεθόδων αυτών (McMullen, 2001b). Το συμπέρασμα ήταν ότι παρόλο που όλες οι μέθοδοι αυτές δίνουν λύσεις με προσεγγιστικά βέλτιστα αποτελέσματα όταν εφαρμόζονται σε μικρά προβλήματα, οι προσεγγίσεις SA και TS υπερτερούν της προσέγγισης του Γενετικού Αλγόριθμου σε μεγαλύτερης κλίμακας προβλήματα, χωρίς όμως να μπορούν πρακτικά να υποστηρίξουν προβλήματα πραγματικών διαστάσεων, λόγω της πολυπλοκότητας της προσέγγισης επίλυσης.

Λοιπές ερευνητικές προσεγγίσεις που εφαρμόστηκαν στην ίδια τυπολογία-προβλήματος, για να ελαχιστοποιηθούν τα τρία κριτήρια που παρουσίασε ο Hyun et al (1998) αφορούν μία πολυκριτηριακή αναζήτηση διασποράς που προτείνουν οι (Rahimi-Vahed, Rabbani, & Tavakkoli-Moghaddam, 2007a), ένα πολυκριτηριακός υβριδικός αλγόριθμος με βάση τον αλγόριθμο SFLA (shuffled frog-leaping algorithm) σε συνδυασμό με αλγόριθμο βελτιστοποίησης BO (bacteria optimization) (Rahimi-Vahed & Mirzaei, 2007b). Διαπιστώθηκε ότι και οι δύο προσεγγίσεις υπερτερούν των γενετικών αλγορίθμων, ιδιαίτερα σε πιο μεγάλης κλίμακας προβλήματα. Το ίδιο πρόβλημα λύθηκε επίσης με αλγόριθμο MOPSO (MO-Particle swarm optimization) (Rahimi-Vahed, Mirghorbani, & Rabbani, 2007). και ένα υβριδικό MO αλγόριθμο βασισμένο σε PSO και TS (Mirghorbani, Rabbani, Tavakkoli-Moghaddam, & Rahimi-Vahed, 2007). Τα αποτελέσματα τους συγκρίθηκαν με αυτά που εξάγονται από γενετικούς αλγόριθμους και τα πρώτα αποδείχθηκαν ανώτερα των τελευταίων.

Οι (Rabbani, Rahimi-Vahed, Javadi, & Tavakkoli-Moghaddam, 2006) και (Javadi, Rahimi-Vahed, Rabbani, & Dangchi, 2008) πρότειναν μια μέθοδο-στόχων ασαφούς μικτού ακέραιου προγραμματισμού στόχου, για να πετύχουν μια ικανοποιητική λύση για το MMALS πρόβλημα τριών κριτηρίων, που προτάθηκε από το Hyun et al. (1998), σύμφωνα με τις προτιμήσεις του αποφασίζοντος. Ασαφής θεωρία συνόλων

εφαρμόστηκε στη μέθοδο GP, προκειμένου να διευκολύνει τον αποφασίζοντα να εκφράσει τις προτιμήσεις του με μεγαλύτερη ακρίβεια σε αυτό το μεγάλης κλίμακας πρακτικό πρόβλημα, με στόχο τη μεγιστοποίηση της ικανοποίησής του, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τα επίπεδα ανοχής του.

Ο (Mahdavi, Javadi, Sahebjamnia, & Mahdavi-Amiri, 2009) μελέτησε το ίδιο πρόβλημα, χρησιμοποιώντας μία μεθοδολογία δύο φάσεων ασαφούς πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού (FMOLP). Στην πρώτη φάση, το πρόβλημα αυτό επιλύεται χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση max-min, ενώ στη συνέχεια λαμβάνει χώρα μια μεγιστοποίηση ενός σύνθετου βαθμού ικανοποίησης. Η μεθοδολογία αυτή, σε σύγκριση με τον ασαφούς προγραμματισμό στόχου και τις προσεγγίσεις σταθμισμένων αθροισμάτων, οδήγησε υψηλότερους βαθμούς ικανοποίησης των αντικειμενικών συναρτήσεων.

3.8 Ερευνητική στόχευση της διατριβής

Από την ανάλυση του παρόντος και του προηγούμενου κεφαλαίου γίνεται φανερό ότι τις τελευταίες δεκαετίες η προσέγγιση του γενικότερου προβλήματος χρονοπρογραμματισμού παραγωγής έχει αποτελέσει ένα ευρύ και ανεξάντλητο πεδίο συνεχούς έρευνας από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα.

Η ερευνητική δραστηριότητα σχετίζεται περισσότερο:

α) με την ανάπτυξη και αξιοποίηση μεθόδων βελτιστοποίησης με σκοπό την εύρεση βέλτιστων λύσεων μέσα σε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο υποθέσεων, προσεγγίσεων και παραδοχών που δεν συναντώνται στην πράξη και

β) με την αξιοποίηση προηγμένων προσεγγιστικών μεθόδων με σκοπό την εύρεση προσεγγιστικών σε προβλήματα αρκετά ρεαλιστικά, αυξημένης πολυπλοκότητας προβλήματα.

Και λιγότερο:

γ) με την θεώρηση και την υποστήριξη αποφάσεων αναφορικά με τον χειρισμό των πολλαπλών κριτηρίων που χαρακτηρίζουν τα πραγματικά προβλήματα, κατά την διαδικασία επίλυσης.

Όσον αφορά στη χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης, οι έρευνες οδήγησαν αρχικά στην επίλυση απλουστευμένων περιπτώσεων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής (μικρός αριθμός μηχανών, λίγες παραγγελίες, αρκετές παραδοχές) οι οποίες ουσιαστικά δεν συναντώνται σε πραγματικά βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η χαλάρωση των περιορισμών και η εισαγωγή πολλών παραδοχών οδηγεί ουσιαστικά στην πολύ αποτελεσματική επίλυση μη ρεαλιστικών προβλημάτων, με συνέπεια οι μέθοδοι να μην αξιοποιούνται τελικά σε επιχειρησιακό επίπεδο. Παρολαυτά, σήμερα μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η επιχειρησιακή έρευνα και η τεχνητή νοημοσύνη παρέχουν πλήθος εργαλείων, μεθόδων και τεχνικών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την αντιμετώπιση της δυσκολίας μοντελοποίησης και επίλυσης προβλημάτων με σύνθετους μαθηματικούς τύπους, αυξημένης πολυπλοκότητας και ποικιλίας περιορισμών.

Όσον αφορά το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής, και ειδικότερα την περίπτωση των γραμμών συναρμολόγησης, έχοντας δρομολογήσει και οριοθετήσει τα αναμενόμενα οφέλη από την αποτελεσματική υπολογιστική επίλυση σχετικών προβλημάτων, το ενδιαφέρον της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας έχει εστιάσει και στην ανάπτυξη μεθόδων για την πολυκριτηριακή θεώρηση των προβλημάτων. Είναι πλέον κατανοητό ότι η πολυκριτηριακή θεώρηση του προβλήματος κατά την μεθόδευση του μοντέλου επίλυσης αλλά και κατά την

διαδικασία επίλυσης, δύναται να επιφέρει σημαντικά οφέλη για τον ιδιοκτήτη του προβλήματος (βιομηχανία). Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο και σημαντικό την εποχή του έντονου ανταγωνισμού σε όλα τα επίπεδα που αντιμετωπίζουν οι επιχειρήσεις.

Σε πραγματικά προβλήματα ένα και μόνο κριτήριο προς βελτιστοποίηση δεν είναι αρκετό για τον υπεύθυνο παραγωγής, ο οποίος εκ των πραγμάτων ενδιαφέρεται να λάβει υπόψη του όσο το δυνατόν περισσότερες παραμέτρους που θα του εξασφαλίσουν ένα καλύτερο και εφικτό πρόγραμμα παραγωγής. Για τον υπεύθυνο παραγωγής μιας επιχείρησης ο χαρακτηρισμός μιας λύσης ως βέλτιστης ή «κοντά στη βέλτιστη» πρέπει να λαμβάνει υπόψη ένα σύνολο από κριτήρια, κάθε ένα από τα οποία αντικατοπτρίζει και μια συγκεκριμένη οπτική γωνία του προβλήματος. Επιπλέον, θα πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι ένα καλό, «κοντά στο βέλτιστο» πρόγραμμα παραγωγής για ένα συγκεκριμένο κριτήριο μπορεί να μην είναι καθόλου καλό για κάποιο άλλο κριτήριο. Συνεπώς, η αντιμετώπιση πολλών κριτηρίων ταυτόχρονα σε ένα πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής είναι πρακτικά πολύ σημαντική, αν και αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της λύσης του προβλήματος.

Για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, η διαδικασία αναζήτησης λύσεων ενός πολυκριτηριακού προβλήματος στο συγκεκριμένο πεδίο αντιμετωπίστηκε ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μιας εκ των προτέρων διαμορφωμένης αριθμητικής έκφρασης, που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει τη συνάρτηση χρησιμότητας του εν λόγω προβλήματος. Σε ένα, όμως, σύνθετο πρόβλημα ή σε ένα πρόβλημα πολλαπλών κριτηρίων η συνάρτηση χρησιμότητας δεν εκφράζει παρά μια αυθαίρετη συνάθροιση των κριτηρίων που οδηγεί σε μία και μοναδική τελική λύση του προβλήματος, που χωρίς τεκμηρίωση θεωρείται ως η πλέον πρόσφορη. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι συχνά κατευθύνει την διαδικασία αναζήτησης σε μια προαποφασισμένη επιλογή. Σε κάθε περίπτωση, η συνάθροιση των κριτηρίων αναιρεί τη δυνατότητα διερεύνησης κρίσιμων πτυχών του προβλήματος, που σχετίζονται με τον τρόπο αλληλεπίδρασης των κριτηρίων και την ύπαρξη καλά συμβιβαστικών περιοχών του πεδίου αποτίμησης.

Η σύγχρονη μαθηματική προσέγγιση αποσκοπεί στην ξεκάθαρη αντιμετώπιση του προβλήματος, με ξεχωριστό χειρισμό των επιμέρους κριτηρίων. Πρόκειται για μια σαφώς πιο δίκαιη και αντικειμενική στρατηγική, που αποσκοπεί στην ταυτόχρονη παραγωγή πολλαπλών μη κατωτέρων λύσεων, που είναι αντιπροσωπευτικές του μετώπου Pareto.

Επισημαίνεται ακόμη ότι, παρά την αλματώδη ανάπτυξή της τελευταίας δεκαετίας, η εφαρμογή των πολυκριτηριακών αλγορίθμων σε προβλήματα επιχειρησιακού χαρακτήρα είναι μάλλον περιορισμένη. Ειδικότερα, σε θέματα διαχείρισης παραγωγής έχουν δοκιμαστεί πρακτικά ελάχιστες από τις τεχνικές που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, και αυτές περιορισμένες σε μικρό, σχετικά, εύρος προβλημάτων.

Επιπλέον, υπάρχει ελάχιστη εμπειρία σε εφαρμογές με περισσότερα από δύο κριτήρια. Συχνά, όταν σε ένα πρόβλημα εμπλέκονται πολλαπλά κριτήρια, προτείνεται η ενσωμάτωσή τους σε έως δυο μέτρα επίδοσης, που αποτελούν συνιστώσες της διανυσματικής στοχικής συνάρτησης. Με τη διαδικασία αυτή αποφεύγεται ο κίνδυνος δημιουργίας εξαιρετικά εκτεταμένων μετώπων Pareto, που καλύπτουν σημαντικό τμήμα του πεδίου αποτίμησης. Η άποψή μας είναι ότι πρόκειται για εγγενή αδυναμία των υφιστάμενων πολυκριτηριακών σχημάτων να χειριστούν πολυδιάστατα πεδία αποτίμησης.

Ένα σημαντικό ερώτημα που εγείρεται είναι ο τρόπος που μπορεί ο χρήστης-αποφασίζων να ερμηνεύσει και, στη συνέχεια, να χειριστεί το σύνολο των Pareto βέλτιστων λύσεων στις οποίες καταλήγει η διαδικασία ανάλυσης και παραγωγής λύσεων, ώστε να επιλέξει την καλύτερα συμβιβαστική από αυτές. Προφανώς, σε μια εφαρμογή όχι απλά ακαδημαϊκού ενδιαφέροντος αλλά επιχειρησιακού χαρακτήρα (όπως στο σχεδιασμό ενός έργου, στη λειτουργία ενός συστήματος ή στη χρήση ενός μοντέλου ως προγνωστικού εργαλείου) απαιτείται η διατύπωση μιας ξεκάθαρης λύσης, που εγγυάται έναν πρόσφορο συγκερασμό των αντικρουόμενων κριτηρίων. Οι πολυκριτηριακοί αλγόριθμοι παρέχουν μια ικανοποιητική προσέγγιση του μετώπου Pareto, δηλαδή των διαφόρων συμβιβασμών μεταξύ των επιμέρους κριτηρίων, λαμβάνοντας υπόψη αποκλειστικά την αρχή της κυριαρχίας. Με τον τρόπο αυτό, ενδέχεται να κατευθυνθούν σε περιοχές λύσεων που είναι μαθηματικά βέλτιστες (αφού ανήκουν στο μέτωπο Pareto), αλλά όχι αποδεκτές από την σκοπιά του χρήστη. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση λύσεων που βρίσκονται στις ακραίες περιοχές του μετώπου, που σημαίνει ότι υπερτερούν σημαντικά ως προς κάποια από τα κριτήρια, αλλά παρουσιάζουν χαμηλή επίδοση ως προς τα υπόλοιπα κριτήρια. Ωστόσο, δεν είναι ασυνήθιστη η περίπτωση που για να είναι αποδεκτή, στην πράξη, μια βέλτιστη επιλογή Pareto, οφείλει να παρέχει μια ελάχιστη επίδοση για το σύνολο των κριτηρίων. Για τον λόγο αυτό, οι «ακραίες» λύσεις ενός πολυκριτηριακού προβλήματος θεωρούνται τελικά απορριπτέες, ανεξάρτητα αν είναι αποδεκτές από καθαρά μαθηματική άποψη.

Συμπερασματικά, διαφαίνεται ότι υπάρχουν ακόμη αρκετά περιθώρια βελτίωσης των υφιστάμενων σχημάτων διανυσματικής βελτιστοποίησης, όσον αφορά στα ακόλουθα σημεία:

- την προσαρμογή διαφορετικών μηχανισμών αναζήτησης λαμβάνοντας υπόψη και τις ιδιαιτερότητες του πολυκριτηριακού προβλήματος·
- τον χειρισμό προβλημάτων με περισσότερα των δύο κριτήρια, αλλά με τρόπο ώστε η διαδικασία επιλογής να μην καταλήγει σε ένα ανεξέλεγκτα μεγάλο αριθμό βέλτιστων λύσεων.
- την ενσωμάτωση επιπλέον κριτηρίων στη διαδικασία επιλογής, που θα αξιοποιούν την εμπειρία του αποφασίζοντος και θα καθοδηγούν την αναζήτηση προς τις πλέον πρόσφορες περιοχές του μετώπου Pareto, που είναι όχι μόνο βέλτιστες από μαθηματική άποψη, αλλά και αποδεκτές, με βάση τις απαιτήσεις του προβλήματος, εξασφαλίζοντας έτσι την παραγωγή επιχειρησιακά αξιοποιήσιμων συμβιβασμών μεταξύ των αντικρουόμενων κριτηρίων.

Οι μέθοδοι πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού που παρουσιάστηκαν αποτελούν ένα αξιόλογο υπόβαθρο για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων. Οι μέθοδοι εμπλοκής του αποφασίζοντος εκ-των-προτέρων, εκ των υστέρων ή κατά την διάρκεια εμφανίζουν η κάθε μία ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα.

Θεωρούμε όμως ότι δεν υφίσταται/αναδεικνύεται κάποια μέθοδος η οποία να μπορεί να ανταποκριθεί επάξια στο σύνολο των απαιτήσεων που παρουσιάζουν τα πραγματικά πολυκριτηριακά προβλήματα ειδικά στον χώρο του χρονοπρογραμματισμού παραγωγής (κεφ. 2).

Αποτελεί ιδιαίτερη ερευνητική πρόκληση η κατάλληλη τροποποίηση, προσαρμογή, και συνδυασμός των μεθόδων εκείνων που παρουσιάζουν συμπληρωματικά πλεονεκτήματα, σε μια μεθοδολογική πολυκριτηριακή προσέγγιση επίλυσης που να μπορεί να τα αξιοποιεί αποτελεσματικά έτσι ώστε να εξουδετερώνονται κατά το δυνατόν και τα μειονεκτήματα των επιμέρους τεχνικών. Απώτερος στόχος είναι η επιστημονική πρόταση ενός μεθοδολογικού πλαισίου η χρήση του θα ικανοποιεί απόλυτα τον χρήστη/αποφασίζοντα και θα τον υποστηρίζει στην διαδικασία λήψης ορθολογικών αποφάσεων, βέλτιστα ισορροπημένων κατά το μοντέλο πολυκριτηριακών προτιμήσεων που επιθυμεί.

Η διατριβή, με την Πρότασή της, επιδιώκει να απαντήσει και να ανταποκριθεί αποτελεσματικά στις αναγνωρισμένες ερευνητικές προκλήσεις της συγκεκριμένης τυπολογίας πραγματικών προβλημάτων, που εντοπίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, αξιοποιώντας συνδυαστικά την εμπειρία και τις τεχνικές που παρέχει ο

χώρος του πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού, προσαρμοσμένες στις ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά του προβλήματος.

Τα επόμενα βήματα της εργασίας της διατριβής περιλαμβάνουν

- **αποτύπωση της προτεινόμενης μαθηματικής μοντελοποίηση**ς του πολυκριτηριακού προβλήματος χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μεικτού μοντέλου,
- παρουσίαση της πρότασης της διατριβής για την **μεθοδολογία επίλυσης** δύο πολυκριτηριακών σεναρίων του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου, με προσαρμογή και αξιοποίηση κατάλληλων τεχνικών πολυστοχικού μαθηματικού προγραμματισμού. Ειδικότερα αναπτύσσονται και παρουσιάζονται:

  Μεθοδολογία Επίλυσης του Ειδικού Δικριτηριακού Σεναρίου – Η μεθοδολογία είναι κατάλληλη για τις περιπτώσεις εκείνες των προβλημάτων που η εταιρεία (αποφασίζων) δίνει απόλυτη και σαφή προτεραιότητα/ιεραρχία σε κάποια κριτήρια, και είναι σε θέση να εντοπίσει την πολυκριτηριακή θεώρηση επίλυσης σε δύο μόνο κριτήρια, για τα οποία δεν έχει ορίσει μοντέλο ιεραρχίας. Στην περίπτωση αυτή, η πρόταση της διατριβής είναι σε θέση να αξιοποιήσει επιπλέον και το πλεονέκτημα της δυνατότητας οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων στον χώρο των δύο διαστάσεων, γεγονός που δεν είναι εύκολο/εύληπτο από τον αποφασίζοντα όταν περνάμε σε περισσότερες των δύο διαστάσεις. Θεωρούμε ότι η δικριτήρια περίπτωση είναι συνήθης στον χώρο των βιομηχανιών παραγωγής, και για τον λόγο αυτό έγινε η ερευνητική προσπάθεια ιδιαίτερης (ή και εναλλακτικής) αντιμετώπισης, δεδομένων των πλεονεκτημάτων που μπορεί να αξιοποιήσει, εφόσον ισχύει η παραδοχή των δύο κριτηρίων.

  Μεθοδολογία Επίλυσης του Γενικού Πολυκριτηριακού Σεναρίου – Η μεθοδολογία είναι κατάλληλη για την γενική περίπτωση τον προβλημάτων προγραμματισμού παραγωγής – με έμφαση σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου.
- Τέλος, γίνεται η παρουσίαση και αξιολόγηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων που επιτυγχάνονται με τις προτεινόμενες προσεγγίσεις, συγκριτικά με την εφαρμογή των συμβατικών τεχνικών πολυκριτηριακής επίλυσης που συναντώνται στην βιβλιογραφία.

Η συμβολή θα επιβεβαιωθεί με την εφαρμογή της Πρότασης σε Πρόβλημα με δεδομένα που προσομοιάζουν πραγματικές συνθήκες βιομηχανικού περιβάλλοντος.

4

Η πρόταση της διατριβής

Κεφάλαιο 4

Η πρόταση της διατριβής

- Εισαγωγή
- Μοντελοποίηση του περιβάλλοντος παραγωγής JIT Γραμμών Συναρμολόγησης Μεικτού Μοντέλου

  Άτυπη Περιγραφή του προβλήματος, Μαθηματική Μοντελοποίηση
- Δικριτηριακή Μοντελοποίηση και Μεθοδολογία Επίλυσης

  Το μοντέλο, Οι τεχνικές, Η μεθοδολογία, Χαρακτηριστικά και Πλεονεκτήματα
- Πολυκριτηριακή Μοντελοποίηση και Μεθοδολογία Επίλυσης

  Το μοντέλο, Οι τεχνικές, Η μεθοδολογία, Χαρακτηριστικά και Πλεονεκτήματα

4.1. Εισαγωγή

Η παρούσα διδακτορική διατριβή παρέχει μια ολοκληρωμένη πρόταση για την μοντελοποίηση και την προσέγγιση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού εργασιών (παραγγελίες προϊόντων) σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου. Στο πλαίσιο της διατριβής, μελετάται η συγκεκριμένη περίπτωση των προβλημάτων παραγωγής και γίνεται ερευνητική συνεισφορά στην μαθηματική μοντελοποίηση ενός προβλήματος χρονοπρογραμματισμού, μορφές/ παραλλαγές του οποίου συναντώνται σε αρκετές περιπτώσεις πραγματικών προβλημάτων στην βιομηχανία συναρμολόγησης προϊόντων (αυτοκίνητα, ποδήλατα, επαγγελματικά/ αγροτικά/ βαρέα οχήματα, εργαλεία, τυποποιημένα έπιπλα, παιχνιδοκατασκευές, κλπ).

Η διατριβή στοχεύει να απαντήσει στις ερευνητικές προκλήσεις που αναδείχθηκαν στο κεφάλαιο 2 «Το πρόβλημα», με μια πρόταση που αξιοποιεί, συνδυάζει, προσαρμόζει και επεκτείνει μεθόδους της πολυκριτήριας ανάλυσης και του μαθηματικού προγραμματισμού.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πρόταση της διατριβής, ως ένα μεθοδολογικό πλαίσιο που αναπτύσσεται σε τρία επίπεδα:

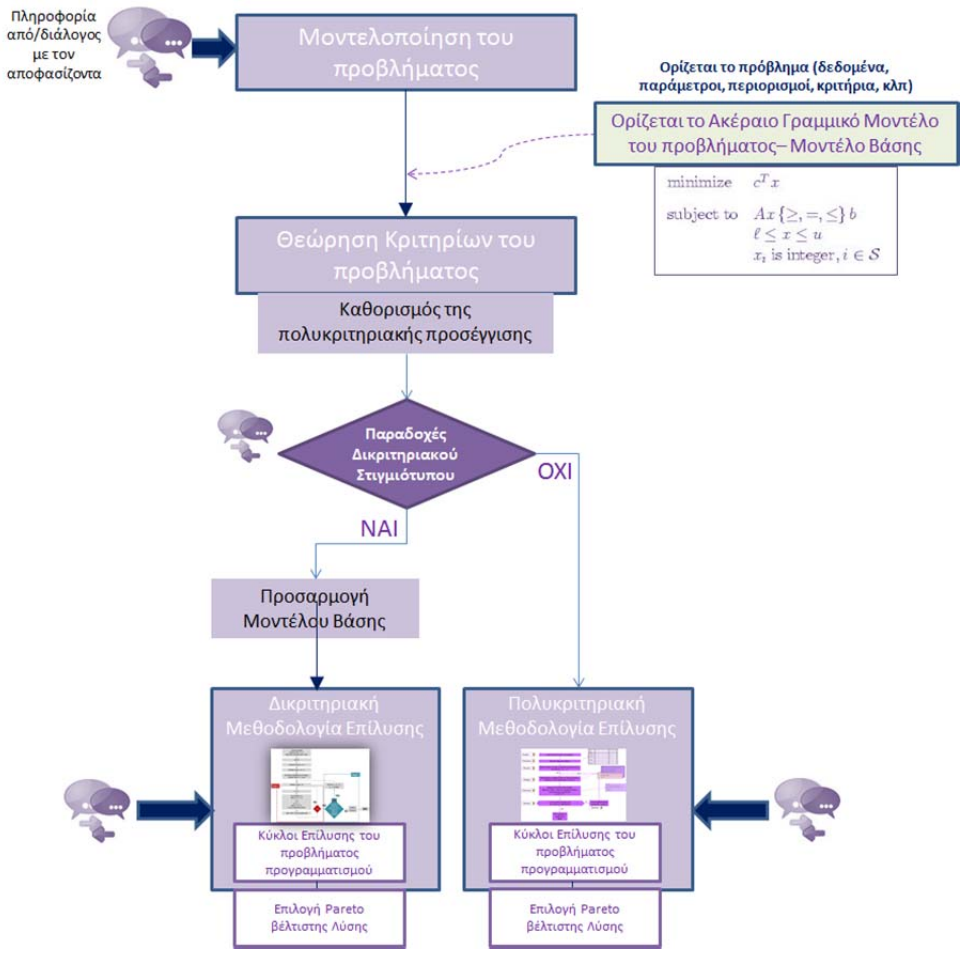
- Μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος η οποία παρουσιάζεται στην ενότητα 4.2 του παρόντος κεφαλαίου.
- Μεθοδολογία επίλυσης του δικριτήριου σεναρίου του προβλήματος, προσαρμόζοντας και συνδυάζοντας πολυκριτήρια a-posteriori μέθοδο παραγωγής λύσεων (generating method) σε μια διαδραστική (interactive) προσέγγιση πολυκριτήριας λήψης αποφάσεων.
- Μεθοδολογία επίλυσης του πολυκριτηριακού σεναρίου του προβλήματος, προσαρμόζοντας και συνδυάζοντας μια διαδραστική (interactive) με μια εκ-των προτέρων (a-priori) μέθοδο πολυκριτήριας βελτιστοποίησης προκειμένου να γίνει αξιοποίηση των συμπληρωματικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι δυο προσεγγίσεις.

Παράλληλα, σε κάθε ενότητα γίνεται παρουσίαση και αξιολόγηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι προτεινόμενες προσεγγίσεις, αναφερόμενες και συγκρινόμενες και με τις απλές μεθόδους ΠΜΠ που χρησιμοποιούνται.

Στο σχήμα 4.1 αποτυπώνεται η λογική ροή του μεθοδολογικού πλαισίου που προτείνεται.

Επισημαίνεται, ότι η πρόταση και η συμβολή της διατριβής εστιάζει στην μεθοδολογία υποστήριξης λήψης αποφάσεων κατά την πολυκριτήρια βελτιστοποίηση και όχι στις μεθόδους βελτιστοποίησης/λύτες που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των μαθηματικών μοντέλων που προκύπτουν.

Αναφορικά με το θέμα επίλυσης των μαθηματικών μοντέλων, χρησιμοποιούνται state –of –the art λύτες μαθηματικού προγραμματισμού οι οποίοι κατά γενική παραδοχή ανταποκρίνονται άριστα στην περίπτωση γραμμικών προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού. Τονίζεται, ότι η μοντελοποίηση γίνεται με γνώμονα και επιδίωξη να μπορεί να αξιοποιηθούν κατά την επίλυση ταχύτατοι λύτες που υπάρχουν διαθέσιμοι για προβλήματα Γραμμικού Ακέραιου Προγραμματισμού, προκειμένου να αποφευχθεί η ανάγκη χρήσης γενετικών αλγορίθμων ή πιο πολύπλοκων αλγορίθμων βελτιστοποίησης.



Σχήμα 4. 1 Περίγραμμα του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου

4.2. Μοντελοποίηση του περιβάλλοντος παραγωγής περιβάλλοντος παραγωγής JIT Γραμμών Συναρμολόγησης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η προτεινόμενη μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού εργασιών (παραγγελίες προϊόντων) σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου.

Ακολούθως, αποτυπώνεται το περιβάλλον παραγωγής, όπως αποδόθηκε περιγραφικά από τα στελέχη της βιομηχανίας, που αποτέλεσε το «μοντέλο-εφαρμογής» για την έρευνα της διατριβής. Η καταγραφή γίνεται σε στενή συνεργασία με τα στελέχη/αποφασίζοντες της επιχείρησης προκειμένου να εξασφαλιστεί η κατά το δυνατόν ακριβής αποτύπωση του τρόπου λειτουργίας του συστήματος παραγωγής και της φιλοσοφίας λήψης αποφάσεων. Με τον τρόπο αυτό οριοθετείται το πρόβλημα και να οριστούν οι τυχόν παραδοχές που γίνονται στο πλαίσιο της διατριβής:

Στην περιγραφή του προβλήματος καθορίζονται, τα δεδομένα, οι περιορισμοί, οι μεταβλητές απόφασης και τα κριτήρια βελτιστοποίησης τα οποία εκφράζουν τους

δείκτες βάσει των οποίων γίνεται η αξιολόγηση της λύσης από τον αποφασίζοντα και πρέπει να αποτελέσουν τον οδηγό για την εύρεση βέλτιστης λύσης που θα ικανοποιεί τον αποφασίζοντα. Με τον όρο αποφασίζοντα στην ανάλυση που ακολουθεί εννοείται ένα άτομο ή ομάδα αποφασιζόντων που αλληλεπιδρά μονοσήμαντα με τον αναλυτή του προβλήματος, συνεισφέροντας σε κάθε φάση της προσέγγισης επίλυσης την πληροφορία/άποψη που εκφράζει τον τρόπο λήψης αποφάσεων στην επιχείρηση στην συγκεκριμένη φάση/περίπτωση.

Ενδεικτικά το ακόλουθο σχήμα αποτυπώνει το θεωρούμενο χαρακτηριστικό προφίλ του αποφασίζοντα.



- Υπεύθυνος Προγραμματισμού Παραγωγής σε τακτικό επίπεδο *(ενδ. εβδομάδα, 15- ήμερο, μήνας)*
- Γνώση και αντίληψη της σημασίας κριτηρίων αξιολόγησης
- Μη σαφώς και a-priori ορισμένο προτιμησιακό μοντέλο παραχωρήσεων
- Ανάγκη ενός συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για την υποστήριξη αναζήτησης/διερεύνησης αντιπροσωπευτικών ικανών λύσεων που να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις και το προτιμησιακό μοντέλο που διαμορφώνεται/αναδεικνύεται αλληλεπιδραστικά
- Προθυμία αλληλεπίδρασης με τον αναλυτή (σύστημα)

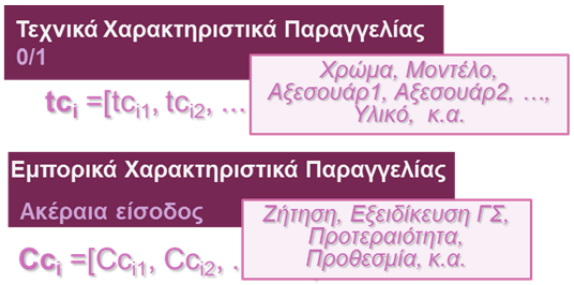
Σχήμα 4. 2 Ενδεικτικό προφίλ του αποφασίζοντα

4.2.1 Άτυπη Περιγραφή του Προβλήματος

Θεωρούμε την περίπτωση μίας βιομηχανίας η οποία παρασκευάζει ένα προϊόν, με δυνατότητα παρασκευής διαφορετικών μοντέλων, μέσω ειδικευμένων γραμμών παραγωγής (συναρμολόγησης).

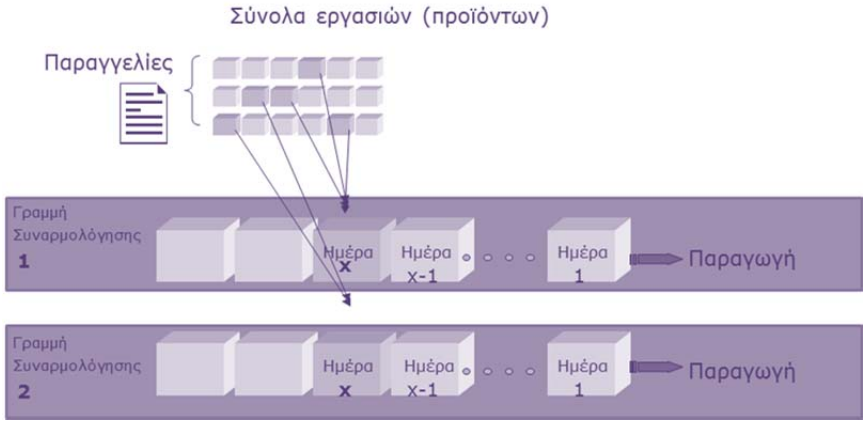
Όταν ένας αριθμός προϊόντων παραγγέλνεται από έναν εμπορικό αντιπρόσωπο της βιομηχανίας (για παράδοση σε ένα συγκεκριμένο πελάτη ή για εμπορικό στοκ), καταγράφεται μία εξειδικευμένη παραγγελία προϊόντος.

Η παραγγελία περιέχει τόσο τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του προϊόντος (π.χ. για την περίπτωση προϊόντων: μοντέλο, έκδοση, κινητήρας, χρώμα, κτλ.), όσο και τα εμπορικά του χαρακτηριστικά (συγκεκριμένα, το ζητούμενο πλήθος των προϊόντων, το επίπεδο προτεραιότητας: υψηλό για παράδοση σε πελάτη και χαμηλό για εμπορικό στοκ, καθώς και την αναμενόμενη περίοδο παραγωγής). Κάθε εβδομάδα, οι καινούργιες παραγγελίες διανέμονται στα διαφορετικά εργοστάσια, με ένα σύστημα βραχυπρόθεσμου σχεδιασμού παραγωγής το οποίο στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής και μεταφοράς, διατηρώντας, ταυτόχρονα, ομοιόμορφη κατανομή εργασίας σε όλα τα εργοστάσια.



Σχήμα 4. 3 Χαρακτηριστικά Παραγγελιών

Καθώς τα προϊόντα παρασκευάζονται π.χ. σε 3-4 εβδομάδες από τη στιγμή που έχουν παραγγελθεί, κάθε εργοστάσιο παραγωγής διατηρεί ένα βιβλίο παραγγελιών, το οποίο αντιστοιχεί σε αντίστοιχα 3-4 εβδομάδες εργασίας. Στο πλαίσιο του προβλήματος που απασχολεί την διατριβή, βασικός σκοπός είναι να κατανεμηθούν οι εργασίες (παραγωγή προϊόντων) των παραγγελιών σε ημέρες και γραμμές συναρμολόγησης με σκοπό την ελαχιστοποίηση των κριτηρίων «κόστους» της επιχείρησης, λαμβάνοντας υπόψη εμπορικούς και βιομηχανικούς περιορισμούς.



Σχήμα 4. 4 Το πρόβλημα του προγραμματισμού (δρομολόγησης) εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μεικτού μοντέλου

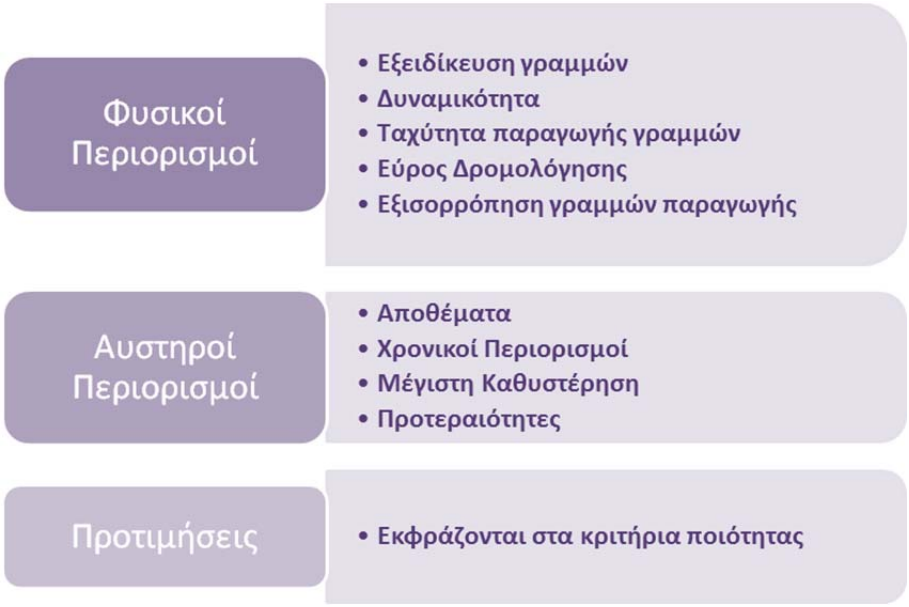
Πηγή: (Makarouni, Psarras, & Siskos, 2013)

Θεωρώντας ένα δεδομένο σύνολο από παραγγελίες προϊόντων, περιορισμούς και κριτήρια, αντικειμενικός σκοπός είναι να βρεθεί βέλτιστος προγραμματισμός για τις γραμμές παραγωγής. δηλ. να προσδιοριστεί η ημερολογιακή σειρά δρομολόγησης των εργασιών που υφίστανται επεξεργασία στις γραμμές συναρμολόγησης.

Το πρόβλημα δρομολόγησης συσχετίζει τα ακόλουθα στοιχεία:

- **Σύνολο και χαρακτηριστικά γραμμών συναρμολόγησης**
- **Σύνολο και χαρακτηριστικά παραγγελιών προϊόντων**
- **Σύνολο και χαρακτηριστικά περιορισμών**

Οι ακόλουθοι περιορισμοί βρίσκουν εφαρμογή στο πρόβλημα:



Σχήμα 4. 5 Περιορισμοί και Προτιμήσεις του προβλήματος

Πηγή: (Makarouni, Psarras, & Siskos, 2013)

- *Περιορισμοί εξειδίκευσης της γραμμής συναρμολόγησης/ παραγωγής*: οι γραμμές συχνά σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγουν ένα περιορισμένο αριθμό μοντέλων και σε ένα δεδομένο σύνολο εκδόσεων (π.χ. για την περίπτωση της αυτοκινητοβιομηχανίας με ή χωρίς ABS, Air Conditioning, κτλ). Για παράδειγμα, μία γραμμή παραγωγής μπορεί να είναι ικανή να παράγει το προϊόν Α αλλά όχι το προϊόν Β που έχει το χαρακτηριστικό k. Στην περίπτωση αυτή, η δυνατότητα παραγωγής των προϊόντων μιας παραγγελίες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, μπορεί να περιορίζεται σε ορισμένες μόνο γραμμές συναρμολόγησης ή, στην καλύτερη για το πρόβλημα περίπτωση, να υπάρχει δυνατότητα παραγωγής από οποιαδήποτε γραμμή.
- *Περιορισμοί παραγωγικής ικανότητας:* ο ημερήσιος αριθμός των εργασιών/προϊόντων που φέρουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και εκτελούνται σε μια γραμμή παραγωγής μπορεί να είναι περιορισμένος εξαιτίας φυσικών περιορισμών, όπως την παραγωγική ικανότητα των μηχανών, τον αριθμό των διαθέσιμων εργατών κτλ. Για παράδειγμα, δε μπορούν να συναρμολογηθούν πάνω από 75 προϊόντα σε μια ημέρα. Στο πρόβλημα της διατριβής, η παραγωγική ικανότητα σχετίζεται με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, και οριοθετείται από ένα κατώτερο και από ένα ανώτερο όριο για κάθε περιορισμό (το ανώτερο όριο θα μπορεί να είναι ακόμη και ίσο με το κατώτερο όριο).
- *Περιορισμός του πλάνου παραγωγής:* για την εξασφάλιση σταθερής ποιότητας στην παραγωγή, η ταχύτητα κάθε γραμμής παραγωγής δε

πρέπει να διαφέρει από μέρα σε μέρα. Επιπλέον, δεν επιτρέπονται κενά στη δρομολόγηση των προϊόντων, γι' αυτό, εάν η ταχύτητα της γραμμής είναι 100 προϊόντα/ώρα, τότε 100 προϊόντα πρέπει και να παράγονται κάθε ώρα. Αυτή η ταχύτητα καθορίζεται από την υπολογιζόμενη ζήτηση και ορίζεται κάθε εξάμηνο. Για να προσαρμοστεί η παραγωγή στην πραγματική ζήτηση, δουλεύονται υπερωρίες ή άλλες μέρες δε δουλεύονται καθόλου. Πάντως, η απόφαση να γίνουν υπερωρίες ή να μη γίνει εργασία μια ημέρα δεν αποτελούν κομμάτι του προβλήματος, και γι' αυτό, ο αριθμός των ωρών εργασίας καθώς και η ταχύτητα των γραμμών θα θεωρούνται γνωστές για τη θεωρούμενη χρονική περίοδο. Στο πρόβλημα της διατριβής, το πλάνο παραγωγής οριοθετείται από ένα κατώτερο και από ένα ανώτερο όριο (το ανώτερο όριο θα μπορεί να είναι ακόμη και ίσο με το κατώτερο όριο).

- *Ελάχιστο μήκος δρομολόγησης:* Για να εξασφαλίσουμε την δυνατότητα να παραγγελθούν οι προμήθειες στην ώρα τους, το μήκος μιας δρομολόγησης πρέπει να είναι τουλάχιστον μεγαλύτερο από μια ορισμένη τιμή, συνήθως τα ¾ της περιόδου που αντιπροσωπεύεται από το θεωρούμενο σύνολο των παραγγελιών.
- *Μέγιστη διαφορά του μήκους δρομολόγησης μεταξύ των γραμμών:* με σκοπό τη διατήρηση μιας ισορροπίας μεταξύ των γραμμών παραγωγής ενός εργοστασίου, το μήκος της δρομολόγησης τους δε θα πρέπει να διαφέρει πολύ.
- *Περιορισμοί όγκου προμηθειών:* μερικά εξαρτήματα είναι διαθέσιμα σε περιορισμένο αριθμό (π.χ. 50 εξαρτήματα k την ημέρα), κάτι το οποίο οφείλεται στα συμβόλαια με εξωτερικούς προμηθευτές ή σε περιορισμένες ικανότητες παραγωγής.
- *Ημερολογιακοί περιορισμοί:* οι εναρκτήριες και/ή οι καταληκτικές ημερομηνίες και/ή ο όγκος της παραγωγής μπορούν να καθοριστούν για ορισμένους τύπους προϊόντων.
- *Περιορισμός μέγιστης καθυστέρησης:* το εργοστάσιο εγγυάται ότι κάθε παραγγελία (θα θεωρήσουμε μόνο εφικτές παραγγελίες) η οποία λαμβάνεται την ημερομηνία T, θα έχει ολοκληρωθεί τουλάχιστον την ημερομηνία T+Dmax για να εξασφαλιστεί ότι η μέγιστη καθυστέρηση μιας παραγγελίας θα είναι περιορισμένη. Το εύρος του χρόνου παραγωγής Dmax μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την προτεραιότητα της παραγγελίας.

- **Στόχοι βελτιστοποίησης:** Ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί ένας κατά ημέρα προγραμματισμός παραγωγής που να σέβεται τους

κατασκευαστικούς περιορισμούς και ταυτόχρονα να ικανοποιεί όσο πιο πολύ μπορεί τις ακόλουθες προτιμήσεις:

- *Εύρος δρομολόγησης:* εξαιτίας του περιορισμών, μπορεί να μην είναι δυνατό να δρομολογήσουμε όλα τα προϊόντα που εμπεριέχονται σε ένα δεδομένο σύνολο παραγγελιών. Για παράδειγμα, αν αυτό το σύνολο αντιπροσωπεύει παραγγελίες 3 εβδομάδων, μπορεί να μην υπάρχει η δυνατότητα να βρεθεί μία εφικτή δρομολόγηση για την τέταρτη εβδομάδα, η οποία να ικανοποιεί τον περιορισμό του πλάνου παραγωγής. Αυτό οδηγεί σε έλλειψη διορατικότητας ως προς την παραγγελία προμηθειών κτλ. Συνεπώς, λύσεις οι οποίες δίνουν την μακρύτερη δρομολόγηση θα πρέπει να προτιμούνται. Αυτό ισοδυναμεί με το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του αριθμού των προϊόντων των παραγγελιών που δεν έχουν δρομολογηθεί.
- *Τήρηση Just-in-Time φιλοσοφίας παραγωγής:* με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους αποθήκευσης, οι παραγγελίες θα πρέπει να εξισορροπούνται από την παραγωγή. Για παράδειγμα, αν το απόθεμα των εξαρτημάτων k είναι 50 την ημέρα, είναι προτιμότερο να παράγονται 50 προϊόντα με εξαρτήματα k την ημέρα από ότι 25 την μία ημέρα, 75 την επόμενη και 40 μετά από δύο ημέρες. Ο στόχος θα είναι, πλέον, η ελαχιστοποίηση του μέσου όγκου των εξαρτημάτων που περισσεύουν, ταυτόχρονα με την εξομάλυνση του.
- *Απόκλιση από προθεσμίες:* στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του χρονικού διαστήματος μεταξύ της σχεδιασμένης ημερομηνίας παραγωγής και της αναμενόμενης ημερομηνίας παραγωγής, η οποία δόθηκε τη στιγμή που έγινε η παραγγελία. Όταν ένα προϊόν ολοκληρώνεται μετά την αναμενόμενη ημερομηνία παραγωγής του, αυτή η καθυστέρηση θα έχει εμπορικές επιπτώσεις. Ομοίως, όταν ένα προϊόν είναι έτοιμο πριν από την αναμενόμενη ημερομηνία παραγωγής, τότε θα υπάρξει ένα κόστος διατήρησης του προϊόντος στο απόθεμα.
- *Χρησιμοποίηση:* εξαιτίας της διαμόρφωσης της γραμμής παραγωγής και της διαφοράς χρόνου που απαιτείται για την εκτέλεση διαφορετικών εργασιών, πολλές φορές είναι αδύνατη η παραγωγή δύο προϊόντων, με κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, το ένα αμέσως μετά το άλλο. Θα πρέπει να υπάρχει μια ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Αυτή ορίζεται από τον ‘λόγο απόστασης’ ο οποίος δίνει το μέγιστο αριθμό των προϊόντων που έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν να παραχθούν, μέσα σε ένα συνολικό αριθμό προϊόντων. Για παράδειγμα, ‘Χαρακτηριστικό k: 1/8’ σημαίνει ότι είναι προτιμότερο

να παραχθεί όχι πάνω από 1/8 των προϊόντων με το χαρακτηριστικό k σε μία συνολική παραγωγή της ημέρας/γραμμής. Πάντως, εξαιτίας της ευελιξίας της γραμμής παραγωγής, παραβιάσεις αυτών των λόγων απόστασης είναι ανεκτές, αλλά επιφέρουν ένα κόστος για κάθε παραβίαση. Οι τιμές του λόγου απόστασης θα πρέπει να είναι τροποποιήσιμες. Αυτό εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες των γραμμών παραγωγής (π.χ. ο αριθμός των μηχανών) καθώς επίσης και από τον αριθμό των εργατών που είναι ειδικευμένοι για δεδομένες εργασίες. Ο λόγος απόστασης ορισμένων τιμών είναι δυνατό να μεταβληθεί: για παράδειγμα, προσλαμβάνοντας έναν ακόμη εργάτη ο λόγος μπορεί να αλλάξει από 1/8 σε 1/4. Αυτή η απόφαση επιφέρει ένα κόστος και -καθώς έχει να κάνει με την απασχόληση- πρέπει να σέβεται τους νόμους της απασχόλησης: για παράδειγμα ένας εργάτης δεν μπορεί να προσλαμβάνεται για λιγότερες από 5 συνεχόμενες ημέρες. Άρα ο λόγος απόστασης της συγκεκριμένης τιμής μπορεί να αλλάξει μόνο μια φορά την εβδομάδα. Ο στόχος θα είναι, πλέον, να μεγιστοποιήσουμε την χρησιμοποίηση, δηλαδή να βελτιστοποιήσουμε τον λόγο απόστασης και τον αριθμό των παραβιάσεών του. Οι προτιμήσεις που περιγράφτηκαν παραπάνω καθορίζονται για κάθε ένα από τα χαρακτηριστικά των προϊόντων. Το ίδιο προϊόν μπορεί να συμμετέχει σε αρκετές διαφορετικές –αντικρουόμενες καμιά φορά μεταξύ τους- προτιμήσεις. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της αυτοκινητοβιομηχανίας, στατιστικά, τα πιο ακριβά μοντέλα είναι εφοδιασμένα με ABS και βαμμένα με ένα σκούρο μεταλλικό χρώμα. Εξαιτίας του σχετιζόμενου χρώματος τους, κάποιος θα τα ομαδοποιούσε μαζί (προτίμηση ομαδοποίησης). Επειδή, όμως, είναι εφοδιασμένα με ABS, θα πρέπει να έχουν κάποια απόσταση μεταξύ τους (προτίμηση χρησιμοποίησης). Οπότε δεν είναι δυνατό να ικανοποιούνται πάντα όλες οι προτιμήσεις.

Η ποιότητα μιας λύσης του προβλήματος εξαρτάται από τον βαθμό ικανοποίησης των προτιμήσεων. Οι στόχοι του συγκεκριμένου πολυκριτηριακού προβλήματος είναι οι ακόλουθοι:

- *η μεγιστοποίηση του αριθμού των προϊόντων των παραγγελιών που δρομολογούνται*
- *η ελαχιστοποίηση του όγκου των προμηθειών που δε χρησιμοποιούνται*
- *η ελαχιστοποίηση της απόκλισης από τις προθεσμίες*
- *η ελαχιστοποίηση του κόστους χρησιμοποίησης, ήτοι του κόστους επιλογής των λόγων απόστασης και η ελαχιστοποίηση του αριθμού των παραβιάσεων των επιλεγμένων λόγων απόστασης*

- **Οι μεταβλητές απόφασης** του προβλήματος είναι:
  - *η απόφαση δρομολόγησης ολόκληρης ή τμήματος της κάθε παραγγελίας*
  - *η απόφαση δρομολόγησης ολόκληρης ή τμήματος της κάθε παραγγελίας στις ημέρες δρομολόγησης*
  - *η απόφαση δρομολόγησης ολόκληρης ή τμήματος της κάθε παραγγελίας στις γραμμές συναρμολόγησης*
  - *η επιλογή της τιμής των λόγων απόστασης για κάθε «δεσμευμένο» χαρακτηριστικό.*

Αυτές οι αποφάσεις δεν είναι όλες ανεξάρτητες μεταξύ τους: κάθε αλλαγή στην επιλογή των λόγων απόστασης θα έχει σίγουρα σημαντικές επιπτώσεις στην βέλτιστη δρομολόγηση των προϊόντων. Επίσης κάθε αλλαγή στην απόφαση δρομολόγησης ή μη τμήματος παραγγελίας επιφέρει αλλαγές στην δρομολόγηση και των υπολοίπων.

4.2.2 Η προτεινόμενη μαθηματική μοντελοποίηση

Όπως τονίστηκε στο Κεφ. 2 της διατριβής, θεωρούμε μεγάλη ερευνητική πρόκληση την εξασφάλιση της δυνατότητας ουσιαστικής πρακτικής αξιοποίησης της μεθόδου από τους χρήστες σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον. Στόχος είναι η πρόταση της διατριβής να αξιοποιηθεί σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα αποφάσεων, στο οποίο ο χρήστης – αποφασίζων θα συνεισφέρει μόνο στα τμήματα του αλγορίθμου/ διαδικασίας που απαιτείται πληροφορία σχετική με τις κριτηριακές του προτιμήσεις και όχι πληροφορία που έχει να κάνει με τους υπολογιστικούς μηχανισμούς βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται. Στο πλαίσιο αυτό, το στάδιο της μοντελοποίησης θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμο και καθοριστικό. Η μοντελοποίηση που συμφωνείται πρέπει

1) να αποτυπώνει ρεαλιστικά το βιομηχανικό περιβάλλον και την λειτουργία του παραγωγικού συστήματος (δεδομένα, περιορισμούς, κριτήρια, σημεία/ μεταβλητές απόφασης),
2) να διευκολύνει κατά το δυνατόν την υπολογιστική επίλυση του προκύπτοντος προβλήματος.

Είναι σαφές βάσει και της βιβλιογραφίας, ότι δεν είναι δυνατή μοντελοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος με συνεχείς μεταβλητές, καθώς αυτές πρέπει να έχουν φυσική σημασία και στο συγκεκριμένο πρόβλημα προγραμματισμού παραγωγής – όπως και στα περισσότερα προβλήματα στην περιοχή αυτή- αφορούν σε ημέρες,

γραμμές παραγωγής, αριθμό προϊόντων, λογικές επιλογών (ναι/όχι), διακριτές επιλογές εργοστασιακών και εμπορικών ρυθμίσεων κ.λπ. (Bosch & Trick, 2005). Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής προτείνεται και επιτυγχάνεται η μαθηματική μοντελοποίηση του βιομηχανικού περιβάλλοντος και του προβλήματος βελτιστοποίησης ως προβλήματος Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Η επίτευξη της μοντελοποίησης αυτής πιστεύουμε ότι αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα για την περαιτέρω πορεία της πολυκριτηριακής επίλυσης. Για δομημένα προβλήματα βελτιστοποίησης ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Συγκεκριμένα, δίνεται η δυνατότητα αξιοποίησης ιδιαίτερα αξιόπιστων και ισχυρών λυτών που έχουν αναπτυχθεί (ενδεικτικά αναφέρουμε τους CPLEX, Gurobi, Xpress, Mosek, κ.λπ.), οι οποίοι με ελάχιστες ρυθμίσεις παραμέτρων ανταποκρίνονται πολύ αποτελεσματικά ακόμα και σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας προβλήματα, σε καλούς χρόνους. Οι λύτες αυτοί, επιστρέφουν λύσεις βέλτιστες αν τους επιτραπεί να ολοκληρώσουν τους υπολογισμούς τους, και χρησιμοποιούν συνήθως κατάλληλο συνδυασμό των μεθόδων διακλάδωσης και οριοθέτησης (branch and bound) και αποκοπής επιπέδων (cutting planes), παρέχοντας για τον πιο έμπειρο χρήστη και μεγάλο αριθμό παραμέτρων ρύθμισης της διαδικασίας αναζήτησης, οι οποίες όμως κατά κανόνα ορίζονται άπαξ, στην αρχή της διαδικασίας για το συγκεκριμένο μοντέλο προβλήματος και δεν χρειάζεται να ρυθμίζονται σε κάθε αναζήτηση/κύκλο βελτιστοποίησης. Βέβαια, τα προβλήματα Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού ανήκουν εν γένει στην κατηγορία των NP-Hard προβλημάτων από πλευράς πολυπλοκότητας, γεγονός που κάνει τον παράγοντα υπολογιστικό χρόνο ιδιαίτερα κρίσιμο στοιχείο και πρέπει να επιδιωχθεί -σε συμφωνία- με τον χρήστη αποφασίζοντα μια ρεαλιστική προσδοκία για την επίτευξη βέλτιστων λύσεων. Σε κάθε περίπτωση, μπορούν στο ίδιο μαθηματικό μοντέλο που προτείνουμε να αξιοποιηθούν για την επίλυσή του κατά περίπτωση και ευρετικές/προσεγγιστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης όπως: αναζήτηση tabu, προσομοίωση ανόπτησης, γενετικοί αλγόριθμοι κλπ (βλέπε κεφάλαιο 2), σε περίπτωση που οι λύτες ΑΓΠ δεν ανταποκρίνονται σε αποδεκτό χρόνο. Τονίζεται όμως ότι οι περισσότερες ευρετικές τεχνικές αναζήτησης παρόλο που -βάσει ερευνητικών εργασιών- μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικές στις εφαρμογές που δοκιμάζονται, η αποτελεσματικότητά/απόδοσή τους είναι πολύ ευαίσθητη και εξαρτώμενη από τις εσωτερικές ρυθμίσεις και παραμέτρους, γεγονός που δυσχεραίνει ιδιαίτερα την δυνατότητα αυτόνομης χρήσης τους από τον ίδιο τον χρήστη/αποφασίζοντα, ήτοι μη έμπειρο ερευνητή/αναλυτή. Ως μια τελευταία παρατήρηση, θεωρούμε, ότι σε πολλές περιπτώσεις τα ερευνητικά αποτελέσματα ευρετικών/ προσεγγιστικών μεθόδων μπορεί να είναι παραπλανητικά ως προς τον συνολικά απαιτούμενο χρόνο, καθώς συχνά δεν λαμβάνεται υπόψιν ο

χρόνος που απαιτείται για την ρύθμιση των παραμέτρων και την εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού αυτών, που θα επιταχύνει την διαδικασία αναζήτησης κάθε φορά.

4.2.2.1 Δεδομένα και Παράμετροι

Θεωρούνται οι ακόλουθοι ορισμοί δεδομένων και παραμέτρων του προβλήματος:

- *i:* δείκτης οικογένειας - παραγγελίας *(i = 1, ..., nFamilies),*
  όπου *nFamilies*: το πλήθος των *οικογενειών*/παραγγελιών
- *j:* δείκτης ημέρας *(j = 1, ..., nDays)*
  όπου *nDays*: το πλήθος των *ημερών* στην περίοδο δρομολόγησης
- *l:* δείκτης γραμμής συναρμολόγησης *(l = 1, ..., nLines)*
  όπου *nLines*: το πλήθος των *γραμμών συναρμολόγησης*
- *dr:* δείκτης περιορισμού λόγου απόστασης *(dr = 1, ..., nDr)*
  όπου *nDr*: το πλήθος των περιορισμών *Χρησιμοποίησης λόγων απόστασης*
- *m:* δείκτης του λόγου απόστασης *(m = 1, ..., sdr)*

  όπου *sdr:* το πλήθος των *επιλογών λόγων απόστασης* για κάθε περιορισμό χρησιμοποίησης λόγων απόστασης
- *k:* δείκτης περιορισμού *(k = 1, ..., nCtrt)*

  όπου *nCtrt*: το πλήθος των *περιορισμών* του προβλήματος
- $famL_{i,l}$ *:* λογική μεταβλητή ίση με 1 αν η οικογένεια *i* μπορεί να παραχθεί στη γραμμή *l* και 0 σε κάθε άλλη περίπτωση. *(περιορισμοί εξειδίκευσης γραμμών).* Ισχύει *για i = 1, ..., nFamilies, l = 1, ..., nLines*
- $famC_{i,k}$ *:* λογική μεταβλητή ίση με 1 αν για την οικογένεια *i* ισχύει ο περιορισμός *k*, αλλιώς 0*. Ισχύει για i = 1, ..., nFamilies, k= 1, ..., nCtrt.*
- $expProd_i$ *:* αναμενόμενη ημερομηνία παραγωγής για τα προϊόντα της οικογένειας *i*. Ισχύει για *i = 1, ..., nFamilies*
- $priority_i$*:* ένα χαρακτηριστικό της οικογένειας *I* που δείχνει το επίπεδο της προτεραιότητας. Θεωρούμε (χωρίς βλάβη της γενικότητας) ότι πρόκειται για λογική μεταβλητή η οποία παίρνει την τιμή **0** όταν η παραγγελία (οικογένεια) *i* προορίζεται για εμπορικό απόθεμα, οπότε δεν έχει προτεραιότητα, ενώ παίρνει την τιμή **1** όταν πρόκειται για παραγγελία πελάτη. Ισχύει για *i = 1, ..., nFamilies*.
- $late_{prior}$ μέγιστος αριθμός των ημερών ένα στοιχείο με προτεραιότητα *prior* επιτρέπεται να μείνει στο βιβλίο παραγγελιών του εργοστασίου. Ισχύει για *prior*=[1,0].

- dem_i: η ζήτηση σε πλήθος για τα είδη της οικογένειας *i*. *Ισχύει για i = 1, ..., nFamilies.*
- $cMin_{k,j,l}$: κάτω όριο παραγωγής σύμφωνα με τον *k*-στό περιορισμό για την ημέρα *j* στη γραμμή συναρμολόγησης *l*.
  Ισχύει για k= 1, ..., nCtrt, j = 1, ..., nDays, l=1,...,nLines.
- $cMax_{k,j,l}$: πάνω όριο παραγωγής σύμφωνα με τον *k*-στό περιορισμό για την ημέρα *j* στη γραμμή συναρμολόγησης *l*.
  Ισχύει για k= 1, ..., nCtrt, j = 1, ..., nDays, l=1,...,nLines
- $pMin_{j,l}$: κάτω όριο για το πλάνο παραγωγής της γραμμής *l,* την ημέρα *j*.
  Ισχύει για j = 1, ..., nDays, l=1,..,nLines
- $pMax_{j,l}$: άνω όριο για το πλάνο παραγωγής της γραμμής *l,* την ημέρα *j*.
  Ισχύει για j = 1, ..., nDays, l=1,..,nLines
- *minL:* ελάχιστο μήκος δρομολόγησης (σε ημέρες) για τις γραμμές συναρμολόγησης.
- *maxDiff:* μέγιστη διαφορά του μήκους δρομολόγησης μεταξύ των γραμμών συναρμολόγησης.
- $numerator_{dr,m}$/$denominator_{dr,\ m}$: m-οστή επιλογή (αριθμητής/ παρονομαστής) για τον λόγο απόστασης *dr*.
  Ισχύει για dr = 1,...,nDr, m=1,..,sdr
- $ec_{dr,l,j,m}$: το κόστος της επιλογής *m*-οστής τιμής για τον λόγο απόστασης *dr*, που πρέπει να εφαρμοστεί για την ημέρα *j* στη γραμμή *l*.
  Ισχύει για dr = 1,...,nDr, l=1,..,nLines, j = 1, ..., nDays, m=1,..,sdr
- $vc_{dr,m}$: το κόστος παραβίασης της *m*-οστής τιμής για τον λόγο απόστασης *dr*.
  Ισχύει για dr = 1,...,nDr, m=1,..,sdr

4.2.2.2 Μεταβλητές του προβλήματος

Για την διαμόρφωση του προβλήματος ως προβλήματος ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, δημιουργούνται οι ακόλουθες **μεταβλητές απόφασης** και **βοηθητικές μεταβλητές**:

- $X_{i,j,l,}$: ακέραια μεταβλητή που δηλώνει τον αριθμό των προϊόντων της οικογένειας *I* που παράγονται στη γραμμή συναρμολόγησης *l* και την ημέρα παραγωγής *j*. *Ισχύει για i = 1, ..., nFamilies, j = 1, ..., nDays, l = 1, ..., nLines*

- $Z_{dr,l,j,m}$: λογική μεταβλητή που δείχνει την επιλογή ή μη της m-οστής τιμής του λόγου απόστασης dr στη γραμμή συναρμολόγησης *l* κατά την ημέρα *j.*
  Ήτοι, $Z_{dr,\ l,\ j,\ m}$ = 1 αν η m-κοστή τιμή του λόγου αποστάσεως dr επιλέγεται για την ημέρα j και την γραμμή l, αλλιώς 0.
  Ισχύει για dr = 1,...,nDr, l=1,..,nLines, j = 1, ..., nDays, m=1,..,sdr

- $nv_{dr,l,j,m}$*:* το πλήθος των παραβιάσεων της *m*-οστής τιμής του *dr,* την ημέρα παραγωγής *j*, στην γραμμή συναρμολόγησης *l (βοηθητική μεταβλητή)*
  Ισχύει για dr = 1,...,nDr, l=1,..,nLines, j = 1, ..., nDays, m=1,..,sdr

- $S_{j,l}$ *:* λογική μεταβλητή που δηλώνει το μήκος αλληλουχίας της γραμμής l. Ήτοι, $S_{j,l}$ = 1, εάν το μήκος της γραμμής συναρμολόγησης *l* είναι *j*, διαφορετικά 0.
  Ισχύει για j = 1, ..., nDays, l=1,..,nLines.

- ***X***: διάνυσμα όλων των μεταβλητών απόφασης

4.2.2.3 Μαθηματική Διατύπωση Προβλήματος

Ακολούθως παρουσιάζεται η προτεινόμενη διατύπωση του πολυκριτηριακού μαθηματικού προβλήματος.

Να βρεθεί το *X*: διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης, το οποίο Βελτιστοποιεί τις ακόλουθα κριτήρια αριστοποίησης (αντικειμενικές συναρτήσεις):

Κριτήριο 1: Εύρος Δρομολόγησης: Πλήθος παραγόμενων προϊόντων, *Μεγιστοποίηση*

[Max] $g_1(X) = \sum_i \sum_j \sum_l x_{ijl}$, με (1)

i = 1, ..., nFamilies, j = 1, ..., nDays, l = 1, ..., nLines

Κριτήριο 2: Ακρίβεια παραγωγής Just-In-Time, *Μεγιστοποίηση*

[Max] $g_2(X) = \sum_k \sum_j \sum_l ((\alpha - j) \times \sum_i (famC_{ik} \times x_{ijl}))$, *με* (2)

k=$k_{JIT^1}, \dots, k_{JIT^N}$ *οι δείκτες των (έστω N) Just-In-time περιορισμών του προβλήματος,*
i = 1, ..., nFamilies, j = 1, ..., nDays, l = 1, ..., nLines

Ο παράγοντας (α – j) υπάρχει εδώ για να προσδώσει περισσότερη σημασία σε ημέρες που είναι κοντά στην ημέρα παραγωγής από ότι σε εκείνες που είναι μακριά από αυτή μιας και είναι πιθανόν αλλαγές να συμβούν πριν φθάσουμε σε αυτές τις ημέρες.

Κριτήριο 3: Απόκλιση από προθεσμίες παράδοσης, *Ελαχιστοποίηση*

[Min] $g_3(X) = \sum_i \sum_j \sum_l (x_{ijl} \times (j - expProd_i)^2)$, με (3)

i *= 1, ..., nFamilies, j = 1, ..., nDays, l = 1, ..., nLines*

Κριτήριο 4: Χρησιμοποίηση – Λόγου Απόστασης Πόρων , *Ελαχιστοποίηση*

[Min] $g_4(X) = \sum_{dr} \sum_l \sum_j \sum_m (z_{dr\,ljm} \times (ec_{dr\,ljm} + nv_{dr\,ljm} \times vc_{dr\,m}))$, με *dr = 1, ..., nDr, j = 1, ..., nDays, l = 1, ..., nLines, m=1,…,sdr.* (4)

Όπου $nv_{dr\,ljm}$ είναι ο αριθμός των παραβιάσεων (βοηθητική μεταβλητή) της m-οστής αξίας του λόγου απόστασης dr για την ημέρα j και τη γραμμή l.

Υποκείμενο στους περιορισμούς:

Περιορισμοί εξειδίκευσης της γραμμής παραγωγής: (5)

$\forall$ i $\in [1,.,\text{nFam}]$, j $\in [1,.,\text{nDays}]$, l$\in [1,.,\text{nLines}]$:

$x_{ijl} = 0, \alpha\nu\ FamL_{il} = 0 = 0$

Περιορισμοί μέγιστης καθυστέρησης: (6)

$\forall i \in [1,.,\text{nFam}]$,

$\forall j \in [\text{creation}_i + \text{late\_prior}_i + 1,..,\text{nDays}]$,

$\forall l \in [1,.,\text{nLines}]$:

$x_{ijl} = 0$,

Περιορισμοί ζήτησης: (7)

$\forall i \in [1,.,\text{nFam}]$,

$\sum_j \sum_l x_{ijl} \leq dem_i$ με

j = 1, ..., nDays, l = 1, ..., nLines

Περιορισμοί πλάνου παραγωγής, παραγωγικής ικανότητας, διάθεσης πόρων & ημερολογίου:

Ημερολογιακοί περιορισμοί Just-in-Time (JIT): Ανά μέρα, ανά γραμμή, ανά «JIT περιορισμένο» χαρακτηριστικό: (8)

$\forall j \in [1,..,\text{nDays}]$,

$\forall l \in [1,.,\text{nLines}]$:

$\forall k \in [k_{JIT^1}, \dots, k_{JIT^N}]$, (έστω N) Just-In-Time περιορισμένων χαρακτηριστικών

$$cMin_{kjl} \leq \sum_{i=1}^{nFam}(famC_{ik} \times x_{ijl}) + \sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} \times cMin_{kjl} \leq cMax_{kjl}$$

όπου ο όρος $\sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} \times cMin_{kjl}$ έχει εισαχθεί για να ισχύει η ανισότητα και στις περιπτώσεις των ημερών παραγωγής μετά την τελευταία ημερομηνία παραγωγής της κάθε γραμμής, οπότε

$$\sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} = 1,\ \sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} \times cMin_{kjl} = cMin_{kjl}$$

Ημερολογιακοί περιορισμοί πλάνου παραγωγής: Ανά μέρα, ανά γραμμή :

$\forall j \in [1,..,nDays]$, (9)

$\forall l \in [1,.,\text{nLines}]$

$$pMin_{jl} \leq \sum_{i=1}^{nFam} x_{ijl} + \sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} \times pMin_{kjl} \leq pMax_{jl}$$

όπου ο όρος $\sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} \times pMin_{jl}$ έχει εισαχθεί για να ισχύει η ανισότητα και στις περιπτώσεις των ημερών παραγωγής μετά την τελευταία ημερομηνία παραγωγής της κάθε γραμμής, οπότε $\sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} = 1,\ \sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} \times pMin_{jl} = pMin_{jl}$

Περιορισμός ελάχιστου μήκους δρομολόγησης (10)

$\forall j \in [1,..,min\ L - 1]$,

$\forall l \in [1,.,\text{nLines}]$

$S_{jl} = 0$

και

$\forall l \in [1,.,\text{nLines}]$

$\sum_{j=1}^{nDays} S_{jl} = 1$

Περιορισμός επιλογής ημερήσιου λόγου απόστασης *από τις διαθέσιμες sdr εναλλακτικές:* (11)

$\forall j \in [1,..,\text{nDays}]$,

$\forall dr \in [1,..,\text{nDr}]$,

$\sum_{m=1}^{sdr} z_{drjm} = 1$

Περιορισμός βοηθητικής μεταβλητής πλήθους παραβιάσεων $nv_{drjm,}$ της m-οστής τιμής του dr, την ημέρα παραγωγής j, στην γραμμή συναρμολόγησης l. (12)

$\forall j \in [1,..,\text{nDays}]$,

$\forall l \in [1,..,\text{nLines}]$,

$\forall dr \in [1,..,\text{nDr}]$,

$denom_{drm} \times nv_{drjlm} + nom_{drm} \times pMax_{jl} \geq denom_{drm} \times \sum_{i=1}^{nFam}(famC_{ik_{dr}} \times x_{ijl})$

Όπου k_{dr} είναι το χαρακτηριστικό που σχετίζεται με τον λόγο απόστασης dr.

X: Θέτουμε το διανύσμα των μεταβλητών που ικανοποιούν τους περιορισμούς (5)-(12).

4.3. Δικριτηριακή μοντελοποίηση και μεθοδολογία επίλυσης

4.3.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία για την επίλυση του δικριτήριου τύπου του προβλήματος μεγάλης κλίμακας χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης. Τα χαρακτηριστικά του προβλήματος και η προτεινόμενη μαθηματική μοντελοποίησή του σε πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.2 του παρόντος κεφαλαίου. Στις ακόλουθες παραγράφους αναλύονται:

- Η φιλοσοφία της προτεινόμενης προσέγγισης δικριτήριας επίλυσης: παρουσιάζονται αναλυτικά οι τεχνικές που αξιοποιούνται και προσαρμόζονται κατάλληλα στην φύση και τις ανάγκες του προβλήματος, για να υποστηρίξουν την προσέγγιση της διατριβής.
- Το δι-κριτήριο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης: παρουσιάζεται το δικριτήριο μοντέλο ακέραιου μαθηματικού προγραμματισμού.
- Η αναλυτική μεθοδολογία/ αλγόριθμος επίλυσης του δικριτήριου προβλήματος.

Η διατριβή προτείνει ιδιαίτερη Μεθοδολογία Επίλυσης του Ειδικού Δικριτηριακού σεναρίου του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου, καθώς θεωρούμε ότι η δικριτήρια περίπτωση είναι συνήθης στον χώρο των σχετικών παραγωγικών συστημάτων και αξίζει ιδιαίτερης ερευνητικής προσοχής προκειμένου να γίνει αξιοποίηση όλων των στοιχείων που μπορεί να είναι αποδειχθούν ευνοϊκά στην περίπτωση αυτή, ακόμα και αν δεν ισχύουν στην περίπτωση θεώρησης περισσότερων των δύο κριτηρίων. Για τον λόγο αυτό έγινε η ερευνητική προσπάθεια ιδιαίτερης (ή και εναλλακτικής) αντιμετώπισης, δεδομένων των πλεονεκτημάτων που μπορεί να αξιοποιηθούν – όπως θα δείξουμε παρακάτω-, εφόσον ισχύει η παραδοχή των δύο κριτηρίων.

Η μεθοδολογία είναι κατάλληλη για τις περιπτώσεις εκείνες των προβλημάτων που η εταιρεία (αποφασίζων):

- Ορίζει δύο και μόνο κριτήρια για την αξιολόγηση ποιότητας των λύσεων και αγνοεί εξολοκλήρου τα άλλα δύο που ισχύουν στην γενική περίπτωση.
- Δίνει απόλυτη και σαφή προτεραιότητα/ιεραρχία σε κάποια κριτήρια, και είναι σε θέση να εντοπίσει την πολυκριτηριακή θεώρηση επίλυσης σε δύο μόνο κριτήρια, για τα οποία δεν ορίζει μοντέλο ιεραρχίας ή προτίμησης (υπονοούμενο ή σαφές).

Στην περίπτωση αυτή, η πρόταση της διατριβής είναι σε θέση να αξιοποιήσει επιπλέον και το πλεονέκτημα της δυνατότητας οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων και της συσχέτισης των κριτηρίων στον χώρο των δύο διαστάσεων, γεγονός που δεν είναι εύκολο/εύληπτο από τον αποφασίζοντα όταν περνάμε σε περισσότερες των δύο διαστάσεις. Οριακά θα μπορούσε να ισχύει και για τρεις διαστάσεις (κριτήρια), όμως η συγκεκριμένη μεθοδολογία προτείνεται για τις δύο διαστάσεις. Η οπτικοποίηση είναι σημαντική παράμετρος που διευκολύνει την συμμετοχή και αυξάνει την αυτοπεποίθηση του αποφασίζοντος, σε σχέση με την ορθότητα της αξιολόγησης των λύσεων που κάνει, συνεπώς και των αποφάσεων που λαμβάνει.

4.3.2. Επιδιώξεις και λογική της προτεινόμενης μεθοδολογίας επίλυσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η φιλοσοφία ανάπτυξης, το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο έχει στόχο τον προγραμματισμό της παραγωγής βελτιστοποιώντας ένα δικριτήριο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής.

Στο Πολυκριτήριο πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού που καλούμαστε να επιλύσουμε η έννοια της βέλτιστης λύσης δεν έχει πια σημασία καθότι δεν υπάρχει (συνήθως) μία λύση που να βελτιστοποιεί συγχρόνως όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις, δηλαδή μια ιδανική λύση (ideal solution). Στον ΠΜΠ υπάρχει η έννοια των κατά Pareto άριστων λύσεων (Pareto optimal solutions).

Όπως είναι κατανοητό, οι λύσεις που ενδιαφέρουν τον αποφασίζοντα στη διαδικασία εύρεσης της προτιμότερης λύσης είναι οι λύσεις που περιλαμβάνονται στο σύνολο Pareto.

Οι μέθοδοι a-posteriori (μέθοδοι παραγωγής) σε σχέση με τις a priori μεθόδους και τις αλληλεπιδραστικές μεθόδους έχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Στα μειονεκτήματα είναι:

- ο εκτεταμένος χρόνος επίλυσης

- η περιορισμένη δυνατότητα χειρισμού μεγάλων προβλημάτων.

Στα πλεονεκτήματα είναι:

- η δυνατότητα που δίνεται στον αποφασίζοντα να δει τη συνολική εικόνα πριν αποφασίσει, δηλαδή το σύνολο (ή ένα αντιπροσωπευτικό υποσύνολο) των υποψηφίων για αποδοχή λύσεων.

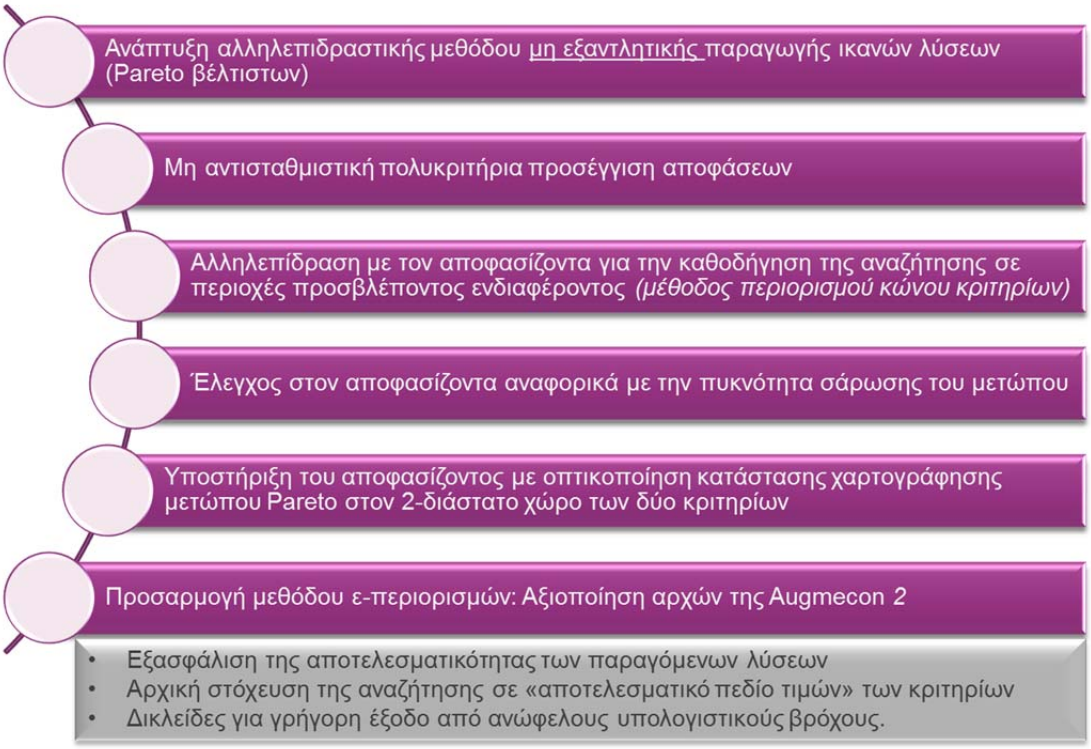
Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε και προτείνεται η χρήση μιας μη-εξαντλητικής μεθόδου παραγωγής βασισμένης στην μέθοδο περιορισμών (e-constraint). Θεωρούμε ότι με την χρήση μη εξαντλητικών μεθόδων παραγωγής μπορεί να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα των μεθόδων παραγωγής χωρίς να επηρεαστούν τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα που τα διέπουν. Επίσης, με τη ταχεία αύξηση των τεχνολογικών εξελίξεων όσον αφορά στην υπολογιστική ισχύ, μεγαλύτερα προβλήματα ΠΜΠ είναι δυνατό να επιλυθούν πλέον με μεθόδους παραγωγής, καθώς μειώνεται σημαντικά ο υπολογιστικός χρόνος για την επίλυσή τους.

Η προτεινόμενη προσέγγιση επίλυσης του δι-κριτήριου προβλήματος χρονοπρογραμματισμού παραγωγής χαρακτηρίζεται από:

- Αλληλεπίδραση με τον αποφασίζοντα
- Μη εξαντλητική μέθοδος παραγωγής ικανών λύσεων (Pareto βέλτιστων)
- Μη αντισταθμιστική πολυκριτήρια προσέγγιση αποφάσεων

Η πρόταση της διατριβής για αυτή την κατηγορία δι-κριτήριων προβλημάτων επιτρέπει στον αποφασίζοντα να επιτύχει μία ικανοποιητική τιμή για κάθε κριτήριο ξεχωριστά, με τη δημιουργία και την αξιολόγηση ενός μεγάλου αριθμού μη κυριαρχούμενων λύσεων, που αποτελούν ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα του εύρους των αποτελεσματικών λύσεων. Ο αποφασίζων αξιολογεί την πορεία παραγωγής αποτελεσματικών λύσεων και καθοδηγεί την αναζήτηση /παραγωγή νέων λύσεων στις περιοχές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

Το ακόλουθο σχήμα συνοψίζει τα βασικά στοιχεία της προτεινόμενης μεθοδολογίας επίλυση:



Σχήμα 4. 6 Κύρια χαρακτηριστικά της προτεινόμενης μεθοδολογίας επίλυσης του δικριτηριακού σεναρίου

Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαδοχικά:

- Η μέθοδος των περιορισμών και η ενισχυμένη μέθοδος των περιορισμών που αποτελούν το υπόβαθρο της διαδικασίας παραγωγής λύσεων Pareto, στο πλαίσιο της προτεινόμενης μεθοδολογίας.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία επίλυσης του δικριτήριου προβλήματος.

4.3.3. Μέθοδος περιορισμών

Στο γενικό πλαίσιο του πολυστοχικού προγραμματισμού, η μέθοδος περιορισμών λειτουργεί ως εξής:

Επιλέγεται ένα κριτήριο ως αντικειμενική συνάρτηση για την συνολική διαδικασία και τα υπόλοιπα κριτήρια ανάγονται σε περιορισμούς με συστηματικά μεταβαλλόμενο δεξί τμήμα, κατά την επαναληπτική διαδικασία που ακολουθείται (Cohon, 1978 Chankong και Haimes, 1983 Miettinen, 1998).

Ανάλογα με την κατεύθυνση βελτιστοποίησης του κάθε κριτηρίου, οι περιορισμοί μετατροπής των κριτηρίων είναι “>=” στις περιπτώσεις μεγιστοποίησης, ενώ είναι “=<” στις περιπτώσεις ελαχιστοποίησης. Η μέθοδος προβλέπει την σταδιακή σάρωση (με επιλεγμένο από τον αναλυτή ή τον αποφασίζοντα βήμα σάρωσης) της περιοχής του μετώπου Pareto του προβλήματος. Σε κάθε βήμα της μεθόδου βελτιστοποιείται το επιλεγμένο κριτήριο, υπό την ισχύ των περιορισμών του εκάστοτε προβλήματος

και επιπλέον των περιορισμών-κριτηρίων με δεξί σκέλος που περιορίζει την αναζήτηση σε ελάχιστα αποδεκτά επίπεδα ως προς τα υπο-περιορισμό κριτήρια. Επισημαίνεται ότι η λύση που παράγεται σε κάθε στάδιο βελτιστοποίησης δεν είναι εγγυημένη ικανή λύση του μετώπου Pareto. Ειδικότερα, η λύση αποτελεί ικανή λύση, αν και μόνο αν μόνο εάν ικανοποιεί τους περιορισμούς-κριτήρια ως ισότητες. Σε αντίθετη περίπτωση, πιθανότατα να υπάρχουν πρόσθετες βέλτιστες λύσεις στο συγκεκριμένο υποπρόβλημα, οπότε η λύση που έχει προκύψει μπορεί να μην είναι ικανή λύση του προβλήματος. Μεταβάλλοντας, σταδιακά και συστηματικά το δεξί σκέλος των περιορισμών των κριτηρίων, «σαρώνεται» το σύνολο των ικανών λύσεων.

Με την μέθοδο των περιορισμών προκύπτουν και μη ακραίες λύσεις του μετώπου Pareto καθώς η διαδικασία σαρώνει συστηματικά όλη την περιοχή. Ο πίνακας πληρωμών του προβλήματος Πολυκριτηριακού Προγραμματισμού μπορεί να αποτελέσει πολύτιμη υποστήριξη για τον καθορισμό του πεδίου τιμών της συστηματικής μεταβολής των περιορισμών κριτηρίων, σε περιοχές ωφέλιμες. Προκειμένου να παραχθούν όλες οι ικανές λύσεις του προβλήματος, το βήμα σάρωσης που μεταβάλει το δεξί σκέλος των περιορισμών κριτηρίων πρέπει να είναι πολύ μικρό, προκειμένου να μην «χαθεί» κάποια λύση. Όσο μικρότερο είναι το βήμα της συστηματικής μεταβολής του δεξιού σκέλους των περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων τόσο πιο χρονοβόρος και επιβαρυντική σε υπολογιστικό κόστος είναι η διαδικασία αλλά είναι και «πυκνότερο» το αντιπροσωπευτικό υποσύνολο των ικανών λύσεων.

Για προβλήματα με περισσότερα από δύο κριτήρια, και σχετικά μεγάλων διαστάσεων, η παραγωγή του συνόλου των ικανών λύσεων μέσω της μεθόδου των περιορισμών θεωρείται δυσεφάρμοστη, λόγω υπολογιστικών απαιτήσεων.

Παρουσιάζουμε λοιπόν την μέθοδο για ένα πρόβλημα δύο κριτηρίων, καθώς αυτή είναι και η περίπτωση στην οποία θα αξιοποιηθούν βασικά στοιχεία της μεθόδου.

Θεωρούμε ένα δικριτήριο πρόβλημα με δυο κριτήρια- αντικειμενικές συναρτήσεις έστω προς ελαχιστοποίηση ($\min \mathrm{f_i(x)}$, $\mathrm{i} = 1{,}2$).

Σύμφωνα με τον (Bérubé, Gendreau, & Potvin, 2009), η μέθοδος υλοποιείται ως εξής:

- Υπολογίζονται οι ιδεατές τιμές z_1^I, z_2^I και οι ναδίρ τιμές z_1^N, z_2^N για τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις $f_1(x), f_2(x)$:

  $$z_i^I = \min\ f_i(x), x \in X \qquad (13)$$

  Ήτοι:

  $z_1^I = \min\ f_1(x), x \in X$

  $z_2^I = \min\ f_2(x), x \in X$

  και

$$z_i^N = \min(\, f_i(x) \;/\; f_j(x) = z_j^I) \qquad (14)$$

ήτοι:

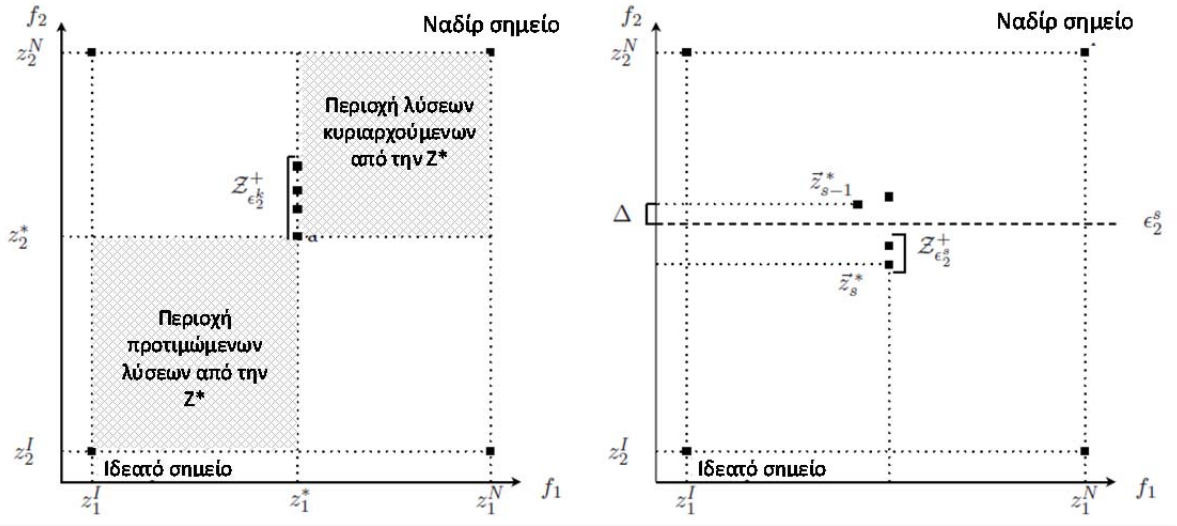
$z_1^N = \min(\, f_1(x) \;/\; f_2(x) = z_2^I)$

$z_2^N = \min(\, f_2(x) \;/\; f_1(x) = z_1^I)$

- Επιλέγεται το κριτήριο αναφοράς προς βελτιστοποίηση. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, έστω το $f_1(x)$, οπότε i=1, j=2.
- Θέτουμε $F = \{(z_i^I, z_j^N)\} = \{(z_1^I, z_2^N)\}$ και

$$\varepsilon_j = z_j^N - \Delta \;\rightarrow\; \varepsilon_2 = z_2^N - \Delta \qquad (15)$$

Όπου Δ είναι το βήμα σάρωσης, ήτοι μια σταθερά που εκφράζει την απόσταση γειτονικών σημείων στην περιοχή $[z_2^I .. z_2^N]$ της συνάρτησης $f_2(x)$ υπό εξέταση. Όσο πιο μικρή είναι η τιμή του Δ, τόσο μεγαλύτερη η πυκνότητα σάρωσης του επιλεγμένου εύρους τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης.



Σχήμα 4. 7 Γραφική απεικόνιση μεγεθών της διαδικασίας ε-constraint

Πηγή: (Bérubé, Gendreau, & Potvin, 2009)

- Τα προβλήματα $P_i(\varepsilon_j)$ ορίζονται από τις σχέσεις (16) - (17) ακολούθως:

$$\min f_i(x) \qquad (16)$$

υπό τους περιορισμούς

$$x \in X \qquad (17.1)$$

$$f_j(x) \le \varepsilon_j,\; i \neq j \qquad (17.2)$$

- Ενώ $\varepsilon_j \ge z_j^I$,δηλ. στην περίπτωση του δικριτήριου ενώ $\varepsilon_2 \ge z_2^I$: (18)
  a. Επίλυση του $P_i(\varepsilon_j)$ ήτοι του $P_1(\varepsilon_2)$ (19)
  b. Προσθήκη της τιμής της βέλτιστης λύσης $(z_i^*, z_j^*) = (z_1^*, z_2^*)\; στο\; F$ (20)

c. $\varepsilon_j = z_j^* - \Delta$, ήτοι $\varepsilon_2 = z_2^* - \Delta$ (21)

- Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν $\varepsilon_j < z_j^I$, ήτοι $\varepsilon_2 < z_2^I$ δηλαδή όταν όλη η περιοχή έχει σαρωθεί με βήμα Δ. (22)

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου των περιορισμών, τρία θέματα προβληματίζουν και απαιτούν διεξοδική εξέταση και συστηματική αλγοριθμική αντιμετώπιση (Mavrotas, et al., 2009):

- ο καθορισμός του εύρους σάρωσης των λύσεων της αντικειμενικών συναρτήσεων που μετατρέπονται σε περιορισμούς,
- η διασφάλιση της Pareto αποτελεσματικότητας της προκύπτουσας λύσης σε κάθε στάδιο βελτιστοποίησης,
- ο μεγάλος κατά κανόνα απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος για την επίλυση όλων των προβλημάτων $\mathrm{P_i}(\varepsilon_\mathrm{j})$ που δημιουργούνται.

Στην βιβλιογραφία, υπάρχουν διάφορες εκδοχές της μεθόδου περιορισμών με στόχο την βελτίωση της απόδοσής της ή την προσαρμογή αυτής σε συγκεκριμένους τύπους προβλημάτων (Bérubé, Gendreau, & Potvin, 2009), (Ehrgott & Ryan, 2002); (Laumanns, 2006).

Ο (Mavrotas, et al., 2009) προτείνει την επέκταση της μεθόδου, και συγκεκριμένα την AUGMECON, την οποία παρουσιάζουμε ακολούθως καθώς αξιοποιούνται βασικά στοιχεία αυτής. Ως εισαγωγή στην επόμενη παράγραφο, παρουσιάζουμε συνοπτικά τις συστάσεις που προτείνονται από (Mavrotas, et al., 2009) στην μοντελοποίηση της μεθόδου των περιορισμών προκειμένου να αντιμετωπιστούν σε κάποιο βαθμό τα παραπάνω θέματα. Η πρόταση της διατριβής ενστερνίζεται αυτές τις συστάσεις και τις ακολουθεί στην πρωτότυπη μέθοδο την οποία προτείνει για το δικριτήριο σενάριο του προβλήματος.

Οι συστάσεις αφορούν:

1 Κατασκευή του Λεξικογραφικού Πίνακα Πληρωμών (payoff table). Με τον τρόπο αυτό καθορίζεται με αξιοπιστία το αναμενόμενο και αποτελεσματικό κατά Pareto εύρος σάρωσης των λύσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων - κριτηρίων.

2 Τροποποίηση του μοντέλου των υπο-προβλημάτων $P_i(\varepsilon_j)$ προκειμένου η βελτιστοποίηση σε κάθε φάση να μην λαμβάνει υπόψιν μόνο το κριτήριο αναφοράς αλλά και τα υπό περιορισμό –κριτήρια. Επιδιώκεται μέσω της βελτιστοποίησης, αν είναι δυνατόν, οι περιορισμοί-κριτήρια να αποκτήσουν όσο μεγαλύτερη απόσταση γίνεται από το δεξί σκέλος του σχετικού περιορισμού. Συγκεκριμένα, για τον σκοπό αυτό, προτείνεται η προσθήκη ενός

δεύτερου σκέλους στην μονοκριτηριακή αντικειμενική συνάρτηση του $P_i(\varepsilon_j)$ που να εκφράζει την προτεραιότητα στις πιο απομακρυσμένες στο δεξί σκέλος των περιορισμών λύσεις, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η βέλτιστη λύση που λαμβάνεται είναι Pareto βέλτιστη για το αρχικό πολυκριτηριακό πρόβλημα (αποφεύγοντας έτσι μη ικανές ή ασθενείς Pareto βέλτιστες λύσεις).

3 Εισαγωγή ευρετικών κανόνων για επιτάχυνση της διαδικασίας και αποφυγή άσκοπων υπολογισμών βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα προτείνεται ο τερματισμός επίλυσης ενός υποπροβλήματος εφόσον το πρόβλημα δεν επιστρέφει εφικτή λύση ή αν δεν προβλέπεται να προκύψει διαφορετική Pareto λύση. Η τεχνική αυτή αναφέρεται ως τεχνική «πρόωρης εξόδου από το βρόχους».

Ακολούθως παρουσιάζεται η μέθοδος AUGMECON η φιλοσοφία της οποίας προσαρμόζεται και αξιοποιείται σε επιμέρους υπολογιστικά τμήματα της πρότασης της διατριβής.

4.3.4. Χρήσιμα χαρακτηριστικά της επαυξημένης μεθόδου περιορισμών

Τα στάδια της επαυξημένης μεθόδου των περιορισμών (augmented ε-constraint, AUGMECON) παρουσιάζονται ακολούθως με τρόπο ώστε να γίνουν σαφείς οι διαφορές της με την κλασσική μέθοδο των περιορισμών και οι βελτιώσεις που εισάγονται:

Λεξικογραφική Βελτιστοποίηση του Πίνακα Πληρωμών: Για την εφαρμογή της μεθόδου των περιορισμών απαιτείται καθορισμός του εύρους σάρωσης του πεδίου τιμών των κριτηρίων, ειδικά αυτών που συμμετέχουν ως περιορισμοί. Ο υπολογισμός αυτός δεν είναι προφανής. Η βέλτιστη λύση για κάθε κριτήριο προκύπτει εύκολα από βελτιστοποίηση του προβλήματος επί του σχετικού κριτηρίου. Για την χειρότερη (ναδίρ) τιμή ο υπολογισμός δεν είναι τετριμμένος.

Μία προσέγγιση θα ήταν με τον ορισμό ελάχιστα αποδεκτών επιπέδων για κάθε κριτήριο από τον αποφασίζοντα. Και σε αυτή την περίπτωση όμως δεν εξασφαλίζεται η «αποτελεσματικότητα» του εύρους τιμών, καθώς δύναται να οριστούν πολύ ελαστικά επίπεδα, γεγονός που α) θα αύξανε άσκοπα το υπολογιστικό κόστος και χρόνο και β) θα παρήγαγε ενδεχομένως μη ικανές λύσεις ως προς τα υπό περιορισμό κριτήρια.

Μια άλλη μέθοδος προβλέπει τον υπολογισμό του εύρους τιμών μέσω του πίνακα πληρωμών. Συγκεκριμένα, η ναδίρ τιμή του εύρους σάρωσης τιμών των υπο-περιορισμό κριτηρίων μπορεί να βρεθεί από την χειρότερη τιμή που λαμβάνει το

κριτήριο στον πίνακα πληρωμών. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η τιμή αυτή είναι τμήμα ικανής κατά Pareto λύσης. Επισημαίνεται ότι οι λύσεις που υπολογίζονται κατά την διαμόρφωση του πίνακα πληρωμών δεν είναι εγγυημένα Pareto ικανές, καθώς δύναται για κάθε βέλτιστη τιμή επί του κριτηρίου αναφοράς στον πίνακα πληρωμών, να υπάρχουν εναλλακτικά βέλτιστα με σημαντική διαφοροποίηση τιμών για τα υπόλοιπα κριτήρια.

Για την αντιμετώπιση λοιπόν αυτής της δυσχέρειας, στο πλαίσιο εφαρμογής της AUGMECON προτείνεται ο υπολογισμός του εύρους σάρωσης μέσω του υπολογισμού ενός λεξικογραφικού πίνακα πληρωμών. Ο λεξικογραφικός πίνακας πληρωμών αποτυπώνει εξ'ορισμού Pareto ικανές λύσεις.

Για την δημιουργία του λεξικογραφικού πίνακα πληρωμών ακολουθείται η φιλοσοφία της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης, για κάθε γραμμή του πίνακα. Ουσιαστικά πραγματοποιείται κατά σειρά η βελτιστοποίηση της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης (αντιστοιχούσα στο πιο σημαντικό κριτήριο) και στην συνέχεια, μεταξύ των εναλλακτικών βέλτιστων που πιθανόν να υπάρχουν, βελτιστοποιείται η δεύτερη και ούτω καθεξής, μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία για όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις.

Αποτελεσματικότητα των Λύσεων: Η λύση του προβλήματος που προκύπτει από την επίλυση ενός υπο-προβλήματος είναι κατά Pareto βέλτιστη αν και μόνο αν, η ικανή λύση ικανοποιεί τους περιορισμούς-κριτήρια ως ισότητες. Σε αντίθετη περίπτωση, δεν αποκλείεται η πιθανότητα ύπαρξης εναλλακτικά βέλτιστων με καλύτερες τιμές για τα υπο-περιορισμό κριτήρια.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το θέμα αυτό, η σύσταση της AUGMECON αφορά στην μετατροπή εισαγωγή στην αντικειμενική συνάρτηση κάθε υπο-προβλήματος ενός δεύτερου όρου –με σαφώς μικρότερη βαρύτητα από το κριτήριο αναφοράς- που θα εκφράζει την σύγκλιση της βελτιστοποίησης σε ικανές μόνο λύσεις. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, μετατρέπονται οι περιορισμοί κριτήρια σε ισότητες, εισάγοντας για κάθε περιορισμό μια βοηθητική μεταβλητή απόκλισης από το δεξί σκέλος αυτού.

Ειδικότερα, θεωρούμε την περίπτωση προβλήματος k κριτηρίων – αντικειμενικών συναρτήσεων $f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_k(x)$, έστω αυτή την φορά προς μεγιστοποίηση. Έστω $f_1(x)$ το επιλεγμένο κριτήριο αναφοράς προς μεγιστοποίηση, κατά τα βήματα σάρωσης του μετώπου Pareto.

Τότε το υποπρόβλημα $P_1(e_2, e_3, \dots, e_k)$ ορίζεται πλέον ως ακολούθως:

$$\max\left(f_1(x) + eps \times (s_2 + s_3 + \cdots + s_k)\right)$$

$$f_2(x) - s_2 = e_2$$

$f_3(x) - s_3 = e_3$

….. (23)

$f_k(x) - s_k = e_k$

$x \in S$ και $s_i \in R^+$

Όπου *eps* είναι ένας πολύ μικρός αριθμός (ενδ. της τάξεως 10^{-3} - 10^{-6}) ανάλογα με την διαφορά τάξης μεγέθους που έχουν τα κριτήρια μεταξύ τους. Ο συντελεστής αυτός για να εξασφαλίσει ότι ο δεύτερος όρος δεν αλλοιώνει την κατά προτεραιότητα βαρύτητα του κριτηρίου $f_1(x)$ στην βελτιστοποίηση.

Αποδεικνύεται εύκολα ότι με την μοντελοποίηση αυτή, παράγονται αποκλειστικά ικανές λύσεις. Αυτό αποδεικνύεται ακολούθως:

Υποθέτουμε ότι το πρόβλημα $P_1(e_2, e_3, \dots, e_k)$ έχει εναλλακτικά βέλτιστα και ένα από αυτά, έστω x', κυριαρχεί την βέλτιστη λύση x* που παρήγαγε το πρόβλημα. Αυτό σημαίνει ότι το διάνυσμα της λύσης x* στον χώρο των κριτηρίων $(z_{1,}e_2 + s_2, \dots, e_k + s_k)$ κυριαρχείται από το διάνυσμα της λύσης x'-> $(z_{1,}e_2 + s_2', \dots, e_k + s_k')$, δηλαδή:

$e_2 + s_2 \leq e_2 + s_2'$

… (24)

$e_k + s_k \leq e_k + s_k'$

με τουλάχιστον μία αυστηρή ανισότητα.

Αθροίζοντας τις σχέσεις αυτές, και δεδομένου ότι ισχύει μία τουλάχιστον ανισότητα προκύπτει:

$\sum_{i=2}^{k} s_i < \sum_{i=2}^{k} s_i'$ (25)

Άρα $f_1(x^*) + eps \times \left(\sum_{i=2}^{k} s_i\right) < f_1(x') - eps \times \left(\sum_{i=2}^{k} s_i'\right)$ (26)

το οποίο είναι άτοπο, καθώς υποθέσαμε ότι η βέλτιστη λύση του προβλήματος $P(e_2, .., 3_k)$ είναι η x*.

Επομένως, δεν υπάρχει λύση x' η οποία κυριαρχεί της παραγόμενης λύσης x*, ή διαφορετικά η λύση x* του προβλήματος είναι ικανή λύση.

<u>Εκτέλεση της μεθόδου:</u> Από τον λεξικογραφικό πίνακα πληρωμών υπολογίζεται το εύρος πεδίου τιμών σάρωσης για κάθε ένα από τα k-1 κριτήρια που θα μετατραπούν σε περιορισμούς. Στην συνέχεια, χωρίζεται το εύρος κάθε κριτηρίου i σε q_i διαστήματα, τα οποία ορίζοντα από n_i-1 κομβικά σημεία. Συνολικά, για το i κριτήριο ορίζονται q_i+1 κομβικά σημεία, συμπεριλαμβανομένων των ακραίων σημείων z_i^I, z_i^N, που προσδιορίζουν σταδιακά το e_i. Ο συνολικός αριθμός των εκτελέσεων βελτιστοποίησης επί των αντίστοιχων υπο-προβλημάτων $P_1(e_2, e_3, \dots, e_k)$ είναι (q_2+1) x (q_3+1) x… x (q_k+1).

Επιπλέον, προκειμένου να αποφευχθούν ενδεχόμενες δυσκολίες από την ύπαρξη διαφορετικής κλίμακας τιμών στις συναρτήσεις των κριτηρίων προτείνεται να αντικατασταθεί ο όρος s_i στον δεύτερο όρο της αντικειμενικής συνάρτησης (και μόνο) από το s_i/r_i, όπου το r_i είναι το εύρος του θεωρούμενου πεδίου τιμών της f_i. Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση της μεθόδου των περιορισμών γίνεται:

$$\max\left(f_1(x) + eps \times (s_2/r_2 + s_3/r_3 + \cdots + s_k/r_k)\right) \quad (27)$$

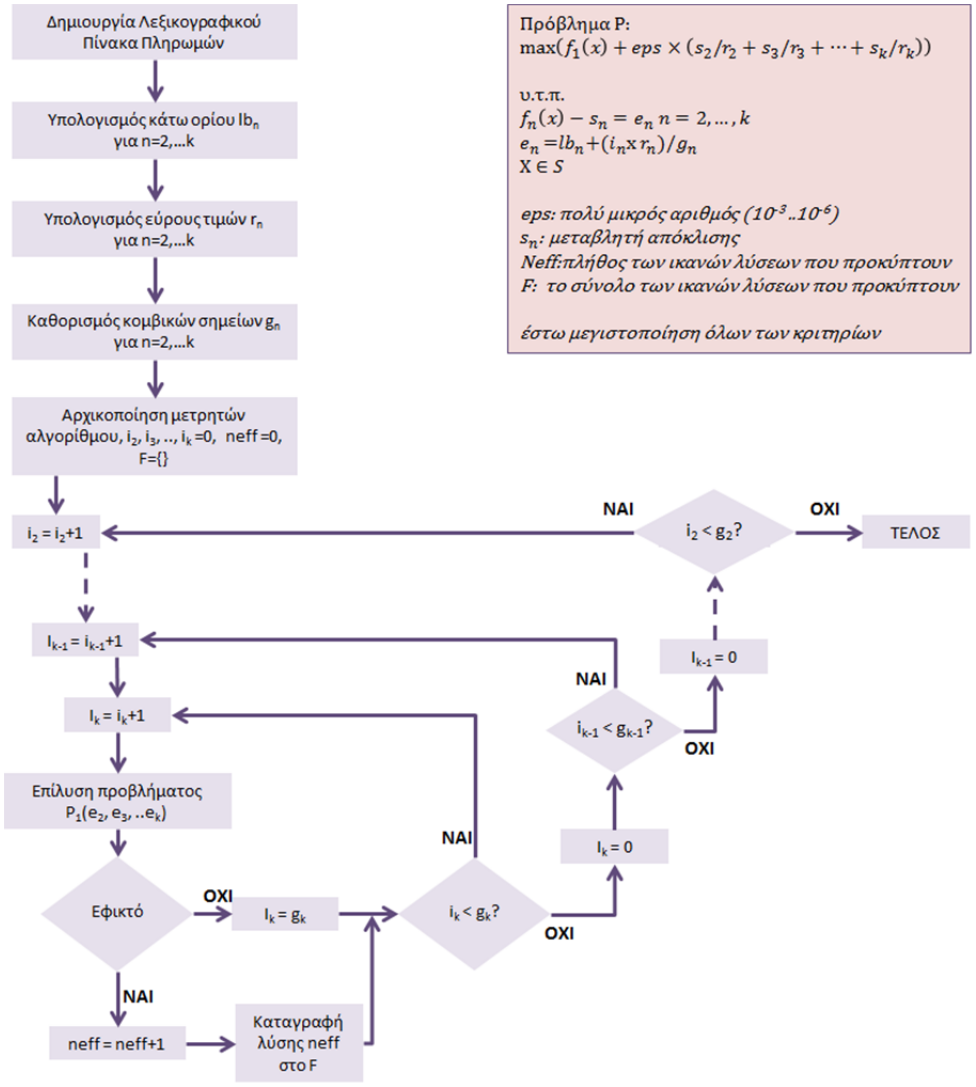
$$f_2(x) - s_2 = e_2$$

….. (28)

$$f_k(x) - s_k = e_k$$

$x \in S$ και $s_i \in R^+$

Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4. 8 Διάγραμμα ροής της μεθόδου AUGMECON

Πηγή: (Mavrotas, et al., 2009) και δική μου επεξεργασία

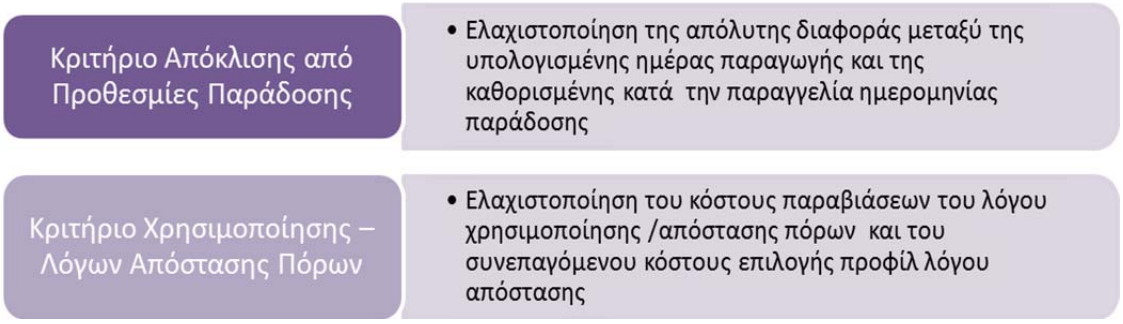
4.3.5. Το δι-κριτήριο πρόβλημα

Το δι-κριτήριο πρόβλημα το οποίο καλούμαστε να επιλύσουμε προκύπτει από το γενικευμένο πρόβλημα Δρομολόγησης Εργασιών που παρουσιάστηκε στην ενότητα 0, με την θεώρηση ενός αριθμού παραδοχών, που σχετίζονται με την επιλογή δύο κριτηρίων προς βελτιστοποίηση και με τον τρόπο αντιμετώπισης/χειρισμού των υπόλοιπων κριτηρίων που έχουν τεθεί.

Κατόπιν συζήτησης με τον αποφασίζοντα αναφορικά με την προτεραιότητα και την σημασία των κριτηρίων, αποφασίστηκε για τις ανάγκες της ερευνητικής άσκησης ο ακόλουθος χειρισμός των κριτηρίων βελτιστοποίησης:

Το πρώτο κριτήριο που αφορά στο «Εύρος Δρομολόγησης» μεγιστοποιείται και ως ορίζεται περιορισμός, λαμβάνοντας την μέγιστη δυνατή τιμή. Ο αποφασίζων, λαμβάνοντας υπόψιν τις στρατηγικές αλλά και τις εμπορικές προτεραιότητες της βιομηχανίας θεωρεί ιδιαίτερα σημαντική την παραγωγή του μέγιστου δυνατού αριθμού εργασιών.

Επισημαίνεται, ότι στην βάση αυτής της λογικής, το πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί τρι-κριτηριακό και η μέθοδος βελτιστοποίησης μερικώς λεξικογραφική, καθώς βελτιστοποιούμε το ένα κριτήριο και, επί των προκυπτουσών λύσεων, ακολουθούμε άλλη προσέγγιση βελτιστοποίησης για τα υπόλοιπα κριτήρια. Σε κάθε περίπτωση, στην συνέχεια της διατριβής αναφερόμαστε σε αυτό το σενάριο ως δικριτηριακό.



Σχήμα 4. 9 Τα κριτήρια της προτεινόμενης μοντελοποίησης

Πηγή: (Makarouni, Psarras, & Siskos, 2013)

Για την δι-κριτήρια μορφή του προβλήματος λαμβάνονται υπόψιν, σύμφωνα με τις προτιμήσεις του αποφασίζοντος τα ακόλουθα κριτήρια βελτιστοποίησης:

- K_2: Κριτήριο Απόκλισης από Προθεσμίες Παράδοσης
- K_4: Κριτήριο Χρησιμοποίησης – Λόγων Απόστασης Πόρων

Το κριτήριο «JIT – Just in Time» θεωρείται ως το λιγότερο σημαντικό δεδομένου ότι η φιλοσοφία JIT αντανακλάται ήδη σε κάποιο βαθμό μέσω των τιθέμενων περιορισμών.

Στην συνέχεια, παρατίθεται το μοντέλο του προβλήματος προς επίλυση, καθορίζοντας τα δεδομένα, τους περιορισμούς και τα κριτήρια προς βελτιστοποίηση.

4.2.2.4 Μαθηματική Μοντελοποίηση

Τα δεδομένα και οι μεταβλητές του προβλήματος ορίζονται στις παραγράφους 4.2.2.1 και 4.2.2.2. Ακολούθως παρουσιάζεται η διατύπωση των κριτηρίων και των περιορισμών του δι-κριτήριου σεναρίου:

Να βρεθεί το διάνυσμα των μεταβλητών X που βελτιστοποιεί τα Κριτήρια και ικανοποιεί τους περιορισμούς ως ακολούθως:

Κριτήριο 1: Απόκλιση από την προθεσμία παράδοσης, *Ελαχιστοποίηση*

[Min] $g_2(X) = \sum_i \sum_j \sum_l (x_{ijl} \times (j - expProd_i)^2)$, με

i *= 1, ..., nFamilies, j = 1, ..., nDays, l = 1, ..., nLines*

Κριτήριο 2: Χρησιμοποίηση – Λόγων Απόστασης Πόρων, *Ελαχιστοποίηση*

[Min] $g_4(X) = \sum_{dr} \sum_l \sum_j \sum_m (z_{dr\,ljm} \times (ec_{dr\,ljm} + nv_{dr\,ljm} \times vc_{dr\,m}))$, με

dr = 1, ..., nDr, j = 1, ..., nDays, l = 1, ..., nLines, m=1,…,sdr.

Όπου $nv_{dr\,ljm}$ είναι ο αριθμός των παραβιάσεων (βοηθητική μεταβλητή) της m-οστής αξίας του λόγου απόστασης dr για την ημέρα j και τη γραμμή l.

Υποκείμενο στους περιορισμούς:

$$\text{maximise} \sum_j \sum_l \sum_l x_{ijl}$$

Περιορισμοί εξειδίκευσης της γραμμής παραγωγής: (5) της §4.2.2

$\forall$ i $\in [1,.,\text{nFam}]$, j $\in [1,.,\text{nDays}]$, l$\in [1,.,\text{nLines}]$:

$x_{ijl} = 0, \alpha v\ FamL_{il} = 0 = 0$

Περιορισμοί μέγιστης καθυστέρησης: (6) της §4.2.2

$\forall i \in [1,.,\text{nFam}]$,

$\forall j \in [\text{creation}_i + \text{late\_prior}_i + 1,..,\text{nDays}]$,

$\forall l \in [1,.,\text{nLines}]$:

$x_{ijl} = 0,$

Περιορισμοί ζήτησης:

$\forall i \in [1,.,\text{nFam}],$

$\sum_j \sum_l x_{ijl} \leq dem_i$ με (7) της §4.2.2

j = 1, ..., nDays, l = 1, ..., nLines

Περιορισμοί πλάνου παραγωγής, παραγωγικής ικανότητας, διάθεσης πόρων & ημερολογίου:

Ημερολογιακοί περιορισμοί Just In Time IT: Ανά μέρα, ανά γραμμή, ανά «JIT περιορισμένο» χαρακτηριστικό:

$\forall j \in [1,.,\text{nDays}],$

$\forall l \in [1,.,\text{nLines}]:$

$\forall k \in [k_{JIT^1}, \dots, k_{JIT^N}]$, (έστω N) Just-In-time περιορισμένων χαρακτηριστικών

$cMin_{kjl} \leq \sum_{i=1}^{nFam}(famC_{ik} \times x_{ijl}) + \sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} \times cMin_{kjl} \leq cMax_{kjl}$ *(8)* της §4.2.2

όπου ο όρος $\sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} \times cMin_{kjl}$ έχει εισαχθεί για να ισχύει η ανισότητα και στις περιπτώσεις των ημερών παραγωγής μετά την τελευταία ημερομηνία παραγωγής της κάθε γραμμής, οπότε $\sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} = 1,\ \sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} \times cMin_{kjl} = cMin_{kjl}$

Ημερολογιακοί περιορισμοί πλάνου παραγωγής: Ανά μέρα, ανά γραμμή :

$\forall j \in [1,.,min\ L],$

$\forall l \in [1,.,\text{nLines}]$

$pMin_{jl} \leq \sum_{i=1}^{nFam} x_{ijl} + \sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} \times pMin_{kjl} \leq pMax_{jl}$ *(9)* της §4.2.2

όπου ο όρος $\sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} \times pMin_{jl}$ έχει εισαχθεί για να ισχύει η ανισότητα και στις περιπτώσεις των ημερών παραγωγής μετά την τελευταία ημερομηνία παραγωγής της κάθε γραμμής, οπότε $\sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} = 1, \sum_{j'=1}^{j-1} S_{j'l} \times pMin_{jl} = pMin_{jl}$

Περιορισμός ελάχιστου μήκους δρομολόγησης

$\forall j \in [1,.,min\ L - 1],$

$\forall l \in [1,.,\text{nLines}]$

$S_{jl} = 0$ *(10)* της §4.2.2

και

$\forall l \in [1,.,\text{nLines}]$

$\sum_{j=1}^{nDays} S_{jl} = 1$

Περιορισμός επιλογής ημερήσιου λόγου απόστασης *από τις διαθέσιμες sdr εναλλακτικές:*

$\forall j \in [1,..,\text{nDays}]$, *(11)* της §4.2.2

$\forall dr \in [1,..,\text{nDr}]$,

$\sum_{m=1}^{sdr} z_{drjm} = 1$

Περιορισμός βοηθητικής μεταβλητής πλήθους παραβιάσεων $nv_{drjm,}$ της m-οστής τιμής του dr, την ημέρα παραγωγής j, στην γραμμή συναρμολόγησης l.

$\forall j \in [1,..,\text{nDays}]$, *(12)* της §4.2.2

$\forall l \in [1,..,\text{nLines}]$,

$\forall dr \in [1,..,\text{nDr}]$,

$denom_{drm} \times nv_{drjlm} + nom_{drm} \times pMax_{jl} \geq denom_{drm} \times \sum_{i=1}^{nFam}(famC_{ik_{dr}} \times x_{ijl})$

Όπου k_{dr} είναι το χαρακτηριστικό που σχετίζεται με τον λόγο απόστασης dr.

4.3.6. Προτεινόμενη Μεθοδολογία Επίλυσης

Η προτεινόμενη μεθοδολογία επίλυσης του δι-κριτήριου προβλήματος χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα:

Βήμα 1
• Εισαγωγή *Παραμέτρων Χρονοδρομολόγησης και Δεδομένων* (Παράμετροι περιβάλλοντος, Παραγγελίες, Περιορισμοί)
Βήμα 2
• Προσαρμογή Μοντέλου Βάσης- • Ανάπτυξη Δικριτήριου Μοντέλου *Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού* $P(x)$
Βήμα 3
• Δημιουργία *Λεξικογραφικού Πίνακα Πληρωμών,* • Υπολογισμός *Ιδεατών και Ναδίρ* τιμών

Βήμα 4

- Επιλογή *Κριτηρίου Βελτιστοποίησης* βάσει λογικής *μεθόδου περιορισμών*
- Αρχικοποίηση Αλγορίθμου, $i = 1$
- Αρχικοποίηση μεταβλητών ορίων πεδίου σάρωσης
- Αρχικοποίηση μετρητή πλήθους ικανών λύσεων και συνόλου F ικανών λύσεων

Βήμα 5

- Υπολογισμός *Εύρους Σάρωσης* r_i, Επιλογή *Πυκνότητας Σάρωσης*,
- Υπολογισμός *πλήθους κομβικών σημείων* q_i και *παραμέτρου* Δ_i

Βήμα 6

Υπολογιστική διαδικασία:

- Εφαρμογή της διαδικασίας βελτιστοποίησης και παραγωγής των αποτελεσματικών λύσεων, στο εύρος r_i
- Σταδιακή επιλεγμένης πυκνότητας σάρωση του μετώπου Pareto.

Βήμα 7

- Καταγραφή (νέων) αποτελεσματικών λύσεων
- Γραφική απεικόνιση της νέας κατάστασης σάρωσης του μετώπου Pareto στον δισδιάστατο χώρο των κριτηρίων.

Βήμα 8

- Αξιολόγηση λύσεων Pareto μετώπου από αποφασίζοντα κατά προτίμηση με την επίδειξη της γραφικής παράστασης χαρτογράφησης του μετώπου Pareto
- Αξιολόγηση πυκνότητας μετώπου
- Αξιολόγηση υπολογιστικού κόστους

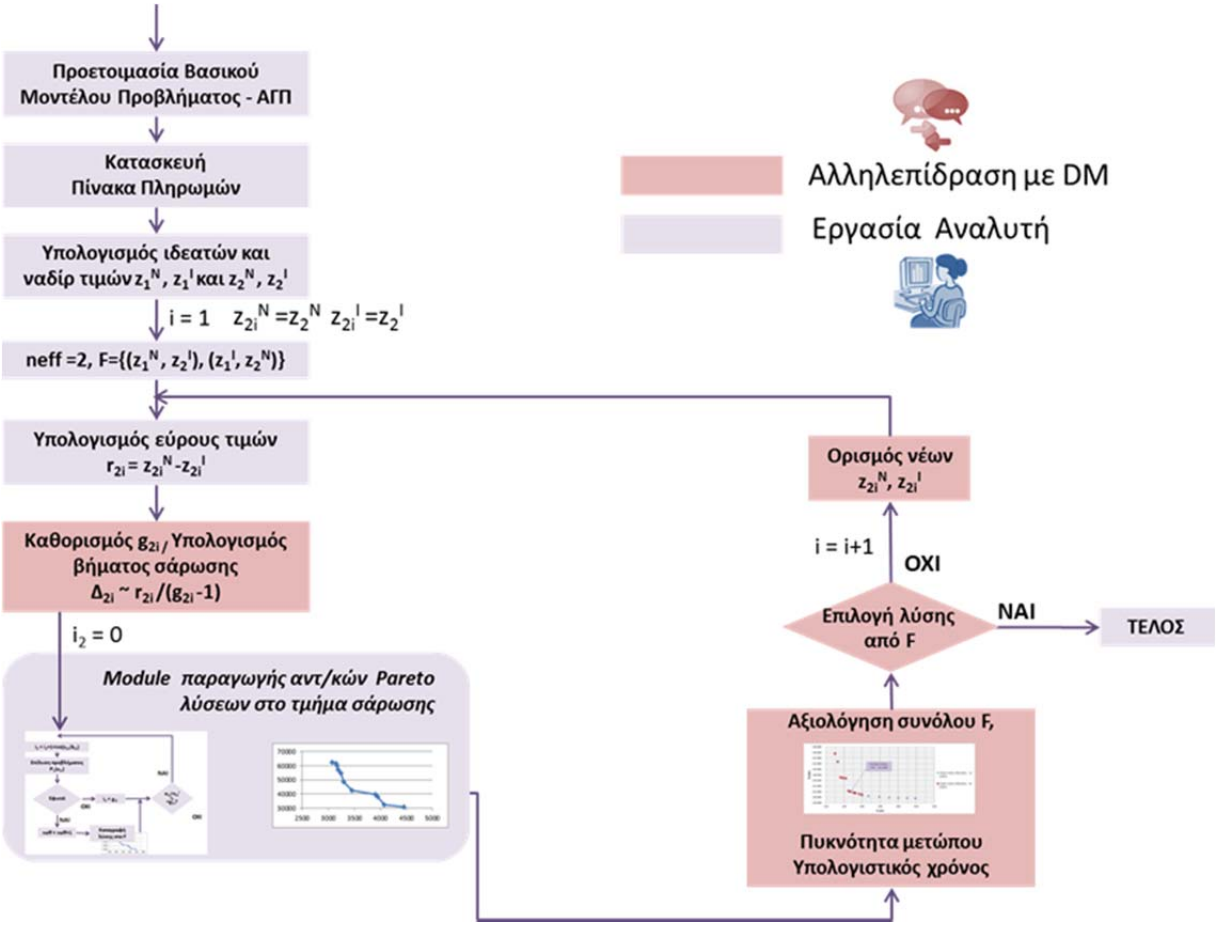
Βήμα 9

- Περίπτωση Επιλογής λύσης από τον αποφασίζοντα, οπότε
- Τερματισμός διαδικασίας

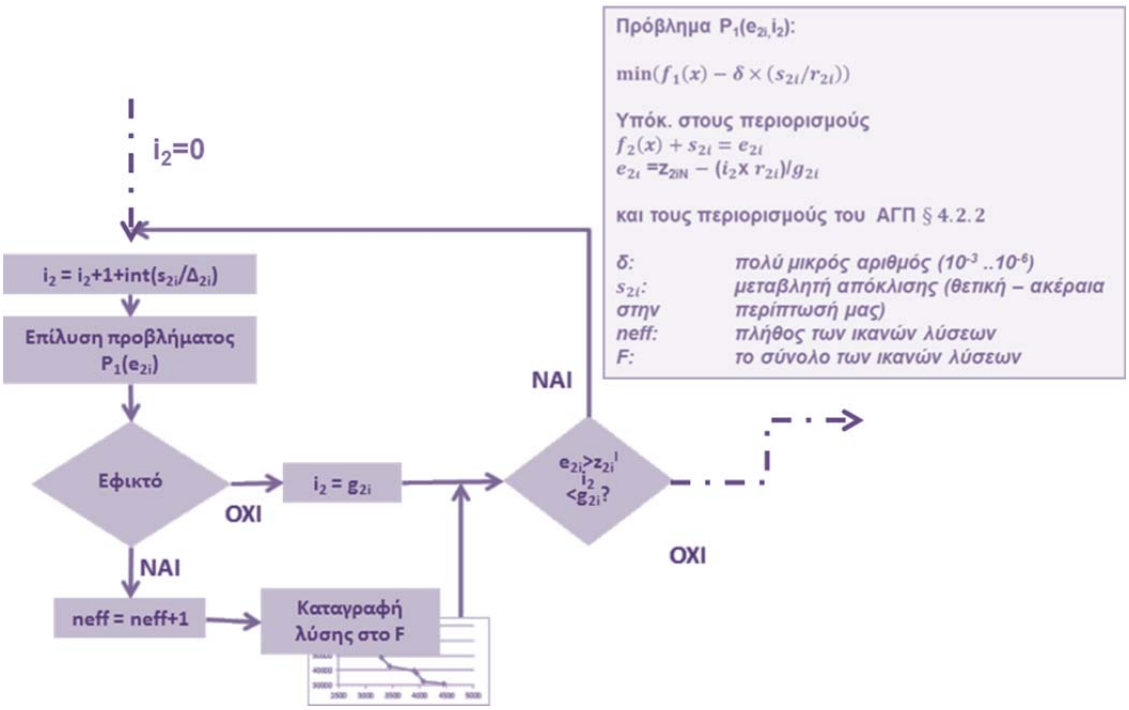
Βήμα 10

- Περίπτωση μη επιλογής λύσης, οπότε
- Έναρξη νέου κύκλου τοπικής σάρωσης
- Επιλογή νέου εύρους τιμών του μετώπου Pareto για περαιτέρω πυκνότερη σάρωση
- Επιστροφή στο βήμα 5.

Τα ακόλουθα διαγράμματα αποτυπώνουν γραφικά την προτεινόμενη διαδικασία:



Σχήμα 4. 10 Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθόδου δικριτηριακής επίλυσης



Σχήμα 4. 11 Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου module παραγωγής αντιπροσωπευτικών λύσεων

Στις παρακάτω παραγράφους γίνεται συστηματική και αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας:

Βήμα 1

Εισαγωγή Παραμέτρων Χρονοδρομολόγησης και Δεδομένων (Παραγγελίες, Περιορισμοί, Κριτήρια)

Στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας γίνεται η εισαγωγή στο σύστημα μοντελοποίησης των παραμέτρων και των δεδομένων της χρονοδρομολόγησης προκειμένου να δημιουργηθεί το αρχικό μοντέλο του προβλήματος.

Συγκεκριμένα, οι παράμετροι και τα δεδομένα του προβλήματος αφορούν στα στοιχεία:

- Αριθμός Γραμμών Συναρμολόγησης
- Αριθμός Ημερών Δρομολόγησης
- Αριθμός Παραγγελιών
- Αριθμός Εργασιών
- Αριθμός Τεχνικών/εμπορικών χαρακτηριστικών
- Αριθμός/είδος Περιορισμών
- Δεδομένα Παραγγελιών
- Δεδομένα Περιορισμών
- Παράμετροι Κριτηρίων Βελτιστοποίησης

Η φάση αυτή απαιτεί σημαντική εργασία προσαρμογής δεδομένων στην κατάλληλη μορφή προκειμένου να είναι αξιοποιήσιμα από το μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού.

Βήμα 2

Προσαρμογή Μοντέλου Βάσης - Ανάπτυξη Δικριτήριου Μοντέλου Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού $\boldsymbol{P(x)}$

$B_L \leq A \times X \leq B_U$

$X \in Z^n$

$f_1(x) = C_1 * (x), min$

$f_2(x) = C_2 * (x), min$

Στόχος σε αυτή την φάση της διαδικασίας, που εξυπηρετείται από το σύστημα που προτείνει η διατριβή, είναι να αναπτυχθεί το ακέραιο μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού που μοντελοποιεί το πρόβλημα της χρονοδρομολόγησης εργασιών

σε γραμμές συναρμολόγησης.

Στο πλαίσιο της διατριβής έχει αναπτυχθεί πρόγραμμα (σε περιβάλλον MATLAB) το οποίο με την αναγνώριση των δεδομένων/παραμέτρων παραγωγής δημιουργεί τους πίνακες X, A, B_L, B_U C_1, C_2 που μοντελοποιούν τις σχέσεις που έχουν αναλυθεί στην προηγούμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου.

Βήμα 3

Δημιουργία Λεξικογραφικού Πίνακα Πληρωμών

Κατασκευάζεται λεξικογραφικά ο πίνακας πληρωμών του προβλήματος.

Δεδομένου ότι αναφερόμαστε σε δύο διαστάσεις, δεν απαιτείται ιεράρχηση των κριτηρίων από τον αποφασίζοντα, γεγονός που θα προκαταλάμβανε την αναζήτηση λύσεων σε συγκεκριμένες μόνο περιοχές του χώρου των λύσεων-κριτηρίων, βάσει της προκαθορισμένης προτεραιότητας.

Η σκοπιμότητα και η φιλοσοφία κατασκευής του λεξικογραφικού πίνακα πληρωμών, επεξηγείται αναλυτικά στην §4.3.4.

Από τον λεξικογραφικό πίνακα ο αποφασίζων αλλά και ο αναλυτής πληροφορούνται για την καλύτερη και την χειρότερη επίδοση κάθε αντικειμενικής συνάρτησης.

Δεν έχει νόημα η διάθεση υπολογιστικού χρόνου για την αναζήτηση λύσεων σε εύρος τιμών εκτός του πεδίου που ορίζεται από τον λεξικογραφικό πίνακα πληρωμών καθώς οι οποιεσδήποτε λύσεις θα είναι μη ικανές.

Υπολογισμός Ιδεατών και Ναδίρ τιμών

Από τον πίνακα πληρωμών γίνεται ο προσδιορισμός των ιδεατών τιμών z_1^I, z_2^I και των ναδίρ τιμών z_1^N, z_2^N για τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις $f_1(x), f_2(x)$.

Βήμα 4

Αρχικοποίηση Αλγορίθμου

Αρχικοποίηση μετρητή σάρωσης, $i = 1$

Η σταθερά i, εκφράζει τον τρέχοντα αύξοντα αριθμό των επιπέδων σάρωσης του μετώπου Pareto (Pareto front) που επιλέγεται από τον αποφασίζοντα. Στην συνέχεια του αλγορίθμου η σταθερά i αυξάνεται κατά μια μονάδα.

Σε κάθε αύξοντα αριθμό i, γίνεται πυκνότερη σάρωση του μετώπου σε περιοχή που επιλέγει ο αποφασίζων διότι κατά την κρίση του παρουσιάζει ενδιαφέρον η περαιτέρω εξέτασή και πυκνότερη χαρτογράφηση των ικανών λύσεων στην περιοχή αυτή.

Αρχικοποίηση μετρητή neff και συνόλου F ικανών λύσεων

Ο μετρητής $neff$ αρχικοποιείται στην τιμή 2 ($neff = 2$), καθώς οι δύο λύσεις του λεξικογραφικού πίνακα πληρωμών αποτελούν τις πρώτες ικανές (ακραίες) λύσεις του μετώπου Pareto.

Αντίστοιχα, το σύνολο F των ικανών λύσεων που προκύπτουν από την διαδικασία αρχικοποιείται στο σύνολο {(z_1^I, z_2^N), (z_1^N, z_2^I)}

Επιλογή Κριτηρίου Βελτιστοποίησης, βάσει λογικής μεθόδου περιορισμών

Επιλέγεται ένα κριτήριο ως κριτήριο αναφοράς, για την βελτιστοποίηση.

Τα υπόλοιπα κριτήρια μετατρέπονται σε περιορισμούς του προβλήματος, ανάλογα με την κατεύθυνση της βελτιστοποίησής τους. Δηλαδή, αν στόχος είναι η μεγιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης (κριτηρίου), τότε δημιουργείται περιορισμός «μεγαλύτερο ή ίσο» για το κριτήριο αυτό, ενώ αν στόχος είναι η ελαχιστοποίησή της τότε δημιουργείται περιορισμός «μικρότερο ή ίσο».

Για την έρευνα που διεξάγεται, και χωρίς άρση της γενικότητας, γίνεται η παραδοχή επιλογής του κριτηρίου f_1 ως κριτηρίου αναφοράς για την μονοκριτήρια βελτιστοποίηση κατά τους κύκλους σάρωσης.

Βήμα 5

Υπολογισμός Εύρους Σάρωσης r_{2i}

Επιλογή Πυκνότητας Σάρωσης,

Υπολογισμός πλήθους κομβικών σημείων q_{2i} και παραμέτρου Δ_i.

Στην φάση αυτή της διαδικασίας γίνεται αρχικά καθορισμός του πεδίου σάρωσης $[z_{2i}^I .. z_{2i}^N]$ του μετώπου Pareto από την μη – εξαντλητική μέθοδο παραγωγής της προσέγγισης. Το πεδίο σάρωσης αφορά στο δεξί μέρος ε_2, του περιορισμού – κριτηρίου $f_2(x) \leq \varepsilon_2$, και εκφράζει το εύρος των τιμών του που θα εξεταστούν.

Συγκεκριμένα, κατά την αρχικοποίηση της διαδικασίας $i = 1$, επιλέγεται το αρχικό εύρος σάρωσης που είναι η περιοχή $[z_2^I .. z_2^N]$ που ορίζεται μεταξύ της ιδεατής και της ναδίρ τιμής του κριτηρίου f_2 που έχουν υπολογιστεί στο βήμα 3.

Ήτοι, $z_{21}^I = z_2^I$ και $z_{21}^N = z_2^N$

Σε αυτή την φάση, ορίζεται από τον αποφασίζοντα το Δ_{2i} το βήμα σάρωσης του εύρους τιμών που έχει επιλεγεί. Το Δ_{2i} είναι μια σταθερά που εκφράζει την απόσταση γειτονικών σημείων στην περιοχή $[z_{2i}^I .. z_{2i}^N]$ της αντικειμενικής συνάρτησης f_2 υπό εξέταση.

Εναλλακτικά, ο αποφασίζων μπορεί να επιλέξει πλήθος κομβικών σημείων

διαχωρισμού του επιλεγμένου πεδίου τιμών, έστω k. Με την λογική αυτή, το ωφέλιμο πεδίο τιμών του κριτηρίου που θα χρησιμοποιηθεί ως περιορισμός ("δεσμευμένο" κριτήριο-περιορισμός) χωρίζεται σε k+1 ίσα μέρη με k εσωτερικά κομβικά σημεία. Το πλήθος των κομβικών σημείων μπορεί να είναι διαφορετικό σε κάθε κύκλο που «τρέχει» η διαδικασία. Τα κομβικά σημεία αποτελούν το δεξί σκέλος των επιπλέον περιορισμών που αντιπροσωπεύουν τα "δεσμευμένα" κριτήρια – περιορισμούς. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των διαστημάτων τόσο πυκνότερο είναι το αντιπροσωπευτικό υποσύνολο των ικανών λύσεων που λαμβάνεται.

Σε αυτή την περίπτωση, το Δ προκύπτει ως ακολούθως:

$$\Delta_{2i} = (z_{2i}^{N} - z_{2i}^{I})/(k+1)$$

Όσο πιο μικρή είναι η τιμή του Δ τόσο μεγαλύτερη η πυκνότητα σάρωσης του επιλεγμένου εύρους τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης. Επισημαίνεται, ότι ένα χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η δυνατότητα ελέγχου της πυκνότητας σάρωσης άρα και της πυκνότητας αναπαράστασης του Pareto μετώπου, μέσω καθορισμού του Δ/k. Η πυκνότητα αναπαράστασης του συνόλου των αποτελεσματικών λύσεων αυξάνει με την αύξηση του πλήθους των κομβικών σημείων, αλλά παράλληλα αυξάνεται αναλογικά και το υπολογιστικό κόστος. Το trade-off μεταξύ της πυκνότητας είναι αποτέλεσμα διαπραγμάτευσης μεταξύ του αναλυτή και του αποφασίζοντος, αλλά σε κάθε περίπτωση η τελική απόφαση ανήκει στον αποφασίζοντα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πυκνότητα μπορεί να είναι διαφορετική σε διαφορετικά τμήματα του μετώπου Pareto, ανάλογα με το ενδιαφέρον που έχει ο αποφασίζων στην διερεύνηση των τμημάτων αυτών.

Βήμα 6

Παραγωγή αποτελεσματικών λύσεων – κομβικών σημείων

Στην φάση αυτή της διαδικασίας, ενεργοποιείται ο αλγόριθμος παραγωγής αποτελεσματικών λύσεων (σημείων αναπαράστασης του Pareto μετώπου). Για τον σκοπό αυτό όπως έχουμε ήδη αναφέρει, χρησιμοποιείται η φιλοσοφία και βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου περιορισμών. Σαρώνεται το σύνολο των κομβικών σημείων λύνοντας για κάθε ένα συνδυασμό κομβικών σημείων το αντίστοιχο πρόβλημα Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (μεταβάλλοντας συστηματικά το δεξί-σταθερό σκέλος των περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων).

Τα αντίστοιχα προβλήματα Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού δημιουργούνται αυτόματα, επιλύονται και παράγουν τις αντίστοιχες ικανές λύσεις. Στα αποτελέσματα μαζί με τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων που αντιστοιχούν στα ικανά σημεία παράγονται και οι τιμές των μεταβλητών απόφασης για κάθε ικανή λύση.

Αναλυτικά:

Τροποποιείται το δι-κριτήριο μοντέλο $P_i(e_{2i})$ χρονοπρογραμματισμού εργασιών ως ακολούθως:

$P_i(e_{2i})$:

$x \in Z$ *και* $s_i \in R^+$

$min(f_1(x) - \delta \times s_{2i}/r_{2i})$

Υπόκ. στους περιορισμούς

$f_2(x) + s_{2i} = e_{2i}$

και τους περιορισμούς του Ακέραιου Γραμμικού Προβλήματος ως στην § 4.2.2

όπου

δ: *πολύ μικρός αριθμός (10^{-3} ..10^{-6})*

s_{2i}: *μεταβλητή απόκλισης από το δεξί σκέλος του περιορισμού*

Η σάρωση της περιοχής $[z_{2i}^I \ldots z_{2i}^N]$ γίνεται ως ακολούθως:

$e_{2i} = z_{2i}^N$

$i_2 = 1$

Ενώ $e_{2i} \geq z_{2i}^I$ *και* $i_{2i} < g_{2i}$

Επιλύεται το $P_i(e_{2i})$

Αν επιστραφεί λύση, έστω (z_1^*, z_2^*), στον χώρο των κριτηρίων,

τότε

$neff = neff + 1$

$F = \{F, (z_1^*, z_2^*)\}$

$e_{2i} = e_{2i} - \Delta_{2i} = e_{2i} - r_{2i}/g_{2i}$

Για την μείωση σπατάλης χρόνου σε περιοχές που ήδη «καλύπτονται» από την αναζήτηση σε προηγούμενα βήματα, προτείνεται εναλλακτικά η διατύπωση:

$i_2 = i_2 + 1 + int(s_{2i}/\Delta_{2i})$

$e_{2i} = z_{2i}^N - (i_2 x\, r_{2i})/g_{2i}$

αλλιώς

$e_{2i} = z_{2i}^I$ *(περίπτωση γρήγορης εξόδου από τον βρόχο σάρωσης)*

Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν $e_{2i} \leq z_{2i}^I$, δηλαδή όταν όλη η περιοχή έχει σαρωθεί με

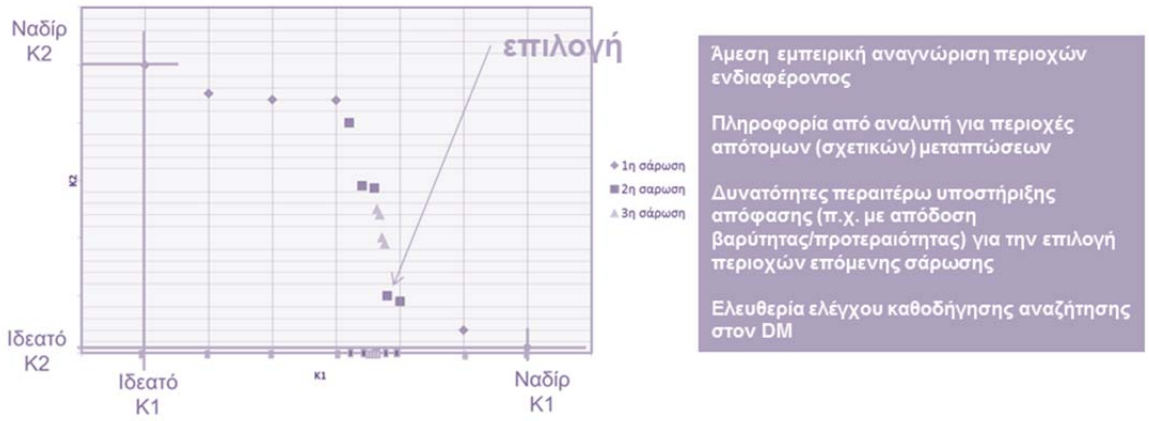
βήμα Δ_{2i}.

Βήμα 7

Καταγραφή (νέων) αποτελεσματικών λύσεων - κατά προτίμηση με γραφικό τρόπο στον χώρο των κριτηρίων.

Σε αυτό το βήμα καταγράφονται οι νέες αποτελεσματικές λύσεις στο σύνολο των λύσεων που έχουν ήδη προκύψει και απεικονίζονται γραφικά.

Η επιλογή της μεθόδου ειδικά για δι-κριτηριακά προβλήματα βασίζεται στο γεγονός ότι κατά κανόνα η μέθοδος επιτρέπει την οπτικοποίηση της κατάστασης σταδιακής σχηματοποίησης του μετώπου, με πυκνότερη αποτύπωση σε περιοχές που παρουσιάζουν ενδιαφέρουν.



Σχήμα 4. 12 Απεικόνιση ενδεικτικής παραγγωγής και γραφικής καταγραφής λύσεων Pareto – σε τρεις κύκλους σάρωσης

Βήμα 8

Αξιολόγηση λύσεων από τον αποφασίζοντα

Σε αυτό το κρίσιμο στάδιο, στόχος είναι να αξιολογήσει ο αποφασίζων τις λύσεις που έχουν παραχθεί με κριτικό τρόπο και να αποφασίσει αν θα επιλέξει λύση σε αυτό το στάδιο χαρτογράφησης του μετώπου ή σε κάποιο επόμενο στάδιο – πυκνότερης αναπαράστασης τμημάτων του μετώπου.

Για να υποστηρίξει την διαδικασία αξιολόγησης, ο αναλυτής παρουσιάζει γραφικά στον αποφασίζοντα την αναπαράσταση του μετώπου ως έχει διαμορφωθεί μέχρι το συγκεκριμένο επίπεδο.

Λόγω της δικριτήριας φύσης του προβλήματος, καθίσταται εύκολα δυνατό να γίνει η αναπαράσταση γραφικά, γεγονός που βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση της κατάστασης από τον αποφασίζοντα όσον αφορά την αλληλοσυσχέτιση των κριτηρίων

και το διαμορφούμενο trade-off μεταξύ των τιμών τους. Ο αποφασίζων μπορεί να επιλέξει μία λύση (ή σειρά λύσεων αν το επιθυμεί) που κρίνει πιο συμφέρουσες και αποδοτικότερες με βάση τον καλύτερο συνδυασμό όλων των δύο κριτηρίων απόφασης. Το στοιχείο της γραφικής απεικόνισης λύσεων του μετώπου Pareto στον δισδιάστατο χώρο των κριτηρίων δίνει στον αποφασίζοντα δυνατότητα αμεσότερης κατανόησης της ποιότητας των αποτελεσμάτων και του συσχετισμού των κριτηρίων. Έτσι διευκολύνεται ουσιαστικά η λήψη αποφάσεων αναφορικά με την τμηματικά πυκνότερη ανάλυση του μετώπου σε περιοχές που ενδέχεται να παρουσιάσουν ενδιαφέρον, κατά την κρίση του αποφασίζοντος, ενώ αποφεύγεται η περαιτέρω αναζήτηση σε περιοχές που δεν διαφαίνεται να παρουσιάσουν ενδιαφέρον.

Τονίζεται, ότι υπάρχει η δυνατότητα και προοπτική αξιοποίησης κλασικών και ευρέως χρησιμοποιούμενων τεχνικών πολυκριτήριας ανάλυσης για την επιλογή, την κατάταξη ή την ταξινόμηση των λύσεων , αν το επιθυμεί ο αποφασίζων (ELECTRE, PROMETHEE, UTA, κ.λπ.

Βήμα 9

Επιλογή λύσης από Αποφασίζοντα, και τερματισμός διαδικασίας

Στην περίπτωση που ο αποφασίζων επιλέξει λύση από τις υπάρχουσες που έχουν παραχθεί και αναπαρασταθεί ήδη στο μέτωπο Pareto, τότε η διαδικασία οδηγείται στην φάση του τερματισμού, ήτοι της απεικόνισης της λύσης στον χώρο των μεταβλητών.

Βήμα 10

Απόφαση επιλεκτικής πυκνότερης σάρωσης του μετώπου κατά τμήματα

Στην μέθοδο που προτείνεται από την διατριβή, δίνεται η δυνατότητα και ευελιξία στον αποφασίζοντα να καθορίσει την πυκνότητα απεικόνισης τα μετώπου Pareto δίνοντας έμφαση σε περιοχές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον και να αποφύγει την σπατάλη χρόνου σε περιοχές που από την φάση της αραιής αναπαράστασης δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας όπου ο υπολογιστικός χρόνος που αφιερώνεται σε κάθε βήμα του αλγορίθμου είναι κρίσιμη παράμετρος για την ποιότητα και την αποδοχή του τρόπου επίλυσης, όσον αφορά την δυνατότητα και την αποτελεσματικότητα αλληλεπίδρασης με τον αποφασίζοντα. Ο αποφασίζων επιλέγει να αναλώσει χρόνο σε περιοχές που τον ενδιαφέρουν, κάτι που το αντιλαμβάνεται στην πορεία της διαδικασίας και να μην αναλώσει χρόνο σε περιοχές που δεν τον ενδιαφέρουν, χωρίς να είναι απαραίτητο να μοντελοποιήσει

μαθηματικά την προτιμησιακή του στρατηγική και την επιλογή της νέας κατεύθυνσης αναζήτησης λύσεων του.

Στην περίπτωση αυτή, απλά

$i = i + 1$

και ο αποφασίζων επιλέγει/ορίζει το νέο πεδίο σάρωσης $[z_{2i}^{I} .. z_{2i}^{N}]$ του μετώπου Pareto. Το νέο πεδίο σάρωσης αφορά στο δεξί μέρος ε_2 του περιορισμού – κριτηρίου $f_2(x) \leq \varepsilon_2$, και εκφράζει το εύρος των τιμών του που θα εξεταστούν στον επόμενο κύκλο επανάληψης της διαδικασίας.

Επιστροφή στο Βήμα 5, όπου επιλέγει και την πυκνότητα της σάρωσης, κατά περίπτωση.

4.3.7. Χαρακτηριστικά και Πλεονεκτήματα

Στο πλαίσιο της διατριβής, προτείνεται μια καινοτόμος μη αντισταθμιστική προσέγγιση για την επίλυση μεγάλης κλίμακας προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού εργασιών με δύο κριτήρια, λαμβάνοντας υπόψιν συνθήκες, απαιτήσεις και χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος λήψης αποφάσεων σε ένα πραγματικό πρόβλημα.

Ο στόχος που επιτυγχάνεται με την προτεινόμενη προσέγγιση είναι η μεγαλύτερη ενδυνάμωση του ρόλου του αποφασίζοντος στην διαμόρφωση της στρατηγικής αναζήτησης λύσεων, συγκριτικά με τις μεθόδους που συναντάμε στην βιβλιογραφία (βλ. κεφ. 2, 3 της παρούσας διατριβής). Συγκεκριμένα, η πρωτότυπη μέθοδος συνδυάζει και προσαρμόζει αποτελεσματικές τεχνικές a-posteriori λήψης απόφασης (μεθόδους παραγωγής λύσεων), όπως η μέθοδος περιορισμών και η AUGMECON, με τεχνικές αλληλεπίδρασης με τον αποφασίζοντα στα κατάλληλα στάδια της μεθοδολογίας, όπου απαιτείται η καθοδήγηση από τον αποφασίζοντα προκειμένου η στρατηγική περαιτέρω αναζήτησης να αντανακλά τις προτιμήσεις του, χωρίς – πολύ σημαντικό- να απαιτείται αυστηρή μαθηματική μοντελοποίηση αυτών.

Η δυνατότητα οπτικοποίησης μέσω γραφικής παράστασης (σε δύο διαστάσεις) των ενδιάμεσων σταδίων και αποτελεσμάτων της διαδικασίας υποστηρίζει σημαντικά τον αποφασίζοντα στην λήψη αποφάσεων, χωρίς να απαιτείται περαιτέρω επεξήγηση και αποτύπωση της ποιότητας των λύσεων και της συσχέτισης των κριτηρίων, κάτι που πιστεύουμε θα προϋπόθετε επιστημονική εξοικείωση του χρήστη με την επιστήμη των μαθηματικών και της στατιστικής.

Με την προτεινόμενη μεθοδολογία, εξασφαλίζεται η συνδυαστική αξιοποίηση πλεονεκτημάτων που συναντάμε στις μεθόδους a-posteriori λήψης απόφασης και στις αλληλεπιδραστικές μεθόδους, όσον αφορά σε:

- **Αποτελεσματικότητα των παραγόμενων λύσεων**, άρα και της τελικά επιλεγόμενης λύσης: Η προτεινόμενη μεθοδολογία παράγει Pareto βέλτιστες λύσεις
- **Ικανοποίηση του αποφασίζοντος:** Η προτεινόμενη μεθοδολογία θεωρούμε ότι αποτελεί ένα εργαλείο υποστήριξης του αποφασίζοντος στην διερεύνηση και σταδιακή χαρτογράφηση του Pareto μετώπου των λύσεων. Η ικανοποίηση του αποφασίζοντος εξασφαλίζεται με την απόδοση σε αυτόν του βαθμού ελευθερίας, ευελιξίας και ελέγχου που ίδιος επιθυμεί να αποκτήσει στην διαδικασία.
    - *Ο ίδιος* επιλέγει τις περιοχές αναζήτησης λύσεων στον χώρο των κριτηρίων, υποβοηθούμενος από την γραφική απεικόνιση της κατάστασης του μετώπου σε κάθε στάδιο.
    - *Ο ίδιος* αντιλαμβάνεται την αντιστάθμιση της πυκνότητας του μετώπου Pareto με τον απαιτούμενο χρόνο για την επίτευξη αυτής.
    - *Ο ίδιος* εμπειρικά οδηγεί την αναζήτηση σε υποσχόμενες μόνο περιοχές, αναλώνοντας χρόνο μόνο για τις συγκεκριμένες διεργασίες αναζήτησης.
    - Επίσης, *ο ίδιος* επιλέγει την τελική λύση που θα εφαρμόσει, μέσα από το σύνολο που έχουν παραχθεί.
- **Απαιτούμενος Υπολογιστικός Χρόνος**: Το υψηλό υπολογιστικό κόστος σε μονάδες χρόνου, είναι πολύ σημαντική παράμετρος για την θεώρηση και την εφαρμογή μιας μεθόδου επίλυσης για μεγάλης κλίμακας πρόβλημα, ειδικά της κλάσης των NP-complete προβλημάτων, από άποψη αλγοριθμικής πολυπλοκότητας, όπως η περίπτωση που αντιμετωπίζει η παρούσα διατριβή. Η προτεινόμενη μέθοδος αξιοποιεί με ισορροπημένο και ορθολογικό τρόπο ευρετικούς/εμπειρικούς κανόνες που εκφράζονται μέσω της άμεσης αλληλεπίδρασης με τον αποφασίζοντα, για την καθοδήγηση των μεθόδων παραγωγής λύσεων που χρησιμοποιούνται για την μη-εξαντλητική χαρτογράφηση του μετώπου Pareto, με έμφαση στις περιοχές ενδιαφέροντος. Με τον τρόπο αυτό, θεωρούμε ότι εξοικονομείται σημαντικός χρόνος. Επιπλέον, λόγω του σημαντικού ελέγχου που δίνεται στον αποφασίζοντα στην απόφαση των παραμέτρων του εύρους (πλήθος κύκλων επανάληψης, i) και του βάθους (πυκνότητας σάρωσης, q_i, Δ_i) εφαρμογής της μεθοδολογίας, προκύπτει ότι όσο πιο έμπειρος και συνειδητοποιημένος είναι ο αποφασίζων ως προς τις επιδιώξεις του και τους στόχους βελτιστοποίησης, τόσο πιο γρήγορα μπορεί να καθοδηγήσει την διαδικασία στην τελικά επιλεγόμενη λύση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο έμπειρος αποφασίζων μπορεί να αναγνωρίσει και να αποκλείσει γρήγορα μεγάλες περιοχές του χώρου των δυνατών λύσεων ‘αδιαφορίας’, μέσω αντίστοιχων περιοχών του χώρου των κριτηρίων, κάτι το οποίο δε είναι δυνατόν να επιτευχθεί απόλυτα μέσω

οποιουδήποτε μαθηματικού ή λογικού προτιμησιακού μοντέλου που αναπτύσσει ένας αναλυτής.

Τονίζεται ότι η ίδια μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί και για προβλήματα περισσότερων των δύο κριτηρίων καθώς δεν υπάρχει κάποιος εγγενής περιοριστικός παράγοντας σε σχέση με τον αριθμό των κριτηρίων σε οποιοδήποτε από τα στάδια της διαδικασίας. Το module παραγωγής αποτελεσματικών λύσεων μπορεί να προσαρμοστεί και να εφαρμοστεί αντίστοιχα για προβλήματα πολυκριτηριακά, καθώς και η αλληλεπίδραση με τον αποφασίζοντα σε σχέση με την στρατηγική σάρωσης του n-διάστατου Pareto μετώπου. Παρόλαυτά, θεωρούμε ότι σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου παίζει η δυνατότητα γραφικής απεικόνισης του μετώπου Pareto των λύσεων, στον χώρο των κριτηρίων (δυο κριτήρια → δύο διαστάσεις χώρου κριτηρίων), κάτι που δεν είναι δυνατό ή/και το ίδιο αποτελεσματικό σε τρεις ή περισσότερες διαστάσεις (κριτήρια).

Για τον λόγο αυτό, η πρόταση της διατριβής παρουσιάζει στην ακόλουθη ενότητα και προτείνει διαφορετική μεθοδολογία και εναλλακτικές μεθόδους επίλυσης για προβλήματα περισσότερων των δύο κριτηρίων.

4.4. Πολυκριτηριακή μοντελοποίηση και μεθοδολογία επίλυσης

4.4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η προτεινόμενη προσέγγιση πολυστοχικής βελτιστοποίησης για την αντιμετώπιση του πολυκριτήριου τύπου του προβλήματος μεγάλης κλίμακας χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης.

Τα χαρακτηριστικά του προβλήματος παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2 ενώ η προτεινόμενη μαθηματική μοντελοποίησή του σε πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4. Στις ακόλουθες ενότητες αναλύονται:

- Η φιλοσοφία των προτεινόμενων προσεγγίσεων πολυκριτήριας επίλυσης: παρουσιάζονται αναλυτικά τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να υποστηρίξουν την προσέγγιση της διατριβής.
- Το πολυκριτηριακό πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης: παρουσιάζεται το πολυκριτήριο μοντέλο ακέραιου μαθηματικού προγραμματισμού.
- Η αναλυτική μεθοδολογία/αλγόριθμος επίλυσης του πολυκριτηριακού προβλήματος, αναφερόμενοι σε:

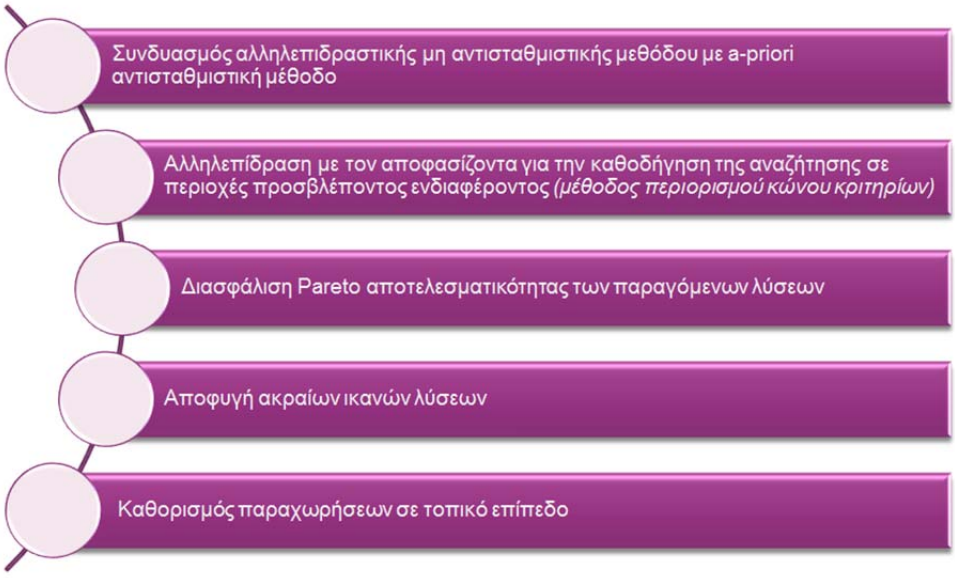
- Εκ των προτέρων αντισταθμιστική προσέγγιση
- Αλληλεπιδραστική μη αντισταθμιστική προσέγγιση
- Πρωτότυπη υβριδική προσέγγιση επίλυσης

- Συγκριτική αξιολόγηση των αναλυόμενων κλασικών μεθόδων ΠΜΠ με την πρωτότυπη προτεινόμενη μέθοδο.

4.4.2 Επιδιώξεις και λογική της προτεινόμενης μεθοδολογίας επίλυσης

Τα τελευταία χρόνια έχει καταγραφεί αυξανόμενη τάση στην αξιοποίηση/χρήση μικτού μοντέλου γραμμών συναρμολόγησης στην βιομηχανία. Οι γραμμές συναρμολόγησης, συχνά ακολουθώντας την φιλοσοφία του Just-In-Time παραγωγικού συστήματος, παράγουν αποτελεσματικά διαφοροποιημένα προϊόντα διατηρώντας ελάχιστα επίπεδα αποθεμάτων.

Στην παρούσα διατριβή, γίνεται η μοντελοποίηση της δρομολόγησης ενός ήδη σταθμισμένου συστήματος γραμμών συναρμολόγησης μικτού μοντέλου, ως ενός πολυκριτήριου προβλήματος ακέραιου προγραμματισμού, με τέσσερα κριτήρια βελτιστοποίησης.



Σχήμα 4. 13 Βασικά χαρακτηριστικά προτεινόμενης μεθοδολογίας επίλυσης πολυκριτηριακού σεναρίου

Όπως έχει σημειωθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, η πολυκριτηριακή ανάλυση, μπορεί να εφαρμοσθεί μαζί με τεχνικές βελτιστοποίησης σε προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού, με την συμμετοχή του αποφασίζοντος (Decision Maker, DM) εκ των προτέρων (a priori methods), κατά τη διάρκεια

(progressive/interactive methods) είτε εκ των υστέρων (a posteriori methods) στη διαδικασία απόφασης, βελτιστοποίησης και καθορισμού του πλάνου παραγωγής.

Στο πλαίσιο ανάπτυξης της πρότασης της εργασίας για την προσέγγιση επίλυσης τέτοιου τύπου προβλημάτων αξιοποιούνται δύο πολυκριτήριες προσεγγίσεις:

- Η εκ των προτέρων προσέγγιση, μέσω της *μεθόδου Ολικού Κριτηρίου*
- Η αλληλεπιδραστική προσέγγιση, μέσω της *μεθόδου των Ικανοποιητικών Στόχων*



Σχήμα 4. 14 Προτεινόμενη Μεθοδολογία: Μια συνέργεια δυο μεθόδων ΠΜΠ

Σύμφωνα με άλλη κατηγοριοποίηση των πολυκριτηριακών μεθόδων, η πρόταση της διατριβής αξιοποιεί:

- Μια αντισταθμιστική μέθοδο, τη *Μέθοδο Ολικού Κριτηρίου*
- Μια μη αντισταθμιστική μέθοδο, τη *Μέθοδο Ικανοποιητικών Στόχων*.

Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να εφαρμοστούν ως ανεξάρτητες μέθοδοι για την προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος της διατριβής, είτε να συνδυαστούν με κατάλληλες προσαρμογές σε μια πρωτότυπη νέα μέθοδο που προτείνει η παρούσα διατριβή.

Στις ακόλουθες ενότητες θα παρουσιαστούν αρχικά οι δύο μέθοδοι των οποίων η φιλοσοφία και βασικά χαρακτηριστικά τους αξιοποιούνται στην προτεινόμενη μεθοδολογία και θα αναδειχθούν τα πλεονεκτήματά τους και οι αδυναμίες που παρουσιάζουν. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν την αλληλεπίδραση με τον αποφασίζοντα για να εισάγουν στο μοντέλο τις προτιμήσεις του σε σχέση με τα κριτήρια, επιτρέποντας έτσι στον αποφασίζοντα να καθοδηγήσει ίδιος την στρατηγική εύρεσης επιθυμητής λύσης.

Η πρόταση της διατριβής, συνδυάζοντας κατάλληλα τις δύο μεθόδους, επιδιώκει να αξιοποιήσει την συμπληρωματικότητά τους ως προς τα πλεονεκτήματα που

προσφέρουν και να μειώσει την αρνητική επίδραση των αδύναμων χαρακτηριστικών τους.

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη πρόταση της διατριβής για το πολυκριτηριακό σενάριο, υποδεικνύοντας τα οφέλη που επιτυγχάνονται με τον συνδυασμό των δύο μεθόδων.

4.4.3 Μέθοδος Ολικού Κριτηρίου

4.4.3.1 Παρουσίαση της μεθόδου

Σύμφωνα με τους (Roy & Bouyssou, Aide multicritere la decision: Methodes et cas, , 1993), ένα πολυκριτήριο μοντέλο απόφασης θεωρείται αντισταθμιστικό όταν η πιθανή επιδείνωση στην τιμή του ενός κριτηρίου μπορεί να αντισταθμιστεί με την βελτίωση στην τιμή ενός ή περισσοτέρων από τα υπόλοιπα κριτήρια. Από την άλλη, ένα πολυκριτήριο μοντέλο απόφασης είναι μη αντισταθμιστικό όταν δεν μπορεί να οριστεί αντιστάθμιση της απώλειας μονάδων από ένα κριτήριο με κέρδος μονάδων σε άλλο κριτήριο.

Ως Μέθοδος Ολικού Κριτηρίου (Global criterion method) νοείται κάθε μέθοδος, που αποσκοπεί στη σύνθεση των αντικειμενικών συναρτήσεων σε μία, μετατρέποντας τον Πολυκριτηριακό Γραμμικό Προγραμματισμό σε πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Η νέα συνάρτηση είναι μία συνάρτηση αξιών (value function):

$u(x)= u\,[g_1(x), g_2(x), \ldots, g_n(x)]$

Πέραν των τεχνικών δυσκολιών που ενδέχεται να θέσει το νέο πρόβλημα:

$[\max]\, u(x)$ υπό τον περιορισμό x € S,

δεδομένου ότι η συνάρτηση αξιών μπορεί να είναι μη γραμμική, τίθεται και θέμα θεμιτότητας της συγκεκριμένης συνάρτησης ως μοντέλου ολικής προτίμησης του αποφασίζοντος. Το τελευταίο πρόβλημα καθορισμού της συνάρτησης αξιών ενός αποφασίζοντος παραπέμπει στην πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας (multi-attribute utility theory). Στην απλή περίπτωση, όπου η συνάρτηση u(x) είναι γραμμική, έχουμε τον σταθμισμένο μέσο των κριτηρίων $g_1, g_2, \ldots, g_n$:

$$u(x) = \sum_{i=1}^{n} p_i \times g_i(x)$$

όπου $p_1, p_2, \ldots, p_n$ είναι θετικοί συντελεστές βαρύτητας των οποίων η φυσική σημασία για τη συγκεκριμένη συνάρτηση δίνεται παρακάτω.

Ως μοντέλο ολικής προτίμησης ενός αποφασίζοντος, για την συνάρτηση αυτή πρέπει να ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$u(x) > u(y) \leftrightarrow$ η λύση x προτιμάται της y

$u(x) = u(y) \leftrightarrow$ η λύση x κρίνεται ισοδύναμη της y.

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η φυσική σημασία των συντελεστών βαρύτητας p_i, i=1, 2,..., n στο μοντέλο σταθμισμένου μέσου, θεωρείται πως υπάρχουν δύο υποθετικές λύσεις x και y με τις εξής τιμές στα κριτήρια:

x: $g_1 \quad g_2 \ldots g_i \ \ldots \ g_n$

y: g_1-Δ $g_2 \ldots \ g_i$ +1... g_n

Οι τιμές των δύο λύσεων στα κριτήρια είναι παντού ίδιες εκτός από δύο κριτήρια, το κριτήριο g_i στο οποίο έχει κερδηθεί μία μονάδα από τη λύση y ως προς τη x και το κριτήριο g_1 όπου έχει χαθεί ποσότητα Δ από τη λύση y.

Υπό την υπόθεση ότι ο αποφασίζων, έχοντας τη λύση x, έχει παραχωρήσει Δ μονάδες κριτηρίου g_1 προκειμένου να κερδίσει μία μονάδα κριτηρίου g_i, δηλαδή είναι αδιάφορος ως προς τις προτιμήσεις μεταξύ των λύσεων x και y (η λύση x κρίνεται ισοδύναμη της y). Σύμφωνα με τη σχέση :

$u(x) = u(y) \leftrightarrow p_1 \times g_1(x) + p_2 \times g_2(x) + \ldots + p_i \times g_i(x) + \ldots p_n \times g_n(x)$

$= p_1 \times (g_1(x) - \Delta) + p_2 \times g_2(x) + \ldots + p_i \times (g_i(x)+1) + \ldots p_n \times g_n(x)$

από όπου προκύπτει τελικά:

$\Delta = p_i/p_1, \forall\, i$

Άρα, αν τεθεί p_1= 1 και η συνάρτηση παίξει το ρόλο της συνάρτησης αναφοράς, που αποζημιώνει τις υπόλοιπες $\Delta = p_i$, το βάρος μιας συνάρτησης είναι η ποσότητα, που παραχωρείται στη συνάρτηση αναφοράς για να κερδηθεί ακριβώς μια μονάδα στη συνάρτηση g_i. Συνεπώς, τα βάρη είναι συντελεστές αντιστάθμισης (trade off) μεταξύ των συναρτήσεων και της συνάρτησης αναφοράς.

Η συνάρτηση αξιών ενός αποφασίζοντος είναι γραμμική (σταθμισμένος μέσος) όταν για κάθε ζεύγος συναρτήσεων (g_1, g_i), i =1, ..., n, οι συντελεστές αντιστάθμισης (βάρη) είναι ανεξάρτητοι των τιμών, που παίρνουν οι υπόλοιπες συναρτήσεις στο χώρο συναρτήσεων και σταθεροί.

Υπό τους όρους του θεωρήματος αυτού, ο αναλυτής του προβλήματος μπορεί να δρομολογήσει ένα διάλογο με τον αποφασίζοντα, τόσο για τη θεμιτότητα του μοντέλου του σταθμισμένου μέσου, όσο και για την εκτίμηση των βαρών των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Μεταξύ δύο ικανών λύσεων, ο συντελεστής αντιστάθμισης μας δείχνει πόσο πρέπει να θυσιάσουμε από ένα κριτήριο προκειμένου να κερδίσουμε σε κάποιο άλλο και να μεταβούμε από την μία ικανή λύση στην άλλη.

Ένας τυπικός διάλογος μεταξύ του αναλυτή και του αποφασίζοντος παρουσιάζεται ακολούθως:

Αναλυτής: Πόσες μονάδες από το κριτήριο αναφοράς g_r θα δεχόσουνα να παραχωρήσεις προκειμένου να κερδίσεις μία μονάδα στο κριτήριο g_i?

Αποφασίζων: Προκειμένου να κερδίσω μία μονάδα από το κριτήριο g_i, θα δεχόμουνα να θυσιάσω κ μονάδες από το κριτήριο g_r.

Αναλυτής: Πιστεύεις ότι η παραχώρηση αυτή μεταξύ των δύο κριτηρίων είναι ανεξάρτητη από τις τιμές στα υπόλοιπα κριτήρια?

Αποφασίζων: Ναι, πιστεύω ότι αυτή η παραχώρηση είναι ανεξάρτητη.

Αναλυτής: Συμφωνείς ότι η ίδια αντιστάθμιση ισχύει για όλες τιμές που λαμβάνονται για τα δύο κριτήρια (g_r, g_i);

Αποφασίζων: Ναι, συμφωνώ.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία για το πρόβλημα αναφοράς της διατριβής (βλ. ενότητα 4.2.2.3), αφού έχουν οριστεί όλες οι παραχωρήσεις k_{ir} διαμορφώνεται η συνάρτηση ολικού κριτηρίου ως εξής:

$u(x) = k_{1r} \times g_1 + k_{2r} \times g_2 + \ldots + k_{ir} \times g_i + k_{nr} \times g_n$

από όπου προκύπτει τελικά:

$k_{ir} = {}^{p_{ir}}/_{p_{rr}}, \forall\, i.$

Η συνεισφορά του αποφασίζοντος στην μέθοδο ολικού κριτηρίου περιορίζεται στην φάση του διαλόγου με τον αναλυτή για τον καθορισμό των παραχωρήσεων, σχετικών βαρών των κριτηρίων.

Με την οριστικοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, ο αναλυτής επιλύει το μονοκριτηριακό πλέον πρόβλημα βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας κατάλληλη τεχνική μαθηματικού προγραμματισμού ή και προσεγγιστική μέθοδο (γενετικοί αλγόριθμοι, αναζήτηση tabu, προσομοίωση ανόπτησης, κ.α.).

Στην συνέχεια ο αναλυτής παρουσιάζει στον αποφασίζοντα την τελική λύση που έχει προκύψει από την εφαρμογή της επιλεγμένης μεθόδου βελτιστοποίησης.

4.4.3.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Είναι φανερό πόσο ισχυρές είναι οι υποθέσεις, που κρύβονται πίσω από το μοντέλο του ολικού κριτηρίου (σταθμισμένου μέσου), υποθέσεις που δημιουργούν σοβαρά πρακτικά προβλήματα στους αναλυτές και στους αποφασίζοντες, οι οποίοι πρέπει άμεσα ή έμμεσα να ελέγξουν και να προσδιορίσουν σταθερές παραχωρήσεις-βάρη μεταξύ οικονομικών κριτηρίων και κριτηρίων περιβαλλοντικών, κοινωνικών, γεωπολιτικών, κ.λπ., προχωρώντας ουσιαστικά στην αντιστάθμισή τους (Σίσκος 1998).

Η συγκεκριμένη μέθοδος παρόλο που οδηγεί σε αποτελεσματικές λύσεις του μετώπου Pareto, δεν αποκλείει σε καμία περίπτωση την πιθανότητα παραγωγής ακραίων λύσεων που υποβαθμίζουν σημαντικά ένα κριτήριο εις βάρος βελτίωσης ενός άλλου, οδηγώντας σε λύσεις που κατά κανόνα δεν γίνονται αποδεκτές από τον αποφασίζοντα.

Επιπλέον, ειδικά στα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε στον προγραμματισμό παραγωγής:

- οι αμοιβαίες παραχωρήσεις δυο κριτηρίων σπάνια είναι ανεξάρτητες από τις τιμές στα υπόλοιπα κριτήρια,
- οι αμοιβαίες παραχωρήσεις δυο κριτηρίων σπάνια είναι σταθερές ανεξαρτήτως επιπέδων τιμών των κριτηρίων.

Κατά τον διάλογο αποφασίζοντα αναλυτή, συχνά η απάντηση στις μεθοδολογικές ερωτήσεις του αναλυτή είναι «Εξαρτάται».

Θεωρούμε ότι η μέθοδος Ολικού Κριτηρίου είναι εφαρμόσιμη μόνο σε ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων που η παραχώρηση μεταξύ των κριτηρίων έχει φυσική και ποιοτική σημασία ίδιου μεγέθους (π.χ. κόστος, καθυστέρηση κλπ), και ισχύουν επιπλέον οι προϋποθέσεις γραμμικότητας των σχέσεων παραχώρησης, κάτι που στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί μόνο σε συγκεκριμένο διάστημα (περιοχή) τιμών στον χώρο των κριτηρίων.

Δεν αγνοούμε βέβαια, ούτε υποβιβάζουμε, το σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου που είναι το μικρό σχετικά υπολογιστικό κόστος, καθώς η μέθοδος οδηγεί σε συγκεκριμένη ικανή λύση στον χώρο των κριτηρίων, χωρίς να απαιτείται (επί της αρχής της μεθόδου) επαναληπτικός κύκλος βελτιστοποίησης, στην ίδια βάση δεδομένων εισόδου από τον αποφασίζοντα.

4.4.4 Μέθοδος Ικανοποιητικών Στόχων

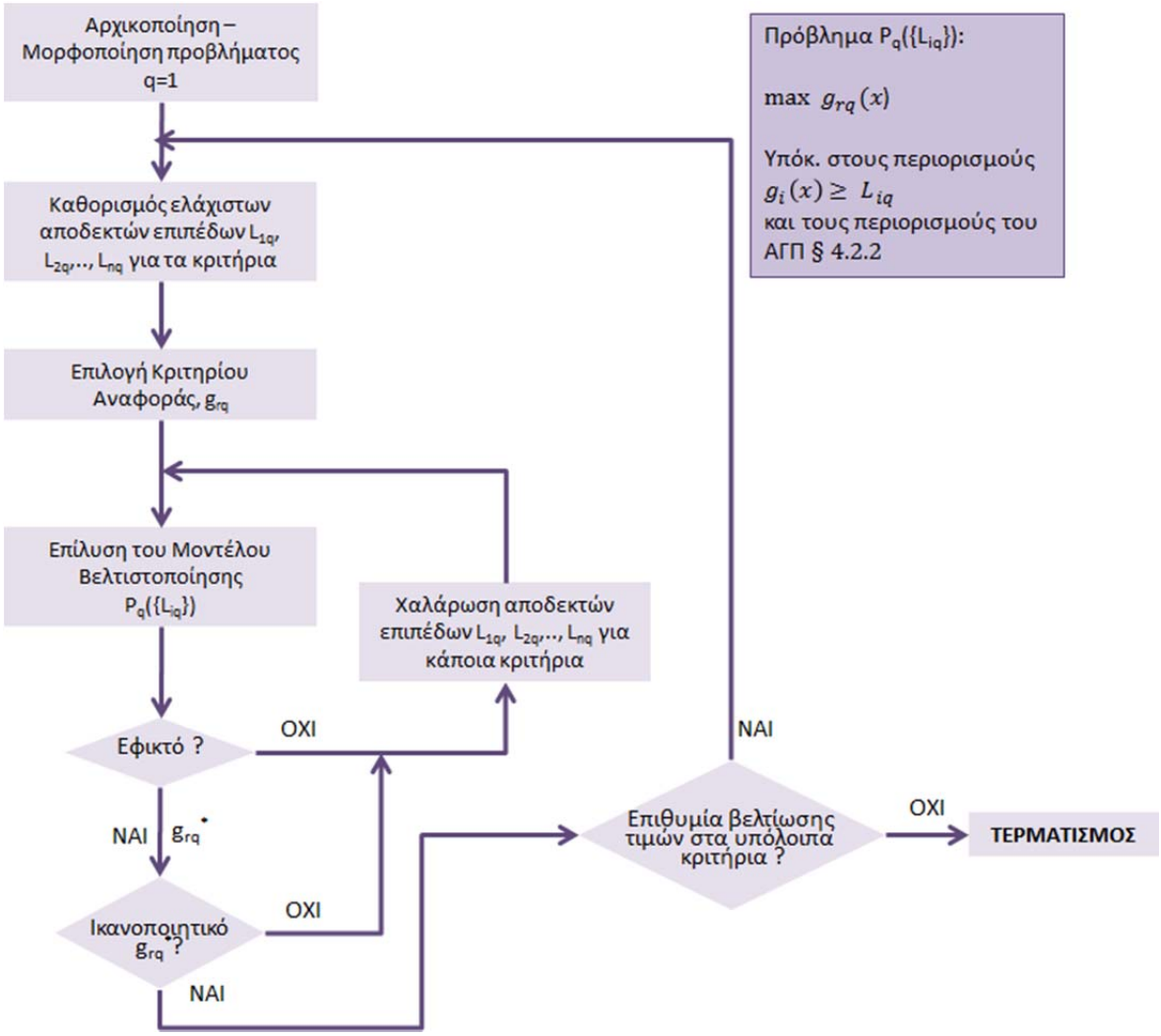
4.4.4.1 Παρουσίαση της μεθόδου

Οι αλληλεπιδραστικές μέθοδοι χαρακτηρίζονται από φάσεις διαλόγου με τον αποφασίζοντα που εναλλάσσονται με φάσεις υπολογισμών από το πρόγραμμα. Είναι επαναληπτικές διαδικασίες όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ αποφασίζοντα και μεθόδου συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης και να βρεθεί η τελική λύση.

Η κεντρική ιδέα είναι η εξής: Σε κάθε επανάληψη μία ή περισσότερες λύσεις παρουσιάζονται στον αποφασίζοντα. Ο αποφασίζων, επιλέγοντας κάποια λύση, παρέχει εμμέσως πληροφορίες για την προτίμησή του και ανάλογα διαμορφώνεται η επόμενη επανάληψη. Ουσιαστικά δηλαδή ο αποφασίζων κατευθύνει τη διαδικασία επίλυσης έως ότου βρεθεί η τελική λύση.

Η μέθοδος των επιπέδων ικανοποίησης (Satisfactory levels) (Hwang & Masud, 1979) βασίζεται σε μια διαδραστική μέθοδο υποστήριξης αποφάσεων στο πλαίσιο της φιλοσοφίας μη αντιστάθμισης μεταξύ των κριτηρίων. Ο αποφασίζων καλείται να θέσει τα ελάχιστα επίπεδα αποδοχής για όλα τα κριτήρια, καθορίζοντας ταυτόχρονα το κριτήριο του οποίου το επίπεδο είναι το λιγότερο ικανοποιητικό και επομένως απαιτείται άμεση βελτίωση. Η μέθοδος είναι επαναληπτική και οδηγεί σε σταδιακή βελτίωση των τιμών κριτηρίων, σε μια λύση που να ικανοποιεί τον αποφασίζοντα. Σε κάθε στάδιο της μεθόδου, ο αποφασίζων επανακαθορίζει τα επίπεδα, με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα και το βαθμό ικανοποίησής του.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής για την εφαρμογή της μεθόδου.



Σχήμα 4. 15 Διάγραμμα ροής της μεθόδου «Ικανοποιητικών στόχων»

Η διαδικασία αναλύεται ως ακολούθως:

Βήμα 1 **Καθορισμός αποδεκτών επίπεδων τιμών L_i των κριτηρίων**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Ο αποφασίζων καθορίζει ελάχιστες αποδεκτές τιμές/επίπεδα L_i για τα κριτήρια g_i, για i: $1..n$ προκειμένου να αποκλειστούν λύσεις που δεν είναι αποδεκτής ποιότητας βάση τιμής σε κάθε ένα από τα κριτήρια.

Βήμα 2 **Καθορισμός Κριτηρίου Βελτιστοποίησης**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Ο αποφασίζων καθορίζει το κριτήριο g_w που, σύμφωνα με την εμπειρία, εκτίμησή του, παρουσιάζει μη ικανοποιητική συμπεριφορά στην βελτιστοποίησή του ή/και

θεωρείται πιο σημαντική η βελτιστοποίησή του σε σχέση με τα άλλα κριτήρια.
Το κριτήριο αυτό αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση *(έστω προς μεγιστοποίηση)* του πρώτου κύκλου της μεθόδου (q=1), ενώ τα επίπεδα L_i που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα κριτήρια του προβλήματος εισάγονται ως περιορισμοί στο μαθηματικό πρόβλημα.

Βήμα 3 **Βελτιστοποίηση μονοκριτηριακού μοντέλου ΜΠ**	**Ενέργεια αναλυτή**

Το στάδιο αυτό αποτελεί την φάση υπολογισμού, όπου βελτιστοποιείται το μονοκριτηριακό μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού που έχει διαμορφωθεί εφαρμόζοντας την επιλεγμένη από τον αναλυτή τεχνική βελτιστοποίησης μονοκριτηριακών προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού.

Συγκεκριμένα επιλύεται το:

max $g_w(x)$

Υποκείμ. στους περιορισμούς του προβλήματος

(5) – (12) του προβλήματος (βλ. §. 4.2.2.3)

Και επιπλέον

$g_j(x) \geq L_j^q, \forall\, j \neq w$

Βήμα 4.1 **Περίπτωση εφικτής και αποδεκτής λύσης**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Αν (η βελτιστοποίηση είναι εφικτή) και (το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης – προκύπτουσα λύση- ικανοποιεί τον αποφασίζοντα),

τότε

Γίνεται πλήρης απεικόνιση της λύσης και παραδίνεται στον αποφασίζοντα.

Η διαδικασία τερματίζεται.

Βήμα 4.2 **Περίπτωση Μη εφικτής λύση**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Αν (η βελτιστοποίηση δεν είναι εφικτή), *δηλαδή ο συνδυασμός των επίπεδων/τιμών ικανοποίησης που έχει θέσει ο αποφασίζοντας αποδεικνύεται πολύ φιλόδοξος,*

τότε

q=q+1

Επιστροφή στο βήμα 1 της μεθόδου

Με τον τρόπο αυτό ξεκινάει νέα προσπάθεια βελτιστοποίησης του ίδιου ή διαφορετικού κριτηρίου. Ο αποφασίζων, δηλαδή, καλείται να «χαλαρώσει» κάποια ή όλα τα επίπεδα ικανοποίησης των κριτηρίων.

Βήμα 4.3 **Περίπτωσης Μη αποδεκτής λύσης / Βελτίωση Λύσης**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Αν {(η βελτιστοποίηση είναι εφικτή) και (ο αποφασίζων επιθυμεί να βελτιώσει την λύση ως προς ένα από τα υπόλοιπα κριτήρια)}

τότε

q=q+1 και

Επιστροφή στο βήμα 1 της μεθόδου

Με τον τρόπο αυτό, και σε αυτή την περίπτωση, ξεκινάει νέα προσπάθεια βελτιστοποίησης του ίδιου ή διαφορετικού κριτηρίου. Η μέθοδος παρέχει την δυνατότητα/ ευελιξία στο αποφασίζοντα για έναρξη νέου κύκλου βελτιστοποίησης, καλώντας τον να βελτιώσει τα επίπεδα των υπο-περιορισμό κριτηρίων, προκειμένου να βελτιώσει τις τιμές τους πέραν των προηγούμενων ορίων που είχαν τεθεί.

4.4.4.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Η διαδικασία επιτρέπει την ευελιξία στον αποφασίζοντα να επιχειρήσει νέους κύκλους βελτιστοποίησης, μεταβάλλοντας τα επίπεδα ικανοποίησης των κριτηρίων ή εναλλάσσοντας το κριτήριο προς βελτιστοποίηση. Με τον τρόπο αυτό, ο αποφασίζων αποκτά και δυνατότητα διερεύνησης της συμπεριφοράς βελτιστοποίησης του προβλήματος και των κριτηρίων του.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος αυτή είναι μια επαναληπτική μέθοδος καθοδηγούμενη από τις προτιμήσεις του αποφασίζοντος, σχετικά με την στρατηγική αναζήτησης που ακολουθείται, λαμβάνοντας υπόψιν σε κάθε επαναληπτικό κύκλο τα αποτελέσματα που έχουν ήδη προκύψει.

Ως πλεονεκτήματα αναμένονται τα ακόλουθα:

- Πρόκειται για μέθοδο απλή και άμεση στην εφαρμογή της κατάλληλη για τις περιπτώσεις προβλημάτων που ο αποφασίζων δίνει υψηλή προτεραιότητα σε ένα κριτήριο και αρκείται (σε επίπεδο αδιαφορίας) σε αποδεκτή ποιότητα για όλα τα υπόλοιπα, χωρίς να χρειάζεται οποιαδήποτε μορφή μαθηματικής μοντελοποίησης της προτιμησιακής συσχέτισης των κριτηρίων.
- Ο αποφασίζων αποκτάει ισχυρό έλεγχο στην διαδικασία εξερεύνησης του χώρου των λύσεων – κριτηρίων και μπορεί να καθοδηγήσει εμπειρικά αλλά μεθοδικά την επίλυση σε περιοχές λύσεων που τον ικανοποιούν, εφόσον υπάρχουν.

Ως μειονεκτήματα αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Η βελτιστοποίηση λαμβάνει υπόψιν μόνο το ένα από τα κριτήρια και τα υπόλοιπα κριτήρια συμμετέχουν μόνο ως περιορισμοί, ενδεχομένως λαμβάνοντας τιμές πολύ κοντά στις κατώτερες αποδεκτές, χωρίς να γίνεται προσπάθεια συνδυαστικής βελτιστοποίησής τους, πέραν των ελάχιστων καθορισμένων επιπέδων.
- Η μέθοδος δεν εξασφαλίζει σε καμία περίπτωση την παραγωγή αποτελεσματικών λύσεων του μετώπου Pareto.
- Ο υπολογιστικός χρόνος μπορεί να είναι μειονέκτημα της μεθόδου, καθώς δεν υπάρχει σαφής όρος τερματισμού της διαδικασίας παρά μόνο η ικανοποίηση του αποφασίζοντος. Ο τελευταίος, δεδομένου ότι η προκύπτουσες λύσεις δεν είναι αποτελεσματικές μπαίνουν στον πειρασμό να αναλώσουν πολύ χρόνο στην εξερεύνηση (μέσω αρκετών κύκλων βελτιστοποίησης) του χώρου των κριτηρίων, χωρίς να κινούνται απαραίτητα πάνω στο μέτωπο Pareto.

4.4.5 Προτεινόμενη Μεθοδολογία Επίλυσης

4.4.5.1 Παρουσίαση της μεθόδου

Παρατηρούμε ότι οι δύο παραπάνω μέθοδοι παρουσιάζουν συμπληρωματικά πλεονεκτήματα ως προς:

α) την αποτελεσματικότητα των παραγόμενων λύσεων,

β) τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο,

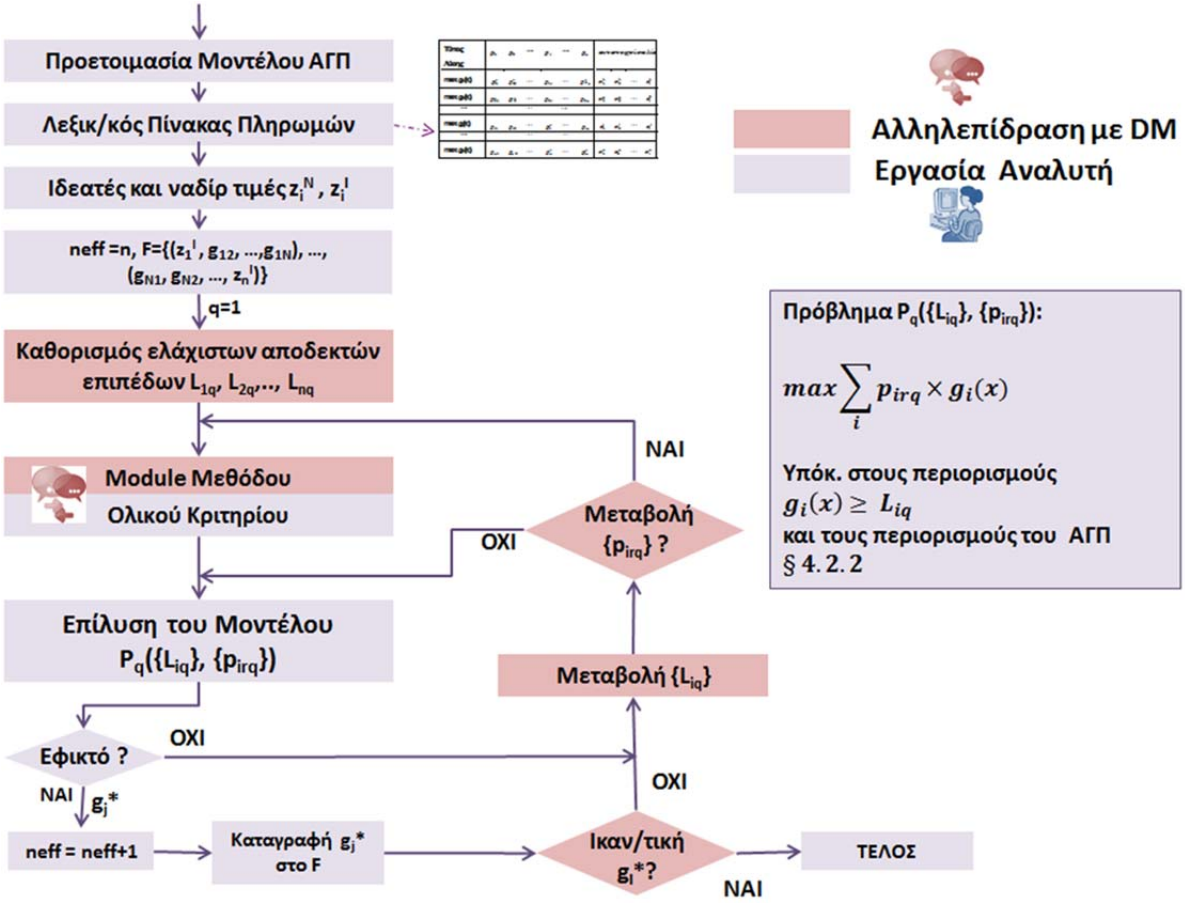
γ) την απόδοση ελέγχου στον αποφασίζοντα σε σχέση με την διαμόρφωση της στρατηγικής αναζήτησης,

δ) την άμεση ή έμμεση αποτύπωση των προτιμησιακών σχέσεων (ως σχέσεων παραχώρησης ανάμεσα στα κριτήρια, κλπ).

Η πρόταση της διατριβής για την περίπτωση των πολυκριτηριακών σεναρίων του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού σε γραμμές συναρμολόγησης, στοχεύει στην συνδυαστική αξιοποίηση των δύο παραπάνω μεθόδων σε μία πρωτότυπη μεθοδολογία η οποία θα παρουσιάζει κατά το δυνατόν τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων και θα αναιρεί τα μειονεκτήματά τους.

Συγκεκριμένα, η προτεινόμενη πρωτότυπη μέθοδος εφαρμόζει την φιλοσοφία της μεθόδου ολικού κριτηρίου σε κάθε επαναληπτικό κύκλο της μεθόδου των ικανοποιητικών στόχων.

Μια επαναληπτική στρατηγική ακολουθείται για την σταδιακή επίτευξη της αποτελεσματικής λύσης που θα ικανοποιεί τον αποφασίζοντα αναφορικά τόσο με τις τιμές των κριτηρίων όσο και με τον υπολογιστικό χρόνο.



Σχήμα 4. 16 Διάγραμμα ροής προτεινόμενης πολυκριτηριακής μεθοδολογίας επίλυσης

Η διαδικασία είναι αλληλεπιδραστική απαιτώντας από το αποφασίζοντα να ορίσει την στρατηγική, την κατεύθυνση αναζήτησης και επιτρέποντάς του να θέσει τις ακόλουθους παραμέτρους σε κάθε κύκλο βελτιστοποίησης:

1 Τα επίπεδα ικανοποίησης για κάθε κριτήριο, λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδεατές τιμές που προκύπτουν από τον πίνακα πληρωμών, τις αποτελεσματικές λύσεις που προκύψαν μέχρι και τον προηγούμενο κύκλο και τις προτιμήσεις βελτιστοποίησης όπως διαμορφώνονται με τα δεδομένα αυτά.

2 Τις αμοιβαίες παραχωρήσεις που ισχύουν μεταξύ των κριτηρίων και ενός κριτηρίου αναφοράς, εφαρμόζοντας την μέθοδο Ολικού Κριτήριου σε κάθε κύκλο Βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, σε κάθε κύκλο βελτιστοποίησης και λαμβάνοντας υπόψιν τα ελάχιστα επίπεδα αναφοράς για κάθε κριτήριο ,ο αποφασίζων ορίζει τις σχετικές παραχωρήσεις που ισχύουν για τις συγκεκριμένες περιοχές τιμών. Ο καθορισμός γίνεται ακολουθώντας την τυπικού διαδικασία διαλόγου όπως στην Μέθοδο Ολικού Κριτηρίου. Με τον τρόπο αυτό, αντιμετωπίζεται η ενδεχόμενη μη σταθερή τιμή των παραχωρήσεων μεταξύ των κριτηρίων για διαφορετικές περιοχές τιμών. Η

συνεισφορά αυτή του αποφασίζοντος οδηγεί στον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων όπως συμμετέχουν στην αντικειμενική συνάρτηση που βελτιστοποιείται.

3 Την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του κάθε κύκλου ως ικανοποιητικού ή μη ικανοποιητικού και την απόφαση για επανάληψη ή μη της διαδικασίας με νέο κύκλο βελτιστοποίησης. Ο νέος κύκλος βελτιστοποίησης στόχο θα έχει, ακολουθώντας την φιλοσοφία της μεθόδου των ικανοποιητικών στόχων, να βελτιώσει ένα ή περισσότερα κριτήρια εις βάρος των υπολοίπων λαμβάνοντας πάντα υπόψιν τις παραχωρήσεις που θα ισχύουν, στα νέα επίπεδα τιμών.

Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου. Στο σχήμα υποδεικνύονται με διαφορετικό χαρακτηριστικό χρώματα στάδια της διαδικασίας που αφορούν σε εργασία του Αναλυτή (διεργασίας ανάλυσης/υπολογιστική) και τα στάδια εμπλοκής/συνεισφοράς πληροφορίας του αποφασίζοντος.

Η προτεινόμενη μέθοδος αναλύεται ακολούθως στα επιμέρους βήματα και ροές εργασίας:

Βήμα 1	**Ενέργεια Αναλυτή**
Εισαγωγή Παραμέτρων και Δεδομένων (Παραγγελίες, Περιορισμοί, Κριτήρια)	

Στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας γίνεται η εισαγωγή στο σύστημα των παραμέτρων και των δεδομένων της χρονοδρομολόγησης προκειμένου να δημιουργηθεί το αρχικό μοντέλο του προβλήματος.

Συγκεκριμένα, οι παράμετροι και τα δεδομένα του προβλήματος αφορούν στα στοιχεία:

- Αριθμός Γραμμών Συναρμολόγησης
- Αριθμός Ημερών Δρομολόγησης
- Αριθμός Παραγγελιών
- Αριθμός Εργασιών
- Αριθμός Τεχνικών/εμπορικών χαρακτηριστικών
- Αριθμός/είδος Περιορισμών
- Δεδομένα Παραγγελιών
- Δεδομένα Περιορισμών
- Παράμετροι Κριτηρίων Βελτιστοποίησης

Βήμα 2	**Ενέργεια Αναλυτή**
Ανάπτυξη Μοντέλου Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού $\boldsymbol{P(x)}$	

Ακολουθώντας την προτεινόμενη μοντελοποίηση (βλ. ενότητα 4.2.2) διαμορφώνεται το πρόβλημα ΑΓΠ στην μορφή

$B_L \leq A\,X \leq B_U$ εκφράζοντας τους περιορισμούς (5)-(12) της ενότητα 4.2.2

$X \in Z^n$

Κριτήριο 1: Πλήθος παραγόμενων προϊόντων (βλ. (1)-4.2.2) - μεγιστοποίηση

$g_1(X) = C_1 * X^T$

Κριτήριο 2: Απόκλιση από προθεσμίες παράδοσης (βλ. (2)-4.2.2) - μεγιστοποίηση

$g_2(X) = C_2 * X^T$

Κριτήριο 3: Ακρίβεια παραγωγής Just-In-Time (βλ. (3)-4.2.2) - ελαχιστοποίηση

$g_3(X) = C_3 * X^T$

Κριτήριο 4: Χρησιμοποίηση Λόγων Απόστασης Πόρων (βλ. (4)-4.2.2) - ελαχιστοποίηση

$g_4(X) = C_4 * X^T$

Στόχος σε αυτή την φάση της διαδικασίας, που εξυπηρετείται από το σύστημα που προτείνει η διατριβή, είναι να αναπτυχθεί το ακέραιο μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού που μοντελοποιεί το πρόβλημα της χρονοδρομολόγησης εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης.

Στο πλαίσιο της διατριβής έχει αναπτυχθεί πρόγραμμα (σε περιβάλλον MATLAB) το οποίο με την αναγνώριση των δεδομένων/παραμέτρων παραγωγής δημιουργεί τους πίνακες X, A, B_L, B_U C_1, C_2, C_3, C_4 που μοντελοποιούν τις σχέσεις (1)- (12) που έχουν αναλυθεί στην ενότητα 4.2.2.3 του παρόντος κεφαλαίου.

Βήμα 3	**Ενέργεια Αναλυτή**
Κατασκευή Λεξικογραφικού Πίνακα Πληρωμών	**Αρχική εμπλοκή αποφασίζοντα**
Αρχική αξιολόγηση ορίων χώρου κριτηρίων	

Αρχικά, ο αναλυτής κατασκευάζει τον πίνακα πληρωμών των κριτηρίων του προβλήματος, με λεξικογραφική βελτιστοποίηση (κατά σειρά προτεραιότητας/ επιλογής του αποφασίζοντος, κατά βούληση ή τυχαία) προκειμένου να επιτευχθεί η αποτελεσματικότητα κατά Pareto των αντιστοιχουσών λύσεων του πίνακα.

Κριτήρια	g_1	g_2	g_3	g_4	$αντιστοιχούσα\ λύση$			
max $g_1(x)$	g_1^*	g_{12}	g_{13}	g_{14}	x_1^1	x_2^1	…	x_n^1
min $g_2(x)$	g_{21}	g_2^*	g_{23}	g_{24}	x_1^2	x_2^2	…	x_n^2
max $g_3(x)$	g_{31}	g_{32}	g_3^*	g_{34}	x_1^3	x_2^3	…	x_n^3
min $g_4(x)$	g_{41}	g_{42}	g_{43}	g_4^*	x_1^4	x_2^4	…	x_n^4

Με τον τρόπο αυτό ορίζονται αμέσως:

- οι Ιδεατές τιμές για κάθε κριτήριο

$z_1^I = g_1^*\ z_2^I = g_2^*\ \ z_3^I = g_3^*\ \ z_4^I = g_4^*$

- οι ναδίρ τιμές για κάθε κριτήριο

$z_1^N = min\{g_{21}, g_{31}, g_{41}\}$

$z_2^N = max\{g_{12}, g_{32}, g_{42}\}$

$z_3^N = min\{g_{13}, g_{23}, g_{43}\}$

$z_4^N = max\{g_{14}, g_{24}, g_{34}\}$

- Τέσσερις (4) αντιστοιχούσες αποτελεσματικές Pareto λύσεις στον χώρο των κριτηρίων προς αρχική αξιολόγηση από τον αποφασίζοντα, ως λύσεις αναφοράς.

Ο αποφασίζων αποκτά μια εικόνα του πεδίου τιμών στο οποίο αξίζει και μπορεί να κινηθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης των επιμέρους κριτηρίων προκειμένου να αποφύγει σπατάλη χρόνου και ενέργειας σε αναζήτηση λύσεων α) μη αποτελεσματικών, β) μη εφικτών- πολύ φιλόδοξων ή γ) πολύ χαμηλής ποιότητας.

Αρχικοποίηση μετρητών και συνόλων αλγορίθμου

neff=4 μετρητής ικανών λύσεων που προκύπτουν

F={(z_1^I, …,g_{14}), …, (g_{41}, …, z_4^I)} σύνολο ικανών λύσεων που προκύπτουν

q=1 μετρητής επαναληπτικών κύκλων

Βήμα 4 **Ορισμός ικανοποιητικών επιπέδων κριτηρίων L_{iq}**	**Ενέργεια Αποφασίζοντος**

Ακολουθώντας την λογική της μεθόδου «Ικανοποιητικών Στόχων», ο αποφασίζων καθορίζει ελάχιστες αποδεκτές τιμές/επίπεδα L_{iq} για τα κριτήρια g_i, προκειμένου να αποκλειστούν λύσεις που δεν είναι αποδεκτής ποιότητας -σε επίπεδο εμπειρικό-επιχειρησιακό. Οι τιμές αυτές αφορούν και ισχύουν για τον συγκεκριμένο κύκλο επανάληψης. Σε επόμενο κύκλο δύναται να μεταβληθούν.

Έναρξη επαναληπτική διαδικασίας

Βήμα 5 **Καθορισμός παραχωρήσεων – ανάπτυξη μοντέλου Ολικού Κριτηρίου**	**Ενέργεια Διαλόγου**

Ακολουθώντας την λογική εφαρμογής της Μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων, ο αποφασίζων καθορίζει το κριτήριο g_{rq} που, σύμφωνα με την εμπειρία, εκτίμησή του, παρουσιάζει μη ικανοποιητική συμπεριφορά στην βελτιστοποίησή του. Έστω χωρίς βλάβη της γενικότητας, το g_1. Το κριτήριο αυτό αποτελεί το κριτήριο αναφοράς για την ανάπτυξη του μοντέλου Ολικού Κριτηρίου, ήτοι την μοντελοποίηση της αντιστάθμισης των κριτηρίων, και την διαμόρφωση μιας συνάρτησης Ολικού Κριτηρίου. Στόχος είναι, σε κάθε κύκλο της μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων, να εφαρμόζεται/βελτιστοποιείται Συνάρτηση Ολικού Κριτηρίου, ισχύουσα για τις συνθήκες του συγκεκριμένου κύκλου q, υπό τους επιπρόσθετους περιορισμούς των επιπέδων L_{iq}.

Συγκεκριμένα, σε αυτή την φάση αξιοποιείται η φιλοσοφία της μεθόδου Ολικού Κριτηρίου η οποία εφαρμόζεται για τον καθορισμό των βαρών συμμετοχής των κριτηρίων στην αντικειμενική συνάρτηση του πρώτου κύκλου/επανάληψης της μεθόδου ($q = 1$).

Συγκεκριμένα, ακολουθώντας τον προβλεπόμενο διάλογο αναλυτή-αποφασίζοντα, ορίζονται οι παραχωρήσεις p_{irq} και διαμορφώνεται η συνάρτηση ολικού κριτηρίου.

Ο διάλογος διαμορφώνεται ως εξής, ενδεικτικά για τον υπολογισμό της παραχώρησης μεταξύ του κριτηρίου $g_{rq} = g_1$ και g_2:

Αναλυτής:
Δεδομένων των ελάχιστων ικανοποιητικών επιπέδων L_{iq}, των ναδίρ z_i^N και των ιδεατών z_i^I τιμών για τα δύο κριτήρια, πόσες μονάδες από το κριτήριο αναφοράς g_1 θα δεχόσουνα να παραχωρήσεις προκειμένου να κερδίσεις μία μονάδα στο κριτήριο g_2?

Αποφασίζων: Με αυτές τις συνθήκες και σε αυτά τα επίπεδα αναφοράς, προκειμένου να κερδίσω μία μονάδα από το κριτήριο g_2, θα δεχόμουνα να θυσιάσω k_2 μονάδες από το κριτήριο g_1.

Αναλυτής: Πιστεύεις ότι η παραχώρηση αυτή μεταξύ των δύο κριτηρίων είναι ανεξάρτητη από τις τιμές στα υπόλοιπα κριτήρια?

Αποφασίζων: Ναι, πιστεύω ότι αυτή η παραχώρηση είναι ανεξάρτητη.

Αναλυτής: Συμφωνείς ότι η ίδια αντιστάθμιση ισχύει για όλες τιμές που λαμβάνονται για τα δύο κριτήρια (g_1, g_2), στην συγκεκριμένη περιοχή του χώρου των κριτηρίων;

Αποφασίζων: Ναι, συμφωνώ

Από την διενέργεια του παραπάνω διαλόγου, τρεις φορές στην περίπτωσή μας, για την αντιστάθμιση όλων των κριτηρίων με το κριτήριο αναφοράς προκύπτει η συνάρτηση ολικού κριτηρίου:

$$P(X) = p_{11q}g_1 + p_{21q}g_2 - p_{31q}g_3 - p_{41q}g_4$$

από όπου :

$$k_i = \frac{p_{i1}}{p_{11}}, \forall\, i: 1..4$$

Η συνάρτηση αυτή αποτελεί το κριτήριο βελτιστοποίησης του προβλήματος για τον τρέχοντα κύκλο της διαδικασίας.

Βήμα 6 **Βελτιστοποίηση μονοκριτηριακού μοντέλου ΜΠ $P_q(\{L_{iq}\}, \{p_{irq}\})$:**	**Ενέργεια αναλυτή**

Το στάδιο αυτό αποτελεί την φάση υπολογισμού, όπου βελτιστοποιείται το μονο-κριτηριακό μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού που έχει διαμορφωθεί $P_q(\{L_{iq}\}, \{p_{irq}\})$ εφαρμόζοντας την επιλεγμένη από τον αναλυτή τεχνική βελτιστοποίησης μονοκριτηριακών προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού.

Συγκεκριμένα, επιλύεται το:

Πρόβλημα $P_q(\{L_{iq}\}, \{p_{irq}\})$:

$$max(\sum_i p_{irq} \times g_i(x))$$

Υπό τους περιορισμούς του προβλήματος

(5) – (12) του προβλήματος (βλ. παραγρ. 4.2.2.3)

Και επιπλέον

$g_i(x) \geq L_{iq}, \forall\, i$

Βήμα 7.1 **Περίπτωση εφικτής και αποδεκτής λύσης**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Αν {(η βελτιστοποίηση είναι εφικτή) και (το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης – προκύπτουσα λύση- ικανοποιεί τον αποφασίζοντα),

τότε

Γίνεται πλήρης απεικόνιση της λύσης και παραδίδεται στον αποφασίζοντα.

Η διαδικασία τερματίζεται.

Βήμα 7.2 **Περίπτωση Μη εφικτής λύση**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Αν (η βελτιστοποίηση δεν είναι εφικτή), δηλαδή ο συνδυασμός των επίπεδων/τιμών ικανοποίησης που έχει θέσει ο αποφασίζοντας αποδεικνύεται πολύ φιλόδοξος,

τότε

q=q+1

Νέος Προσδιορισμός επιπέδων $\{L_{iq}\}$

Αν ο αποφασίζων επιθυμεί να μεταβάλει και τις παραχωρήσεις $\{p_{irq}\}$

Τότε

Επιστροφή στο βήμα 5 της μεθόδου

Αλλιώς

Επιστροφή στο βήμα 6 της μεθόδου

για νέα προσπάθεια βελτιστοποίησης.

Ο αποφασίζων, δηλαδή, καλείται να «χαλαρώσει» κάποια ή όλα τα επίπεδα ικανοποίησης των κριτηρίων και να μεταβάλλει παράλληλα αν επιθυμεί τις παραχωρήσεις που ισχύουν.

Βήμα 7.3 **Περίπτωσης Μη αποδεκτής λύσης / Βελτίωση Λύσης**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Αν (η βελτιστοποίηση είναι εφικτή) και (η λύση δεν ικανοποιεί απόλυτα τον

αποφασίζοντα),

τότε

q=q+1

Νέος Προσδιορισμός επιπέδων $\{L_{iq}\}$

Αν ο αποφασίζων επιθυμεί να μεταβάλει και τις παραχωρήσεις $\{p_{irq}\}$

Τότε

Επιστροφή στο βήμα 5 της μεθόδου

Αλλιώς

Επιστροφή στο βήμα 6 της μεθόδου

για νέα προσπάθεια βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος παρέχει την δυνατότητα/ ευελιξία στο αποφασίζοντα έναρξης νέου κύκλου βελτιστοποίησης, καλώντας τον να βελτιώσει τα επίπεδα των υπο-περιορισμό κριτηρίων, ή και να μεταβάλλει σε αυτή την περίπτωση τους συντελεστές παραχώρησης.

4.4.5.2 Χαρακτηριστικά και Πλεονεκτήματα

Στην περίπτωση της μεθόδου Ολικού Κριτηρίου ο αποφασίζων συναντάει δυσκολία στον καθορισμό σταθερών βαρών αντιστάθμισης που να ισχύουν σε όλο τον χώρο των κριτηρίων, χωρίς καμία θεώρηση ελάχιστου επιπέδου ή ορίων τιμών. Ο αποφασίζων συχνά διστάζει να επιβεβαιώσει ότι οι ίδιες παραχωρήσεις ισχύουν σε όλο το εύρος τιμών, μεταξύ δύο κριτηρίων. Είναι πιο πιθανό κα ρεαλιστικό να θεωρήσουμε την ισχύ μιας γραμμικής συνάρτησης Ολικού κριτηρίου σε τοπικό επίπεδο συγκεκριμένων ορίων του χώρου των κριτηρίων. Στην προτεινόμενη μεθοδολογία, μετακινούμενοι στον χώρο των κριτηρίων από περιοχή σε περιοχή, ήτοι μεταβάλλοντας επίπεδα $\boldsymbol{L_j^q}$, θεωρούμε ότι είναι σκόπιμο να επανεξετάζονται από τον αποφασίζοντα οι συντελεστές αντιστάθμισης, καθοδηγώντας έτσι την βελτιστοποίηση με διαφορετικούς – αλλά ρεαλιστικούς- προτιμησιακούς όρους παραχώρησης ανάλογα με τις συνθήκες της συγκεκριμένης περιοχής του χώρου των κριτηρίων. Αντίστοιχο στόχο με διαφορετική όμως λογική εφαρμογής προτείνουν και ακολουθούν οι μέθοδοι Geoffrion και Zionts - Wallenius method (Hwang & Masud, 1979).

Από την άλλη πλευρά, η Μέθοδος Ικανοποιητικών Στόχων, ενώ θεωρητικά οδηγεί άμεσα στην εύρεση μια ικανοποιητικής λύσης, εφόσον οι σχετικές επιδιώξεις του

αποφασίζοντος είναι ρεαλιστικές, δεν υπάρχει καμία εξασφάλιση ότι η προκύπτουσα λύση είναι Pareto ικανή, οδηγώντας τον αποφασίζοντα σε αμφισβήτηση της ποιότητας της λύσης σε σχέση με τις ικανοποιητικές αλλά αποτελεσματικές λύσεις, του μετώπου Pareto. Επιπλέον, δεν γίνεται καμία (μεθοδευμένη) προσπάθεια βελτιστοποίησης των κριτηρίων πέραν των ορίων που ορίζουν τα επίπεδα ικανοποίησης. Η οποιαδήποτε βελτίωση πέραν των ορίων που ορίζουν τα επίπεδα ικανοποίησης επί των κριτηρίων που εμπλέκονται ως περιορισμοί, είναι κατά κανόνα τυχαία και πιθανότατα έχει περισσότερη σχέση με καλά στοιχεία της αρχικής λύσης που χρησιμοποιεί ο λύτης ΑΓΠ στο στάδιο της βελτιστοποίησης.

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν και αναμένονται από την εφαρμογή των δύο κλασικών μεθόδων επισημαίνονται στις παραγράφους 4.3.3.1 και 4.4.4.1.

Όσον αφορά στην πρωτότυπη μεθοδολογία που προτείνεται, αναμένεται και επιδιώκεται ο αποφασίζων να έχει πλήρη έλεγχο και ευελιξία ως προς:

- Έκφραση προτίμησης των επιπέδων ικανοποιητικής ποιότητας των κριτηρίων. Δυνατότητα τροποποίησης αυτών, κατά την αναζήτηση νέων βελτιωμένων λύσεων, στο πλαίσιο επαναληπτικής διαδικασίας.
- Έκφραση των παραμέτρων παραχώρησης/ αντιστάθμισης μεταξύ των κριτηρίων. Δυνατότητα τροποποίησης αυτών ανάλογα με την υποπεριοχή του χώρου όπου κινείται η τοπική αναζήτηση, στο πλαίσιο επαναληπτικής διαδικασίας.

Η μεθοδολογία παρέχει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση επίλυσης που εκτιμούμε και υποστηρίζουμε ότι παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Προσεγγίζει και μοντελοποιεί την στρατηγική αναζήτησης και την προτιμησιακή αξιολόγηση των λύσεων με συνδυασμό τεχνικής αντιστάθμισης κριτηρίων και ορισμού επιπέδων περιορισμού της τιμής τους.
- Σταθμίζει σημαντικά την μη γραμμικότητα των παραχωρήσεων μεταξύ των κριτηρίων (βάρη στην συνάρτηση ολικού Κριτηρίου), με δυνατότητα τροποποίησης τους ανά περιοχή (κύκλο) αναζήτησης.
- Εξασφαλίζει εγγενώς – μέσω της χρήσης γραμμικής συνάρτησης Ολικού Κριτηρίου- την Pareto αποτελεσματικότητα των παραγόμενων σε κάθε φάση λύσεων.
- Ανιχνεύει και εντοπίζει σταδιακά – μέσω κύκλων επανάληψης – λύσεις Pareto σε υποσχόμενες περιοχές του χώρο των κριτηρίων

Ως εν δυνάμει μειονέκτημα θα μπορούσαμε να αναφέρουμε, ότι δεδομένου του μεγάλου βαθμού ελευθερίας, και της σημαντικής ευελιξίας που παρέχεται στον αποφασίζοντα να καθορίσει ο ίδιος τους όρους τερματισμού της διαδικασίας, ο

αλγόριθμος μπορεί να αποδειχθεί χρονοβόρος, λόγω της επιλογής μεγάλου πλήθους επαναλήψεων. Παρόλαυτά, θεωρούμε ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία πλεονεκτεί σημαντικά στο θέμα του χρονικού παράγοντα έναντι της απλής μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων.

5

Εφαρμογή και αποτελέσματα

Κεφάλαιο 5

Εφαρμογή και αποτελέσματα

- Εισαγωγή
- Το πρόβλημα της εφαρμογής: Χαρακτηριστικά και παράμετροι
- Δικριτηριακή Μεθοδολογία Επίλυσης: Εφαρμογή και αποτελέσματα
- Πολυκριτηριακή Μεθοδολογία Επίλυσης: Εφαρμογή και αποτελέσματα
- Αξιολόγηση του μεθοδολογικού πλαισίου

5.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της διατριβής, εφαρμόστηκε η Πρόταση και οι επιμέρους μεθοδολογίες που την αποτελούν, σε πραγματικά δεδομένα ενός βιομηχανικού μεγάλης κλίμακας προβλήματος χρονοδρομολόγησης εργασιών παραγωγής διαφορετικών προϊόντων σε γραμμές συναρμολόγησης πολλαπλών μοντέλων. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχουν στην βιβλιογραφία προβλήματα αναφοράς που να συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των προβλημάτων που επιδιώκει να προσεγγίσει και επιλύσει η Πρόταση της διατριβής, ήτοι:

- πρόβλημα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού παραγωγής,
- μεγάλη κλίμακα προβλήματος,
- μοντελοποίηση ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού,
- πολυκριτηριακή φύση.

Η εγκυρότητα και η αξία της Πρότασης υποστηρίζεται από την εφαρμογή και τα αποτελέσματα αυτής σε προβλήματα πραγματικής φύσης με τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Προς αυτή την κατεύθυνση, για την εφαρμογή αξιοποιήθηκαν οι τύποι δεδομένων, τα χαρακτηριστικά του βιομηχανικού περιβάλλοντος και η προβληματική της διαδικασίας λήψης αποφάσεων του προβλήματος της

αυτοκινητοβιομηχανίας που αντιμετωπίστηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου CHIC II: “Creating Hybrid Solutions for Industry and Commerce”, EC ESPRIT 22165, στο οποίο η γράφουσα υπήρξε βασική ερευνήτρια στο πλαίσιο ανάπτυξης/αξιοποίησης λογισμικού (γλώσσας) βελτιστοποίησης σε περιβάλλον λογικού προγραμματισμού με χρήση περιορισμών (*ECLiPSe*). Το εν λόγω πρόβλημα, που αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά στην κατηγορία του, γενικεύτηκε ώστε να αφορά σε πλήθος άλλων περιπτώσεων και αποτέλεσε το πρόβλημα εφαρμογής για τον σκοπό της έρευνας. Τον ρόλο του αποφασίζοντος στην εφαρμογή ανέλαβε εμπειρογνώμονας, με εμπειρία σε αντίστοιχα περιβάλλοντα παραγωγής, κατάλληλη επιστημονική κατάρτιση και στέρεα γνώση της εταιρικής φιλοσοφίας και των προτεραιοτήτων που εφαρμόζονται για την διαμόρφωση και την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση πλάνων παραγωγής.

Στις ακόλουθες παραγράφους, αποτυπώνεται η διαδικασία εφαρμογής της Πρότασης στο συγκεκριμένο πρόβλημα και τα προκύπτοντα αποτελέσματα. Ειδικότερα:

- Αποτυπώνονται συνοπτικά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και του προβλήματος της εφαρμογής.
- Περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο που αποτυπώνει το πρόβλημα της εφαρμογής.
- Εφαρμογή και αποτελέσματα της δικριτηριακής μοντελοποίησης και προσέγγισης επίλυσης.
- Εφαρμογή και αποτελέσματα της πολυκριτηριακής μοντελοποίησης και προσέγγισης επίλυσης.

5.2 Το πρόβλημα της εφαρμογής: Χαρακτηριστικά και παράμετροι

Τα δεδομένα του προβλήματος, προσομοιάζουν πραγματικά δεδομένα και αφορούν σε μια εταιρεία (έστω αυτοκινητοβιομηχανία) που λαμβάνει τακτικά μια σειρά από εντολές που αφορούν την παραγωγή συγκεκριμένων προϊόντων (π.χ. μοντέλων οχημάτων), από μια σειρά εξειδικευμένων γραμμών παραγωγής -συναρμολόγησης. Ο γενικός στόχος-πρόκληση του προβλήματος όπως αναφέρθηκε, είναι κάθε εργασία που αφορά στην παραγωγή ενός προϊόντος (π.χ. οχήματος) να ανατεθεί σε μία συγκεκριμένη γραμμή συναρμολόγησης και σε συγκεκριμένα ημέρα στο πρόγραμμα παραγωγής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής και τις καθυστερήσεις, λαμβάνοντας υπόψη εμπορικούς και βιομηχανικούς περιορισμούς.

Λαμβάνοντας υπόψη το δεδομένο σύνολο των Εντολών Εργασίας, Περιορισμών και Κριτηρίων, ο στόχος είναι να προκύψει ένα βέλτιστο πρόγραμμα για κάθε γραμμή παραγωγής. Δύο τύποι αποφάσεων πρέπει να ληφθούν:

- ✓ Α: πότε (ημέρα) και πού (γραμμή συναρμολόγησης) θα παραχθεί το κάθε προϊόν και
- ✓ Β: πόσοι πόροι απαιτούνται σε κάθε τμήμα της κάθε γραμμής, δηλαδή απόφαση για την τριάδα (πόρος, γραμμή και την ημέρα).

Οι δύο τύποι αυτοί μεταβλητών αντιστοιχούν σε τέσσερα σύνολα μεταβλητών όπως παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4.

Η μοντελοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, οδηγεί ουσιαστικά στην επίλυση ενός προβλήματος πολυκριτηριακού ακέραιου προγραμματισμού.

Για να δώσουμε μια ένδειξη του μεγέθους του προβλήματος και της πολυπλοκότητας που εν γένει το χαρακτηρίζει, παραθέτουμε τα νούμερα για κάποιες από τις βασικές παραμέτρους του περιβάλλοντος εργασίας, ενώ για τα υπόλοιπα δεδομένα των περιορισμών παραπέμπουμε σε σχετικό παράρτημα.

Παράμετρος	**Τιμή**	**Εισαγωγή δεδομένων από**
nFamilies: Πλήθος των οικογενειών/ παραγγελιών	400	Αρχείο Δεδομένων Παραγγελιών: Orders.dat (βλ. σχετικό Παράρτημα)
Πλήθος προϊόντων σε ζήτηση	6.966	Αρχείο Δεδομένων Παραγγελιών: Orders.dat (βλ. σχετικό Παράρτημα)
Πλήθος διαφορετικών χαρακτηριστικών των μοντέλων	124	Αρχείο Δεδομένων Παραγγελιών: Orders.dat (βλ. σχετικό Παράρτημα)
nDays: το πλήθος των *ημερών* στην περίοδο δρομολόγησης	15	Αρχείο Δεδομένων Παραγγελιών: Orders.dat (βλ. σχετικό Παράρτημα)
nLines: *το πλήθος των γραμμών συναρμολόγησης*	2	Αρχείο Δεδομένων Παραγγελιών: Orders.dat (βλ. σχετικό Παράρτημα)
nDr: το πλήθος των περιορισμών	38	Αρχείο Περιορισμών Λόγου Χρησιμοποίησης Πόρων:

Χρησιμοποίησης λόγων απόστασης		resource_util_ratios.dat (βλ. σχετικό Παράρτημα)
sdr: το πλήθος των *επιλογών λόγων απόστασης* για κάθε περιορισμό χρησιμοποίησης λόγων απόστασης	3	Αρχείο Περιορισμών Λόγου Χρησιμοποίησης Πόρων: resource_util_ratios.dat (βλ. σχετικό Παράρτημα)
nCtrt: το πλήθος των *περιορισμών* του προβλήματος	*Περιορισμοί Ζήτησης:* 400 *Περιορισμοί Δυναμικότητας:* 15*2 = 30 *Περιορισμοί Just in Time:* 15*2*20 =600	Αρχείο Δεδομένων Περιορισμών ζήτησης και ημερολογιακών constraints.dat (βλ. σχετικό Παράρτημα)
$expProd_i$: αναμενόμενη ημερομηνία παραγωγής για τα προϊόντα της οικογένειας i. Ισχύει για i = 1, ..., nFamilies *$priority_i$: ένα χαρακτηριστικό της οικογένειας I που δείχνει το επίπεδο της προτεραιότητας. Θεωρούμε (χωρίς βλάβη της γενικότητας) ότι πρόκειται για λογική μεταβλητή η οποία παίρνει την τιμή 0 όταν η παραγγελία (οικογένεια) i προορίζεται για εμπορικό απόθεμα, οπότε δεν έχει προτεραιότητα, ενώ παίρνει την τιμή 1 όταν πρόκειται για παραγγελία πελάτη. Ισχύει για i = 1, ..., nFamilies.* *dem_i: η ζήτηση σε πλήθος για τα είδη της οικογένειας i. Ισχύει για i = 1, ..., nFamilies.* *minL: ελάχιστο μήκος δρομολόγησης (σε ημέρες) για τις γραμμές συναρμολόγησης.*		Αρχείο Δεδομένων Παραγγελιών: Orders.dat (βλ. σχετικό Παράρτημα)

maxDiff: μέγιστη διαφορά του μήκους δρομολόγησης μεταξύ των γραμμών συναρμολόγησης.	
$cMin_{k,j,l}$: κάτω όριο παραγωγής σύμφωνα με τον *k*-στό περιορισμό για την ημέρα *j* στη γραμμή συναρμολόγησης *l*. *Ισχύει για k= 1, ..., nCtrt, j = 1, ..., nDays, l=1,...,nLines.* $cMax_{k,j,l}$: πάνω όριο παραγωγής σύμφωνα με τον *k*-στό περιορισμό για την ημέρα *j* στη γραμμή συναρμολόγησης *l*. *Ισχύει για k= 1, ..., nCtrt, j = 1, ..., nDays, l=1,...,nLines* $pMin_{j,l}$: κάτω όριο για το πλάνο παραγωγής της γραμμής *l*, την ημέρα *j*. *Ισχύει για j = 1, ..., nDays, l=1,..,nLines* $pMax_{j,l}$: άνω όριο για το πλάνο παραγωγής της γραμμής *l*, την ημέρα *j*. *Ισχύει για j = 1, ..., nDays, l=1,..,nLines*	Αρχείο Δεδομένων Περιορισμών ζήτησης και ημερολογιακών constraints.dat (βλ. σχετικό Παράρτημα)
$numerator_{dr,m}/denominator_{dr,m}$: m-οστή επιλογή (αριθμητής/ παρονομαστής) για τον λόγο απόστασης *dr*. *Ισχύει για dr = 1,...,nDr, m=1,..,sdr* $ec_{dr,l,j,m}$: το κόστος της επιλογής *m*-οστής τιμής για τον λόγο απόστασης *dr*, που πρέπει να εφαρμοστεί για την ημέρα *j* στη γραμμή *l*. *Ισχύει για dr = 1,...,nDr, l=1,..,nLines, j = 1, ..., nDays, m=1,..,sdr* $vc_{dr,m}$: το κόστος παραβίασης της *m*-οστής τιμής για τον λόγο απόστασης *dr*. *Ισχύει για dr = 1,...,nDr, m=1,..,sdr*	Αρχείο Περιορισμών Λόγου Χρησιμοποίησης Πόρων: resource_util_ratios.dat (βλ. σχετικό Παράρτημα)

Πίνακας 5. 1 Χαρακτηριστικά και βασικά δεδομένα του προβλήματος της εφαρμογής

Ακολουθώντας την μοντελοποίηση του προβλήματος που προτείνεται στην ενότητα 4.2.2, διαμορφώθηκε το μοντέλο πολυκριτηριακού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού.

Στόχος είναι η μοντελοποίηση και διαμόρφωση του σχετικού μοντέλου στην γνωστή μορφή:

Εύρεση του διανύσματος X = $[x_1 \quad \dots \quad x_{n_v}]$,

που βελτιστοποιεί τα 4 κριτήρια του προβλήματος, της μορφής

$min/\max g_i = \sum_{j=1}^{n_v} C_{ij} \times X_j$, για i = 1, 2, 3, 4,

μοντέλο των 4 κριτηρίων του προβλήματος, *βλ. σχέσεις (1)-(4), ενότητα 4.2.2*

Υπό τους περιορισμούς

$$\begin{bmatrix} b_{1l} \\ \vdots \\ b_{cl} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n_v} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{c1} & \cdots & a_{cn_v} \end{bmatrix} \times [x_1 \quad \dots \quad x_{n_v}] \leq \begin{bmatrix} b_{1u} \\ \vdots \\ b_{cu} \end{bmatrix}$$

$x_j \geq 0, j \in N \equiv \{1,2,\dots,n_v\}$ *βλ. σχέσεις (5)-(12), ενότητα 4.2.2*

x_j *ακέραιοι*

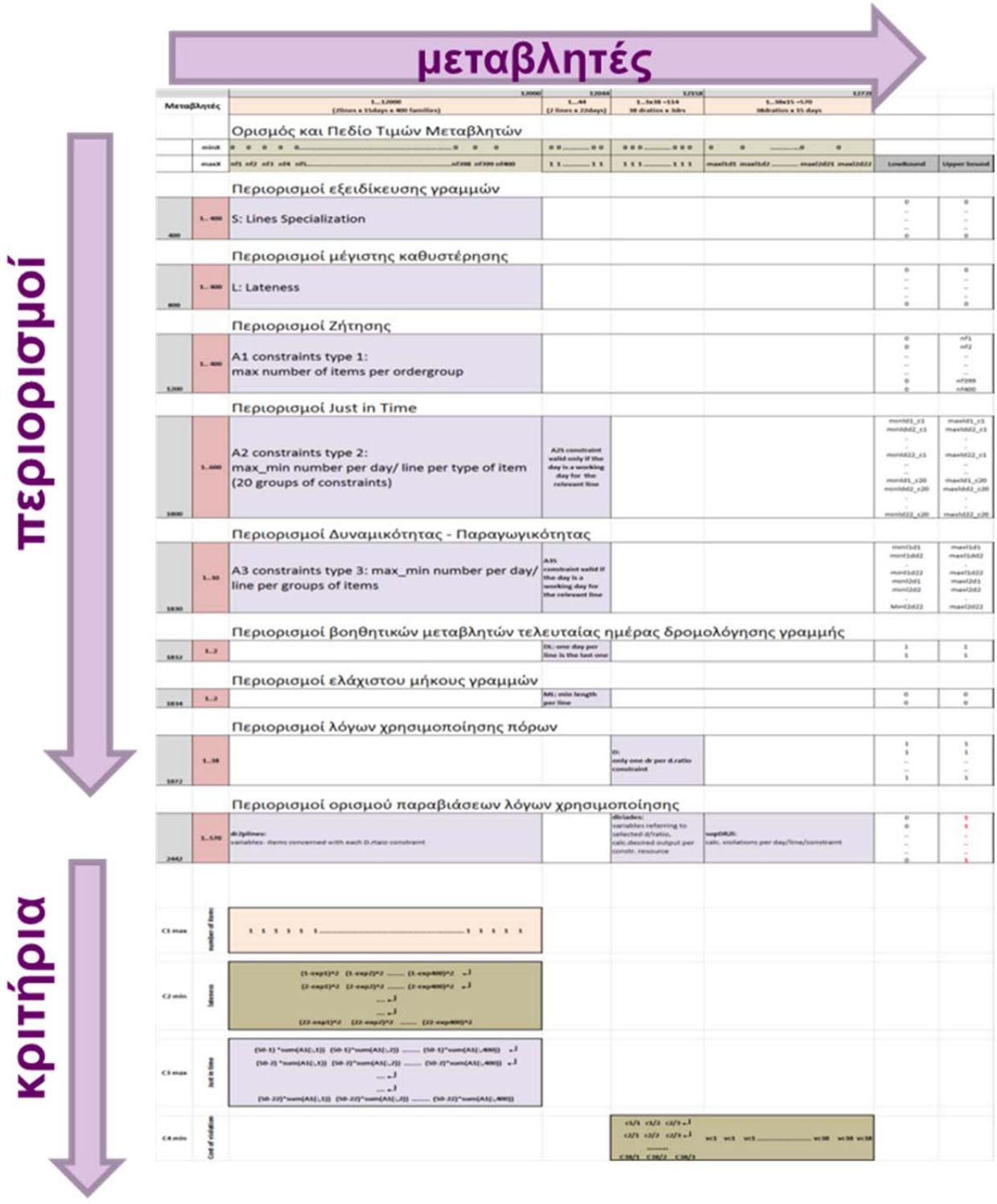
Όπου

c: το πλήθος των περιορισμών του προβλήματος.

n_i: *το πλήθος των μεταβλητών του προβλήματος.*

$\alpha_{ij}, b_{iu}, b_{il}$: *δεδομένα των περιορισμών του προβλήματος*,

Το κάτωθι σχήμα παρουσιάζει σχηματικά το μοντέλο του προβλήματος, προκειμένου να γίνει πιο εύκολα αντιληπτή η μορφή του και η συσχέτιση μεταβλητών, δεδομένων, περιορισμών και κριτηρίων.



Σχήμα 5. 1 Σχηματική αναπαράσταση του Πολυκριτηριακού Ακέραιου Γραμμικού Μοντέλου

Το μοντέλο χαρακτηρίζεται από πίνακες αραιούς όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. 1, και έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Πλήθος Μεταβλητών	12. 728
Πλήθος Περιορισμών	12.728 περιορισμοί ορισμού πεδίου τιμών μεταβλητών 2.442 σχεσιακοί περιορισμοί μεταβλητών
Πλήθος Κριτηρίων	4

Το πρόβλημα είναι εφικτό.

Στην περίπτωση που το πρόβλημα δεν είναι εφικτό, με την υποστήριξη του αναλυτή, ο αποφασίζων θα πρέπει να χαλαρώσει κάποιους από τους περιορισμούς, είτε μεταβάλλοντας ορισμένες τιμές b_{iu}, b_{il}, είτε μετατρέποντας τους σχετικούς περιορισμούς σε (επιπλέον) κριτήρια προς βελτιστοποίηση.

Η εισαγωγή και προσαρμογή των δεδομένων καθώς και η μοντελοποίηση του προβλήματος έγινε με την ανάπτυξη custom εφαρμογής σε περιβάλλον MATLAB R2008a. Ο απαιτούμενος χρόνος για την οργάνωση/ προσαρμογή των δεδομένων και την κατάστρωση του μοντέλου ήταν της τάξεως των 1’ (ενός λεπτό).

Στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής των δυο μεθοδολογιών που προτείνονται στην παρούσα διατριβή, για το δικριτηριακό σενάριο, και το πολυκριτηριακό σενάριο του προβλήματος.

Συγκεκριμένα, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται ως ακολούθως:

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της δικριτηριακής μεθοδολογίας στο παράδειγμά μας.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής μεθοδολογίας επίλυσης, στο πλαίσιο της οποίας παρουσιάζονται για λόγους συγκριτικής αξιολόγησης – αλλά και ως επιλογές στον αποφασίζοντα- οι μέθοδοι:

- Μέθοδος Λεξικογραφικής Βελτιστοποίησης (Lexicographic optimization)
- Μέθοδος Ολικού κριτηρίου (Global criterion)
- Μέθοδος ικανοποιητικών στόχων

και η προτεινόμενη

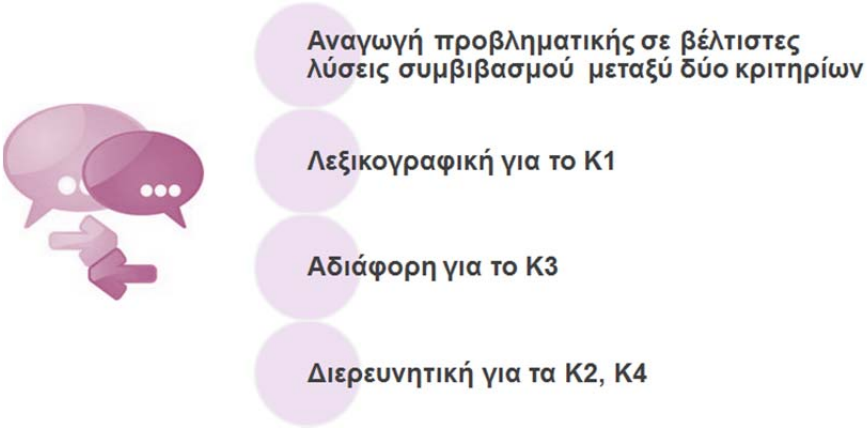
- Πρωτότυπη αλληλεπιδραστική μέθοδος Ολικού Κριτηρίου με Ικανοποιητικούς Στόχους

Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον χώρο των κριτηρίων, όπως συνηθίζεται σε πολυκριτηριακά προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού αλλά και σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας με μεγάλο αριθμό μεταβλητών.

5.3 Δικριτηριακή μεθοδολογία επίλυσης: Εφαρμογή και αποτελέσματα

Ακολουθώντας την μεθοδολογία που προτείνεται στην ενότητα 0, διαμορφώθηκες η δι-κριτήρια μορφή του προβλήματος λαμβάνονται υπόψιν, σύμφωνα με τις προτιμήσεις του αποφασίζοντος τα ακόλουθα κριτήρια βελτιστοποίησης:

- K_2: Κριτήριο Απόκλισης από προθεσμίες Παράδοσης
- K_4: Κριτήριο Χρησιμοποίησης – Λόγων Απόστασης Πόρων



Σχήμα 5.2 Προϋποθέσεις θεώρησης κριτηρίων για την ανάπτυξη του δικριτηριακού σεναρίου

Το κριτήριο K_1 που αφορά στο «Εύρος Δρομολόγησης» μεγιστοποιείται και ορίζεται ως περιορισμός, λαμβάνοντας την μέγιστη δυνατή τιμή.

Το κριτήριο K_3 «Ακρίβεια Just in Time παραγωγής» θεωρείται ως το λιγότερο σημαντικό για την περίπτωση αυτή, δεδομένου ότι η φιλοσοφία JIT αντανακλάται ήδη σε μεγάλο βαθμό μέσω των τιθέμενων περιορισμών.

Για την διαμόρφωση του δικριτήριου μοντέλου, έπρεπε αρχικά να γίνει βρεθεί η τιμή για τον νέο περιορισμό - κριτηρίου «Εύρος Δρομολόγησης».

Εκτελούμε την μονοκριτήρια βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση) για το κριτήριο

«Εύρος Δρομολόγησης», υπό τους περιορισμούς (5)-(12), και προκύπτει

$max \sum_j \sum_l \sum_l \ x_{ijl}$ = 6.928

Ήτοι, το μέγιστο πλήθος εργασιών/προϊόντων που μπορεί να παραχθεί βάσει των περιορισμών του προβλήματος είναι 6.928 από τα 6966 συνολικά που αποτελούν το πλήθος σε παραγγελία από όλες τις οικογένειες.

Παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα ανά βήμα της μεθοδολογίας 4.3.6.

Βήμα 1

Εισαγωγή *Παραμέτρων Χρονοδρομολόγησης και Δεδομένων* (Παράμετροι περιβάλλοντος, Παραγγελίες, Περιορισμοί)

Ανάλυση ως την ενότητα 5.2. Σε αυτή την φάση θεωρούμε ότι έχει ήδη εκτελεστεί.

Βήμα 2

Προσαρμογή Μοντέλου Βάσης - Ανάπτυξη Δικριτήριου Μοντέλου Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού $P(x)$

Η διατύπωση των κριτηρίων και των περιορισμών του δι-κριτήριου σεναρίου $P(x)$ είναι:

Να βρεθεί το θετικό διάνυσμα ακεραίων x που βελτιστοποιεί τα Κριτήρια και ικανοποιεί τους περιορισμούς ως ακολούθως:

Κριτήριο 2: Απόκλιση από την προθεσμία παράδοσης, *Ελαχιστοποίηση*

[Min] $g_2(X) = \sum_i \ \sum_j \ \sum_l \ (x_{ijl} \times (j - expProd_i)^2)$, με

$i = 1, \ldots, 400$, $j = 1, \ldots, 15$, $l = 1, \ldots, 2$

Κριτήριο 4: Χρησιμοποίησης – Λόγων Απόστασης Πόρων, *Ελαχιστοποίηση*

[Min] $g_4(X) = \sum_{dr} \sum_l \ \sum_j \ \sum_m (z_{dr\ ljm} \times (ec_{dr\ ljm} + nv_{dr\ ljm} \times vc_{dr\ m}))$, με

$dr = 1, \ldots, 38$, $j = 1, \ldots, 15$, $l = 1, \ldots, 2$, $m = 1, \ldots, 3$.

Όπου $nv_{dr\ ljm}$ είναι ο αριθμός των παραβιάσεων (βοηθητική μεταβλητή) της m-οστής αξίας του λόγου απόστασης dr για την ημέρα j και τη γραμμή l.

Υποκείμενο στους περιορισμούς:

$\sum_j \sum_l \sum_l \ x_{ijl}$ = 6.928, όπου 6.928 η μέγιστη τιμή που προκύπτει για το K_1

και τους περιορισμούς (5) – (12) της ενότητας 4.2.2

Βήμα 3

Δημιουργία Λεξικογραφικού Πίνακα Πληρωμών,

Ο λεξικογραφικός πίνακας πληρωμών παρουσιάζεται ακολούθως, με την επισήμανση ένδειξης τιμών – για λόγους πληρότητας και συγκριτικής αξιολόγησης- και για τα άλλα δύο κριτήρια (*Εύρος Δρομολόγησης*, και *Ακρίβεια εφαρμογής JIT*) τα οποία συμμετέχουν στην λεξικογραφική βελτιστοποίηση ως πρώτης και τελευταίας προτεραιότητας αντίστοιχα.

Με την τρόπο αυτό, εξασφαλίζουμε ότι οι λύσεις που προκύπτουν είναι ικανές και οριοθετούν το μέτωπο Pareto, όσον αφορά στα δύο υπο βελτιστοποίηση κριτήρια.

Πίνακας πληρωμών	f1 (K2)	f2 (K4)	K2	K1
f1 (K2)	*129.625**	*319*	353.671	6.928
f2 (K4)	*145.563*	*230**	353.134	6.928

Πίνακας 5. 2 Πίνακας πληρωμών δικριτηριακού προβλήματος

Υπολογισμός Ιδεατών και Ναδίρ τιμών

Από τον πίνακα πληρωμών προσδιορίζονται οι ιδεατές και ναδίρ τιμές για τα δύο κριτήρια.

Ιδεατές τιμές:

$z_1^I = 129.625$

$z_2^I = 230$

Ναδίρ τιμές:

$z_1^N = 145.563$

$z_2^N = 319$



Σχήμα 5. 3 Γράφημα με τα σημεία του πίνακα πληρωμών δικριτηριακού προβλήματος

Βήμα 4
Αρχικοποίηση Αλγορίθμου

Αρχικοποίηση μετρητή σάρωσης, $\mathrm{i}=1$

Αρχικοποίηση μετρητή neff και συνόλου F ικανών λύσεων

$\mathrm{neff}=2$, $\mathrm{F}=\{(129.625, 319), (145.563, 230)$

Επιλέγεται ως κριτήριο βελτιστοποίησης το Κριτήριο K_2 (f_1) και ως κριτήριο σάρωσης πεδίου τιμών το κριτήριο K_4 (f_2).

Βήμα 5.1
Υπολογισμός Εύρους Σάρωσης $\mathbf{r_{2,i}}$
Επιλογή Πυκνότητας Σάρωσης,
Υπολογισμός πλήθους κομβικών σημείων $\mathbf{q_{2,i}}$ και παραμέτρου $\mathbf{\Delta_{2,i}}$

Ορισμός άνω φράγματος, $\mathrm{e}_2 = z_2^N = 319$

Υπολογισμός εύρους σάρωσης, $r_{2,1} = z_2^N - z_2^I = 319 - 230 = 89$

Υπολογισμός πλήθους κομβικών σημείων $q_{2,1} = 10$

και παραμέτρου $\Delta_{2,1} = 10$, σύμφωνα με το παραπάνω εύρος ($\mathrm{r}_{2,1}$), για τη δημιουργία έως και 10 σημείων.

Για τον πρώτο γύρο σάρωσης επιλέγονται τα σημεία:

$p_{1.1}$	$p_{1.2}$	$p_{1.3}$	$p_{1.4}$	$p_{1.5}$	$p_{1.5}$	$p_{1.5}$	$p_{1.5}$	$p_{1.6}$	$p_{1.7}$
230	240	250	260	270	280	290	300	310	319

Πίνακας 5. 3 Κομβικά σημεία 1ης σάρωσης μετώπου Pareto

Βήμα 6.1
Παραγωγή αποτελεσματικών λύσεων – κομβικών σημείων

Υπολογιστική διαδικασία: Εφαρμογή της διαδικασίας παραγωγής των αποτελεσματικών λύσεων, στο εύρος $\mathrm{r}_{2,1,}$, για τα σημεία $\mathrm{p}_{1.\mathrm{i}}$

Τα 10 προβλήματα Ακέραιου Προγραμματισμού που επιλύονται είναι της μορφής:

Για i: $1..10$

$\min\left(\mathrm{f}_1(\mathrm{x}) - \delta \times (\mathrm{s}_{2\mathrm{i}})\right)$

$\mathrm{f}_2(\mathrm{x}) + \mathrm{s}_{2\mathrm{k}} = \mathrm{e}_{2\mathrm{k}}$

με $\delta = 10^{-3}$

$\mathrm{e}_{2.\mathrm{k}} = \mathrm{f}^*_{2.\mathrm{k}-1} - \Delta$

και υπό τους περιορισμούς (5)-(12) του προβλήματός μας.

Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν $e_{2k} < z_2^I$, δηλ. < 230, δηλαδή όταν όλη η περιοχή έχει σαρωθεί με βήμα Δ=10.

Παρουσιάζονται ενδεικτικά τα δύο πρώτα υποπροβλήματα:

Υποπρόβλημα 1

$\min\left(f_1(x) - \delta \times (s_{2.1})\right)$

$f_2(x) + s_{2.1} = 310$

με $\delta = 10^{-3}$

Υπό τους περιορισμούς (5)- (12)

Αποτέλεσμα: $f_{1.1}^*$=129.715, $f_{2.1}^*$=310 ($s_{2.1}$=0)

Υποπρόβλημα 2

$\min\left(f_1(x) - \delta \times (s_{2.2})\right)$

$f_2(x) + s_{2.2} = 300$

με $\delta = 10^{-3}$

Υπό τους περιορισμούς (5)- (12)

Αποτέλεσμα, $f_{1.2}^*$=129.715, $f_{2.2}^*$=300 ($s_{2.2}$=0)

κ.ο.κ

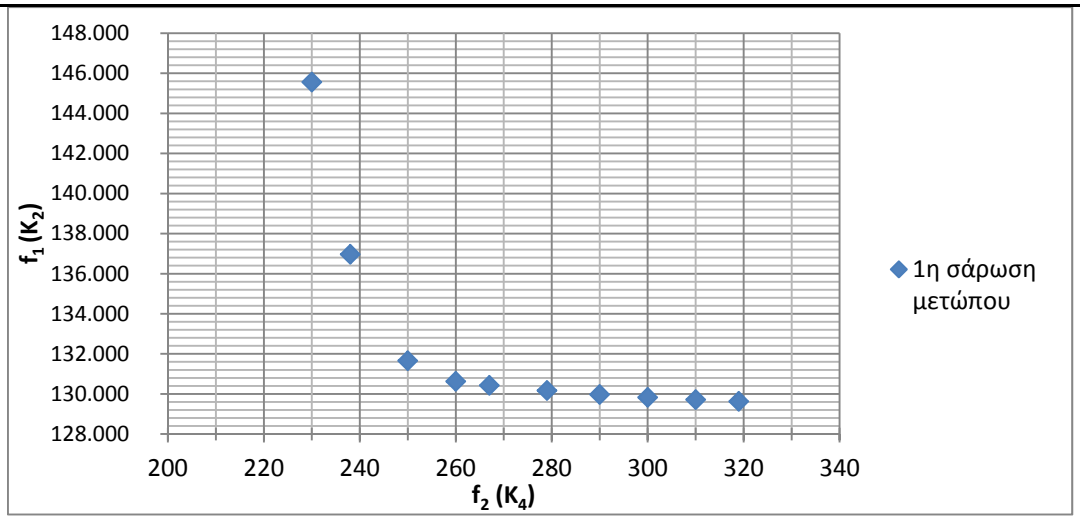
Βήμα 7

Καταγραφή (νέων) αποτελεσματικών λύσεων - κατά προτίμηση με γραφικό τρόπο στον χώρο των κριτηρίων.

Από τον πρώτο κύκλο σάρωσης του μετώπου, προέκυψαν οι ακόλουθες ικανές λύσεις:

e_{2k}	$S_{2.k}$	$f_{2.k}$* (K4)	$f_{1.k}$*(K2)
230	0	230	145.563
240	6	234	136.969
250	0	250	131.658
260	3	257	130.627
270	0	270	130.428
280	1	279	130.168
290	0	290	129.967
300	0	300	129.827
310	0	310	129.715
319	0	319	129.625

Πίνακας 5. 4 Ικανές λύσεις *πρώτου σταδίου* εφαρμογής της μεθόδου σάρωσης του μετώπου



Σχήμα 5. 4 Γραφική απεικόνιση -Ικανές λύσεις *1ου σταδίου* εφαρμογής της μεθόδου σάρωσης του μετώπου

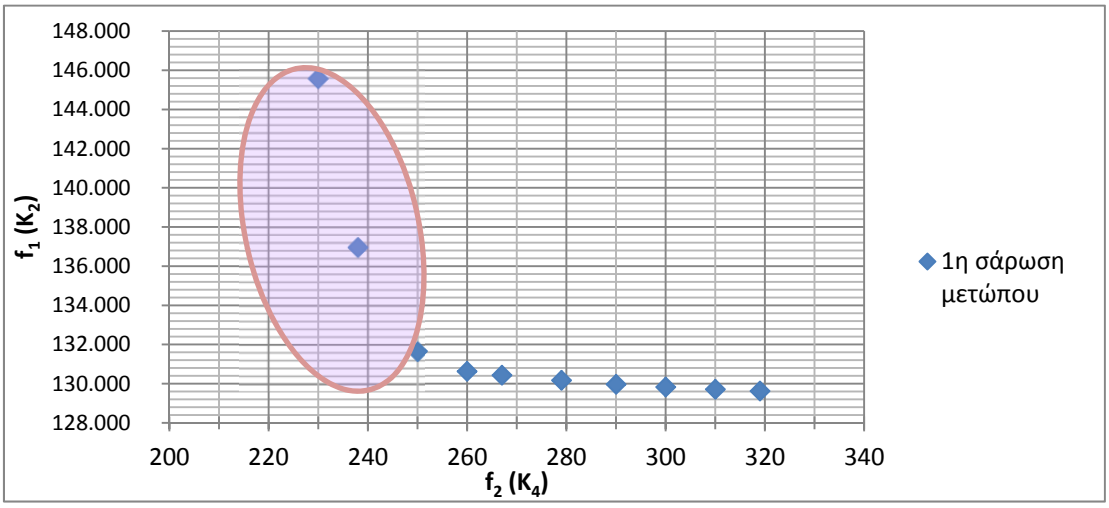
Βήμα 8.1

Αξιολόγηση λύσεων από τον αποφασίζοντα

Βήμα 10.1

Απόφαση επιλεκτικής πυκνότερης σάρωσης του μετώπου κατά τμήματα

Σε αυτό το κρίσιμο στάδιο, στόχος είναι να αξιολογήσει ο αποφασίζων τις λύσεις που έχουν παραχθεί με κριτικό τρόπο και να αποφασίσει αν θα επιλέξει λύση σε αυτή το στάδιο χαρτογράφησης του μετώπου ή σε κάποιο επόμενο στάδιο – πυκνότερης αναπαράστασης τμημάτων του μετώπου.



Σχήμα 5. 5 Επιλογή νέου πεδίου σάρωσης για το *2ο στάδιο* εφαρμογής της μεθόδου

- Ο αποφασίζων δεν επιλέγει καμία από τις λύσεις που έχουν ήδη παραχθεί.
- Ζητάει και προτείνει μια αναπαράσταση πυκνότερη του μετώπου Pareto front

στην περιοχή τιμών [230..260] στον άξονα του κριτηρίου $f_2(K_4)$.

- $i=i+1=2$
- Επιστροφή στο βήμα 5

2ος κύκλος σάρωσης

Βήμα 5.2

Υπολογισμός Εύρους Σάρωσης $r_{2,2}$, Επιλογή Πυκνότητας Σάρωσης, Υπολογισμός πλήθους κομβικών σημείων $q_{2,2}$ και παραμέτρου Δ_2.

Υπολογισμός εύρους σάρωσης, $r_{2,2} = 260 - 230 = 30$

Υπολογισμός πλήθους κομβικών σημείων $q_{2,2} = 10$

και παραμέτρου $\Delta_2 = 10$, σύμφωνα με το παραπάνω εύρος $r_{2,2}$, για τη δημιουργία έως και 10 σημείων.

Για τον δεύτερο γύρο σάρωσης ορίζονται τα σημεία:

$p_{2.1}$	$p_{2.2}$	$p_{2.3}$	$p_{2.4}$	$p_{2.5}$	$p_{2.6}$	$p_{2.7}$	$p_{2.8}$	$p_{2.9}$	$p_{2.10}$
230	233	236	239	242	245	248	251	254	257

Πίνακας 5. 5 Κομβικά σημεία 2ης σάρωσης μετώπου Pareto

Βήμα 6.2

Παραγωγή αποτελεσματικών λύσεων – κομβικών σημείων

Εφαρμογή της διαδικασίας παραγωγής των αποτελεσματικών λύσεων στο εύρος $r_{2,2,}$, για τα σημεία $p_{2.2}$

Τα 10 προβλήματα Ακέραιου Προγραμματισμού που επιλύονται είναι της μορφής:

Για k: $1..10$

$\min\left(f_1(x) - \delta \times (s_{2k})\right)$

$f_2(x) + s_{2k} = e_{2k}$

με $\delta = 10^{-3}$

$e_{2.k} = e_{2k} - \Delta$

και εννοείται υπό τους περιορισμούς (5)-(12) του προβλήματός μας.

Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν $e_{2k} < z_2^I$, δηλ. <230, δηλαδή όταν όλη η περιοχή έχει σαρωθεί με βήμα $\Delta=3$.

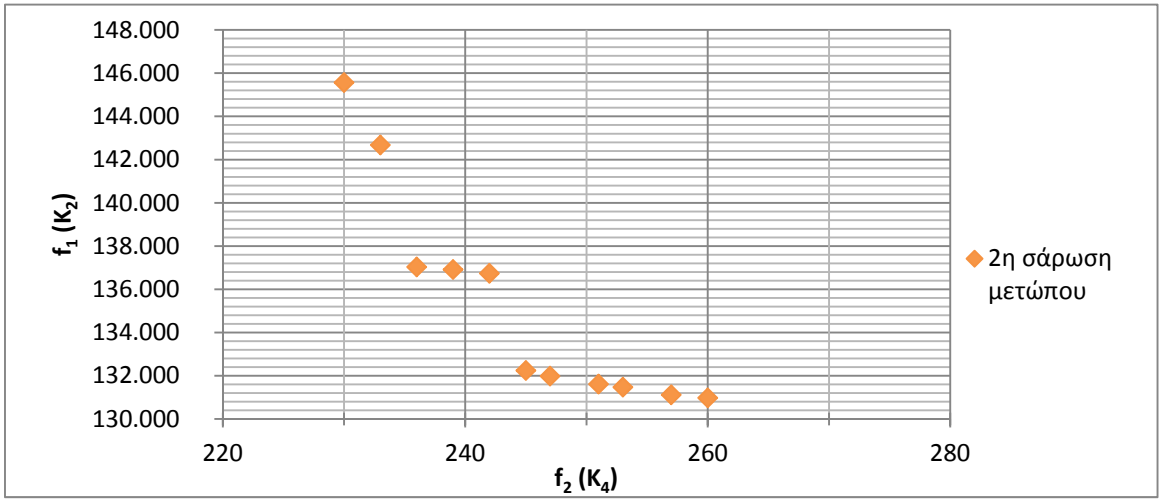
Βήμα 7.2

Καταγραφή (νέων) αποτελεσματικών λύσεων - κατά προτίμηση με γραφικό τρόπο στον χώρο των κριτηρίων.

Από τον δεύτερο κύκλο σάρωσης του μετώπου, προέκυψαν οι ακόλουθες ικανές λύσεις:

e_{2k}	$S_{2.k}$	$f_{2.k}$* (K4)	$f1_{.k}$*(K2)
230	0	230	145.563
233	0	233	142.672
236	0	236	137.035
239	0	239	136.911
242	0	242	136.734
245	0	245	132.240
248	1	247	131.986
251	0	251	131.613
254	1	253	131.470
257	0	257	131.118
260	0	260	130.977

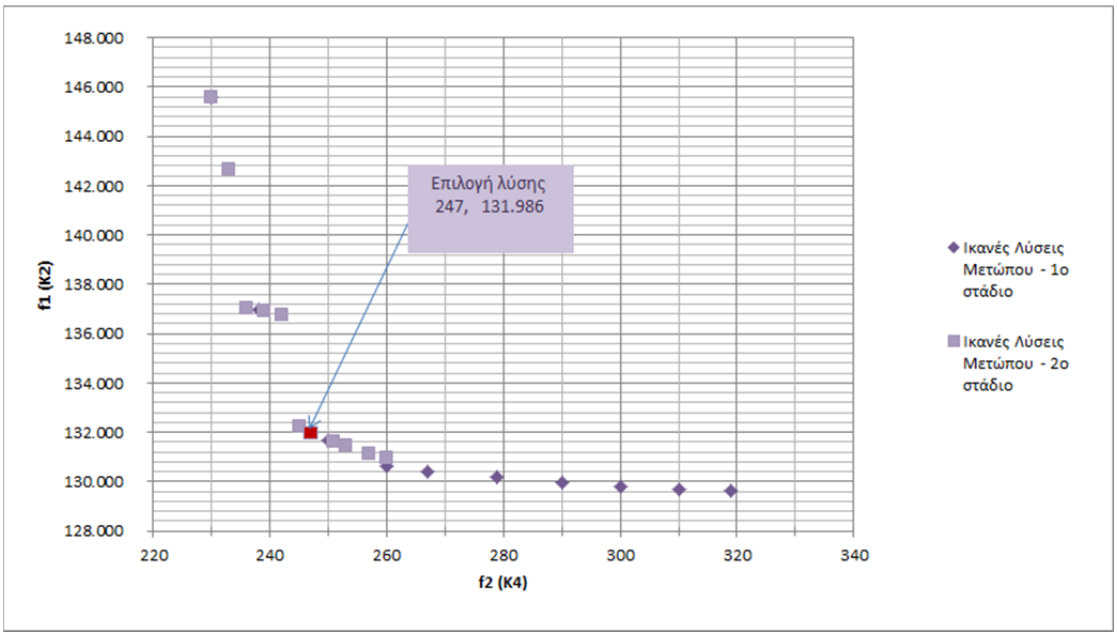
Πίνακας 5. 6 Ικανές λύσεις $2^{ο}$ *σταδίου* εφαρμογής της μεθόδου σάρωσης του μετώπου



Σχήμα 5. 6 Γραφική απεικόνιση -Ικανές λύσεις $2^{ου}$ σταδίου εφαρμογής της σάρωσης του μετώπου

Βήμα 8.2 *Αξιολόγηση λύσεων Pareto μετώπου* – κατά προτίμηση με επίδειξη *γραφήματος*

Ο αποφασίζων αξιολογεί το σύνολο των ικανών λύσεων που του παρουσιάζονται και επιλέγει την λύση που θεωρεί βέλτιστη από τις λύσεις που έχουν ήδη παραχθεί, καθώς θεωρεί ότι έχει μελετήσει επαρκώς και αντιπροσωπευτικά τις περιοχές του χώρου των κριτηρίων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.



Σχήμα 5. 7 Γραφική απεικόνιση -Ικανές λύσεις του μετώπου Pareto

Η επιλεχθείσα λύση είναι εκείνη που στον χώρο των κριτηρίων απεικονίζεται $(f_1^*, f_2^*) = (247,131.986)$.

Βήμα 9

Επιλογή λύσης από Αποφασίζοντα και τερματισμός διαδικασίας

Δεδομένου ότι ο αποφασίζων επέλεξε λύση από τις υπάρχουσες που έχουν παραχθεί και αναπαρασταθεί ήδη στο μέτωπο Pareto, τότε η διαδικασία οδηγείται στην φάση του τερματισμού, ήτοι της απεικόνισης της λύσης στον χώρο των μεταβλητών.
Η απεικόνιση στον χώρο των μεταβλητών γίνεται με καταγραφή της σχετικής λύσης σε αρχείο αποτελεσμάτων, σε μορφή επεξεργάσιμη και περαιτέρω διαχειρίσιμη από το περιβάλλον προγραμματισμού της παραγωγής.

Η παραπάνω διαδικασία έτρεξε σε περιβάλλον GAMS, με λύτη MILP – CPLEX, σε υπολογιστή με επεξεργαστή intel Core i5, CPU M450 @ 2,4GHz, 4GBRAM.

Φάση Μεθόδου	Απαιτούμενος Χρόνος
Προετοιμασία Μοντέλου	1’
Λεξικογραφικός Πίνακας Πληρωμών	3 ‘ 8’’
Ενημέρωση Αποφασίζοντα	5’

Υπολογισμοί 1ης σάρωσης	4 ‘ 54’’
Υπολογισμοί 2ης σάρωσης	6 ‘ 2’’
Διάλογοι αναλυτή - αποφασίζοντα	3’
Σύνολο	**23’ 4’’**

5.4 Πολυκριτηριακή μεθοδολογία επίλυσης: Εφαρμογή και αποτελέσματα

Ακολουθώντας την μεθοδολογία που προτείνεται στην ενότητα 4.4, διαμορφώθηκε η πολυκριτήρια μορφή του προβλήματος λαμβάνονται υπόψιν, σύμφωνα με τις προτιμήσεις του αποφασίζοντος και τα τέσσερα κριτήρια βελτιστοποίησης που αναφέρονται στο αρχικό μοντέλο αποτύπωσης του προβλήματος (βλ. ενότητα 4.2.2):

K_1:	Κριτήριο Εύρους Δρομολόγησης (εκφράζει το σύνολο των τελικά παραγόμενων προϊόντων σε όλες τις γραμμές συναρμολόγησης, σε όλες τις ημέρες της περιόδου αναφοράς)	Μεγιστοποίηση
K_2:	Κριτήριο Απόκλισης από Προθεσμίες Παράδοσης	Ελαχιστοποίηση
K_3:	Κριτήριο Ακρίβειας Παραγωγής Just-In-Time	Μεγιστοποίηση
K_4:	Κριτήριο Χρησιμοποίησης – Λόγων Απόστασης Πόρων	Ελαχιστοποίηση

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής μεθοδολογίας επίλυσης, στο πλαίσιο της οποίας παρουσιάζονται για λόγους συγκριτικής αξιολόγησης – αλλά και ως επιλογές στον αποφασίζοντα- οι μέθοδοι:

- Λεξικογραφικής Βελτιστοποίησης
- Μέθοδος Ολικού Κριτηρίου
- Μέθοδος Ικανοποιητικών Στόχων
  και η προτεινόμενη
- Πρωτότυπη μέθοδος συνέργειας Ολικού Κριτηρίου με Ικανοποιητικούς Στόχους

Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον χώρο των κριτηρίων, όπως συνηθίζεται σε πολυκριτηριακά προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού ειδικά σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας με μεγάλο αριθμό μεταβλητών.

5.4.1 Λεξικογραφικός Πίνακας Πληρωμών

Για να αποκτηθεί μια εποπτεία του χώρου των κριτηρίων και των ενδεικτικών σχέσεων ασυμβατότητας – σύγκρουσης μεταξύ τους, κατασκευάζεται ο πίνακας πληρωμών (pay-off table), χρησιμοποιώντας την μέθοδο της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης, προκειμένου να προκύψουν σε κάθε περίπτωση ικανές λύσεις, στις

γραμμές του πίνακα. Ο λεξικογραφικός πίνακας πληρωμών αποτυπώνει τα όρια εκείνου του τμήματος του χώρου των κριτηρίου που εκφράζει την προκατειλημμένη άποψη του αποφασίζοντος ως προς την ιεραρχία των κριτηρίων.

Ο αποφασίζων (DM) στη δική μας περίπτωση ιεραρχεί τα κριτήρια του προβλήματος ως προς την σημαντικότητα και την σειρά βελτιστοποίησης ως ακολούθως:

Σημαντικότερο	…	…	Λιγότερο σημαντικό
K_1	K_2	K_3	K_4

Στο πλαίσιο της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης, όπως υποδεικνύει η μέθοδος, βελτιστοποιείται κάθε φορά το πρόβλημα ως προς ένα μόνο κριτήριο. Στη συνέχεια, και με δεδομένη την βέλτιστη τιμή στο υπο θεώρηση κριτήριο, βελτιστοποιούμε σταδιακά και με τον ίδιο τρόπο τα υπόλοιπα κριτήρια τηρώντας την σειρά ιεράρχησης. Με τον τρόπο αυτό, στην περίπτωση που υπάρχουν πολλές λύσεις που αντιστοιχούν στην βέλτιστη τιμή για το υπο θεώρηση κριτήριο, επιλέγονται αυτές που βελτιστοποιούν το αμέσως επόμενο στην ιεραρχία κριτήριο, κ.ο.κ..

Με την διαδικασία αυτή, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας πληρωμών (pay-off table):

Πίνακας Πληρωμών	Max K_1	Min K_2	Max K_3	Min K_4
10* K_1	**69.280**	40.580	68.970	57.620
K_2	129.625	**48.106**	246.918	114.800
K_3	357.241	233.713	**377.245**	231.884
100 * K_4	55.000	88.600	223.900	**19.000**

Πίνακας 5. 7 Λεξικογραφικός πίνακας Πληρωμών

Στους ακόλουθους πίνακες και σχήματα, παρουσιάζονται με τρόπο γραφικό αλλά και με πίνακες επεξεργασμένων δεδομένων, στον αποφασίζοντα πληροφορίες που τον βοηθούν να αντιληφθεί την ποιότητα των λύσεων που προκύπτουν από τον λεξικογραφικό πίνακα πληρωμών.

Ποσοστιαία απόσταση από βέλτιστο	Max K_1	Min K_2	Max K_3	Min K_4
K_1	**0,00%**	41,43%	0,45%	16,83%
K_2	169,46%	**0,00%**	413,28%	138,64%
K_3	5,30%	38,05%	**0,00%**	38,53%
K_4	189,47%	366,32%	1078,42%	**0,00%**
	364%	**446%**	**1492%**	**194%**

Πίνακας 5. 8 Πίνακας Πληρωμών: Ποσοστιαία απόστασης επί του βέλτιστου, για κάθε κριτήριο

Ταξινόμηση Θέσεων βελτιστοποίησης ανά Κριτήριο	Max K_1	Min K_2	Max K_3	Min K_4
K_1	**1**	4	2	3
K_2	3	**1**	4	2
K_3	2	3	**1**	4
K_4	2	3	4	**1**
	8	**11**	**11**	**10**

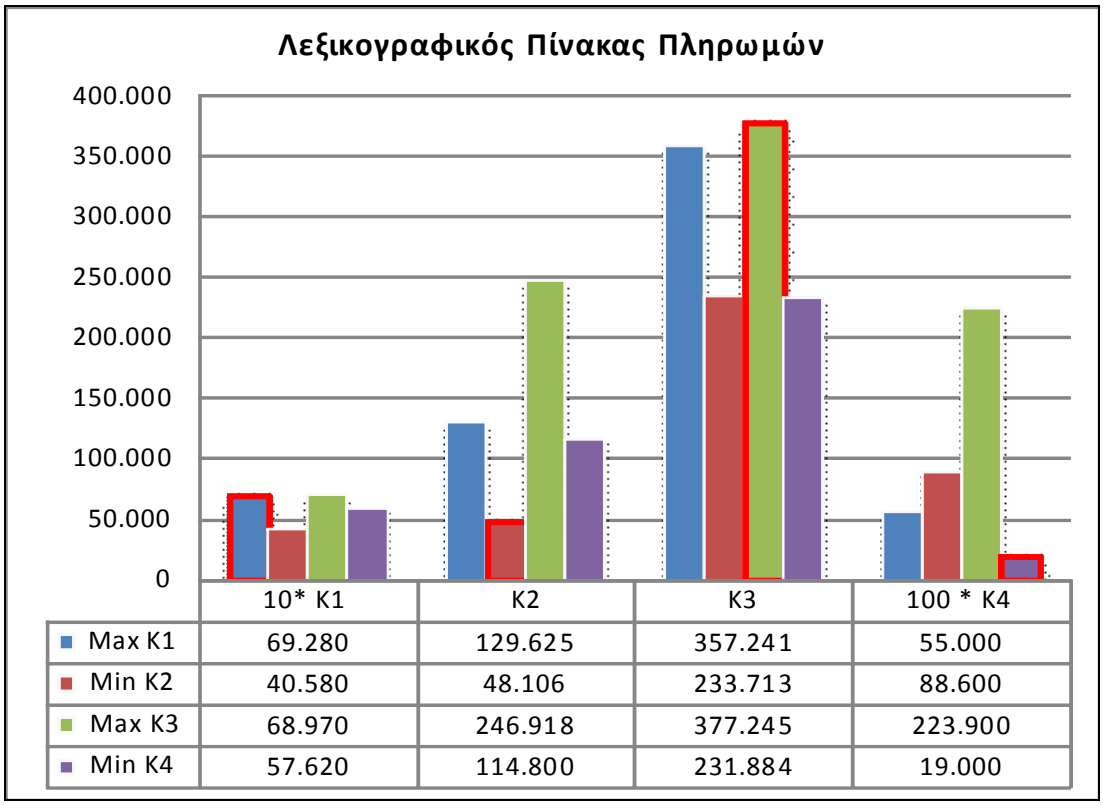
Πίνακας 5. 9 Πίνακας Πληρωμών: Ταξινόμηση θέσεων βελτιστοποίησης ανά κριτήριο

Ποσοστιαία απόσταση από βέλτιστο	Max K_1	Min K_2	Max K_3	Min K_4
K_1	**0,00%**	41,43%	0,45%	16,83%
K_2	169,46%	**0,00%**	413,28%	138,64%
K_3	5,30%	38,05%	**0,00%**	38,53%
K_4	189,47%	366,32%	1078,42%	**0,00%**
	364%	**446%**	**1492%**	**194%**

Πίνακας 5. 10 Πίνακας Πληρωμών: Ποσοστιαία απόσταση επί του βέλτιστου

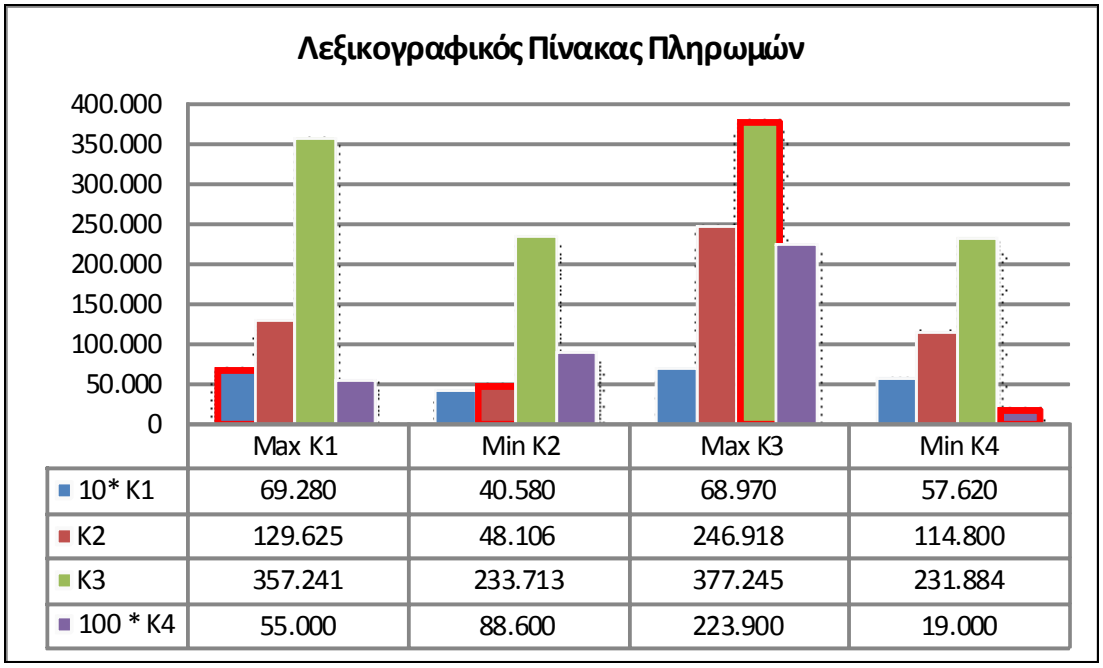
Ποσοσταία απόδοση λύσεων επί του βέλτιστου κάθε κριτηρίου	Max K_1	Min K_2	Max K_3	Min K_4
K_1	**100,00%**	58,57%	99,55%	83,17%
K_2	269,46%	**100,00%**	513,28%	238,64%
K_3	94,70%	61,95%	**100,00%**	61,47%
K_4	289,47%	466,32%	1178,42%	**100,00%**

Πίνακας 5. 11 Πίνακας Πληρωμών: Ποσοστιαία απόδοση λύσεων επί του βέλτιστου κάθε κριτηρίου



	10* K1	K2	K3	100 * K4
Max K1	69.280	129.625	357.241	55.000
Min K2	40.580	48.106	233.713	88.600
Max K3	68.970	246.918	377.245	223.900
Min K4	57.620	114.800	231.884	19.000

Σχήμα 5. 8 Πίνακας Πληρωμών – Όψη α.



	Max K1	Min K2	Max K3	Min K4
10* K1	69.280	40.580	68.970	57.620
K2	129.625	48.106	246.918	114.800
K3	357.241	233.713	377.245	231.884
100 * K4	55.000	88.600	223.900	19.000

Σχήμα 5. 9 Πίνακας Πληρωμών – Όψη β.

Λόγω διαφορετικής κλίμακας των τιμών των κριτηρίων, τα κριτήρια K_1 και K_4 παρουσιάζονται σε κλίμακα x10, x100 αντίστοιχα.

Η παραπάνω διαδικασία υπολογισμού του λεξικογραφικού πίνακα πληρωμών έτρεξε σε περιβάλλον GAMS, σε υπολογιστή με επεξεργαστή intel Core i5, CPU M450 @ 2,4GHz, 4GBRAM.

Φάση Μεθόδου	**Απαιτούμενος χρόνος:**
Προετοιμασία Μοντέλου	1’
Ενημέρωση Αποφασίζοντα/ Ιεράρχηση κριτηρίων	3’
Υπολογιστική Διαδικασία βελτιστοποιήσεων	9' 21''
(4 x 4=16 προβλήματα Α. Γ. Π)	
Συνολικός χρόνος διαδικασίας	**13’ 21’’**

5.4.2 Μέθοδος Ολικού Κριτηρίου

Για την εφαρμογή της μεθόδου Ολικού Κριτηρίου διενεργείται διάλογος μεταξύ του αναλυτή και του αποφασίζοντος, προκειμένου για τον ορισμό του κριτηρίου αναφοράς και των παραχωρήσεων (βαρών) των λοιπών κριτηρίων ως προς το κριτήριο αναφοράς.

Θεωρώντας το κριτήριο 2 (K_2: Απόκλιση από Προθεσμίες Παράδοσης) ως το κριτήριο αναφοράς, ο διάλογος αποφασίζοντα-αναλυτή δίνει αποτελέσματα των συντελεστών παραχώρησης που εκφράζουν έξι διαφορετικές περιπτώσεις εταιρικής πολιτικής (περιπτώσεις 1 – 6), σε σχέση με την προτιμησιακή φιλοσοφία της εταιρείας.

Περιπτώσεις ανάθεσης συντ/στής	Σενάρια	Βαρύτητα Κριτηρίου
Περίπτωση 1	Βασικό Σενάριο	Βασικό Σενάριο
Περίπτωση 2	Εμπορικό Σενάριο: Υποτίμηση κριτηρίων K_3 - JIT και K_4 -Χρησιμοποίησης- λόγου απόστασης πόρων	$\downarrow K_3, \downarrow K_4$
Περίπτωση 3	Ειδικό Σενάριο 1 (ειδικών περιστάσεων)	$\downarrow K_1, \downarrow K_3$
Περίπτωση 4	Ειδικό Σενάριο 2 (ειδικών περιστάσεων)	$\downarrow K_1, \downarrow K_3$
Περίπτωση 5	Εργοστασιακό Σενάριο 1: Ευνοούνται κριτήρια εργοστασιακού κόστους K_3, K_4 σε σχέση με τα κριτήρια εμπορικού κόστους (K_1, K_2)	$\downarrow\downarrow K_1$
Περίπτωση 6	Εργοστασιακό Σενάριο 2: Ευνοούνται κριτήρια εργοστασιακού κόστους K_3, K_4	$\downarrow\downarrow K_1, \uparrow\uparrow K_4$

Πίνακας 5. 12 Περιπτώσεις – Σενάρια Εταιρικής Πολιτικής Προτίμησης Κριτηρίων

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τους συντελεστές για κάθε κριτήριο όπως προκύπτουν (με τις παραδοχές της μεθόδου) γα κάθε μία από τις έξι περιπτώσεις:

Πίνακας συντ/των ανα περίπτωση	Συντ/τής K_1	Συντ/τής K_2	Συντ/τής K_3	Συντ/τής K_4
Περίπτωση 1	1000	-1	10	-10
Περίπτωση 2	1000	-1	5	-5
Περίπτωση 3	500	-1	5	-10
Περίπτωση 4	500	-1	2,5	-10
Περίπτωση 5	100	-1	10	-10
Περίπτωση 6	100	-1	10	-50

Πίνακας 5. 13 Συντελεστές Κριτηρίων ανά σενάριο βαρύτητας κριτηρίων

Ακολούθως παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διάλογοι που διενεργήθηκαν για τον καθορισμό των παραχωρήσεων μεταξύ των τριών κριτηρίων K_2, K_3, K_4 και τα αποτελέσματα των διαλόγων για την περίπτωση 1:

***Αναλυτής*: Πόσες μονάδες του κριτηρίου K_2 θα παραχωρούσες για να κερδίσεις 1 μονάδα του K_1?**

Αποφασίζων: Για να κερδίσω **1 μονάδα του K_1** θα παραχωρούσα **1000 μονάδες του κριτηρίου K_2**.

Αναλυτής: Νομίζετε ότι αυτή η παραχώρηση μεταξύ αυτών των δύο κριτηρίων (K_2, K_1) είναι ανεξάρτητη των τιμών για τα υπόλοιπα κριτήρια;

Αποφασίζων: Ναι, (υπό τις συνθήκες της συγκεκριμένης περίπτωσης, που καθορίζονται από την εταιρική πολιτική) η παραχώρηση αυτή είναι ανεξάρτητη της τιμών των άλλων κριτηρίων.

Αναλυτής: Συμφωνείτε ότι η ίδια παραχώρηση (trade-off) παραμένει αμετάβλητη για όλες τις τιμές που λαμβάνονται από το ζευγάρι των κριτηρίων (K_2, K_1);

Αποφασίζων: Συμφωνώ.

Πίνακας 5. 14 Διάλογος 1: Καθορισμός trade-off μεταξύ κριτηρίων $K_2 \leftrightarrow K_1$

***Αναλυτής*: Πόσες μονάδες του κριτηρίου K_2 θα παραχωρούσες για 1 μονάδα του K_3?**

Αποφασίζων: Για να κερδίσω **1 μονάδα του K_3** θα παραχωρούσα **10 μονάδες του κριτηρίου K_2**.

Αναλυτής: Νομίζετε ότι αυτή η παραχώρηση μεταξύ αυτών των δύο κριτηρίων (K_3, K_2) είναι ανεξάρτητη των τιμών για τα υπόλοιπα κριτήρια;

Αποφασίζων: Ναι, (υπό συνθήκες που καθορίζονται από την εταιρική πολιτική) η παραχώρηση αυτή είναι ανεξάρτητη της τιμών των άλλων κριτηρίων.

Αναλυτής: Συμφωνείτε ότι η ίδια παραχώρηση (trade-off) παραμένει αμετάβλητη για όλες τις τιμές που λαμβάνονται από το ζευγάρι των κριτηρίων (K_3, K_2);

Αποφασίζων: Συμφωνώ.

Πίνακας 5. 15 Διάλογος 2: Καθορισμός trade-off μεταξύ κριτηρίων $K_2 \leftrightarrow K_3$

***Αναλυτής*: Πόσες μονάδες του κριτηρίου K_2 θα παραχωρούσες για να μειώσεις κατά 1 μονάδα το K_4?**

Αποφασίζων: Για να μειώσω κατά **1 μονάδα το K_4** θα παραχωρούσα **10 μονάδες του κριτηρίου K_2**.

Αναλυτής: Νομίζετε ότι αυτή η παραχώρηση μεταξύ αυτών των δύο κριτηρίων (K_4, K_2) είναι ανεξάρτητη των τιμών για τα υπόλοιπα κριτήρια;

Αποφασίζων: Ναι, (υπό συνθήκες που καθορίζονται από την εταιρική πολιτική) η παραχώρηση αυτή είναι ανεξάρτητη της τιμών των άλλων κριτηρίων.

Αναλυτής: Συμφωνείτε ότι η ίδια παραχώρηση (trade-off) παραμένει αμετάβλητη για όλες τις τιμές που λαμβάνονται από το ζευγάρι των κριτηρίων (K_4, K_2);

Αποφασίζων: Συμφωνώ.

Πίνακας 5. 16 Διάλογος 3: Καθορισμός trade-off μεταξύ κριτηρίων $K_2 \leftrightarrow K_4$

Η γραμμική συνάρτηση αξίας του Ολικού Κριτηρίου που βελτιστοποιούμε (μεγιστοποιήσουμε) θα είναι για κάθε περίπτωση η:

Περίπτωση 1 $$Gl\_Cr_1(X) = 1000 \times K_1 - 1 \times K_2 + 10 \times K_3 - 10 \times K_4$$

Περίπτωση 2 $$Gl\_Cl_2(X) = 1000 \times K_1 - 1 \times K_2 + 5 \times K_3 - 5 \times K_4$$

Περίπτωση 3 $$Gl\_Cr_3(X) = 500 \times K_1 - 1 \times K_2 + 5 \times K_3 - 10 \times K_4$$

Περίπτωση 4 $$Gl\_Cr_4(X) = 500 \times K_1 - 1 \times K_2 + 2{,}5 \times K_3 - 10 \times K_4$$

Περίπτωση 5 $$Gl\_Cr_5(X) = 100 \times K_1 - 1 \times K_2 + 10 \times K_3 - 10 \times K_4$$

Περίπτωση 6 $$Gl\_Cr_6(X) = 100 \times K_1 - 1 \times K_2 + 10 \times K_3 - 50 \times K_4$$

Με βάση την παραπάνω διαδικασία, κατασκευάστηκαν 6 διαφορετικά σενάρια βελτιστοποίησης μονοκριτηριακών προβλημάτων, των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

	ΙΔΕΑΤΗ ΤΙΜΗ	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4	Περίπτωση 5	Περίπτωση 6
K_1	*6.928*	*6.897*	*6.928*	*6.897*	*6.897*	*6.896*	*6.250*
K_2	*48.106*	151.408	147.232	128.797	123.400	151.518	139.254
K_3	*377.245*	372.443	367.613	369.235	367.879	372.463	377.113
K_4	*190*	*427*	*398*	*304*	*357*	*425*	*205*

Πίνακας 5. 17 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης – Τιμές Κριτηρίων ανά Περίπτωση

Η παρουσίαση στους πίνακες και της ιδεατής τιμής για κάθε κριτηρίο, που προκύπτει από τον πίνακα πληρωμών (Πίνακας 5. 7), γίνεται καθαρά για λόγους σύγκρισης και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της μεθόδου. Ο υπολογισμός των ιδεατών τιμών δεν αποτελεί τμήμα της μεθόδου και δεν απαιτείται για την εκτέλεση της μεθόδου Ολικού Κριτηρίου.

Συντ/στές και Τιμές Ολικών Κριτηρίων ανά περίπτωση	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4	Περίπτωση 5	Περίπτωση 6
w1	1.000	1.000	500	500	100	100
w2	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1
w3	10	5	5	3	10	10
w4	- 10	- 5	- 10	- 10	- 10	- 50
GL_Cr1	**10.465.752**	10.452.918	10.457.513	10.448.820	10.464.862	9.879.826
GL_Cr2	8.605.672	**8.616.843**	8.612.858	8.611.210	8.604.672	7.995.286
GL_Cr3	5.155.037	5.150.853	**5.162.838**	5.160.925	5.154.547	4.869.261
GL_Cr4	4.223.930	4.231.821	4.239.751	**4.241.228**	4.223.390	3.926.479
GL_Cr5	4.258.452	4.217.718	4.250.213	4.241.520	**4.258.462**	4.254.826
GL_Cr6	4.241.372	4.201.798	4.238.053	4.227.240	4.241.462	**4.246.626**

Πίνακας 5. 18 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης – Τιμές Ολικού Κριτηρίου ανά Περίπτωση

Στην διαγώνιο του Πίνακα 5. 18 εμφανίζεται η τιμή της επιλεγμένης ανά περίπτωση συνάρτησης Ολικού Κριτηρίου Gl_Cr_i που προκύπτει στον αντίστοιχο κύκλο μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης, ενώ στις υπόλοιπες στήλες εμφανίζεται απλά για λόγους πληρότητας και σύγκρισης η τιμή και των υπόλοιπων συναρτήσεων Ολικού Κριτηρίου. Ακολούθως φαίνεται η % απόσταση της προκύπτουσας βέλτιστης λύσης σε κάθε περίπτωση από την ιδεατή για κάθε κριτήριο.

Αποστάσεις % από ιδεατές τιμές	K_1	K_2	K_3	K_4
I.T.	*6.928*	*48.106*	*377.245*	*190*
Π1	*-0,45%*	*214,74%*	*-1,27%*	*124,74%*
Π2	*0,00%*	*206,06%*	*-2,55%*	*109,47%*
Π3	*-0,45%*	*167,74%*	*-2,12%*	*60,00%*
Π4	*-0,45%*	*156,52%*	*-2,48%*	*87,89%*
Π5	*-0,46%*	*214,97%*	*-1,27%*	*123,68%*
Π6	*-9,79%*	*211,26%*	*-1,41%*	*7,89%*

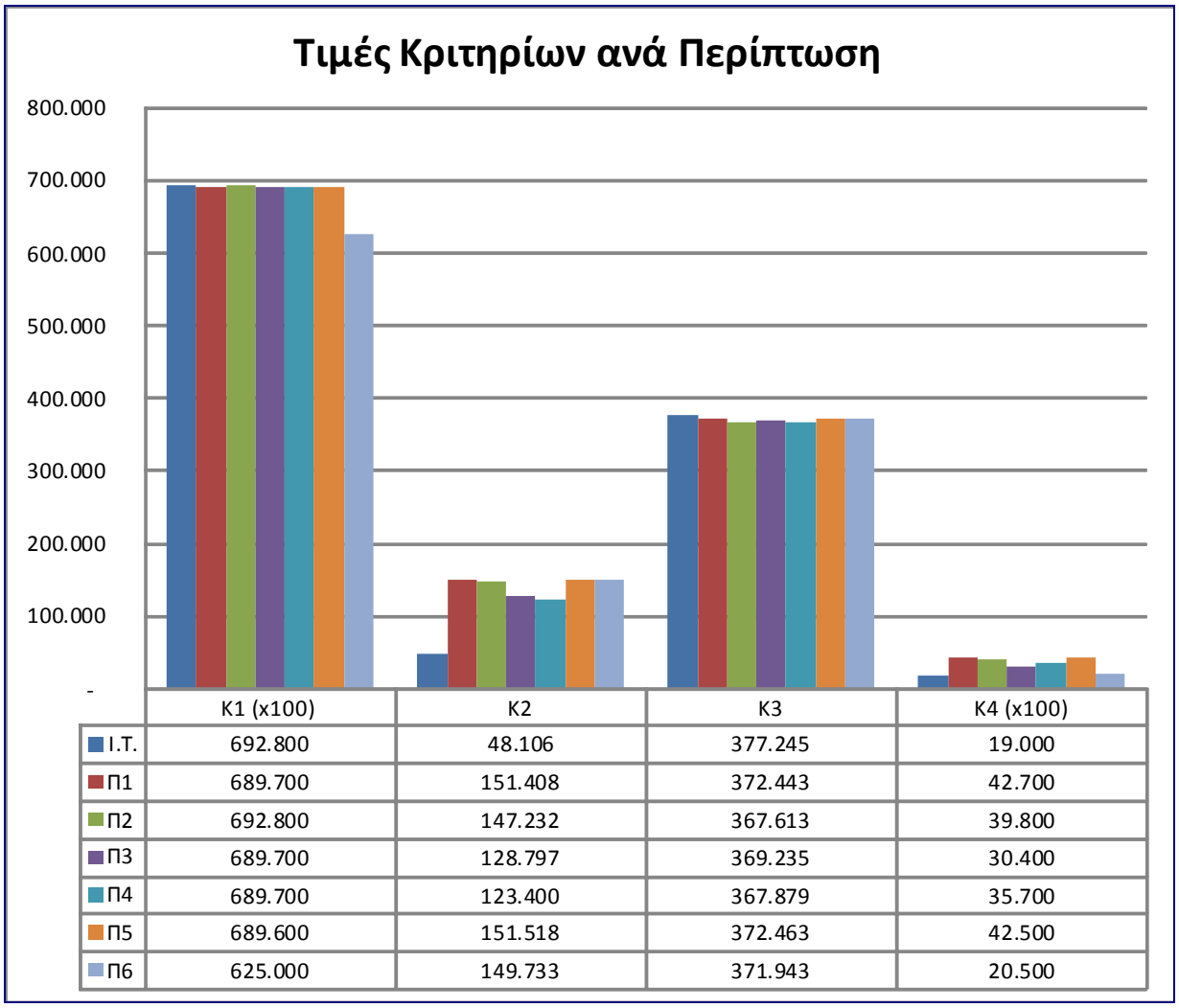
Πίνακας 5. 19 Ποσοστιαία απόσταση αποτελεσμάτων από ιδεατές τιμές κριτηρίων

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τις μεταβολές που αυξήσεις / μειώσεις που επιτυγχάνονται στις τιμές των κριτηρίων ως αποτέλεσμα των μεταβολών των συντελεστών που χρησιμοποιούνται σε κάθε κριτήριο.

Συντ/στές και Τιμές Ολικών Κριτηρίων ανά περίπτωση	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4	Περίπτωση 5	Περίπτωση 6
w_1	1000	1000	500	500	100	100
w_2	-1	-1	-1	-1	-1	-1
w_3	10	5	5	3	10	10
w_4	-10	-5	-10	-10	-10	-50
Μεταβολή συντελεστών κριτηρίων	**Βασικό Σενάριο**	**↓K_3↓K_4**	**↓K_1, ↓K_3**	**↓K_1, ↓K_3**	**↓↓K_1**	**↓↓K_1, ↑↑ K_4**
	Π1	**Π2**	**Π3**	**Π4**	**Π5**	**Π6**
K_1	6.897	6.928	6.897	6.897	6.896	6.250
K_2	151.408	147.232	128.797	123.400	151.518	139.254
K_3	372.443	367.613	369.235	367.879	372.463	377.113
K_4	427	398	304	357	425	205
Μεταβολή τιμών κριτηρίων		**↑K1 ↓K2 ↓K3 ↓ K4**	**~ K1 ↓↓K2 ↓K3 ↓↓K4**	**~ K1 ↓↓K2 ↓K3 ↓K4**	**~↓K1 ↑K2 ↑K3 ↓K4**	**~↓K1 ↓K2 ↓K3 ↓↓K4**
Βελτίωση Κριτηρίων		**K_1, K_2, K_4**	**K_2, K_4**	**K_2, K_4**	**~K_2, ~K_3, ~K_4**	**~K_2, K_4**

Πίνακας 5. 20 Συσχετισμός μεταβολής συντελεστών κριτηρίων και μεταβολής βελτίωσης τιμών κριτηρίων

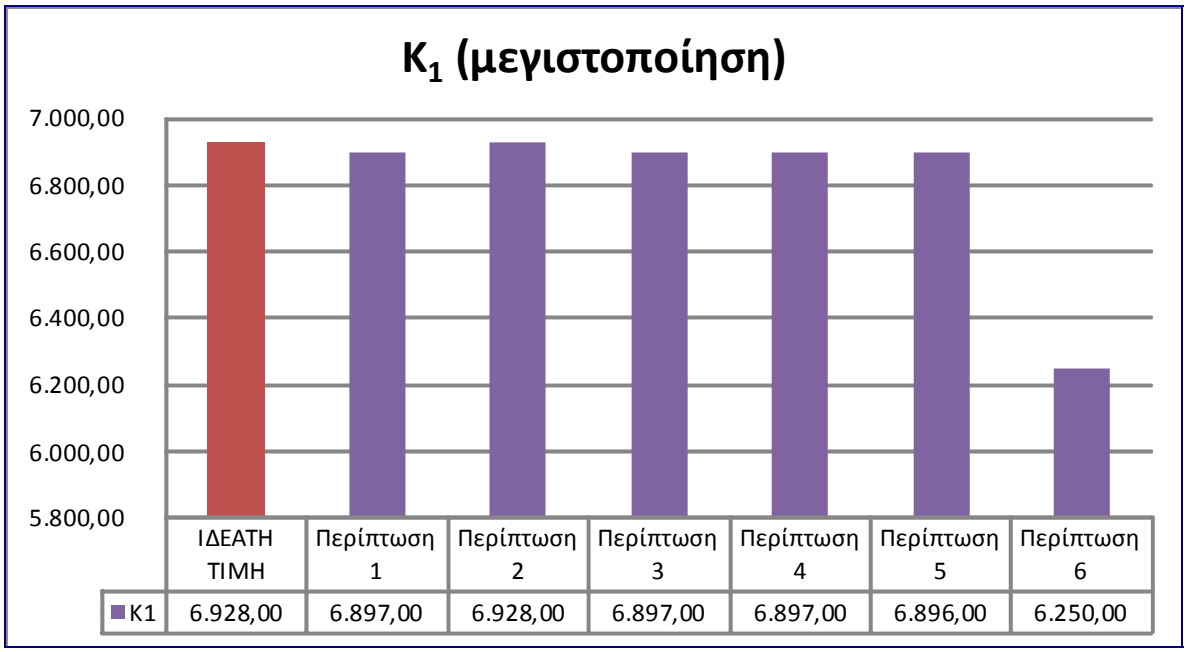
Οι λύσεις παρουσιάστηκαν στον αποφασίζοντα και με γραφήματα προκειμένου να γίνει πιο εύκολα αντιληπτή η ποιότητα των λύσεων, ο συσχετισμός τιμών μεταξύ των κριτηρίων αλλά και αξιολόγηση των τιμών σε σχέση με τις ιδεατές. Ακολούθως παρουσιάζονται τα σχετικά γραφήματα αποτελεσμάτων:



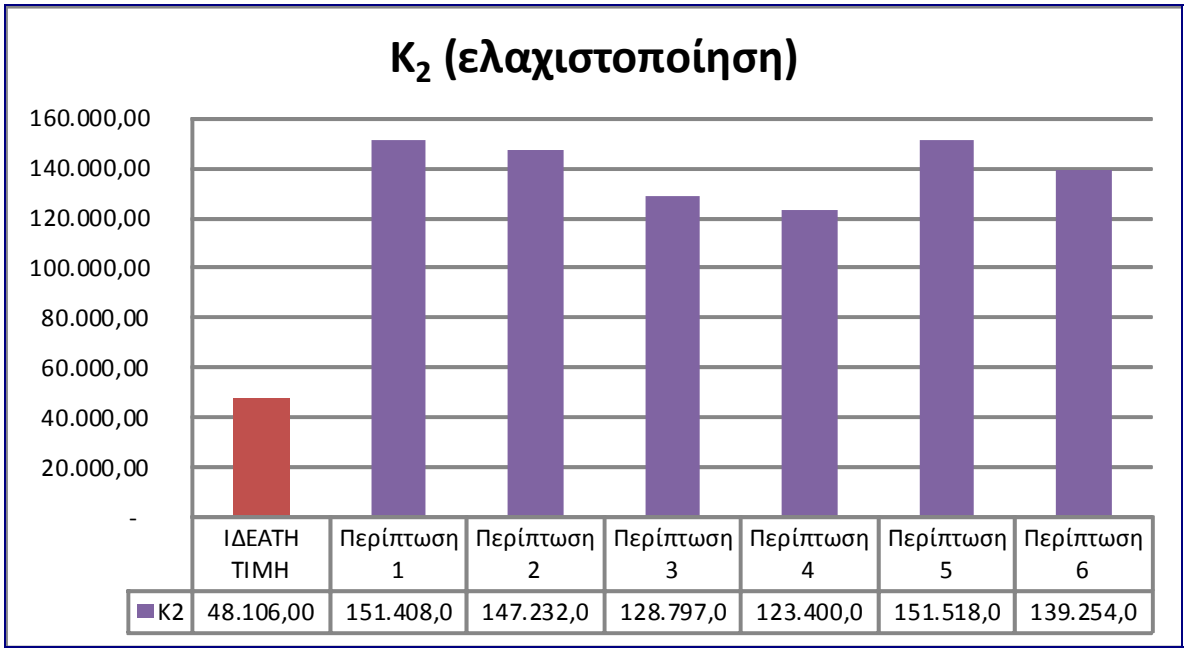
	K1 (x100)	K2	K3	K4 (x100)
I.T.	692.800	48.106	377.245	19.000
Π1	689.700	151.408	372.443	42.700
Π2	692.800	147.232	367.613	39.800
Π3	689.700	128.797	369.235	30.400
Π4	689.700	123.400	367.879	35.700
Π5	689.600	151.518	372.463	42.500
Π6	625.000	149.733	371.943	20.500

Σχήμα 5. 10 Αποτελέσματα Κριτηρίων - σύνοψη

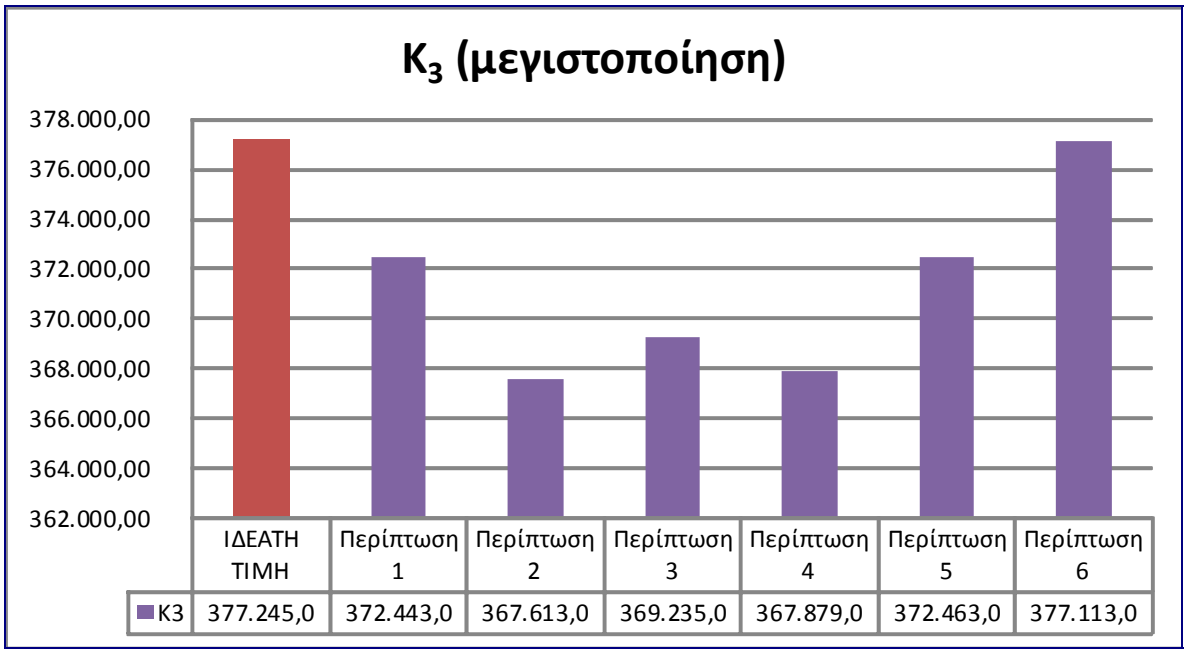
Τέλος, παρουσιάζουμε και τις τιμές κάθε κριτηρίου ξεχωριστά για κάθε διαφορετικό σενάριο:



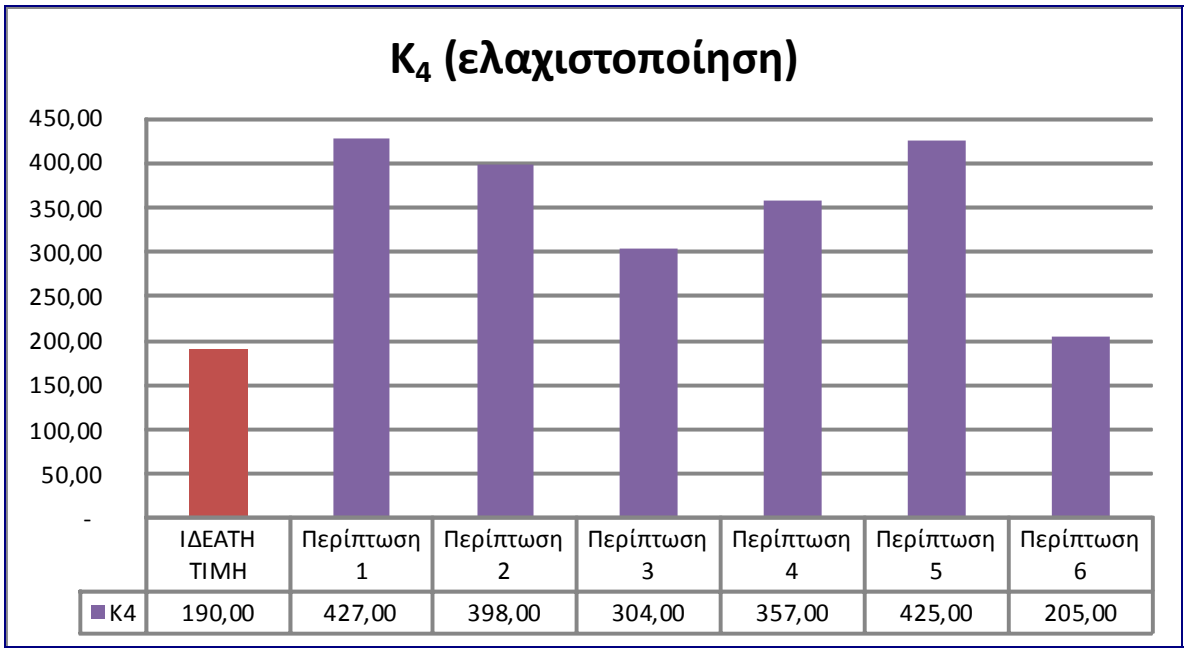
Σχήμα 5. 11 Αποτελέσματα Κριτήριου K_1: Εύρος Δρομολόγησης



Σχήμα 5. 12 Αποτελέσματα Κριτήριου K_2: Απόκλιση από Προθεσμίες Παράδοσης



Σχήμα 5. 13 Αποτελέσματα Κριτήριου K_3: Ακρίβεια JIT Παραγωγής



Σχήμα 5. 14 Αποτελέσματα Κριτήριου K_4: Χρησιμοποίηση – Λόγων Απόστασης Πόρων

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι προκύπτουσες λύσεις είναι ικανές, όμως η μέθοδος δεν δίνει ένδειξη για την θέση των λύσεων αυτών στο μέτωπο Pareto του πολυκριτηριακού, ήτοι αν πρόκειται για ακραία βέλτιστες λύσεις που ευνοούν υπερβολικά ένα κριτήριο εις βάρος των υπολοίπων, λόγω των δηλούμενων παραχωρήσεων. Ο αποφασίζων δεν μπορεί να κατανοήσει την μορφή του μετώπου

Pareto καθώς καλείται ο ίδιος να καθορίσει a-priori την στρατηγική αναζήτησης βέλτιστης λύσης μοντελοποιώντας με σαφή και μονοσήμαντο τρόπο την προτιμησιακή του συμπεροφορά.

Παρατηρούμε, ότι όπως επεσήμανε και ο αποφασίζων κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, δεν δίνεται πληροφορία αν η λύση αυτή είναι μοναδική, αν δηλαδή υπάρχουν κι άλλες (ενδεχομένως λιγότερο ακραίες) λύσεις που δίνουν το ίδιο αποτελέσμα.

Επιπλέον, ο αποφασίζων παρατήρησε ότι οι μεταβολές στην βαρύτητα δεν ανατποκρίνοται πάντα σε αναμενόμενη μεταβολή των αντίστοιχων κριτηρίων, γεγονός που αποτελεί έντονη ένδειξη για την ύπαρξη πολλαπλών βελτίστων σε διαφορετικές περιοχές του μετώπου, που η μέθοδος δεν είναι σε θέση να διερευνήσει καθώς κάτι τέτοιο ξεφεύγει από την φιλοσοφία της.

Τέλος, θυμίζουμε ότι για την εφαρμογή της μεθόδου ο αποφασίζων αποδέχτηκε (κατά τον διάλογο καθορισμού των παραχωρήσεων) τις παραδοχές που είναι αναγκαίες, αναφορικά με:

- Την ανεξαρτησία των βαρών (συντελεστών) μεταξύ των κριτηρίων
- Την ανεξαρτησία και σταθερότητα των βαρών σε σχέση με τις τιμές των κριτηρίων
- Μοντελοποίηση της σχέσης ασυγκριτικότητας μεταξύ των κριτηρίων.

Η παραπάνω διαδικασία έτρεξε σε περιβάλλον GAMS, με λύτη MILP:
CPLEX, σε υπολογιστή με επεξεργαστή intel Core i5, CPU M450 @ 2,4GHz, 4GBRAM.

Φάση Μεθόδου	**Απαιτούμενος χρόνος**
Προετοιμασία Μοντέλου	1’
Ενημέρωση και Διάλογοι Αποφασίζοντα	3’ (ανά Περίπτωση)
Υπολογισμοί Π1	1 ‘ 54’’
Υπολογισμοί Π2	25’’
Υπολογισμοί Π3	16’’
Υπολογισμοί Π4	2’31’’
Υπολογισμοί Π5	47’’
Υπολογισμοί Π6	39’’
Μέσος Χρόνος Διαδικασίας	***5’ 5’’***

5.4.3 Μέθοδος Ικανοποιητικών Στόχων

Η μέθοδος των ικανοποιητικών στόχων (Satisfactory Goals) βασίζεται σε διαδραστική φιλοσοφία υποστήριξης αποφάσεων. Ο αποφασίζων καλείται να θέσει τα ελάχιστα επίπεδα αποδοχής για τα κριτήρια, καθορίζοντας ταυτόχρονα το κριτήριο του οποίου το επίπεδο είναι το λιγότερο ικανοποιητικό, ή πιο σημαντικό. Η μέθοδος είναι επαναληπτική και οδηγεί σε σταδιακή βελτίωση των τιμών κριτηρίων, σε μια λύση που να ικανοποιεί τον αποφασίζοντα. Η μέθοδος περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 4.4.4..

Για την εφαρμογή της μεθόδου στην περίπτωση του πολυκριτηριακού σεναρίου του προβλήματος, ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 4.4.4.

Διενεργήθηκαν 11 επαναληπτικοί κύκλοι, καθοδηγούμενοι από τον αποφασίζοντα, προτού ο αποφασίζων τερματίσει την διαδικασία με επιλογή της λύσης που τον ικανοποιεί.

Συγκεκριμένα, στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζεται ο τρόπος εφαρμογής της μεθόδου σε κάθε στάδιο της διαδικασίας για τους δύο πρώτους κύκλους, και στην συνέχεια για οικονομία χώρου, παρουσιάζονται σε πίνακες οι παράμετροι εφαρμογής και τα αποτελέσματα όλων των κύκλων μέχρι τον τερματισμό της διαδικασίας.

$1^{ος}$ Κύκλος

Βήμα 1.1 **Καθορισμός αποδεκτών επίπεδων τιμών L_i^1 των κριτηρίων**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Ο αποφασίζων, χωρίς να γνωρίζει κάποια άλλη πληροφορία σχετική με ιδεατές ή και ναδίρ τιμές των κριτηρίων, καθορίζει ελάχιστες αποδεκτές τιμές/επίπεδα L_i^1 για τα 4 κριτήρια του προβλήματος K_1, K_2, K_3 και K_4. Ήτοι g_i: { K_1, K_2, K_3, K_4} προκειμένου να αποκλείσει λύσεις που δεν είναι αποδεκτής ποιότητας βάση τιμής σε κάθε ένα από τα κριτήρια.

Αρχικά, ο αποφασίζων, όρισε τα ακόλουθα όρια:

	Κριτήριο K1	Κριτήριο K2	Κριτήριο K3	Κριτήριο K4
Κύκλος	**L1**	**L2**	**L3**	**L4**
	>=	=<	>=	=<
1	6.900	70.000	340.000	220

Βήμα 2.1 **Καθορισμός Κριτηρίου Βελτιστοποίησης**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Ο αποφασίζων ορίζει το κριτήριο K_1 ως κριτήριο βελτιστοποίησης καθώς, σύμφωνα

με την εμπειρία, εκτίμησή του θεωρείται πιο σημαντική η βελτιστοποίησή του σε σχέση με τα άλλα κριτήρια.

Το κριτήριο αυτό αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση *(προς μεγιστοποίηση)* του πρώτου κύκλου της μεθόδου (q=1), ενώ τα επίπεδα $\boldsymbol{L_i}$ που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα κριτήρια του προβλήματος εισάγονται ως περιορισμοί στο μαθηματικό πρόβλημα.

Βήμα 3.1 **Βελτιστοποίηση μονοκριτηριακού μοντέλου ΜΠ**	**Ενέργεια αναλυτή**

Το στάδιο αυτό αποτελεί την φάση υπολογισμού, όπου βελτιστοποιείται το μονοκριτηριακό μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού που έχει διαμορφωθεί εφαρμόζοντας την επιλεγμένη από τον αναλυτή τεχνική βελτιστοποίησης μονοκριτηριακών προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού.

Συγκεκριμένα επιλύεται το:

$max\ K_1(x)$ *Υπό τους περιορισμούς του προβλήματος*

(5) – (12) του προβλήματος (βλ. παραγρ. 4.2.2.3)

Και επιπλέον

$K_1(x) \geq L_1^1 \Rightarrow K_1(x) \geq 6.900$

$K_2(x) \leq L_2^1 \Rightarrow K_2(x) \leq 70.000$

$K_3(x) \geq L_3^1 \Rightarrow K_3(x) \geq 340.000$

$K_4(x) \leq L_4^1 \Rightarrow K_4(x) \leq 220$

Βήμα 4.2.1 **Περίπτωση μη εφικτής λύση**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Αν ο συνδυασμός των επιπέδων που όρισε ο αποφασίζων επιστρέφει μη εφικτή λύση (η *βελτιστοποίηση δεν είναι εφικτή*), δηλαδή ο συνδυασμός των επίπεδων/τιμών ικανοποίησης που έχει θέσει ο αποφασίζοντας αποδεικνύεται πολύ φιλόδοξος,

τότε

$q=q+1$ και

Επιστροφή στο βήμα 1

της μεθόδου για νέα προσπάθεια βελτιστοποίησης του ίδιου ή διαφορετικού κριτηρίου. Ο αποφασίζων, δηλαδή, καλείται να «χαλαρώσει» κάποια ή όλα τα

επίπεδα ικανοποίησης των κριτηρίων.

2ος Κύκλος

Βήμα 1.1 **Καθορισμός αποδεκτών επίπεδων τιμών L_i^2 των κριτηρίων**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Ο αποφασίζων καθορίζει νέες ελάχιστες αποδεκτές τιμές/επίπεδα L_i^1 για τα 4 κριτήρια του προβλήματος K_1, K_2, K_3 και K_4. Σε αυτή την φάση (και ανάλογα με τον επιλύτη του προβλήματος μαθηματικού προγραμματισμού που επιλέγεται) υποστηρικτικό ρόλο μπορεί να παίξει και η ένδειξη που του παρέχει ο αναλυτής για τους περιορισμούς των κριτηρίων που δεν ικανοποιήθηκαν στο προηγούμενο στάδιο. Η πληροφορία αυτή βέβαια είναι ενδεικτική, γιατί με άλλη δρομολόγηση επίλυσης του λύτη, δύναται να καταστούν διαφορετικοί περιορισμοί μη εφικτοί.

Ο αποφασίζων επιλέγει να χαλαρώσει τα Κριτήρια K_2, K_4 θεωρώντας ότι η χαλάρωση των ορίων τους κινείται επίσης σε ικανοποιητικά επίπεδα. Θα του δοθεί έτσι η ευκαιρία να εστιάσει στην βελτίωση των άλλων δύο κριτηρίων και στην συνέχεια να επανέλθει με μικρές διορθωτικές κινήσεις να βελτιώσει, αν χρειάζεται, τις τιμές στα χαλαρωμένα κριτήρια.

Τα νέα επίπεδα είναι:

	Κριτήριο K1	Κριτήριο K2	Κριτήριο K3	Κριτήριο K4
Κύκλος	**L1**	**L2**	**L3**	**L4**
	>=	**=<**	**>=**	**=<**
2	6.900	140.000	340.000	250

Βήμα 2.2 **Καθορισμός Κριτηρίου Βελτιστοποίησης**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Ο αποφασίζων συνεχίζει με το κριτήριο K_1 ως κριτήριο βελτιστοποίησης.

Το κριτήριο αυτό αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση *(προς μεγιστοποίηση)* του δεύτερου κύκλου της μεθόδου (q=2), ενώ τα επίπεδα L_i που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα κριτήρια του προβλήματος εισάγονται ως περιορισμοί στο μαθηματικό πρόβλημα.

Βήμα 3.2 **Βελτιστοποίηση μονοκριτηριακού μοντέλου ΜΠ**	**Ενέργεια αναλυτή**

Επιλύεται το:

$\max\ K_1(x)$

Υπό τους περιορισμούς του προβλήματος

(5) – (12) του προβλήματος (βλ. παραγρ. 4.2.2.3)

Και επιπλέον

$K_1(x) \geq L_1^1 \ \Rightarrow K_1(x) \geq 6.900$

$K_2(x) \leq L_2^1 \ \Rightarrow K_2(x) \leq 140.000$

$K_3(x) \geq L_3^1 \ \Rightarrow K_3(x) \geq 340.000$

$K_4(x) \leq L_4^1 \ \Rightarrow K_4(x) \leq 250$

Βήμα 4.3.2 **Περίπτωσης Μη αποδεκτής λύσης / Βελτίωση Λύσης**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

Η βελτιστοποίηση επιστρέφει το αποτέλεσμα:

Κριτήριο Κ1	Κριτήριο Κ2	Κριτήριο Κ3	Κριτήριο Κ4
6.928	139.963	355.705	250

Ο αναλυτής εξηγεί στον αποφασίζοντα ότι η παραγόμενη λύση είναι βέλτιστη ως προς το κριτήριο K_1 και δεν γίνεται καμία προσπάθεια βελτιστοποίησης των υπόλοιπων κριτηρίων πέραν των επιπέδων που έχουν οριστεί.

Η παραγόμενη λύση πιθανότατα δεν είναι ικανή λύση του μετώπου Pareto, καθώς μπορεί να υπάρχουν και άλλες λύσεις με την τιμή $K_1=6.928$ και καλύτερη τιμή σε ένα από τα κριτήρια K_2, K_3, K_4 εντός των ορίων που έχει θέσει ο αποφασίζων.

Σε αυτό το πλαίσιο, ο αποφασίζων, αξιολογεί την λύση και επιλέγει να συνεχίζει την προσπάθεια βελτίωσης των τιμών των κριτηρίων K_2, K_3 και K_4 με ενδεχόμενη μικρή μείωση ποιότητας στο K_1.

$q=q+1$ και

Επιστροφή στο βήμα 1 της μεθόδου για νέα προσπάθεια βελτιστοποίησης του ίδιου ή διαφορετικού κριτηρίου.

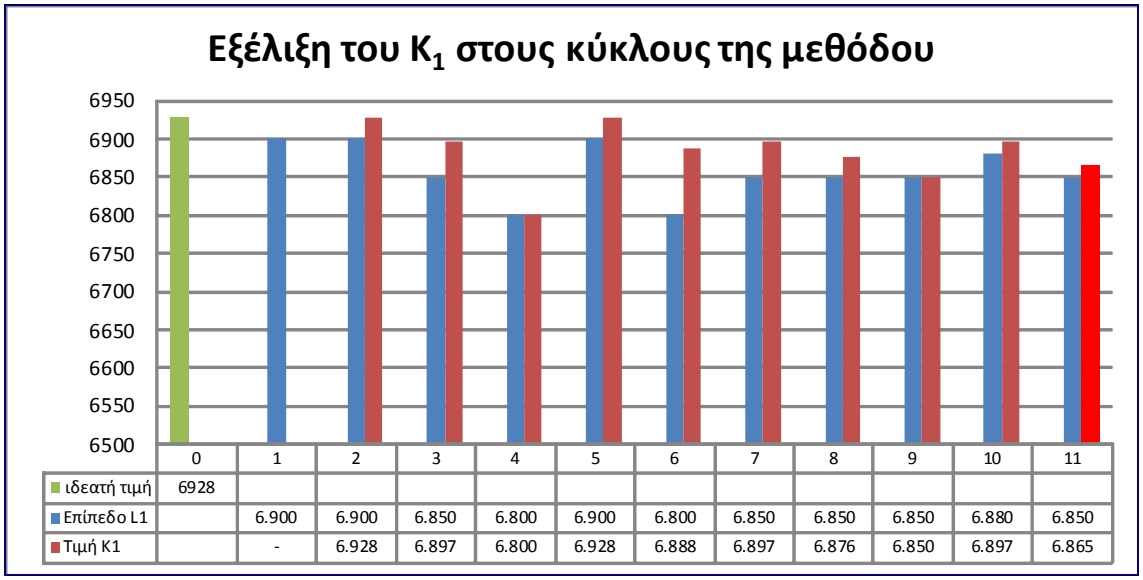
κ.ο.κ

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συνοπτικά τους 11 κύκλους βελτιστοποίησης, με την εξέλιξη των ικανοποιητικών στόχων που θέτει ο αποφασίζων (DM) και των αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης που προκύπτουν:

L_i^q	**Ενέργειες αποφασίζοντα**						**Ενέργειες αναλυτή – αποτελέσματα**			
	Κριτήριο K_1	**Κριτήριο K_2**	**Κριτήριο K_3**	**Κριτήριο K_4**	**Κριτήριο Βελ/σης**	**Μεταβολές L_i^q**	**Κριτήριο K_1**	**Κριτήριο K_2**	**Κριτήριο K_3**	**Κριτήριο K_4**
	L_1	**L_2**	**L_3**	**L_4**			**Max K_1**	**Min K_2**	**Max K_3**	**Min K_4**
Q	>=	=<	>=	=<						
1	6.900	70.000	340.000	220	K_1		M.E.	M.E.	M.E.	M.E.
2	6.900	140.000	340.000	250	K_1	$\uparrow L_2, \uparrow L_4$	6.928	139.963	355.705	250
3	6.850	130.000	340.000	250	K_1	$\downarrow L_1, \downarrow L_2$	6.897	129.981	340.029	250
4	6.800	130.000	360.000	250	K_2	$\downarrow L_1, \uparrow L_3$	6.800	114.345	360.000	250
5	6.900	135.000	340.000	250	K_2	$\uparrow L_1, \uparrow L_2, \downarrow L_3$	6.928	131.648	353.936	250
6	6.800	140.000	360.000	500	K_3	$\downarrow L_1, \uparrow L_2, \uparrow L_3, \uparrow L_4$	6.897	139.998	371.130	500
7	6.850	140.000	360.000	350	K_3	$\uparrow L_1, \downarrow L_4$	6.897	139.959	370.870	350
8	6.850	130.000	360.000	300	K_3	$\downarrow L_2, \downarrow L_4$	6.897	129.998	369.445	300
9	6.850	130.000	360.000	250	K_3	$\downarrow L_4$	6.897	129.984	367.734	250
10	6.800	140.000	360.000	250	K_4	$\downarrow L_1, \uparrow L_2$	6.897	139.997	360.050	225
11	6.850	130.000	360.000	250	K_4	-	6.897	129.998	360.009	225
Τερματισμός διαδικασίας										

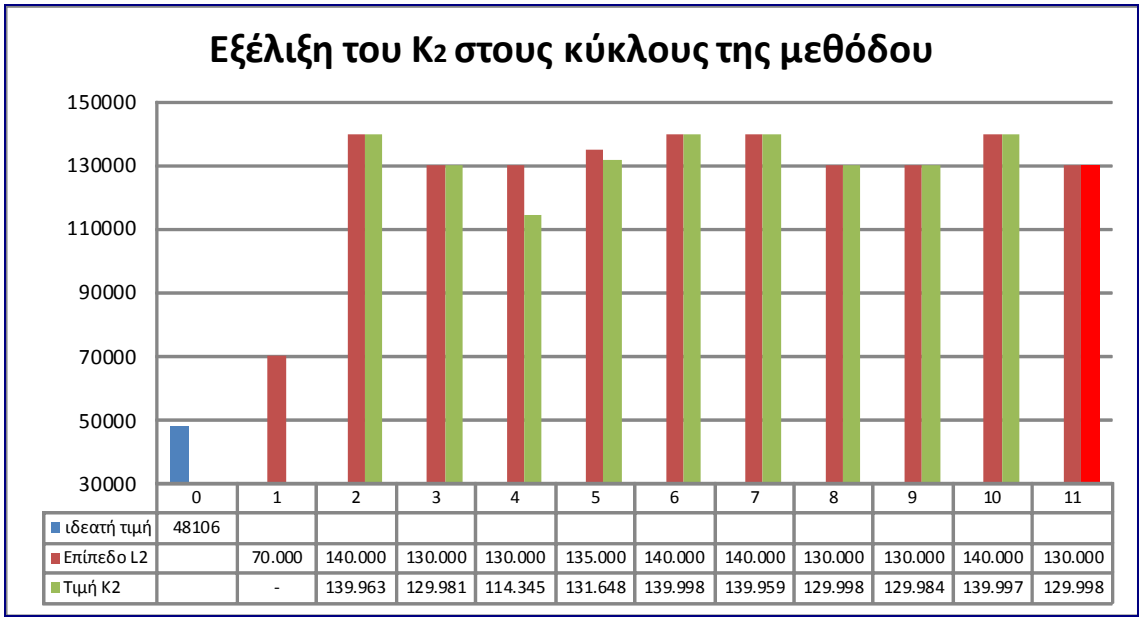
Πίνακας 5. 21 Αποφάσεις και αποτελέσματα μεθόδου Ικανοποιητικών στόχων ανά κύκλο βελτιστοποίησης

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα για κάθε κριτήριο ξεχωριστά και η εξέλιξη των τιμών τους μέσα στους διάφορους κύκλους αποφάσεων:



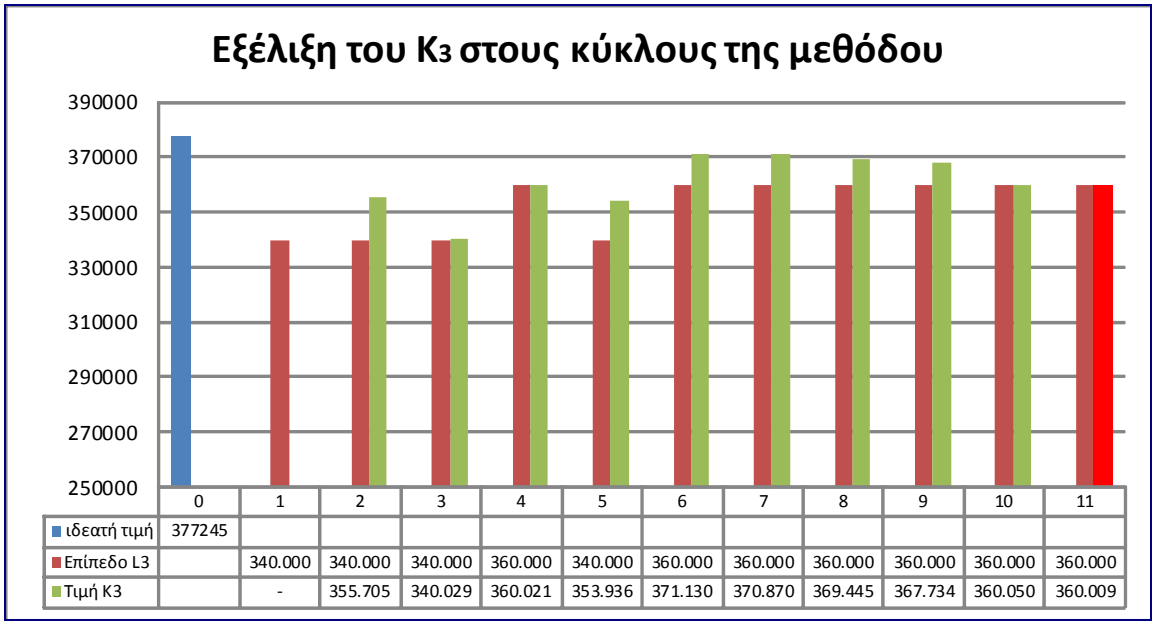
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ιδεατή τιμή	6928											
Επίπεδο L1		6.900	6.900	6.850	6.800	6.900	6.800	6.850	6.850	6.850	6.880	6.850
Τιμή K1		-	6.928	6.897	6.800	6.928	6.888	6.897	6.876	6.850	6.897	6.865

Σχήμα 5. 15 Εξέλιξη του K_1 στους κύκλους της μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων



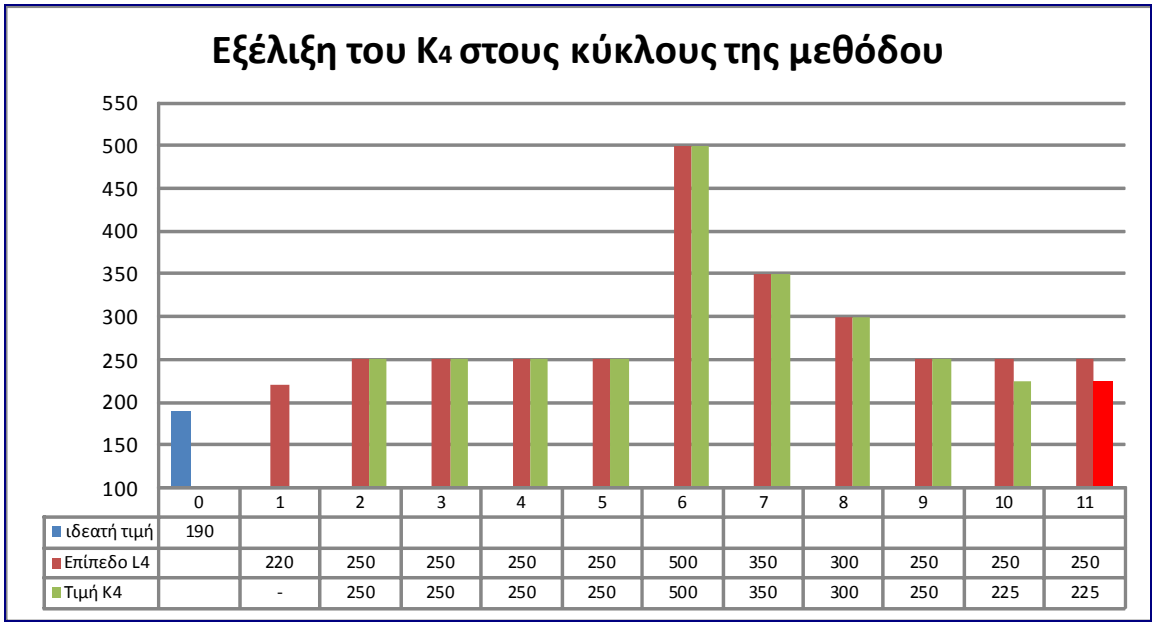
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ιδεατή τιμή	48106											
Επίπεδο L2		70.000	140.000	130.000	130.000	135.000	140.000	140.000	130.000	130.000	140.000	130.000
Τιμή K2		-	139.963	129.981	114.345	131.648	139.998	139.959	129.998	129.984	139.997	129.998

Σχήμα 5. 16 Εξέλιξη του K_2 στους κύκλους της μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ιδεατή τιμή	377245											
Επίπεδο L3		340.000	340.000	340.000	360.000	340.000	360.000	360.000	360.000	360.000	360.000	360.000
Τιμή K3		-	355.705	340.029	360.021	353.936	371.130	370.870	369.445	367.734	360.050	360.009

Σχήμα 5. 17 Εξέλιξη του K_3 στους κύκλους της μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ιδεατή τιμή	190											
Επίπεδο L4		220	250	250	250	250	500	350	300	250	250	250
Τιμή K4		-	250	250	250	250	500	350	300	250	225	225

Σχήμα 5. 18 Εξέλιξη του K_4 στους κύκλους της μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων

Η παραπάνω διαδικασία έτρεξε σε περιβάλλον GAMS, σε υπολογιστή με επεξεργαστή intel Core i5, CPU M450 @ 2,4GHz, 4GBRAM.

Φάση Μεθόδου	Απαιτούμενος χρόνος
Προετοιμασία Μοντέλου	1’

Ενημέρωση και Διάλογοι Αποφασίζοντα	1’ x 11 = 11` (ελάχιστος – ενδεικτικός χρόνος, εξαρτάται από την ετοιμότητα του αποφασίζοντος)
Υπολογισμοί q_1	0,12’’
Υπολογισμοί q_2	43’’
Υπολογισμοί q_3	38’’
Υπολογισμοί q_4	1,31’’
Υπολογισμοί q_5	28’’
Υπολογισμοί q_6	21’’
Υπολογισμοί q_7	49’’
Υπολογισμοί q_8	14’’
Υπολογισμοί q_9	38’’
Υπολογισμοί q_{10}	42’’
Υπολογισμοί q_{11}	12’’
Συνολικός Χρόνος Διαδικασίας	*11’ + 4' + 46,73''*

Ο αποφασίζων επιβεβαίωσε στο τέλος της διαδικασίας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που επισημαίνονται στην παράγραφο 4.4.4.

Ως πλεονεκτήματα αναφέρονται η απλότητα και αμεσότητα της μεθόδου, αλλά και η σημαντική ευελιξία και έλεγχος που αποδίδεται στον αποφασίζοντα.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου ήταν ιδιαίτερα έντονα στην περίπτωση της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Η βελτιστοποίηση ως προς ένα κριτήριο σε κάθε κύκλο, δημιούργησε μεγάλη έλλειψη αυτοπεποίθησης και σιγουριάς στον αποφασίζοντα ως προς την ποιότητα της λύσης στα υπόλοιπα κριτήρια. Το γεγονός αυτό που αναπόφευκτα οδήγησε σε πολλούς κύκλους επανάληψης και δοκιμής συσχετισμού ικανοποιητικών στόχων (επιπέδων), προκειμένου να διερευνηθεί ικανοποιητικά (αλλά όχι συστηματικά) ο χώρος των κριτηρίων.

Σε κάθε περίπτωση, το γεγονός ότι οι παραγόμενες λύσεις δεν είναι ικανές λύσεις του μετώπου Pareto, αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για την περίπτωση αυτού του τύπου προβλημάτων. Ο αποφασίζων οδηγείται «ψυχα-αναγκαστικά» σε μεγάλο πλήθος δοκιμών προκειμένου να μειώσει τις πιθανότητες μεγάλης απόκλισης από τις ικανές λύσεις, χρησιμοποιώντας συχνά πολύ φιλόδοξα όρια/επίπεδα που συνδυαστικά μπορεί να οδηγούν σε μη εφικτές λύσεις.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση της εφαρμογής, ο αποφασίζων θεώρησε πιο ικανοποιητική ως προσέγγιση την έναρξη της διαδικασίας με ιδιαίτερα φιλόδοξα επίπεδα και την σταδιακή χαλάρωσή τους. Την ίδια προσέγγιση ακολούθησε και σε

ενδιάμεσα στάδια της διαδικασίας, προκειμένου να μπορεί να μετακινείται σε υποσχόμενες περιοχές του χώρου αναζήτησης.

Ο τερματισμός της διαδικασίας έγινε ως αποτέλεσμα παραχώρησης του απαιτούμενου χρόνου και της επιτευχθείσας ποιότητας λύσης.

5.4.4 Προτεινόμενη Μεθοδολογία Επίλυσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή στο πρόβλημα της προτεινόμενης, από την διατριβή, μεθόδου συνέργειας της φιλοσοφίας πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης βάσει μεθόδου Ολικού Κριτηρίου και της φιλοσοφίας πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης βάσει μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων.

Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στην ενότητα 4.4.5, η διαδικασία είναι αλληλεπιδραστική απαιτώντας από το αποφασίζοντα να ορίσει την στρατηγική, την κατεύθυνση αναζήτησης και επιτρέποντάς του να θέσει τις ακόλουθους παραμέτρους σε κάθε κύκλο βελτιστοποίησης.

1 Τα επίπεδα ικανοποίησης για κάθε κριτήριο, λαμβάνοντας υπόψιν τα στοιχεία που ήδη διατίθενται (πίνακας πληρωμών, λύσεις προηγούμενων κύκλων)

2 Τις αμοιβαίες παραχωρήσεις που ισχύουν μεταξύ των κριτηρίων και ενός κριτηρίου αναφοράς, εφαρμόζοντας την μέθοδο Ολικού Κριτήριου σε κάθε κύκλο Βελτιστοποίησης.

3 Την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του κάθε κύκλου ως ικανοποιητικού ή μη ικανοποιητικού και την απόφαση για επανάληψη ή μη της διαδικασίας με νέο κύκλο βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος ολοκληρώθηκε με επιτυχία σε έξι κύκλους βελτιστοποίησης.

Ακολούθως παρουσιάζεται αναλυτικά ο πρώτος κύκλος, και στην συνέχεια, για λόγους οικονομίας χώρου, παρουσιάζονται σε πίνακες και γραφήματα, οι παράμετροι και τα ενδιάμεσα αποτελέσματα από όλους τους κύκλους αλληλεπίδρασης-βελτιστοποίησης, έως τον τερματισμό της διαδικασίας.

Βήμα 1	**Ενέργεια Αναλυτή**
Εισαγωγή Παραμέτρων και Δεδομένων (Παραγγελίες, Περιορισμοί, Κριτήρια)	
Ανάλυση ως παρουσιάζεται στην ενότητα 5.2. Θεωρούμε σε αυτή την φάση ότι έχει ήδη ολοκληρωθεί.	

Βήμα 2	**Ενέργεια Αναλυτή**
Ανάπτυξη Μοντέλου Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού $\boldsymbol{P(x)}$	

Ακολουθώντας την προτεινόμενη μοντελοποίηση (βλ. ενότητα 5.2) διαμορφώθηκε το πρόβλημα ΑΓΠ στην μορφή

$B_L \leq A \times X \leq B_U$ εκφράζοντας τους περιορισμούς (5)-(12) της ενότητα 4.2.2

$X \in Z^n$

$K_1(X) = C_1 * X^T$, μεγιστοποίηση

$K_2(X) = C_2 * X^T$, ελαχιστοποίηση

$K_3(X) = C_3 * X^T$, μεγιστοποίηση

$K_4(X) = C_4 * X^T$, ελαχιστοποίηση

Στο πλαίσιο της διατριβής έχει αναπτυχθεί πρόγραμμα (σε περιβάλλον MATLAB) το οποίο με την αναγνώριση των δεδομένων/παραμέτρων παραγωγής δημιουργεί τους πίνακες $X, A, B_L, B_U, C_1, C_2, C_3, C_4$ που μοντελοποιούν τις σχέσεις (1)- (12) που έχουν αναλυθεί στην ενότητα 4.2.2.3.

Βήμα 3	**Ενέργεια Αναλυτή**
Κατασκευή Λεξικογραφικού Πίνακα Πληρωμών	**Αρχική εμπλοκή αποφασίζοντα**
Αρχική αξιολόγηση ορίων χώρου κριτηρίων	

Κατασκευάστηκε ο πίνακας πληρωμών των κριτηρίων του προβλήματος, με λεξικογραφική βελτιστοποίηση (κατά σειρά προτεραιότητας/ επιλογής του αποφασίζοντος, κατά βούληση ή τυχαία.).

Η ακριβής διαδικασία παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.4.1. Ακολουθεί ο πίνακας πληρωμών με την παραδοχή ιεραρχίας των κριτηρίων

$$K_1 \text{ -> } K_2 \text{ -> } K_3 \text{ -> } K_4$$

Λεξ/κός Πίνακας Πληρωμών	K1	K2	K3	K4
Max K1	**6.928**	129.625	357.241	550
Min K2	4.058	**48.106**	233.713	886
Max K3	6.897	246.918	**377.245**	2.239
Min K4	5.762	114.800	231.884	**190**

Με τον τρόπο αυτό ορίζονται αμέσως:

a) οι Ιδεατές τιμές για κάθε κριτήριο

$z_1^I = 6.928,$

$z_2^I = 48.106,$

$z_3^I = 377.245,$

$z_4^I = 190$

οι ναδίρ τιμές για κάθε κριτήριο

$z_1^N = 4.058$

$z_2^N = 246.918$

$z_3^N = 231.884$

$z_4^N = 2.239$

a) Τέσσερις (4) αντιστοιχούσες αποτελεσματικές Pareto λύσεις στον χώρο των κριτηρίων προς αρχική αξιολόγηση από τον αποφασίζοντα, ως λύσεις αναφοράς.

Ο αποφασίζων αποκτά μια εικόνα του πεδίου τιμών στο οποίο αξίζει και μπορεί να κινηθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης των επιμέρους κριτηρίων προκειμένου να αποφύγει σπατάλη χρόνου και ενέργειας σε αναζήτηση λύσεων α) μη αποτελεσματικών, β) μη εφικτών- πολύ φιλόδοξων ή γ) πολύ χαμηλής ποιότητας. .

Αρχικοποίηση επαναληπτικής διαδικασίας, q=1

Αρχικοποίηση μετρητών και συνόλων αλγορίθμου

neff=4, μετρητής ικανών λύσεων που προκύπτουν

F={(6.928, 129.625,357.241,550), (4.058, 48.106, 233.713, 886),
(6.897, 246.918, 377.245, 2.239), (5.762, 114.800, 231.884, 190)}

q=1 μετρητής επαναληπτικών κύκλων

Βήμα 4 **Ορισμός ικανοποιητικών επιπέδων κριτηρίων**	**Ενέργεια Αποφασίζοντος**

Ο αποφασίζων, μελετώντας τον πίνακα πληρωμών καθόρισε τις ελάχιστες αποδεκτές τιμές/επίπεδα L_i^1 για τα κριτήρια K_1, K_2, K_3, K_4 προκειμένου να αποκλειστούν λύσεις που δεν είναι αποδεκτής ποιότητας -σε επίπεδο εμπειρικό-επιχειρησιακό και να διερευνηθεί η ανταπόκριση της διαδικασίας βελτιστοποίησης των κριτηρίων στον συγκεκριμένο συνδυασμό επιπέδων.

Τα όρια που τέθηκαν για τον πρώτο κύκλο είναι:

	Κριτήριο K_1	Κριτήριο K_2	Κριτήριο K_3	Κριτήριο K_4
L_i^1	L_1	L_2	L_3	L_4
Κύκλος, q	>=	=<	>=	=<

1	6.500	110.000	330.000	280

Έναρξη επαναληπτικής διαδικασίας

Βήμα 5.1 **Καθορισμός παραχωρήσεων – ανάπτυξη μοντέλου Ολικού Κριτηρίου**	**Ενέργεια Διαλόγου**

Ακολουθώντας την λογική εφαρμογής της Μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων, ο αποφασίζων καθόρισε το κριτήριο K_2 ως το κριτήριο $g_{r,1}$ που, σύμφωνα με την εμπειρία, εκτίμησή του, παρουσιάζει μη ικανοποιητική συμπεριφορά στην βελτιστοποίησή του. Το κριτήριο αυτό αποτελεί το κριτήριο αναφοράς για την ανάπτυξη του μοντέλου Ολικού Κριτηρίου, ήτοι την μοντελοποίηση της αντιστάθμισης των κριτηρίων, και την διαμόρφωση μιας συνάρτησης Ολικού Κριτηρίου.

Συγκεκριμένα, σε αυτή την φάση αξιοποιήθηκε η φιλοσοφία της μεθόδου Ολικού Κριτηρίου η οποία εφαρμόζεται για τον καθορισμό των βαρών συμμετοχής των κριτηρίων στην αντικειμενική συνάρτηση του πρώτου κύκλου/επανάληψης της μεθόδου ($q = 1$).

Συγκεκριμένα, ακολουθώντας τον προβλεπόμενο διάλογο αναλυτή-αποφασίζοντα, ορίστηκαν οι παραχωρήσεις K_{ir} και διαμορφώθηκε η συνάρτηση ολικού κριτηρίου, για τον συγκεκριμένο κύκλο.

Επαναλαμβάνοντας τους διαλόγους της ενότητας 5.4.2 – με τα νέα δεδομένα του προβλήματος-, ο αποφασίζων επέλεξε για την φάση αυτή της βελτιστοποίησης το προτιμησιακό σενάριο Π2 (Περίπτωση 2).

Ενδεικτικά, ο διάλογος διαμορφώθηκε ως εξής, για τον υπολογισμό της παραχώρησης μεταξύ του κριτηρίου $g_{r,1} = K_2$ και K_1:

Αναλυτής:

Δεδομένων των ελάχιστων ικανοποιητικών επιπέδων L_i^1, των ναδίρ z_i^N και των ιδεατών z_i^I τιμών για τα όλα τα κριτήρια, πόσες μονάδες από το κριτήριο αναφοράς K_2 θα δεχόσουνα να παραχωρήσεις προκειμένου να κερδίσεις μία μονάδα στο κριτήριο K_1?

Αποφασίζων: Με αυτές τις συνθήκες και σε αυτά τα επίπεδα αναφοράς, προκειμένου να κερδίσω μία μονάδα από το κριτήριο K_1, θα δεχόμουνα να παραχωρήσω 1000 μονάδες από το κριτήριο K_2.

Αναλυτής: Πιστεύεις ότι η παραχώρηση αυτή μεταξύ των δύο κριτηρίων είναι ανεξάρτητη από τις τιμές στα υπόλοιπα κριτήρια, δεδομένων των ελάχιστα αποδεκτών επιπέδων που ισχύουν?

Αποφασίζων: Ναι, πιστεύω ότι αυτή η παραχώρηση είναι ανεξάρτητη.

Αναλυτής: Συμφωνείς ότι η ίδια αντιστάθμιση ισχύει για όλες τιμές που λαμβάνονται για τα δύο κριτήρια (K_1, K_2), στην συγκεκριμένη περιοχή του χώρου των κριτηρίων;

Αποφασίζων: Ναι, συμφωνώ

Με την λογική αυτή και την διενέργεια του παραπάνω διαλόγου, τρεις φορές στην περίπτωσή μας, η συνάρτηση ολικού κριτηρίου, (με τους συντελεστές της Περίπτωσης 2) διαμορφώθηκε ως εξής:

$P(X) = 1000 \times K_1 - 1 \times K_2 + 5 \times K_3 - 5K_4$

Η συνάρτηση αυτή αποτελεί το κριτήριο βελτιστοποίησης του προβλήματος για τον τρέχοντα κύκλο της διαδικασίας.

Βήμα 6.1 **Βελτιστοποίηση μονοκριτηριακού μοντέλου ΜΠ $P_1(\{L_{i1}\}, \{p_{ir1}\})$:**	**Ενέργεια αναλυτή**

Επιλύθηκε (με τον γνωστό επιλύτη CPLEX, σε περιβάλλον GAMS) το μονοκριτηριακό πλέον πρόβλημα:

$\max(1000 \times K_1 - 1 \times K_2 + 5 \times K_3 - 5K_4)$

Υπό τους περιορισμούς του προβλήματος

(5) – (12) του προβλήματος (βλ. παραγρ. 4.2.2.3)

Και επιπλέον

$K_1(x) \geq 6.500$

$K_2(x) \leq 110.000$

$K_3(x) \geq 330.000$

$K_4(x) \leq 280$

Βήμα 7.3.1 **Περίπτωσης Μη αποδεκτής λύσης / Βελτίωση Λύσης**	**Ενέργεια αποφασίζοντος**

- Το πρόβλημα παράγει εφικτές λύσεις και επιστρέφει την ακόλουθη βέλτιστη λύση:

Κριτήριο K_1	Κριτήριο K_2	Κριτήριο K_3	Κριτήριο K_4
6.674	109.998	349.452	280

- Ο αναλυτής ενημερώνει τον αποφασίζοντα ότι η προκύπτουσα λύση είναι ικανή λύση του μετώπου Pareto.
- Ο αποφασίζων επιθυμεί να διερευνήσει κι άλλες λύσεις του μετώπου βελτιώσει τις τιμές ως προς τα κριτήρια K_1, K_3, K_4. και ενημερώνει σχετικά τον αναλυτή (σύστημα).
- $q = q + 1$
- Προσδιορίζονται από τον αποφασίζοντα νέα επιπέδων $\{L_{i2}\}$

$$\{L_{i2}\} = \{6.850, 130.000, 360.000, 250\}$$

- Ο αποφασίζων δεν επιθυμεί να μεταβάλει τις παραχωρήσεις $\{p_{irq}\}$ σε αυτή την φάση
- Επιστροφή στο βήμα 6 της μεθόδου για νέο κύκλο βελτιστοποίησης,

Ακολούθησαν έξι ακόμα κύκλοι βελτιστοποίησης με αλλαγές παραμέτρων από τον αποφασίζοντα τόσο ως προς τους συντελεστές της μεθόδου Ολικού Κριτηρίου όσο και ως προς τα επίπεδα ικανοποίησης κατά την εφαρμογή της μεθόδου Ικανοποιητικών Στόχων.

Στην πραγματικότητα ο αποφασίζων εφάρμοσε την διαδικασία και επέλυσε το πρόβλημα για τρία σενάρια συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων, που αντιστοιχούσαν στις Περιπτώσεις 2, 3, 6 της εταιρικής πολιτικής προτιμήσεων/παραχωρήσεων (βλ. ενότητα 5.4.2), προκειμένου να αποκτήσει και να αξιολογήσει λύσεις που ανταποκρίνονται στις τρεις στρατηγικές της εταιρείας. Είχε δηλαδή την δυνατότητα, να ελέγξει ο ίδιος τα επίπεδα τιμών και τις περιοχές εφαρμογής της κάθε στρατηγικής προκειμένου να αποφευχθούν ακραία βέλτιστες λύσεις.

Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τις παραμέτρους απόφασης σε κάθε κύκλο βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε.

	Ενέργειες αποφασίζοντα									
	Ικανοποιητικά Επίπεδα κατά Μ.Ι.Σ.				Συντ/τές κατά Μ.Ο.Κ.				$\uparrow,\downarrow L_i^q$	k_{ir}^q
	L_1	L_2	L_3	L_4						
Q	>=	=<	>=	=<	k_{12}	k_{22}	k_{23}	k_{24}		
1-π2	6.500	110.000	330.000	280	1.000	-1	5	-5		Π2
2-π2	6.850	130.000	360.000	250	1.000	-1	5	-5	$\uparrow L_1, \uparrow L_2, \uparrow L_3, \downarrow L_4$	Π2
3-π2	6.900	140.000	355.000	250	1.000	-1	5	-5	$\uparrow L_1, \uparrow L_2, \downarrow L_3$	Π2
4-π3	6.850	130.000	360.000	240	1.000	-2	10	-20	$\uparrow L_1, \uparrow L 2, \uparrow L_3, \downarrow L_4$	Π3
5-π3	6.900	140.000	355.000	250	1.000	-2	10	-20	$\uparrow L_1, \uparrow L_2, \downarrow L_3, \uparrow L_4$	Π3
6-π6	6.850	130.000	360.000	280	1.000	-10	100	-500	$\uparrow L_1, \uparrow L_2, \uparrow L_3$	Π6
7-π6	6.900	140.000	355.000	225	1.000	-10	100	-500	$\uparrow L_1, \uparrow L_2, \uparrow L_3, \downarrow L_4$	Π6
Τερματισμός διαδικασίας										

Πίνακας 5. 22 Ενέργειες του αποφασίζοντος ανά κύκλο της μεθόδου συνέργειας των ΜΙΣ, ΜΟΚ

Με την παραγωγή της κάθε ικανής λύσης, ο αναλυτής παρουσιάζει στον αποφασίζοντα γραφήματα και στοιχεία που τον βοηθούν να κατανοήσει την σχετική θέση κάθε λύσης ως προς τα κριτήρια σε σχέση με τις λύσεις που έχουν ήδη παραχθεί.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες:

	Ενέργειες αποφασίζοντος						Ενέργειες αναλυτή/αποτελέσματα			
	Ικανοποιητικά Επίπεδα Κριτηρίων κατά Μ.Ι.Σ.						Αποτελέσματα – τιμές κριτηρίων κατά Μ.Ο.Κ. (ικανές λύσεις)			
Q	L_1 >=	L_2 =<	L_3 >=	L_4 =<	$\uparrow,\downarrow L_i^q$	k_{ir}^q	K_1	K_2	K_3	K_4
1-π2	6.500	110.000	330.000	280		Π2	6.674	109.998	349.452	280
2-π2	6.850	130.000	360.000	250	$\uparrow L_1, \uparrow L_2, \uparrow L_3, \downarrow L_4$	Π2	6.897	129.992	362.190	245
3-π2	6.900	140.000	355.000	250	$\uparrow L_1, \uparrow L_2, \downarrow L_3$	Π2	6.928	139.957	361.094	250
4-π3	6.850	130.000	360.000	240	$\uparrow L_1, \uparrow L_2, \uparrow L_3, \downarrow L_4$	Π3	6.887	129.992	364.071	225
5-π3	6.900	140.000	355.000	250	$\uparrow L_1, \uparrow L_2, \downarrow L_3, \uparrow L_4$	Π3	6.900	133.939	365.148	245
6-π6	6.850	130.000	360.000	280	$\uparrow L_1, \uparrow L_2, \uparrow L_3$	Π6	6.876	129.993	365.082	220
7-π6	6.900	140.000	355.000	225	$\uparrow L_1, \uparrow L_2, \uparrow L_3, \downarrow L_4$	Π6	6.902	138.760	365.440	225

Πίνακας 5. 23 Αποτελέσματα διαδικασίας (ικανές λύσεις) ανά κύκλο της μεθόδου συνέργειας των ΜΙΣ, ΜΟΚ

Ενδεικτικά, ο ακόλουθος πίνακας υποδεικνύει την βαθμολογία απόδοσης κάθε προκύπτουσας λύσης βάσει σχετικής κατάταξης που έχει για κάθε κριτήριο.

	K_1		K_2		K_3		K_4		
Ικανή Λύση κύκλου q	*Ιδεατή Λύση = 6928*	*Βαθ/γία σχετικής κατάταξης**	*Ιδεατή Λύση = 48106*	*Βαθ/γία σχετικής κατάταξης*	*Ιδεατή Λύση = 377.245*	*Βαθ/γία σχετικής κατάταξης*	*Ιδεατή Λύση = 190*	*Βαθ/γία σχετικής κατάταξης*	*Βαθμολογία*
1	6.674	1	109.998	7	349.452	1	280	1	10
2	6.897	4	129.992	5	362.190	3	245	4	16
3	6.928	7	139.957	1	361.094	2	250	2	12
4	6.887	3	129.992	6	364.071	4	225	6	19
5	6.900	5	133.939	3	365.148	6	245	3	17
6	6.876	2	129.993	4	365.082	5	220	7	18
7	6.902	6	138.760	2	365.440	7	225	5	20

** 7: πλησιέστερο, 1: πιο μακρινό*

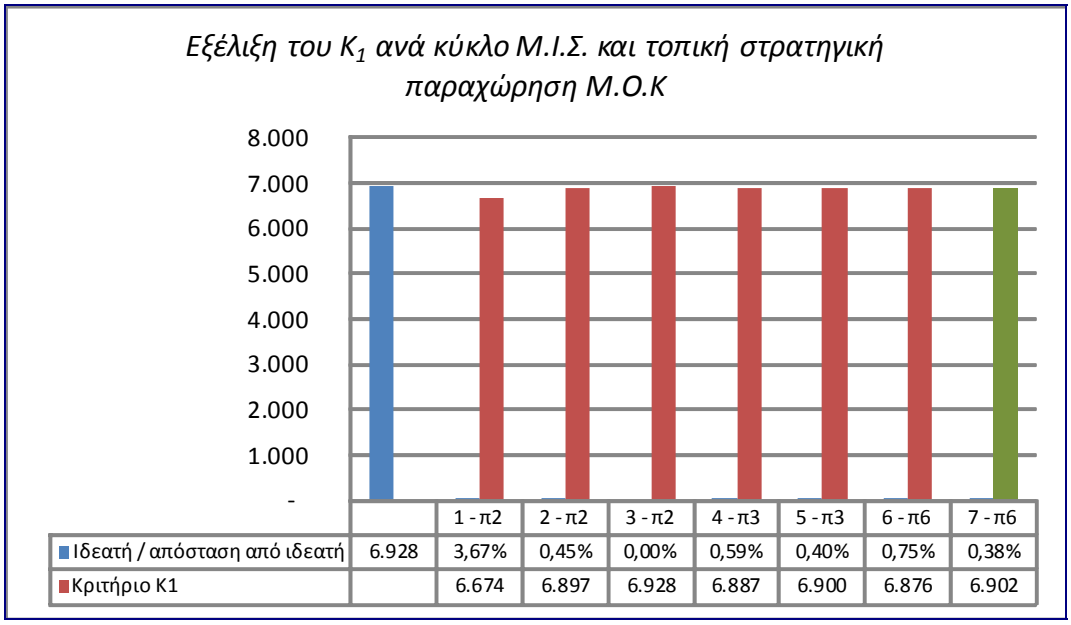
Πίνακας 5. 24 Κατάταξη λύσεων της μεθόδου συνέργειας των ΜΙΣ, ΜΟΚ αναφορικά με κάθε κριτήριο

Σε κάθε περίπτωση, ο αποφασίζων λαμβάνοντας και τις αναλύσεις αυτές υπόψιν, επιλέγει εμπειρικά και σταματάει στην λύση που τον ικανοποιεί περισσότερο. Το

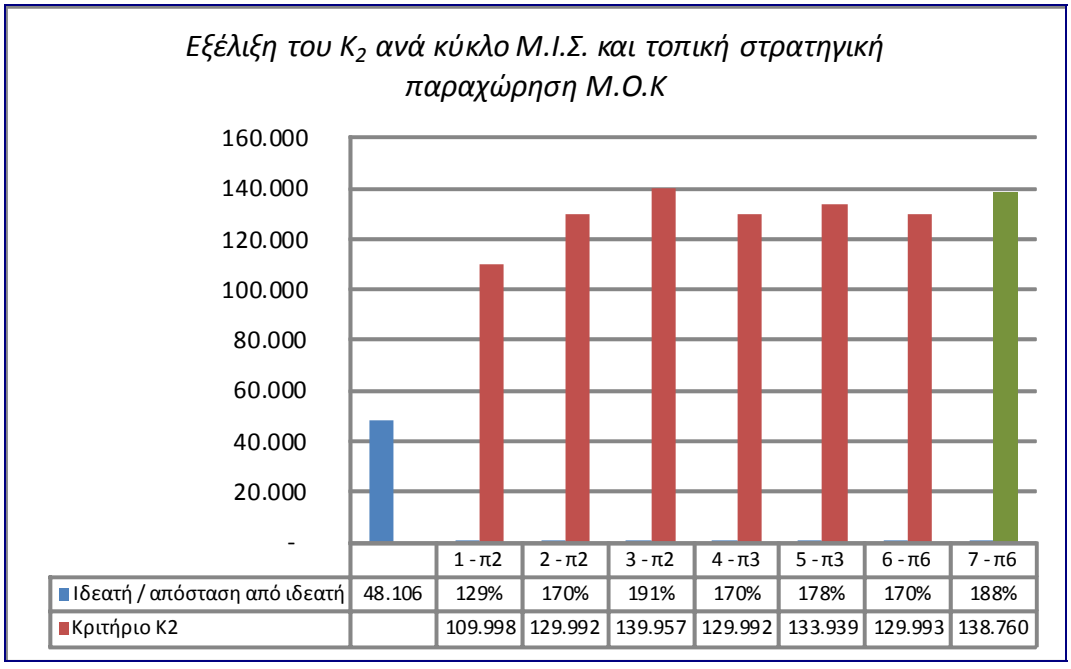
πέρας της διαδικασίας ορίστηκε από τον αποφασίζοντα με υπόδειξη ικανοποίησης του από την λύση που είχε τελικά προκύψει στον κύκλο 7. Η επιλεχθείσα λύση ήταν η:

Κριτήριο K_1	Κριτήριο K_2	Κριτήριο K_3	Κριτήριο K_4
6.902	138.760	365.440	225

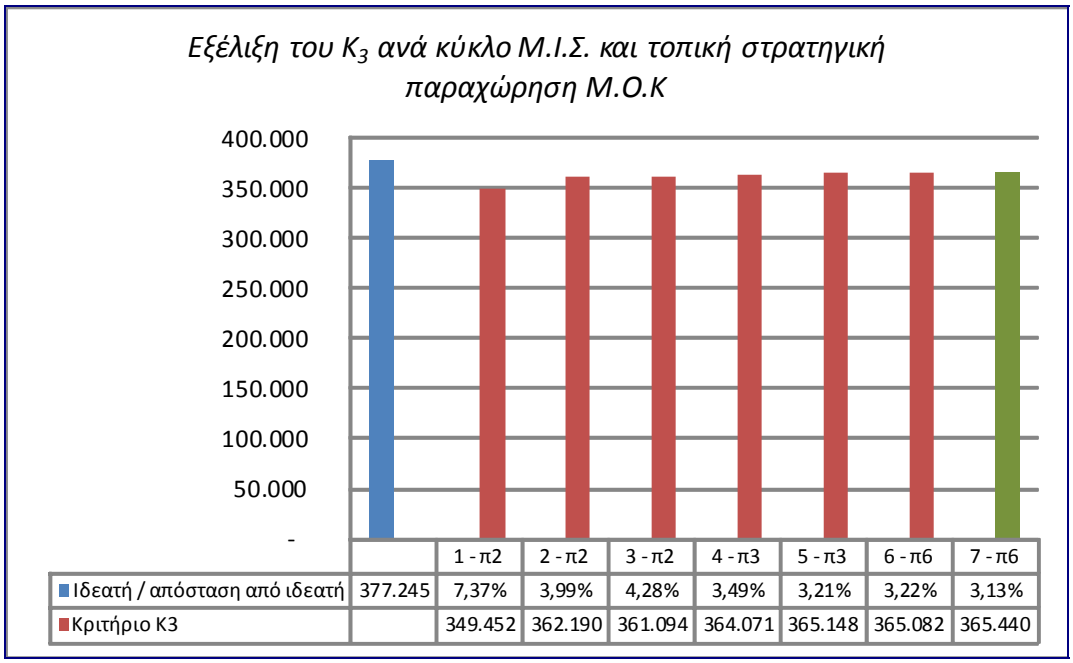
Τα παρακάτω γραφήματα δείχνουν την εξέλιξη της τιμής του κάθε κριτηρίου σε κάθε επαναληπτικό κύκλο της προτεινόμενης μεθόδου.



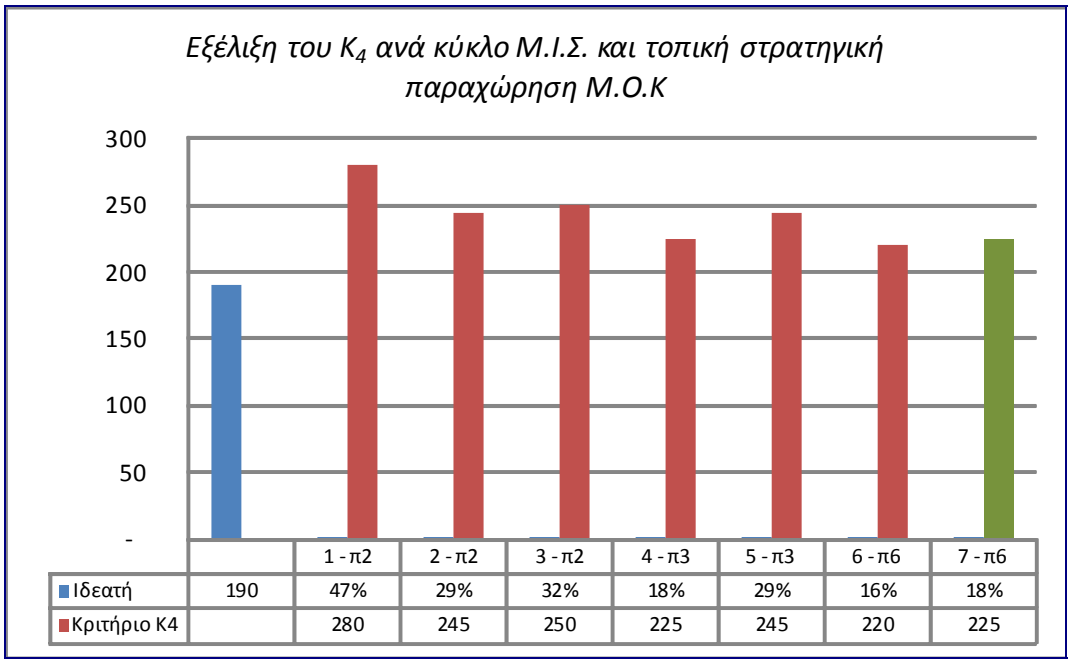
Σχήμα 5. 19 Εξέλιξη κριτηρίου Κ1 ανά κύκλο Μ.Ι.Σ. και τοπική στρατηγική παραχώρησης Μ.Ο.Κ.



Σχήμα 5. 20 Εξέλιξη κριτηρίου Κ2 ανά κύκλο Μ.Ι.Σ. και τοπική στρατηγική παραχώρησης Μ.Ο.Κ.



Σχήμα 5. 21 Εξέλιξη κριτηρίου Κ3 ανά κύκλο Μ.Ι.Σ. και τοπική στρατηγική παραχώρησης Μ.Ο.Κ.



Σχήμα 5. 22 Εξέλιξη κριτηρίου Κ4 ανά κύκλο Μ.Ι.Σ. και τοπική στρατηγική παραχώρησης Μ.Ο.Κ.

Η παραπάνω διαδικασία έτρεξε σε περιβάλλον GAMS, σε υπολογιστή με επεξεργαστή intel Core i5, CPU M450 @ 2,4GHz, 4GBRAM.

Φάση Μεθόδου	Απαιτούμενος χρόνος
Προετοιμασία Μοντέλου	1’
Ενημέρωση και διάλογοι Αποφασίζοντα	1’ x 7 = 7` (ελάχιστος – ενδεικτικός χρόνος, εξαρτάται από την ετοιμότητα του αποφασίζοντος)
Υπολογισμοί q_1	12’’
Υπολογισμοί q_2	43’’
Υπολογισμοί q_3	38’’
Υπολογισμοί q_4	1,31’’
Υπολογισμοί q_5	28’’
Υπολογισμοί q_6	21’’
Υπολογισμοί q_7	49’’
Συνολικός Χρόνος Διαδικασίας	***11’ 42***

Ο αποφασίζων επιβεβαίωσε στο τέλος της διαδικασίας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που επισημαίνονται στην παράγραφο 4.4.5.

5.4.5 Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης πρωτότυπης μεθόδου συνέργειας (Ι.Σ. – Ο.Κ.) συγκριτικά με τα αποτελέσματα που επετεύχθησαν ακολουθώντας τις απλές προσεγγίσεις:

- Λεξικογραφικής βελτιστοποίησης (ΛΕΞ/ΚΗ)
- Ολικού Κριτηρίου (Ο.Κ)
- Ικανοποιητικών Στόχων (Ι.Σ.)

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις λύσεις που προέκυψαν από κάθε μέθοδο:

		K_1	K_2	K_3	K_4
α/α	Λύση - μέθοδος	*Ιδεατή Λύση = 6928*	*Ιδεατή Λύση = 48106*	*Ιδεατή Λύση = 377.245*	*Ιδεατή Λύση = 190*
1	ΛΕΞ/ΚΗ1	6.928	129.625	357.241	550
2	ΛΕΞ/ΚΗ2	4.058	48.106	233.713	886
3	ΛΕΞ/ΚΗ3	6.897	246.918	377.245	2.239
4	ΛΕΞ/ΚΗ4	5.762	114.800	231.884	190
5	Ο.Κ.1	6.897	151.408	372.443	427
6	Ο.Κ.2	6.928	147.232	367.613	398
7	Ο.Κ.3	6.897	128.797	369.235	304
8	Ο.Κ.4	6.897	123.400	367.879	357
9	Ο.Κ.5	6.896	151.518	372.463	425
10	Ο.Κ.6	6.250	139.254	377.113	205
11	Ι.Σ.1	6.928	139.963	355.705	250
12	Ι.Σ.2	6.897	129.981	340.029	250
13	Ι.Σ.3	6.800	114.345	360.021	250
14	Ι.Σ.4	6.928	131.648	353.936	250
15	Ι.Σ.5	6.888	139.998	371.130	500
16	Ι.Σ.6	6.897	139.959	370.870	350
17	Ι.Σ.7	6.876	129.998	369.445	300
18	Ι.Σ.8	6.850	129.984	367.734	250
19	Ι.Σ.9	6.897	139.997	360.050	225
20	Ι.Σ.10	6.865	129.998	360.009	225
21	Ι.Σ.-Ο.Κ.1	6.674	109.998	349.452	280
22	Ι.Σ.-Ο.Κ.2	6.897	129.992	362.190	245
23	Ι.Σ.-Ο.Κ.3	6.928	139.957	361.094	250
24	Ι.Σ.-Ο.Κ.4	6.887	129.992	364.071	225
25	Ι.Σ.-Ο.Κ.5	6.900	133.939	365.148	245
26	Ι.Σ.-Ο.Κ.6	6.876	129.993	365.082	225
27	Ι.Σ.-Ο.Κ.7	6.902	138.760	365.440	225

Πίνακας 5. 25 Συγκεντρωτική παρουσίαση λύσεων ανά μέθοδο

Προκειμένου να υποστηρίξουμε περαιτέρω την απόδοση και την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους που δοκιμάστηκαν, αναλύονται περαιτέρω ποσοτικά χαρακτηριστικά κάθε λύσης ως προς:

- τις % αποστάσεις από τις ιδεατές λύσεις κάθε κριτηρίου
- την σχετική κατάταξη κάθε λύσης ως προς τα κριτήρια

Σε κάθε περίπτωση, η αποτελεσματικότητα και η επιτυχία της μεθόδου επιβεβαιώνεται ουσιαστικά από τον ίδιο τον αποφασίζοντα.

		K_1		K_2		K_3		K_4		**Σύνολο**	
α/α	**Λύση - μέθοδος**	*Σχετική κατάταξη**	*% απόσταση από ιδεατή*	*Σχετική κατάταξη**	*% απόσταση από ιδεατή*	*Σχετική κατάταξη**	*% απόσταση από ιδεατή*	*Σχετική κατάταξη**	*% απόσταση από ιδεατή*	*Βαθμολογία*	*Σ%αποστάσεων*
1	ΛΕΞ/ΚΗ1	27	0,0%	21	169,5%	7	5,3%	3	189,5%	58	364,2%
2	ΛΕΞ/ΚΗ2	1	41,4%	27	0,0%	2	38,0%	2	366,3%	32	445,8%
3	ΛΕΞ/ΚΗ3	20	0,4%	1	413,3%	27	0,0%	1	1078,4%	49	1492,1%
4	ΛΕΞ/ΚΗ4	2	16,8%	24	138,6%	1	38,5%	27	0,0%	54	194,0%
5	Ο.Κ.1	20	0,4%	3	214,7%	24	1,3%	5	124,7%	52	341,2%
6	Ο.Κ.2	27	0,0%	4	206,1%	17	2,6%	7	109,5%	55	318,1%
7	Ο.Κ.3	20	0,4%	22	167,7%	20	2,1%	10	60,0%	72	230,3%
8	Ο.Κ.4	20	0,4%	23	156,5%	19	2,5%	8	87,9%	70	247,3%
9	Ο.Κ.5	12	0,5%	2	215,0%	25	1,3%	6	123,7%	45	340,4%
10	Ο.Κ.6	3	9,8%	10	189,5%	26	0,0%	26	7,9%	65	207,2%
11	Ι.Σ.1	27	0,0%	7	190,9%	6	5,7%	18	31,6%	58	228,2%
12	Ι.Σ.2	20	0,4%	20	170,2%	3	9,9%	18	31,6%	61	212,1%
13	Ι.Σ.3	5	1,8%	25	137,7%	9	4,6%	18	31,6%	57	175,7%
14	Ι.Σ.4	27	0,0%	13	173,7%	5	6,2%	18	31,6%	63	211,4%
15	Ι.Σ.5	11	0,6%	5	191,0%	23	1,6%	4	163,2%	43	356,4%
16	Ι.Σ.6	20	0,4%	8	190,9%	22	1,7%	9	84,2%	59	277,3%
17	Ι.Σ.7	9	0,8%	15	170,2%	21	2,1%	11	57,9%	56	230,9%
18	Ι.Σ.8	6	1,1%	19	170,2%	18	2,5%	18	31,6%	61	205,4%
19	Ι.Σ.9	20	0,4%	6	191,0%	10	4,6%	25	18,4%	61	214,4%
20	Ι.Σ.10	7	0,9%	14	170,2%	8	4,6%	25	18,4%	54	194,1%
21	Ι.Σ.-Ο.Κ.1	4	3,7%	26	128,7%	4	7,4%	12	47,4%	46	187,1%
22	Ι.Σ.-Ο.Κ.2	20	0,4%	17	170,2%	12	4,0%	20	28,9%	69	203,6%
23	Ι.Σ.-Ο.Κ.3	27	0,0%	9	190,9%	11	4,3%	18	31,6%	65	226,8%
24	Ι.Σ.-Ο.Κ.4	10	0,6%	18	170,2%	13	3,5%	25	18,4%	66	192,7%
25	Ι.Σ.-Ο.Κ.5	21	0,4%	12	178,4%	15	3,2%	20	28,9%	68	211,0%
26	Ι.Σ.-Ο.Κ.6	9	0,8%	16	170,2%	14	3,2%	25	18,4%	64	192,6%
27	Ι.Σ.-Ο.Κ.7	22	0,4%	11	188,4%	16	3,1%	25	18,4%	74	210,4%

Πίνακας 5. 26 Συγκριτική σχετική κατάταξη λύσεων – α’

		Κ1		Κ2		Κ3		Κ4		Σύνολο	
α/α	**Λύση - μέθοδος**	*Σχετική κατάταξη**	*% απόσταση από ιδεατή*	*Σχετική κατάταξη**	*% απόσταση από ιδεατή*	*Σχετική κατάταξη**	*% απόσταση από ιδεατή*	*Σχετική κατάταξη**	*% απόσταση από ιδεατή*	*Βαθμολογία*	*Σ%αποστάσεων*
27	Ι.Σ.-Ο.Κ.7	22	0,4%	11	188,4%	16	3,1%	25	18,4%	74	210,4%
7	Ο.Κ.3	20	0,4%	22	167,7%	20	2,1%	10	60,0%	72	230,3%
8	Ο.Κ.4	20	0,4%	23	156,5%	19	2,5%	8	87,9%	70	247,3%
22	Ι.Σ.-Ο.Κ.2	20	0,4%	17	170,2%	12	4,0%	20	28,9%	69	203,6%
25	Ι.Σ.-Ο.Κ.5	21	0,4%	12	178,4%	15	3,2%	20	28,9%	68	211,0%
24	Ι.Σ.-Ο.Κ.4	10	0,6%	18	170,2%	13	3,5%	25	18,4%	66	192,7%
10	Ο.Κ.6	3	9,8%	10	189,5%	26	0,0%	26	7,9%	65	207,2%
23	Ι.Σ.-Ο.Κ.3	27	0,0%	9	190,9%	11	4,3%	18	31,6%	65	226,8%
26	Ι.Σ.-Ο.Κ.6	9	0,8%	16	170,2%	14	3,2%	25	18,4%	64	192,6%
14	Ι.Σ.4	27	0,0%	13	173,7%	5	6,2%	18	31,6%	63	211,4%
12	Ι.Σ.2	20	0,4%	20	170,2%	3	9,9%	18	31,6%	61	212,1%
18	Ι.Σ.8	6	1,1%	19	170,2%	18	2,5%	18	31,6%	61	205,4%
19	Ι.Σ.9	20	0,4%	6	191,0%	10	4,6%	25	18,4%	61	214,4%
16	Ι.Σ.6	20	0,4%	8	190,9%	22	1,7%	9	84,2%	59	277,3%
1	ΛΕΞ/ΚΗ1	27	0,0%	21	169,5%	7	5,3%	3	189,5%	58	364,2%
11	Ι.Σ.1	27	0,0%	7	190,9%	6	5,7%	18	31,6%	58	228,2%
13	Ι.Σ.3	5	1,8%	25	137,7%	9	4,6%	18	31,6%	57	175,7%
17	Ι.Σ.7	9	0,8%	15	170,2%	21	2,1%	11	57,9%	56	230,9%
6	Ο.Κ.2	27	0,0%	4	206,1%	17	2,6%	7	109,5%	55	318,1%
4	ΛΕΞ/ΚΗ4	2	16,8%	24	138,6%	1	38,5%	27	0,0%	54	194,0%
20	Ι.Σ.10	7	0,9%	14	170,2%	8	4,6%	25	18,4%	54	194,1%
5	Ο.Κ.1	20	0,4%	3	214,7%	24	1,3%	5	124,7%	52	341,2%
3	ΛΕΞ/ΚΗ3	20	0,4%	1	413,3%	27	0,0%	1	1078,4%	49	1492,1%
21	Ι.Σ.-Ο.Κ.1	4	3,7%	26	128,7%	4	7,4%	12	47,4%	46	187,1%
9	Ο.Κ.5	12	0,5%	2	215,0%	25	1,3%	6	123,7%	45	340,4%
15	Ι.Σ.5	11	0,6%	5	191,0%	23	1,6%	4	163,2%	43	356,4%
2	ΛΕΞ/ΚΗ2	1	41,4%	27	0,0%	2	38,0%	2	366,3%	32	445,8%

Πίνακας 5. 27 Συγκριτική σχετική κατάταξη λύσεων – β’

Στον παραπάνω πίνακα επισημαίνεται η σχετική κατάταξη κάθε λύσης ως προς τα τέσσερα κριτήρια και στην συνέχεια ταξινομούνται οι λύσεις ως προς το σύνολο της βαθμολογίας που έχουν συγκεντρώσει (αθροίσει). Παρατηρούμε ότι στις 9 πρώτες θέσεις της κατάταξης βρίσκονται οι 6 από τις 7 ικανές λύσεις της πρωτότυπης μεθόδου ενώ την πρώτη θέση κατέχει η λύση που επελέγη και τερμάτισε την διαδικασία περαιτέρω αναζήτησης. Επιπλέον, στον πίνακα επισημαίνονται για κάθε

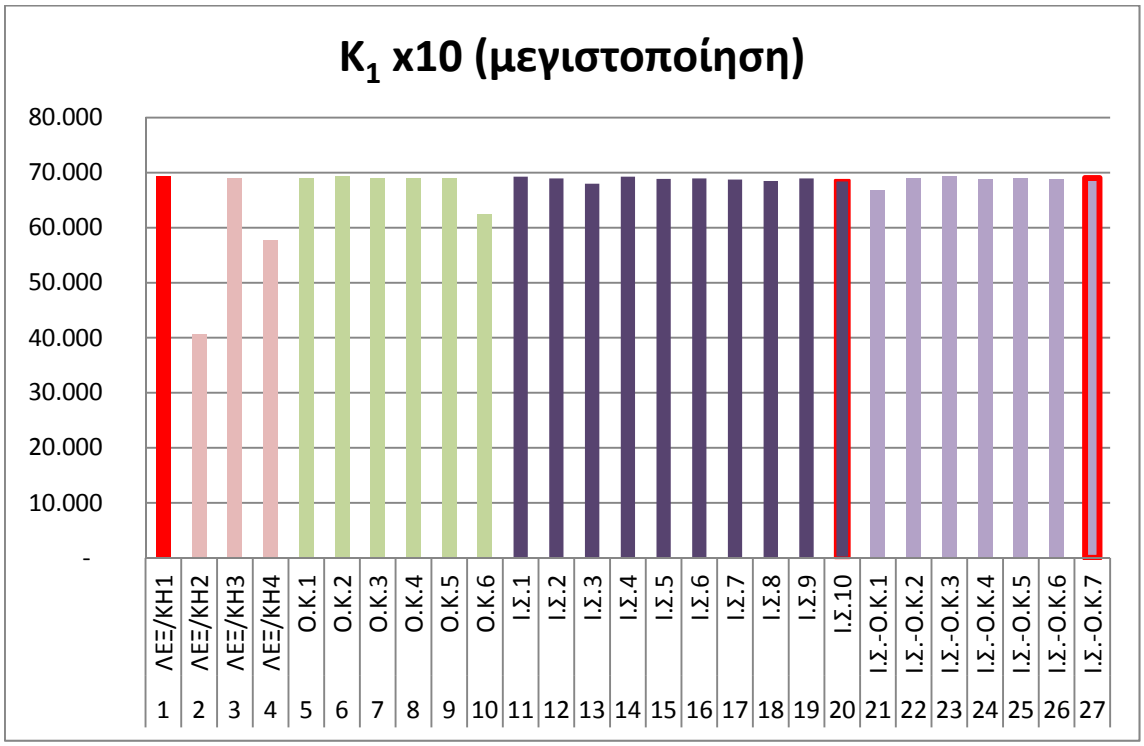
προσέγγιση οι επιλεχθείσες από το αποφασίζοντα λύσεις προκειμένου να γίνει αντιληπτή η θέση τους στην κατάταξη.

Παρατηρούμε ότι, μετά από την λεξικογραφική βελτιστοποίηση, οι λύσεις Ο.Κ. έχουν συστηματικά -και αναμενόμενα- μεγάλο (αθροιστικά) σύνολο αποστάσεων από τις ιδεατές τιμές, καθώς όπως επισημάνθηκε ήδη στα μειονεκτήματα, η μέθοδος ευνοεί, και σε καμία περίπτωση δεν αποκλείει, την παραγωγή ακραία βέλτιστων λύσεων.

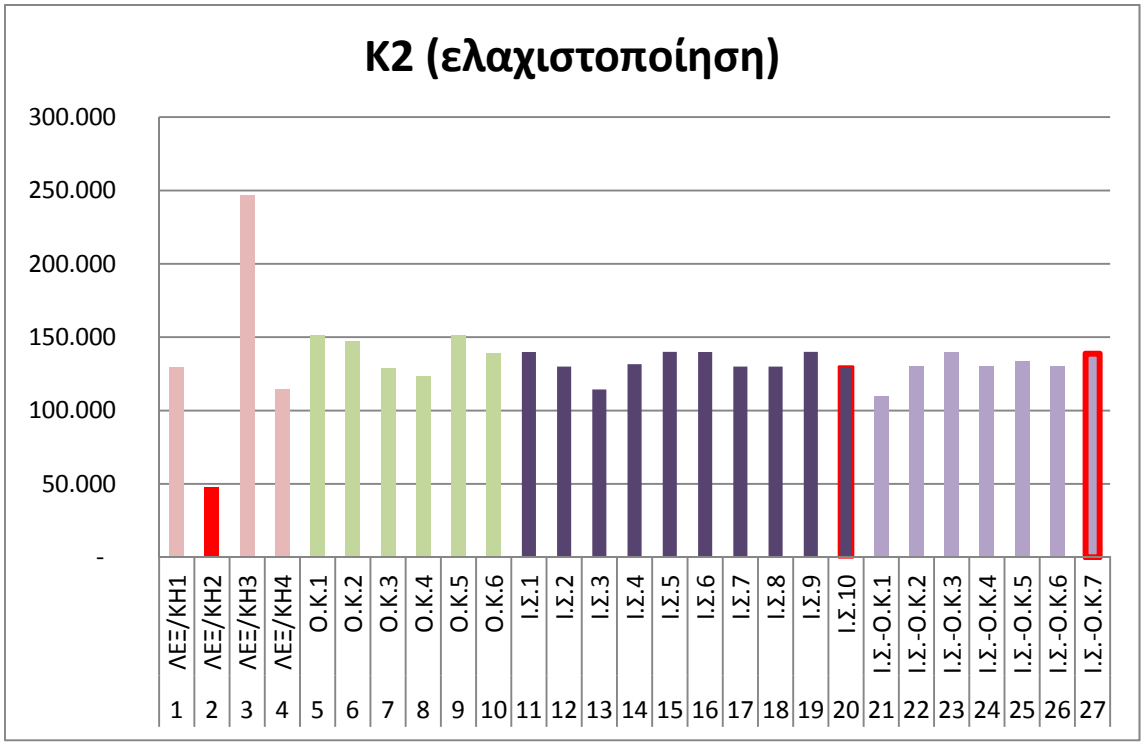
Από την άλλη, η μέθοδος ικανοποιητικών στόχων παρουσιάζει μέτρια συμπεριφορά και επιβεβαιώνει την φιλοσοφία της για επίτευξη απλά ικανοποιητικών λύσεων. Οι λύσεις που προέκυψαν δεν είναι επιβεβαιωμένα ικανές. Μάλιστα, προκύπτει ήδη από τις λύσεις που έχουν συγκεντρωθεί, ότι τρεις λύσεις της μεθόδου Ι.Σ. κυριαρχούνται από άλλες λύσεις. Σημειώνεται, και επισημαίνεται ότι η επιλεγείσα από τον αποφασίζοντα λύση Ι.Σ. 10 βρίσκεται στις τελευταίες θέσεις της κατάταξης, γεγονός που αφενός αποτελεί σχετική έκπληξη, αφετέρου θεωρούμε ότι αποτελεί μια ένδειξη της σύγχυσης που δημιουργεί η μέθοδος στην συγκεκριμένη περίπτωση μεγάλης κλίμακας προβλημάτων, αναφορικά με την αξιολόγηση της σχετικής ποιότητας των λύσεων που επιτυγχάνεται, το μεγάλο βάρος που ‘πέφτει’ στον αποφασίζοντα για την αποκλειστικά καθοδηγούμενη στρατηγική αναζήτησης ικανοποιητικών αλλά πιθανότατα όχι ικανών λύσεων και τέλος το άγχος για τον τερματισμό της διαδικασίας θεωρώντας ως σημαντική παράμετρο και τον απαιτούμενο χρόνο που απαιτείται για την συνέχιση της διαδικασίας πέραν των 11 κύκλων που ήδη εκτελέστηκαν.

Με την απλή αυτή ανάλυση (εκ των υστέρων) επιβεβαιώνεται ότι η μέθοδος συνέργειας παράγει συστηματικά, μεθοδικά και άμεσα ικανοποιητικές ικανές λύσεις στην περίπτωση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού παραγωγής που αντιμετωπίστηκε.

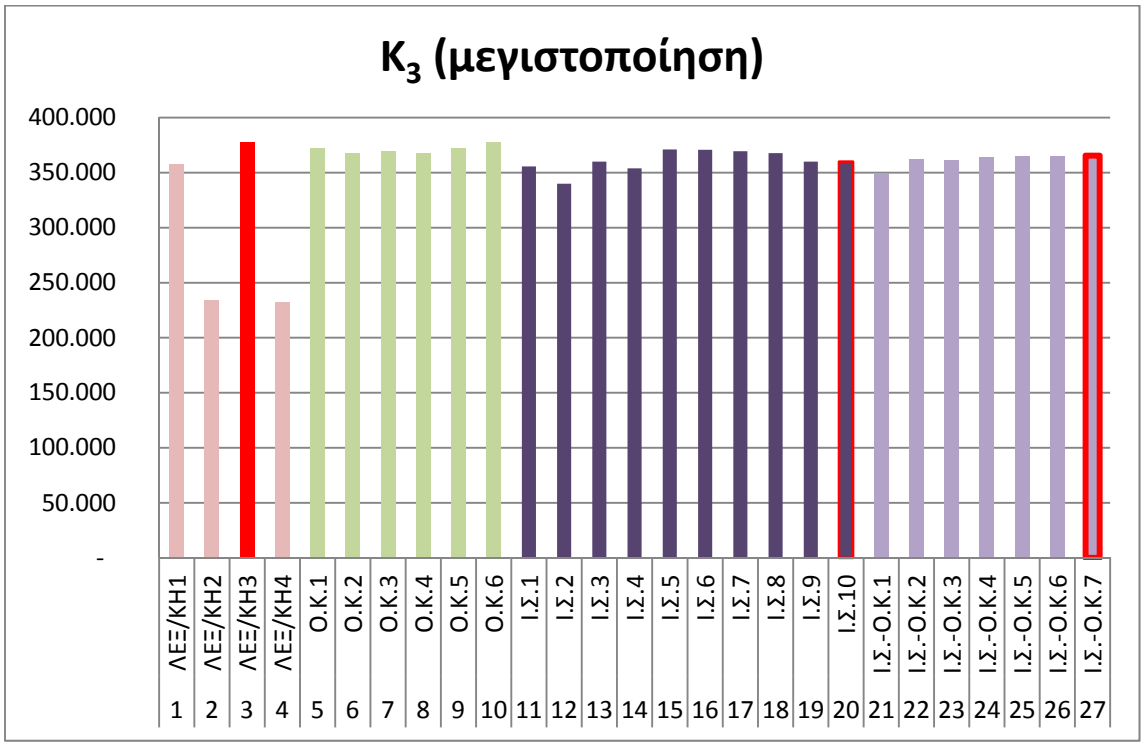
Τα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζουν την απόδοση των λύσεων κάθε μεθόδου αναφορικά με τα τέσσερα κριτήρια του προβλήματος.



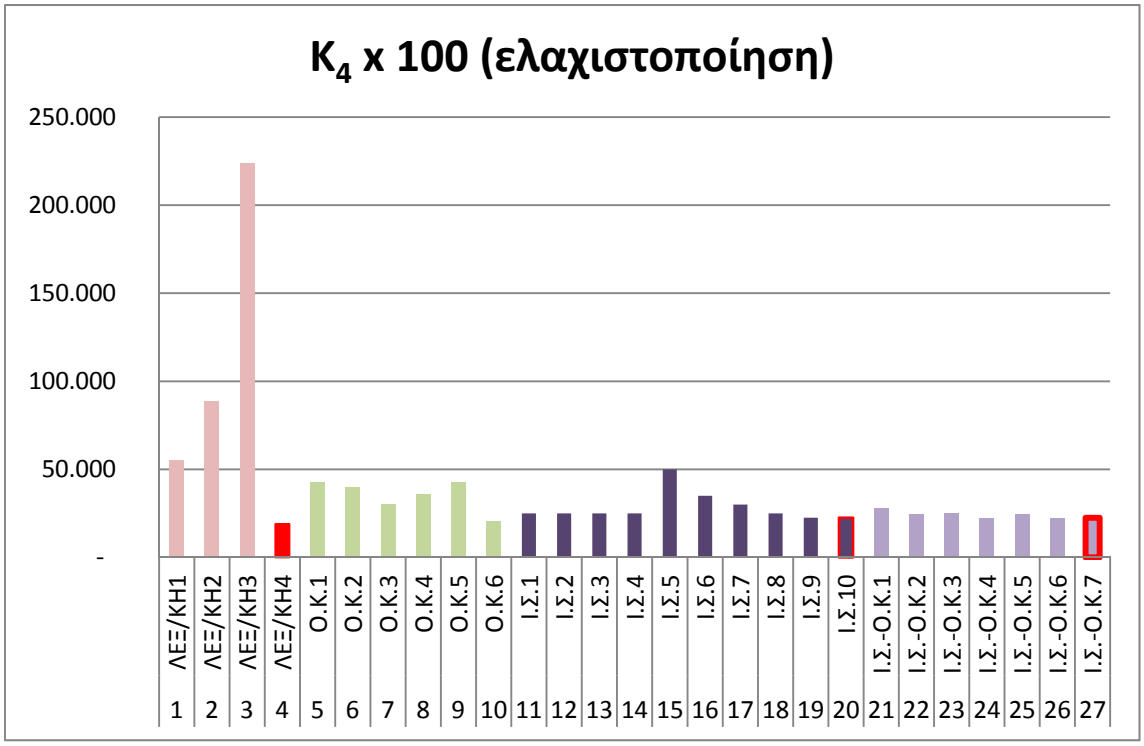
Σχήμα 5. 23 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων κριτηρίου K_1



Σχήμα 5. 24 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων κριτηρίου K_2



Σχήμα 5. 25 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων κριτηρίου K_3



Σχήμα 5. 26 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων κριτηρίου K_4

5.5 Αξιολόγηση του μεθοδολογικού πλαισίου

Στην ενότητα αυτή, συνοψίζονται οι παρατηρήσεις, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μοντελοποίησης και των μεθοδολογιών που προτείνονται στην παρούσα διατριβή τόσο για το δικριτηριακό, όσο και για το πολυκριτηριακό σενάριο. Τα στοιχεία αυτά της ποιότητας σχετίζονται με:

- Την προτεινόμενη ανάλυση του προβλήματος
- Την προτεινόμενη μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος
- Το προτεινόμενο μοντέλο εμπλοκής/συμμετοχής του αποφασίζοντος
- Τις λύσεις – αποτελέσματα στον χώρο των κριτηρίων
- Το υπολογιστικό κόστος

Δεδομένου ότι η συγκεκριμένη μοντελοποίηση αφορά στην ειδική τυπολογία προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου, για την οποία δεν καταγράφονται,-εξ’ όσων γνωρίζουμε, σχετικές πολυκριτηριακές προσεγγίσεις και η εφαρμογή έγινε –σκοπούμενα- σε πραγματικό σενάριο, δεν γίνεται σύγκριση με άλλες ερευνητικές υλοποιήσεις σε διεθνή προβλήματα αναφοράς (benchmark) προβλήματα χρονοπρογραμματισμού. Τα τελευταία είναι κατάλληλα μόνο για σύγκριση απόδοσης αλγορίθμων βελτιστοποίησης κάτι το οποίο δεν αποτελεί κύριο στόχο της διατριβής. Επιπλέον, τα συγκεκριμένα προβλήματα είναι απλοποιημένα ως προς το σκέλος της μοντελοποίησης και δεν αναφέρονται σε περιορισμούς και κριτήρια που περιλαμβάνονται στο πρόβλημα που πραγματεύεται η διατριβή.

Η σύγκριση/αξιολόγηση γίνεται επί της υλοποίησης των εναλλακτικών πολυκριτηριακών προσεγγίσεων στο ίδιο πρόβλημα, οι οποίες δοκιμάστηκαν και παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του μεθοδολογικού πλαισίου, πέρα από την καταγραφή των αντικειμενικών χαρακτηριστικών που αποτυπώνει ο αναλυτής (η ερευνήτρια της διατριβής), ακολουθήθηκε ένα ακόμα διαλογικό επεισόδιο με τον αποφασίζοντα προκειμένου να αποτυπωθεί η αντίληψή του και η βαθμολογία του ως προς τα στοιχεία/χαρακτηριστικά που τον αφορούν.

ΜΕ τον τρόπο αυτό, επιδιώκεται να αναδειχθούν περαιτέρω τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της μοντελοποίησης και των πρωτότυπων μεθοδολογιών που προτείνει η διατριβή.

Αναγνωρίζονται ως σημαντικά κριτήρια για την αξιολόγηση του μεθοδολογικού πλαισίου επίλυσης πραγματικών μεγάλης κλίμακας προβλημάτων στον τομέα του χρονοπρογραμματισμού σε γραμμές συναρμολόγησης τα ακόλουθα:

- Pareto αποτελεσματικότητα λύσεων
- Συμβιβαστικότητα λύσεων, αναφορικά με τον (άμεσο ή έμμεσα υπονοημένο) συσχετισμό των κριτηρίων
- Κάλυψη μετώπου Pareto
- Αποκλειστική κάλυψη ενδιαφερουσών περιοχών μετώπου
- Υπολογιστικός φόρτος/χρόνος
- Ποσότητα/ποιότητα πληροφορίας από αποφασίζοντα
- Έλεγχος αποφασίζοντα
- Ευκολία επιλογής λύσης, τερματισμού
- Συνολική Ικανοποίηση αποφασίζοντα

Ο ακόλουθος πίνακας αναδεικνύει τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας έναντι των αντιπροσωπευτικών πολυκριτηριακών προσεγγίσεων, ως προς τα σημαντικά κριτήρια ποιότητας, ήτοι τα:

Η βαθμολογία έγινε από [0..5], με *0: χείριστη/πλήρως ανεπαρκής* και *5: άριστη* συμπεριφορά..

	Δικριτηριακή Μεθοδολογία			Πολυκριτηριακή Μεθοδολογία		
Κριτήριο	**Μέθοδος Περιορισμών**	**Μέθοδος Augmecon**	**Μέθοδος Interactive Augmecon**	**Μέθοδος Ο.Κριτηρίου**	**Μέθοδος Ικαν. Στόχων**	**Μέθοδος Συνέργειας**
Αποτελεσματικότητα Λύσεων	2 Μη εγγυημένη	5 Εγγυημένη	5 Εγγυημένη	5 Εγγυημένη	0 Μη Εγγυημένη	5 Εγγυημένη
Συμβιβαστικότητα Λύσεων	3 Έμμεση από επιλογή αποφασίζοντα από σύνολο λύσεων	4 Έμμεση από επιλογή αποφασίζοντα από Pareto λύσεις	4 Έμμεση από επιλογή αποφασίζοντα από Pareto λύσεις	3 Άμεσος, Πιθανά ακραία λύση συμβιβασμού	1 Έμμεσος, μέσω ορισμού επιπέδων ικανοποίησης	5 Άμεσος
Κάλυψη μετώπου Pareto	1 Αντιπροσ/κή, Μη εγγυημένη σωστή κάλυψη μετώπου	5 Αντιπροσ/κή	3 Αντιπροσ/κή	1 Σημειακή (πιθανότατα ακραία)	0 Δεν προβλέπεται	2 Μη Αντιπροσ/κή Κάλυψη
Αποκλειστική Κάλυψη Ενδιαφ/σών περιοχών μετώπου	0 Πλήρης κάλυψη, ανεξαρτήτως ενδιαφέροντος περιοχής	0 Πλήρης κάλυψη, ανεξαρτήτως ενδιαφέροντος περιοχής	5 Προοδευτική Εστίαση μόνο σε περιοχές ενδιαφέροντος	0 Δεν προβλέπεται	0 Δεν προβλέπεται	2 Μη Αντιπροσ/κή Κάλυψη
Υπολογιστικός Φόρτος/Χρόνος	1 Ανεπίτρεπτος για μεγάλα προβλήματα	2 Ανεπίτρεπτος για μεγάλα προβλήματα	3 Ικανοποιητικός	5 Πολύ καλός: ένας κύκλος βελτιστοποίησης	3 Μη ικανοποιητικός. Κύκλοι βελτιστ/σης χωρίς σαφές όριο τερ/σμού	4 Ικανοποιητικός
Ποσότητα/Ποιότητα Πληροφορίας από αποφασίζοντα	5 Μικρή και σαφής είσοδος	5 Μικρή και σαφής είσοδος	4 Μικρή και σαφής είσοδος	1 Μικρή /με πολλές παραδοχές	3 Διαρκής, εμπειρική καθοδήγηση	3 Διαρκής εμπειρική καθοδήγηση
Έλεγχος αποφασίζοντα	3 Μόνο στην επιλογή λύσης και στην πυκνότητα σάρωσης	3 Μόνο στην επιλογή λύσης και στην πυκνότητα σάρωσης	5 Στην επιλογή λύσης και στην πυκνότητα σά-ρωσης, και την καθοδήγηση αναζήτησης	2 Μικρός αρχικός μόνο - μέσω Παραχωρήσεων	2 Διαρκής μέσω Επιπέδων	4 Διαρκής μέσω Επιπέδων και Παραχωρήσεων
Ευκολία επιλογής λύσης, τερματισμού	3 Επιλογή από πολλές λύσεις μη εγγυημένα ικανές Οπτικ/ση	4 Επιλογή από πολλές λύσεις εγγυημένα ικανές Οπτικ/ση	5 Επιλογή περιο-χών σάρωσης. Επιλογή από λιγότερες ικανές λύσεις. Οπτικ/ση	5 Δεν υπάρχει επιλογή. Μια λύση προκύπτει	2 Σύγχυση τερματισμού λόγω προσδ. περιθωρίων βελτίωσης (μη ικανή λύση)	4 Επιλογή κατόπιν διερεύνησης περιοχών ενδιαφέροντος
Συνολική Ικανοποίηση αποφασίζοντα	**1**	**3**	**4**	**1**	**3**	**4**

Πίνακας 5. 28 Σύνοψη συγκριτικών πλεονεκτημάτων προτεινόμενων μεθοδολογιών επίλυσης.

6

Συμπεράσματα και Προοπτικές

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και προοπτικές

- Γενικά
- Συμπεράσματα
- Προοπτικές – περαιτέρω ερευνητικές κατευθύνσεις

6.1 Γενικά

Αντικείμενο της διατριβής ήταν η πολυκριτηριακή μοντελοποίηση μεγάλης κλίμακας πολυστοχικών προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής και η πρόταση μεθοδολογίας επίλυσης τους με προσαρμογή και αξιοποίηση πολυκριτηριακών μεθόδων υποστήριξης αποφάσεων.

Η διατριβή εστίασε τόσο στο μαθηματικό-υπολογιστικό σκέλος (επισκόπηση και αξιοποίηση αλγορίθμων βελτιστοποίησης και πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού) όσο και στο μεθοδολογικό σκέλος, που αφορά στην εφαρμογή προσεγγίσεων σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού παραγωγής. Ως προς το τελευταίο, η έμφαση δίνεται σε ένα απαιτητικό πρόβλημα, ήτοι στο χρονοπρογραμματισμό παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου, με χρήση πολλαπλών κριτηρίων.

Η διατριβή αξιοποίησε και συνδύασε στην πρότασής της, μεθόδους και τεχνικές τόσο από το πεδίο της επιχειρησιακής έρευνας και του μαθηματικού προγραμματισμού όσο και από την περιοχή της πολυκριτηριακής υποστήριξης αποφάσεων, προκειμένου να απαντήσει αποτελεσματικά στις ερευνητικές προκλήσεις και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν τα πραγματικά προβλήματα του σχετικού βιομηχανικού πεδίου.

Η μεθοδολογία επίλυσης της επιλεγμένης τυπολογίας προβλημάτων αναπτύχθηκε και εξειδικεύθηκε σε δύο περιπτώσεις που εκφράζουν αντίστοιχα δύο διαφορετικά σενάρια του γενικευμένου προβλήματος: την περίπτωση του δικριτηριακού προβλήματος και την περίπτωση του πολυκριτήριου προβλήματος για τα οποία προτείνεται να ακολουθηθεί διαφορετική προσέγγιση.

Η Πρόταση που παρουσιάζεται αναφέρεται σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου. Όμως γίνεται σαφές στην εργασία ότι μπορεί να εφαρμοστεί -με κατάλληλες προσαρμογές- και σε διαφορετικά προβλήματα προγραμματισμού παραγωγής που αντιμετωπίζουν ερευνητικές προκλήσεις παρόμοιας φύσης.

Αρχικά στο Κεφάλαιο 2 ορίστηκε το περιβάλλον του προβλήματος που πραγματεύεται η διδακτορική διατριβή και γίνεται επισκόπηση του σχετικού ερευνητικού πεδίου των τεχνικών βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα διαχείρισης παραγωγής. Στο πλαίσιο αυτό αναδείχτηκαν οι προκλήσεις του προβλήματος που δεν έχουν απαντηθεί επαρκώς από την ερευνητική κοινότητα και στις οποίες εστιάζει η συμβολή της παρούσας διατριβής.

Στην συνέχεια, παρουσιάστηκαν οι υπάρχουσες επιστημονικές προσεγγίσεις στο πεδίο προβλημάτων πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού και έγινε εισαγωγή στον τρόπο που επιδιώκει η πρόταση της Διατριβής να απαντήσει στα ερευνητικά κενά που έχουν αναδειχθεί, συνδυάζοντας και περαιτέρω αναπτύσσοντας τις κατάλληλες πολυκριτηριακές μεθόδους.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκε η πρόταση της διατριβής στο επίπεδο της μαθηματικής μοντελοποίησης του περιβάλλοντος χρονοπρογραμματισμού εργασιών παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου και στο επίπεδο διερεύνησης, προσαρμογής και ανάπτυξης πρωτότυπων μεθοδολογιών για την επίλυση πολυκριτηριακών σεναρίων αυτού.

Τέλος, παρουσιάστηκε η εφαρμογή της πρότασης της διατριβής στο «πραγματικών χαρακτηριστικών» παράδειγμα προβλήματος χρονοπρογραμματισμού εργασιών παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου. Παρουσιάζεται αναλυτικά το πρόβλημα και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, η μοντελοποίησή του, η ενδεικτική εφαρμογή κλασικών μεθόδων ΠΜΠ και δύο προτεινόμενων πρωτότυπων μεθοδολογιών για το δικριτηριακό και για το πολυκριτηριακό σενάριο αντίστοιχα. Αναλύονται για κάθε περίπτωση ο τρόπος εφαρμογής της μεθοδολογίας, τα αποτελέσματα εφαρμογής, καθώς και σχόλια τόσο επί της εφαρμογής όσο και επί των αποτελεσμάτων, ειδικά σε σύγκριση με την εφαρμογή υπαρχουσών μεθόδων στο ίδιο πρόβλημα, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα που επικυρώνουν την συμβολή της διατριβής.

6.2 Συμπεράσματα

Η αποτελεσματική πολυκριτηριακή προσέγγιση και επίλυση πραγματικών προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής σε γραμμές συναρμολόγησης φιλοσοφίας JIT, μικτού μοντέλου δύναται να προσφέρει ισορροπημένο συνδυασμό θετικών επιπτώσεων σε επίπεδα που αποτελούν στρατηγικές προτεραιότητες για μια επιχείρηση ειδικά την εποχή της οικονομικής κρίσης και του έντονου ανταγωνισμού:

- Οικονομικά οφέλη από την μείωση κόστους παραγωγής και αποθεματοποίησης,
- Οικονομικά οφέλη από την επίτευξη ακριβέστερων και καταλληλότερων συμφωνιών με τους προμηθευτές,
- Οικονομικά οφέλη από την μείωση οικονομικών ποινών (ρήτρες) που επιβάλλονται στην επιχείρηση
- Οφέλη εμπορικά από την μείωση των καθυστερήσεων και την βελτίωση της εμπορικής εικόνας της επιχείρησης
- Οφέλη εσωτερικά από την βελτίωση και ομαλοποίηση των σχέσεων εργασίας λόγω εξομάλυνσης απαιτούμενων εργασιακών πόρων, και έγκαιρης οργάνωσης αυτών

Μέχρι σήμερα, στις βιομηχανίες αυτών των παραγωγικών συστημάτων οι επιχειρήσεις ακολουθούσαν μια μονοδιάστατη προσέγγιση αξιολόγησης της ποιότητας για τον χρονοπρογραμματισμό των εργασιών παραγωγής. Στις καλύτερες περιπτώσεις ακολουθούσαν λεξικογραφική ιεράρχηση των πολλαπλών κριτηρίων ποιότητας ή συνάθροιση αυτών σε μια συνάρτηση εισάγοντας βάρη για κάθε κριτήριο.

Δείξαμε ότι η προσέγγιση αυτή είναι αρκετά απλοϊκή και αφήνει πολλά περιθώρια βελτίωσης των αποφάσεων στο πλαίσιο ισόρροπης θεώρησης των κριτηρίων κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης των πλάνων χρονοπρογραμματισμού παραγωγής.

Η θεώρηση των κριτηρίων πρέπει να γίνει με τρόπο που να σέβεται και τις υπόλοιπες ερευνητικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα πραγματικά προβλήματα αυτής της κατηγορίας, ήτοι: την μεγάλη διάσταση των προβλημάτων (όγκος δεδομένων), το πλήθος των περιορισμών που τα διέπουν, την απαίτηση για απόκτηση λύσης αποτελεσματικής (υπό την έννοια της Pareto κυριαρχίας) και ικανοποιητικής (υπό την έννοια ικανοποίησης της καθορισμένης ή υπονοούμενης προτιμησιακής στρατηγικής της εταιρείας) σε σύντομο χρονικό διάστημα, με χρονικά και υπολογιστικά αποδεκτό κόστος.

Δείξαμε ότι οι υπάρχουσες πολυκριτηριακές προσεγγίσεις μαθηματικού προγραμματισμού δεν καλύπτουν συνολικά τις απαιτήσεις αυτές. Όμως παρουσιάζουν συμπληρωματικά πλεονεκτήματα και χαρακτηριστικά τα οποία με κατάλληλη προσαρμογή των υπαρχουσών μεθόδων, μπορούν να επιφέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η διατριβή υποστηρίζει ότι η θεώρηση των κριτηρίων μπορεί να διενεργηθεί με συνέπεια και αποδοτικότητα συνδυάζοντας, αξιοποιώντας και επεκτείνοντας κατάλληλες τεχνικές πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού, μεθοδεύοντας παράλληλα την εμπλοκή του αποφασίζοντος σε καίρια στάδια της διαδικασίας αναζήτησης «βέλτιστων» λύσεων.

Η αλληλεπίδραση με τον αποφασίζοντα αποτελεί σημαντικό δομικό παράγοντα του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου. Για την συγκεκριμένη περίπτωση προβλημάτων οι πολυκριτηριακές μέθοδοι εκ–των-προτέρων εμπλοκής του αποφασίζοντος δεν ευνοούν την παραγωγή συμβιβαστικά αποτελεσματικής λύσης καθώς η πληροφορία του αποφασίζοντος δεν λαμβάνει υπόψιν στο ελάχιστο την μορφή των εφικτών λύσεων στον χώρο των κριτηρίων, ούτε και τις δυνατότητες συμβιβασμού μεταξύ των κριτηρίων. Από την άλλη, οι μέθοδοι εκ των υστέρων εμπλοκής του αποφασίζοντος δεν ευνοούν το υπολογιστικό τμήμα της ανάλυσης καθώς απαιτούν κατά κανόνα απαγορευτικό υπολογιστικό κόστος και χρόνο. Οι υπάρχουσες αλληλεπιδραστικές μέθοδοι ευνοούν την ικανοποίηση της καθορισμένης ή υπονοούμενης προτιμησιακής στρατηγικής, όμως δεν εγγυώνται την Pareto αποτελεσματικότητα των λύσεων και συχνά προκαλούν σύγχυση στον αποφασίζοντα ως προς τον τρόπο εμπλοκής του, τον ρόλο του κ.α.

Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο της διατριβής είναι έντονα αλληλεπιδραστικό καθώς θεωρούμε και δείχνουμε ότι η κατά στάδια εισαγωγή της εμπειρικής πληροφορίας /γνώσης του αποφασίζοντος στην διαδικασία αναζήτησης λύσης, αξιολογώντας σε κάθε φάση την κατάσταση και τις λύσεις που έχουν ήδη επιτευχθεί, καθοδηγεί αποτελεσματικά την διαδικασία αποκλειστικά σε περιοχές ενδιαφέροντος αποφεύγοντας την σπατάλη χρόνου σε περιοχές αμελητέου ενδιαφέροντος, ή μικρής προστιθέμενης αξίας και προοπτικής. Η γνώση του αποφασίζοντος μπορεί να αποτυπωθεί στο μοντέλο επίλυσης είτε με σαφή μαθηματικό τρόπο είτε με υπονοούμενο τρόπο μέσω δομημένου διαλόγου είτε συνδυαστικά στις περισσότερες περιπτώσεις.

Στο πλαίσιο αυτό, η διατριβή συμβάλλει στα ακόλουθα:

- Ανάπτυξη μαθηματικής μοντελοποίησης του πολυκριτηριακού μεγάλης κλίμακας προβλήματος χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου.

- Εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων – με μεθοδευμένη εμπλοκή του αποφασίζοντος- για την επίλυση του πολυκριτηριακού σεναρίου του προβλήματος.
- Πρωτότυπη Μεθοδολογία επίλυσης του δικριτηριακού σεναρίου του προβλήματος.
- Πρωτότυπη Μεθοδολογία επίλυσης του πολυκριτηριακού σεναρίου του προβλήματος.

Η συμβολή της διατριβής επιβεβαιώνεται με την εφαρμογή της Πρότασης – και στα τέσσερα επίπεδα-, σε συγκεκριμένο πρόβλημα με δεδομένα που προσομοιάζουν πραγματικές συνθήκες βιομηχανικού περιβάλλοντος, ως προς τις παραμέτρους λειτουργίας του παραγωγικού συστήματος, το μέγεθος/όγκο των δεδομένων, την κωδικοποίηση και την ποιότητα των δεδομένων, το προφίλ του αποφασίζοντος και την στρατηγική προτιμήσεων.

Η εφαρμογή της πρότασης της διατριβής αναδεικνύει και επιβεβαιώνει τα πλεονεκτήματα που συγκεντρώνει το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο. Συνοψίζουμε ακολούθως τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα της διατριβής σε κάθε ένα από τα επίπεδα συμβολής αυτής.

Μοντελοποίηση του προβλήματος

- Η πρόταση της διατριβής προτείνει και παρουσιάζει την μαθηματική μοντελοποίηση του γενικευμένου προβλήματος χρονικού προγραμματισμού εργασιών σε γραμμές συναρμολόγησης μικτού μοντέλου, ως ενός πολυκριτηριακού προβλήματος ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού.
- Επιλέγεται, επιδιώκεται και επιτυγχάνεται η αποτύπωση του προβλήματος σε ακέραιο γραμμικό μοντέλο, προκειμένου να μειωθεί κατά το δυνατόν η προσεγγιστικότητα των υπολογιστικών διεργασιών βελτιστοποίησης, στο βαθμό που το επιτρέπουν το μέγεθος του προβλήματος και η δυνατότητα του λύτη που χρησιμοποιείται. Η μοντελοποίηση σε αυτή την μορφή επιτρέπει την αξιοποίηση κατάλληλου λύτη από το πλήθος των λυτών μαθηματικού προγραμματισμού οι οποίοι κατά γενική παραδοχή ανταποκρίνονται άριστα και με ταχύτητα στην περίπτωση γραμμικών προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού, ακόμα και μεγάλης κλίμακας (ενδεικτικά CPLEX της ILOG).
- Η προτεινόμενη μοντελοποίηση επιτρέπει την κατ' επιλογήν συνδυαστική αξιοποίηση και εξελικτικών αλγορίθμων κατά τις υπολογιστικές φάσεις βελτιστοποίησης. Η βιβλιογραφία παρέχει πλήθος καλών επιλογών για την προσεγγιστική βελτιστοποίηση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού ενδ. (Μπότσικας, 2009). Θα απαιτούνταν βέβαια η κατάλληλη κωδικοποίηση των

λύσεων, με γνώμονα πάντα το ήδη προτεινόμενο μοντέλο για την συγκεκριμένη κατηγορία προβλημάτων.

Δικριτηριακή μεθοδολογία επίλυσης

- Ο στόχος που επιτυγχάνεται με την προτεινόμενη προσέγγιση είναι η μεγαλύτερη ενδυνάμωση του ρόλου του αποφασίζοντος στην διαμόρφωση της στρατηγικής αναζήτησης λύσεων, συγκριτικά με τις μεθόδους που συναντάμε στην βιβλιογραφία.
- Η πρωτότυπη μέθοδος συνδυάζει και προσαρμόζει αποτελεσματικές τεχνικές a-posteriori λήψης απόφασης (μεθόδους παραγωγής λύσεων), με τεχνικές αλληλεπίδρασης με τον αποφασίζοντα στα κατάλληλα στάδια της μεθοδολογίας, όπου απαιτείται η καθοδήγηση από τον αποφασίζοντα προκειμένου η στρατηγική περαιτέρω αναζήτησης να αντανακλά τις προτιμήσεις του, χωρίς – πολύ σημαντικό- να απαιτείται αυστηρή μαθηματική μοντελοποίηση αυτών.
- Η δυνατότητα οπτικοποίησης μέσω γραφικής παράστασης (σε δύο διαστάσεις) των ενδιάμεσων σταδίων και αποτελεσμάτων της διαδικασίας υποστηρίζει σημαντικά τον αποφασίζοντα στην λήψη αποφάσεων.
- Με την προτεινόμενη μεθοδολογία, εξασφαλίζεται η συνδυαστική αξιοποίηση πλεονεκτημάτων που συναντάμε στις μεθόδους a-posteriori λήψης απόφασης και στις αλληλεπιδραστικές μεθόδους, όσον αφορά σε:
    - **Την Pareto αποτελεσματικότητα των παραγόμενων λύσεων**, άρα και της τελικά επιλεγόμενης λύσης: Η προτεινόμενη μεθοδολογία παράγει Pareto βέλτιστες λύσεις
    - **Ικανοποίηση του αποφασίζοντος, ως προς τον αποδιδόμενο έλεγχο:** Η προτεινόμενη μεθοδολογία θεωρούμε ότι αποτελεί ένα εργαλείο υποστήριξης του αποφασίζοντος στην διερεύνηση και σταδιακή χαρτογράφηση του Pareto μετώπου των λύσεων. Η ικανοποίηση του αποφασίζοντος εξασφαλίζεται με την απόδοση σε αυτόν του βαθμού ελευθερίας, ευελιξίας και ελέγχου που ίδιος επιθυμεί να αποκτήσει στην διαδικασία.
    - **Απαιτούμενος Υπολογιστικός Χρόνος**: Η προτεινόμενη μέθοδος αξιοποιεί με ισορροπημένο και ορθολογικό τρόπο ευρετικούς/εμπειρικούς κανόνες που εκφράζονται μέσω της άμεσης αλληλεπίδρασης με τον αποφασίζοντα, για την καθοδήγηση των μεθόδων παραγωγής λύσεων που χρησιμοποιούνται στην μη-

εξαντλητική χαρτογράφηση του μετώπου Pareto, με έμφαση στις περιοχές ενδιαφέροντος. Με τον τρόπο αυτό, θεωρούμε ότι εξοικονομείται σημαντικός χρόνος. Επιπλέον, λόγω του σημαντικού ελέγχου που δίνεται στον αποφασίζοντα προκύπτει ότι όσο πιο έμπειρος και συνειδητοποιημένος είναι ο αποφασίζων ως προς τις επιδιώξεις του και τους στόχους βελτιστοποίησης, τόσο πιο γρήγορα μπορεί να καθοδηγήσει την διαδικασία στην τελικά επιλεγόμενη λύση.

- Τονίζεται ότι η ίδια μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί και για προβλήματα περισσότερων των δύο κριτηρίων καθώς δεν υπάρχει κάποιος εγγενής περιοριστικός παράγοντας σε σχέση με τον αριθμό των κριτηρίων σε οποιοδήποτε από τα στάδια της διαδικασίας. Παρόλαυτά, θεωρούμε ότι σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου παίζει η δυνατότητα γραφικής απεικόνισης του μετώπου Pareto των λύσεων, στον χώρο των κριτηρίων (δυο κριτήρια → δύο διαστάσεις χώρου κριτηρίων), κάτι που δεν είναι δυνατό ή/και το ίδιο αποτελεσματικό σε τρεις ή περισσότερες διαστάσεις (κριτήρια).

Πολυκριτηριακή μεθοδολογία επίλυσης

- Η προτεινόμενη πρωτότυπη μεθοδολογία για την αντιμετώπιση του πολυκριτηριακού σεναρίου του προβλήματος εφαρμόζει χαρακτηριστικά της φιλοσοφίας της μεθόδου ολικού κριτηρίου σε κάθε επαναληπτικό κύκλο της διαδικασίας που συνδυάζει χαρακτηριστικά της μεθόδου των ικανοποιητικών στόχων.
- Για την ανάπτυξη της πρωτότυπης αλληλεπιδραστικής μεθόδου Συνέργειας Ολικού Κριτηρίων με Ικανοποιητικούς Στόχους επιτεύχθηκε η συμπληρωματική αξιοποίηση των πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι δύο κλασικές μέθοδοι ως προς:

  α) την Pareto αποτελεσματικότητα των παραγόμενων λύσεων,

  β) τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο/υπολογιστικό κόστος,

  γ) την απόδοση ελέγχου στον αποφασίζοντα σε σχέση με την διαμόρφωση της στρατηγικής αναζήτησης,

  δ) την άμεση ή έμμεση αποτύπωση των προτιμησιακών σχέσεων (ως σχέσεων παραχώρησης ανάμεσα στα κριτήρια, κλπ.)
- Μια επαναληπτική στρατηγική ακολουθείται για την σταδιακή επίτευξη της αποτελεσματικής λύσης που θα ικανοποιεί τον αποφασίζοντα αναφορικά τόσο

με τις τιμές των κριτηρίων, τις σχέσεις παραχωρήσεων μεταξύ τους αλλά και τον υπολογιστικό χρόνο.

- Η διαδικασία είναι αλληλεπιδραστική απαιτώντας από το αποφασίζοντα να ορίσει την στρατηγική, την κατεύθυνση αναζήτησης και επιτρέποντάς του να θέσει τις ακόλουθους παραμέτρους σε κάθε κύκλο βελτιστοποίησης:
    - Τα επίπεδα ικανοποίησης για κάθε κριτήριο, λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδεατές τιμές που προκύπτουν από τον πίνακα πληρωμών, τις αποτελεσματικές λύσεις που προκύψαν μέχρι και τον προηγούμενο κύκλο και τις προτιμήσεις βελτιστοποίησης όπως διαμορφώνονται με τα δεδομένα αυτά.
    - Τις αμοιβαίες παραχωρήσεις που ισχύουν μεταξύ των κριτηρίων και ενός κριτηρίου αναφοράς, εφαρμόζοντας την μέθοδο Ολικού Κριτήριου σε κάθε κύκλο Βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, σε κάθε κύκλο βελτιστοποίησης και λαμβάνοντας υπόψιν τα ελάχιστα επίπεδα αναφοράς για κάθε κριτήριο, ο αποφασίζων ορίζει τις σχετικές παραχωρήσεις που ισχύουν για τις συγκεκριμένες περιοχές τιμών. Ο καθορισμός γίνεται ακολουθώντας την τυπικού διαδικασία διαλόγου όπως στην Μέθοδο Ολικού Κριτηρίου. Με τον τρόπο αυτό, αντιμετωπίζεται η ενδεχόμενη μη σταθερή τιμή των παραχωρήσεων μεταξύ των κριτηρίων για διαφορετικές περιοχές τιμών. Η συνεισφορά αυτή του αποφασίζοντος οδηγεί στον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων όπως συμμετέχουν στην αντικειμενική συνάρτηση που βελτιστοποιείται.
    - Την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του κάθε κύκλου ως ικανοποιητικού ή μη ικανοποιητικού και την απόφαση για επανάληψη ή μη της διαδικασίας με νέο κύκλο βελτιστοποίησης. Ο νέος κύκλος βελτιστοποίησης στόχο θα έχει, ακολουθώντας την φιλοσοφία της μεθόδου των ικανοποιητικών στόχων, να βελτιώσει ένα ή περισσότερα κριτήρια εις βάρος των υπολοίπων λαμβάνοντας πάντα υπόψιν τις παραχωρήσεις που θα ισχύουν, στα νέα επίπεδα τιμών.

Οι μεθοδολογίες που προτείνονται επιτυγχάνουν εξισορρόπηση της απόδοσης/συμπεριφοράς ως προς σημαντικές παραμέτρους ποιότητας:

- Pareto αποτελεσματικότητα λύσεων
- Συμβιβαστικότητα λύσεων
- Κάλυψη μετώπου Pareto
- Αποκλειστική κάλυψη ενδιαφερουσών περιοχών μετώπου

- Υπολογιστικός φόρτος/Χρόνος
- Ποσότητα/ποιότητα πληροφορίας από αποφασίζοντα
- Έλεγχος αποφασίζοντα
- Ευκολία επιλογής λύσης, τερματισμού
- Συνολική Ικανοποίηση αποφασίζοντα

σε σχέση πάντα με τις υπάρχουσες αντιπροσωπευτικές μεθόδους ΠΜΠ που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν (βλ. Πίνακα 2.27).

Η εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου σε (τύπου-) πραγματικά δεδομένα επιβεβαιώνει τα ως άνω συμπεράσματα.

Προοπτικές περαιτέρω βελτίωσης «στα σημεία» του μεθοδολογικού πλαισίου υπάρχουν σημαντικές και ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες όπως προτείνουμε στην επόμενη ενότητα, και αποτελούν στόχο της ερευνήτριας για το άμεσο μέλλον. Οι βελτιώσεις αφορούν είτε στην ενδυνάμωση και επέκταση της ερευνητικής σκοπιάς του μεθοδολογικού πλαισίου είτε στην πρακτική πλευρά αξιοποίησης αυτού.

6.3 Προοπτικές – Περαιτέρω ερευνητικές κατευθύνσεις

Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο αποτελεί μια ολοκληρωμένη πρόταση υποστήριξης αποφάσεων για μεγάλης κλίμακας πολυκριτηριακά προβλήματα διαχείρισης παραγωγής, προσαρμοσμένη -στο πλαίσιο της διατριβής- σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού εργασιών σε περιβάλλον γραμμών συναρμολόγησης, φιλοσοφίας Just-in-Time, μικτού μοντέλου προϊόντων.

Ενδιαφέρον θα παρουσίαζαν στο πλαίσιο μελλοντικών ερευνητικών και επιχειρησιακών δραστηριοτήτων οι ακόλουθες προοπτικές:

- **Εφαρμογή σε άλλα προβλήματα**

  Εφαρμογή των πρωτότυπων μεθοδολογιών πολυκριτηριακής επίλυσης σε άλλα προβλήματα παραγωγής ίδιου ή διαφορετικού τύπου, βάσει της τυπολογίας κατάταξης των προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού εργασιών παραγωγής. Επιπλέον, εφαρμογή της πρότασης της διατριβής σε πολυκριτηριακά προβλήματα άλλων επιστημονικών περιοχών που παρουσιάζουν τις ίδιες προκλήσεις.

- **Εφαρμογή στο διευρυμένο πρόβλημα αναφοράς**

  Επέκταση εφαρμογής του μεθοδολογικού πλαισίου (μοντελοποίηση και πολυκριτηριακή επίλυση) στο πρόβλημα ημερήσιου μικρο-προγραμματισμού των εργασιών συναρμολόγησης, ήτοι καθορισμού της ακριβούς αλληλουχίας

δρομολόγησης των εργασιών που έχουν ήδη προγραμματισθεί για κάθε γραμμή συναρμολόγησης-ημέρα. Αυτή η διάσταση θα ολοκλήρωνε την ρεαλιστική προσέγγιση του προβλήματος και θα κάλυπτε τις ανάγκες ακόμα μεγαλύτερου τμήματος των βιομηχανιών που χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο περιβάλλον παραγωγής.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν επιπλέον κριτήρια/περιορισμοί για την αλληλουχία των εργασιών εντός της ημέρας, η δουλειά του αναλυτή είναι απλή και συνίσταται στην παραγωγή εντολών δρομολόγησης των ημερήσιων εργασιών με τυχαία σειρά. Στην περίπτωση που εμπλέκονται επιπλέον περιορισμοί και κριτήρια επί της αλληλουχίας, τότε αποτελούν πρόκληση τόσο η ανεξάρτητη εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου και σε αυτό το τμήμα του χρονοπρογραμματισμού, όσο και η συνολική μοντελοποίηση του προβλήματος ως ενός ενιαίου προβλήματος προγραμματισμού και αλληλουχίας εργασιών. Τονίζεται ότι ο συνολικός προγραμματισμός έχει νόημα και προτείνεται μόνο όταν τα νέα κριτήρια και περιορισμοί εμπλέκουν σημαντικά, και χωρίς δυνατότητα ρεαλιστικής ανεξαρτητοποίησης, τα δύο προβλήματα μεταξύ τους. Σε αντίθετη περίπτωση, εφόσον έχουν ανεξάρτητη φυσική σημασία, είναι σαφέστερα προτιμότερο να επιλυθούν δυο μικρότερα προβλήματα παρά ένα μεγάλο, καθώς η υπολογιστική πολυπλοκότητα αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά (και σίγουρα μη γραμμικά). Στην περίπτωση αυτή, ακολουθείται η λογική του λειτουργικού διαχωρισμού του προβλήματος (operational decomposition).

- **Αξιοποίηση εναλλακτικών σύγχρονων αλγορίθμων βελτιστοποίησης**

  Εφαρμογή και αξιοποίηση εξελικτικών αλγορίθμων και ευρετικών κανόνων στις υπολογιστικές φάσεις βελτιστοποίησης των προτεινόμενων μεθοδολογιών, για τις περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η (ακέραια) γραμμική μοντελοποίηση του προβλήματος ή στις περιπτώσεις που το μέγεθος σε συνδυασμό με την δομή του προβλήματος δεν επιτρέπουν (χρονικά) την απευθείας εφαρμογή και τερματισμό μεθόδων μαθηματικού προγραμματισμού. Στην περίπτωση αυτή αναμένεται βελτίωση απόδοσης ως προς τον χρόνο, αλλά και πιθανότατα μείωση της ακρίβειας προσέγγισης του μετώπου Pareto.

- **Εφαρμογή σε προβλήματα με περισσότερα κριτήρια**

  Εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου σε προβλήματα με περισσότερα κριτήρια έτσι ώστε να εξεταστεί η ανταπόκριση των εξεταζόμενων/

προτεινόμενων μεθόδων σε περιβάλλον με προστιθέμενη πολυκριτηριακή πολυπλοκότητα.

- **Ανάπτυξη υποστηρικτικού πληροφοριακού συστήματος/περιβάλλοντος**

  Η ολοκλήρωση του μεθοδολογικού πλαισίου σε ένα ενιαίο πληροφοριακό σύστημα – ιδανικά ως «module» ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης παραγωγής- αποτελεί μια σαφή και άμεση προοπτική για την αξιοποίηση της ερευνητικής διατριβής. Η προοπτική αυτή στοχεύει, πέραν από την ερευνητική διάσταση της συγκεκριμένης εργασίας, να υποστηρίξει:

  - την αυτοματοποίηση της μοντελοποίησης του περιβάλλοντος παραγωγής,
  - την άμεση αξιοποίηση και συνεργασία με τις βάσεις δεδομένων του συστήματος παραγωγής,
  - την συνεργασία μέσω εξελιγμένου γραφικού περιβάλλοντος με τον αποφασίζοντα για την εισαγωγή παραμέτρων και την διενέργεια των διαλογικών φάσεων της μεθοδολογίας,
  - την απεικόνιση σε πρώτη χρόνο στην οθόνη του αποφασίζοντος (χρήστη) των γραφικών παραστάσεων που δρουν υποστηρικτικά στην λήψη των αποφάσεων, σε όλα τα στάδια της αλληλεπιδραστικής μεθοδολογίας,
  - την συνολικά ταχύτερη ολοκλήρωση όλων των φάσεων του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου.

- **Διερεύνηση ευρωστίας των λύσεων του Pareto μετώπου**

  Προς την ίδια κατεύθυνση, θεωρούμε πολύ σημαντική την προοπτική διερεύνησης της ευρωστίας των λύσεων που προκύπτουν από τις πολυκριτηριακές μεθοδολογίες που προτείνονται, ως προς την στοχαστικότητα των παραμέτρων συμβιβασμού και γενικότερα των παραμέτρων του προτιμησιακού μοντέλου που ορίζονται από τον αποφασίζοντα. Η ανάλυση ευρωστίας των λύσεων θα αποτελέσει μια πολύτιμη πληροφορία για την περαιτέρω υποστήριξη ορθολογικών αποφάσεων, με τα συνακόλουθα οφέλη αυτών.

- **Ένταξη κλασικών μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης υποστηρικτικά στην συγκριτική αξιολόγηση που διενεργεί ο αποφασίζων μεταξύ των λύσεων που προκύπτουν.**

Υπάρχει πληθώρα εργαλείων και τεχνικών για να βοηθήσουν σε αυτή την κατεύθυνση περαιτέρω επεξεργασίας και συγκριτικής ανάλυσης των λύσεων που προκύπτουν αν το επιθυμεί ο αποφασίζων.

Βιβλιογραφία

Βιβλιογραφία

1. Ahn, B. S. (2011). Compatible weighting method with rank order centroid: Maximum entropy ordered weighted averaging approach. *European Journal of Operational Research, Volume 212, Issue 3,* , 552-559.
2. Aigbedo, H., & Monden, Y. (1997). A parametric procedure for multicriterion sequence scheduling for Just-In-Time mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research, 35:9*, 2543-2564.
3. Akpınar, S., G. Bayhan, M., & Baykasoglu, A. (2013). Hybridizing ant colony optimization via genetic algorithm for mixed-model assembly line balancing problem with sequence dependent setup times between tasks. *Applied Soft Computing, Volume 13, Issue 1*, 574-589 .
4. Ammari, H. M. (2013). On the energy-delay trade-off in geographic forwarding in always-on wireless sensor networks: A multi-objective optimization problem. *Computer Networks, Volume 57, Issue 9*, 1913–1935.
5. Balachandran, J., & Gero, S. (1985). THE NONINFERIOR SET ESTIMATION (NISE) METHOD FOR THREE OBJECTIVE PROBLEMS. *Engineering Optimization, vol. 9, no. 2*, 77-88.
6. Bard, J., Clayton, R., & Feo, T. (1994). Machine setup and component placement in printed circuit board assembly. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems 6*, 5–31.
7. Bartal, Y., Leonardi, S., Marchetti-Spaccamela, A., Sgall, J., & Stougie, a. L. (2000). Multiprocessor scheduling with rejection. *SIAM Journal on Discrete Mathematics, 13*, 64–78.
8. Bautista, J., Companys, R., & Corominas, A. (1996a). Heuristics and exact algorithms for solving the Monden problem. *European Journal of Operational Research 88*, 101–131.
9. Bautista, J., Companys, R., & Corominas, A. (1996b). A note on the relation between the product rate variation (PRV) and the apportionment problem. *Journal of the Operational Research Society 47*, 1410-1414.

10. Becerra, R., & Coello Coello, C. (2007). Epsilon-constraint with an efficient cultured differential evolution. *Proceedings of the 2007 GECCO Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation*, 2787–2794.

11. Benayoun, R., & Tergny, J. (1969). Critères multiples en programmation mathématique, une solution dans le cas linéaire. *RIRO, 5(2)*, 31-56.

12. Benayoun, R., Montgolfier, J. d., Tergny, J., & Laritchev, O. (1971). Linear programming with multiple objective functions: Step method (stem). *Mathematical Programming, volume 1, issue 1*, 366-375.

13. Benoit, T. (2007). Soft car sequencing with colors: Lower bounds and optimality proofs. *European Journal of Operational Research*, doi:10.1016/j.ejor.2007.04.035.

14. Benson, R. (1975). *Interactive Multiple Criteria Optimization Using Satisfactory Goals.* Ph. D. Thesis, University of Iowa.

15. Bertel, S., & Billaut, J.-C. (2004). A genetic algorithm for an industrial multiprocessor flow shop scheduling problem with re- circulation. *European Journal of Operational Research, 159*, 651-662.

16. Bérubé, J., Gendreau, M., & Potvin, J. (2009). *An exact ε-constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems – Application to the travelling salesman problem with profits.* 39–50: European Journal of Operational Research, 194.

17. Bolat, A., Savsar, M., & Al-Fawzan, M. A. (1994). Algorithms for real-time scheduling of jobs on mixed model assembly lines. *Computers & Operations Research, Volume 21, Issue 5*, 487-498.

18. Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems.* Oxford: Oxford University Press.

19. Bosch, R., & Trick, M. (2005). Integer programming. Στο E. K. Eds: Burke, & G. Kendall, *Search Methodologies; Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques* (σσ. 69-95). Springer US.

20. Boulif, M., & Atif, K. (2006). An exact multiobjective epsilon-constraint approach for the manufacturing cell formation problem. *International Conference on Service Systems and Service Management; Vol. 2*, 883–888.

21. Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2009). Sequencing mixed-model assembly lines: survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research, 192 (2)*, 349–373.

22. Briant, O., Naddef, D., & Mounié, G. (2007). Greedy approach and multi-criteria simulated annealing for the car sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, doi:10.1016/j.ejor.2007.04.052.

23. Celano, G., Fichera, S., Grasso, V., La Commare, U., & Perrone, G. (1999). An evolutionary approach to multi-objective scheduling of mixed model assembly lines. *Computers & Industrial Engineering, Volume 37, Issues 1–2*, 69-73.

24. Černý, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications 45*, 41–51.

25. Chang, P.-C., Hsieh, J.-C., & Lin, S.-G. (2002). The development of gradual-priority weighting approach for the multi-objective flowshop scheduling problem. *International Journal of Production Economics, Volume 79, Issue 3*, 171-183.

26. Chang, Y., Yeh, C., & Shen, C. (2000). A multiobjective model for passenger train services planning: application to taiwan's high-speed rail line. *Transportation Research Part B: Policy and Practice,94*, 91-106.

27. Charnes, A., & Cooper, W. (1961). *Management models and industrial applications of linear programming.* New York: Wiley.

28. Charnes, A., Cooper, W., & Ferguson, R. (1955). Optimal estimation of executive compensation by linear programming. *Management Science, 1*, 138-151.

29. Cohon, J. L. (2004). *Multiobjective Programming and Planning .* Courier Dover Publications.

30. Cordeau, J.-F., Laporte, G., & Pasin, F. (2007). An iterated local search heuristic for the car sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, doi:10.1016/j.ejor.2007.04.048.

31. Deb, K. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multiobjective optimization, NSGA II. *Proceedings of Parallel problem Solving form Nature – PPSN VI, Lecture Notes in Computer Science,* (σσ. 849-858). Springer.

32. Dileepan, P., & Sen, T. (1988). Bicriterion static scheduling research for a single machine. *Omega, 16(1)*, 53—59.

33. Dorigo, M., Caro, G. D., & Gambardella, L. (1999). Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life 5 (2)*, 137–172.

34. Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, V. (1991). *Technical Report 91-016 - Ant System: An Autocatalytic Optimizing Process.* Milano: Dip. di Elettronica, Politecnico di Milano.

35. Dyer, J. S. (1972). Interactive Goal Programming. *Management Science, Vol. 19, No. 1, Theory Series* , 62-70.

36. Eds: Ehrgott, M., Figueira, J., & Greco, S. (2010). *Trends in multiple criteria decision analysis.* New York: Springer.

37. Eds: Figueira, J., Greco, S., & Ehrgott, M. (2005). *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys.* New York: Springer.

38. Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria Optimization.* Springer.

39. Ehrgott, M., & Ryan, D. (2002). Constructing Robust Crew Schedules with Bicriteria Optimization. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 11*, 139-150.

40. Emde, S., & Boysen, N. (2012). Optimally routing and scheduling tow trains for JIT-supply of mixed-model assembly lines. *European Journal of Operational Research, Volume 217, Issue 2*, 287-299.

41. Estellon, B., Gardi, F., & Nouioua, K. (2008). Two local search approaches for solving real life car sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, doi:10.1016/j.ejor.2007.04.043.

42. Evans, G. (1984). An Overview of Techniques for Solving Multiobjective Mathematical Programs. *Management Science 30*, 1268-1282.

43. Evans, J., & Steuer, R. (1973). A Revised Simplex Method for Linear Multiple Objective Programs. *Mathematical Programming 5*, 54–72.

44. Fargier, H., & Lamothe, J. (2001). Handling soft constraints in hoist scheduling problems: the fuzzy approach. *Engineering Application of Artificial Intelligence, 14*, 387—399.

45. Fichefet, J. (1976). GPSTEM: an interactive multiobjective optimization method. *Progress in Operations Research, North-Holland, Vol. 1*, 317–332.

46. Fliedner, M., Boysen, N., & Scholl, A. (2010). Solving symmetric mixed-model multi-level just-in-time scheduling problems. *Discrete Applied Mathematics, Volume 158, Issue 3*, 222-231.

47. Fondrevelle, J., Oulamara, A., & Portmann, M.-C. (2008). Permutation flowshop scheduling problems with time lags to minimize the weighted sum of machine completion times. *International Journal of Production Economics, Volume 112, Issue 1*, 168-176.

48. Gabrel, V. and Vanderpooten, D. (2002). Enumeration and interactive selection of efficient paths in a multiple criteria graph for scheduling an earth observing satellite. *European Journal of Operational Research, 139*, 533-542.

49. Garfunkel, R. S., & Nemhauser, G. L. (1972). *Integer Programming.* New York: John Wiley.

50. Gass, S. I. (2003). *Linear Programming: Methods and Applications, Dover Books on Computer Science Series.* Courier Dover Publications.

51. Geoffrion, A. (1968). Proper Efficiency and the Theory of Vector Maximization. *Journal of Mathematical Analysis and Application, 22:3*, 618-630.

52. Geoffrion, A. M., Dyer, J. S., & Feinberg., A. (1972). *Management Science, Vol. 19, No. 4, Application Series, Part 1*, 357-368.

53. Gharehgozli, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Zaerpour, N. (2009). A fuzzy-mixed-integer goal programming model for a parallel-machine scheduling problem with sequence-dependent setup times and release dates. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 25 Issues 4–5,* , 853-859.

54. Glover, F. (1986). Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. *Computers and Operations Research 13 (5)*, 533–549.

55. Glover, F. (1989). Tabu Search - Part 1. *ORSA Journal on Computing 1 (2)*, 190–206.

56. Glover, F. (1990). Tabu Search - Part 2. *ORSA Journal on Computing 2 (1)*, 4–32.

57. Goicoechea, A., Hansen, D. R., & Duckstein, L. (1982). *Multiobjective decision analysis with engineering and business applications.* Wiley.

58. Gomes, J. H., Júnior, A. R., Paiva, A. P., Ferreira, J. R., Costa, S. C., & Balestrassi, P. P. (2012). Global Criterion Method Based on Principal Components to the Optimization of Manufacturing Processes with Multiple Responses. *Journal of Mechanical Engineering 58*, 345-353.

59. Grandinetti, L., Pisacane, O., & Sheikhalishahi, M. (2013). An approximate -constraint method for a multi-objective job scheduling in the cloud Future Generation. *Computer Systems, Volume 29, Issue 8*, 1901-1908.

60. Guo, Z., Wong, W., Leung, S., Fan, J., & Chan, S. (2006). Mathematical model and genetic optimization for the job shop scheduling problem in a mixed- and multi-product assembly environment: A case study based on the apparel industry. *Computers & Industrial Engineering, Volume 50, Issue 3*, 202-219.

61. Güray Güler, M. (2013). A hierarchical goal programming model for scheduling the outpatient clinics. *Expert Systems with Applications, Volume 40, Issue 12, 15*, 4906-4914.

62. Hapke, M., Jaszkiewicz, A., & Slowinski, R. (1998). Interactive analysis of multiple-criteria project scheduling. *European Journal of Operational Research,107(2)*, 315-324.

63. Herroelen, W., De Reyck, B., & Demeulemeester, E. (1998a). Resource-constrained project scheduling: a survey. *Computers and Operations Research,*, 25(4):279—302.

64. Hoogeveen, H. (2005). Multicriteria scheduling. *European Journal of Operational Research, 167*, 592-623.

65. Hoogeveen, J. A. (1992). *Single-Machine Bicriteria Scheduling.* Amsterdam, The Netherlands: PhD thesis, CWI, .

66. Huckert, K., Rhode, R., Roglin, O., & Weber, R. (1980). On the interactive solution to a multicriteria scheduling problem. *Journal of Operations Research*, 47-60.

67. Hwang, C. L., & Masud, A. S. (1979). *Multiple objective decision making, methods and applications: A state-of-the-art survey.* Berlin and New York: Springer-Verlag.

68. Hwang, C., & Masud, A. (1979). Multiple objective decision making: Methods and applications. *Springer-Verlag, Berlin*.

69. Hwang, C.-L., Masud, A., Paidy, S., & Yoon, K. (1979). *Multiple Objective Decision Making - Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems).* Springer.

70. Hyun, C. K. (1998). A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines. *Computers Operations Research, 25*, 675-690.

71. Ignizio, J. (1976). *Goal programming and extensions.* Lexington, MA.: Lexington Books.

72. Jacquet-Lagrèze, E., Meziani, R., & Slowinski, R. (1987). MOLP with an interactive assessment of a piecewise linear utility function. *European Journal of Operational Research, 31(3)* , 350–357.

73. Jaszkiewicz, A., & Slowinski, R. (1997). Outranking-driven search over a nondominated set. In G. Fandel and T. Gal, editors, Multiple Criteria Decision Making. *LNEMS 448, Berlin, Springer-Verlag*, 340-349.

74. Javadi, B., Rahimi-Vahed, A., Rabbani, M., & Dangchi, M. (2008). Solving a multi-objective mixed-model assembly line sequencing problem by a fuzzy goal programming approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 39*, 975-982.

75. Jones, D., & Tamiz, M. (2010). *Practical Goal Programming.* Springer Books.

76. JP Ignizio, T. C. (1994). *Linear programming.* Prentice Hall.

77. Kaliszewski, I. (2000). Using trade-off information in decision-making algorithms. *Computers & OR 27(2)*, 161-182 .

78. Kamran, S. M. (2013). Multi-objective preventive maintenance and replacement scheduling in a manufacturing system using goal programming. *International Journal of Production Economics, Volume 146, Issue 2*, 704-716.

79. Keeney, R., & Raiffa., H. (1976). *Decisions with Multiple Objectives.* New York: John Wiley & Sons.

80. Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., & Vecchi, μ. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science 220 (4598):* , 671–680.

81. Klee, Victor; Minty, George J. (1972). How good is the simplex algorithm? *In Shisha, Oved. Inequalities III (Proceedings of the Third Symposium on Inequalities held at the University of California, Los Angeles, Calif., September 1–9, 1969, New York-London: Academic Press.*, 159–175.

82. Knowles, J. D., & Corne, D. W. (2000a). M-PAES : A Memetic Algorithm for Multiobjective Optimization. *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation*, (σσ. 325-332.).

83. Knowles, J. D., & Corne, D. W. (2000b). The pareto-envelope based selection algorithm for multiobjective optimization. *Proceedings of the Sixth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN VI)*, (σσ. 839-848). Berlin.

84. Koopmans, T. (1951). *Activity Analysis of Production and Allocation.* New York: John Wiley & Sons.

85. Korhonen, P., & Laakso, J. (1986). A Visual Interactive Method for Solving the Multiple Criteria Problem. *European Journal of Operational Research, 24*, 277-287.

86. Korhonen, P., & Wallenius, J. (1988). A Pareto Race. *Naval Research Logistics, 35(6)*, 615-623.

87. Korkmazel, T., & Meral, S. (2001). Bicriteria sequencing methods for the mixed-model assembly line in just-in-time production systems. *European Journal of Operational Research, 131*, 188–207.

88. Kostaras, G., Makarouni, I., Mitrou, G., & Psarras, J. (2000). Solving Large Scale Multi-Criteria Job Sequencing Problems in Real Industrial Environments. *ICEIS 2000, Proceedings of the Second International Conference on Enterprise Information Systems*, 157-162.

89. Kubiak, W. (1993). Minimizing variation in production rates in Just-In-Time production systems: A survey. *European Journal of Operational Research, 55*, 259-271.

90. Kuhn, H. W., & Tucker, A. W. (1951). Nonlinear Programming. *Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability* (σσ. 481-492). Berkeley: University of California Press.

91. Laumanns, M. T. (2006). An efficient, adaptive parameter variation scheme for metaheuristics based on the epsilon-constraint method. *European Journal of Operational Research, 169*, 932-942.

92. Lee, S. (1972). *Goal programming for decision analysis.* Philadelphia: Auerback.

93. Leung, J. Y.-T., & Anderson, J. H. (2004). *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models, and Performance Analysis.* Chapman and Hall/CRC; 1 edition .

94. Liu, M., Sun, Z.-j., Yan, J.-w., & Kang, J.-s. (2011). An adaptive annealing genetic algorithm for the job-shop planning and scheduling problem. *Expert Systems with Applications, Volume 38, Issue 8*, 9248-9255 .

95. Lofti, V., Stewart, T., & Zionts, S. (1992). An Aspiration-Level Interactive Model for Multiple Criteria Decision Making. *Computers and Operations Research, 19(7)*, 671-681.

96. Lucie, P., & Teodorovic, D. (1999). Simulated annealing for the multi-objective aircrew rostering problem. *Transportation Research A: Policy and Practice, 33(l)*, 19-45.

97. M. Dorigo, V. M. (1996). The ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans. Systems Man Cybernet. B 26 (1)*, 29–41.

98. Mahdavi, I., Javadi, B., Sahebjamnia, N., & Mahdavi-Amiri, N. (2009). A two-phase linear programming methodology for fuzzy multi-objective mixed-model assembly line problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44*, 1010-1023.

99. Makarouni, I., Psarras, J., & Siskos, E. (2013). Interactive bicriterion decision support for a large scale industrial scheduling system. *Annals of Operations Research, 17 July 2013* .

100. Manavizadeh, N., Hosseini, N.-s., Rabbani, M., & Jolai, F. (2013). A Simulated Annealing algorithm for a mixed model assembly U-line balancing type-I problem considering human efficiency and Just-In-Time approach. *Computers & Industrial Engineering, Volume 64, Issue 2* , 669-685.

101. Mansouri, S. (2005). A Multi-Objective Genetic Algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines. *European Journal of Operational Research, 167*, 696-716.

102. Marcotte, O., & Soland, R. M. (1985). An Interactive Branch-And-Bound Algorithm For Multiple Criteria Optimization. *Management Science. 32 (1)*, 61-75.

103. Marler, R., & Arora, J. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization 26 (6)*, 369–395.

104. Martel, J.-M., & Aouni, B. (1990). Incorporating the Decision-Maker's Preferences in the Goal-Programming Model. *The Journal of the Operational Research Society, Vol. 41, No. 12*, 1121-1132.

105. Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problemsApplied Mathematics and Computation, 213, pp.455-465. *Applied Mathematics and Computation, 213*, 455-465.

106. Mavrotas, G., Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., Lalas, D., Hontou, V., et al. (2009). Multi-objective combinatorial optimization for selecting best available techniques (BAT) in the industrial sector: the COMBAT tool. *Journal of the Operational Research Society 60*, 906-920.

107. McMullen, P. (1998). JIT sequencing for mixed-model assembly lines with setups using tabu search. *Production Planning and Control, 9*, 504–510.

108. McMullen, P. (2001). An efficient frontier approach to addressing JIT sequencing problems with setups via search heuristics. *Computers and Industrial Engineering, 41*, 335–353.

109. McMullen, P. (2001a). A Kohonen self-organizing map approach to addressing a multiple objective, mixed-model JIT sequencing problem. *International Journal of Production Economics, 72*, 59–71.

110. McMullen, P. (2001b). An ant colony optimization approaches to addressing a JIT sequencing problem with multiple objectives. *Artificial Intelligence in Engineering, 15*, 309–317.

111. McMullen, P., & Frazier, G. (2000). A simulated annealing approach to mixed-model sequencing with multiple objectives on a just-in-time line. *IIE Transactions, 32*, 679–686.

112. Miettinen, K. (1999). *Nonlinear Multiobjective Optimization.* Boston: Kluwer Academic Publishers.

113. Miltenburg, G. (1990). Changing MRP's Costing Procedures to Suit JIT. *Production and Inventory Management Journal, 31*, 77-83.

114. Miltenburg, G., & Goldstein, T. (1991). (1991): Developing production schedules which balance part usage and smooth production loads for just-in-time production systems. *Naval Research Logistics 38*, 893-910.

115. Miltenburg, J. (1989). Level schedules for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems. *Management Science, 35*, 192-207.

116. Miltenburg, J. (1993). A theoretical framework for understanding why JIT reduces cost and cycle time and improves quality. *International Journal of Production Economics, Volumes 30–31*, 195-204.

117. Mirghorbani, S., Rabbani, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rahimi-Vahed, A. (2007). A multi-objective particle swarm for a mixed-model assembly line sequencing. *Operations Research Proceedings, 2006*, 181-186.

118. Monden, Y. (1983, 1993). *Toyota Production System: A practical approach to production management.* Georgia: Industrial engineering and management press.

119. Murty, K. G. (1976). *Linear and combinatorial programming.* Wiley.

120. Mustafa, A., & Goh, M. (1996). Multi-criterion models for higher education administration. *OMEGA, 24 (24)*, 167-178.

121. Nagar, A., Haddock, J., & Heragu, S. (1995). Multiple and bicriteria scheduling: A litterature survey. *European journal of operational research*, 88–104.

122. Naidu, K., Mokhlis, H., & Bakar, A. (2014). Multiobjective optimization using weighted sum Artificial Bee Colony algorithm for Load Frequency Control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 55*, 657-667.

123. Navaei, J., Ghomi, S. M., & Jolai, F. M. (2014). Heuristics for an assembly flow-shop with non-identical assembly machines and sequence dependent setup times to minimize sum of holding and delay costs. *Computers & Operations Research, Volume 44*, 52-65.

124. Nemhauser, G. L., & Garfinkel, R. (1972). *Integer Programming.* Wiley & Sons, Incorporated, John.

125. Ng, W., & Mak, K. (1994). A branch and bound algorithm for scheduling just-in-time mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Economics, Volume 33, Issues 1–3*, 169-183.

126. Nguyen, A. &.-D. (2005). Le problème du Car Sequencing Renault et le challenge ROADEF' 2005. *Proceedings of Journées Francophones de Programmation par Contraintes, 3-10, 2005.*

127. Özlen, M., & Azizog, M. (2009). Multi-objective integer programming: A general approach for generating all non dominated solutions. *European Journal of Operational Research 199*, 25-35.

128. Palencia, A. E., & Delgadillo, G. E. (2012). A computer application for a bus body assembly line using Genetic Algorithms. *International Journal of Production Economics, Volume 140, Issue 1*, 431-438.

129. Panopoulos, D. M. (2006). Solving production scheduling problems using advanced model checking tools. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 37-48.

130. Pardalos, P., Siskos, Y., & Zopounidis, C. (1995). *Advances in Multicriteria analysis.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

131. Philip, J. (1972). Algorithms for the vector maximization problem. *Math Program 2*, 207—229.

132. Ponnambalam, S., Aravindan, P., & Rao, M. S. (2003). Genetic algorithms for sequencing problems in mixed model assembly lines. *Computers & Industrial Engineering, Volume 45, Issue 4*, 669-690.

133. Prats, X., Puig, V., Joseba, Q., & Fatiha, N. (2010). Lexicographic optimisation for optimal departure aircraft trajectories. *Aerospace Science and Technology, Volume 14, Issue 1*, 26-37.

134. Prot, D., & Bellenguez-Morineau, O. (2012). Tabu search and lower bound for an industrial complex shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering, Volume 62, Issue 4*, 1109-1118.

135. Punnen, A. P., & Aneja, Y. (2004). Lexicographic balanced optimization problems. *Operations Research Letters, Volume 32, Issue 1*, 27-30.

136. Rabbani, M., Rahimi-Vahed, A., Javadi, B., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2006). A new approach for mixed-model assembly line sequencing. *Operations Research Proceedings*, 169-174.

137. Rahimi-Vahed, A., & Mirzaei, A. (2007b). A hybrid multi-objective shuffled frog-leaping algorithm for a mixed-model assembly line sequencing problem. *Computers and Industrial Engineering, 53*, 642-666.

138. Rahimi-Vahed, A., Mirghorbani, S., & Rabbani, M. (2007). A new particle swarm algorithm for a multi-objective mixed-model assembly line sequencing problem. *Soft Computing – A fusion of foundations, methodologies and applications, 11*, 997-1012.

139. Rahimi-Vahed, A., Rabbani, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2007a). Torabi, S.A., Jolai, F. (2007). A multi-objective scatter search for a mixed-model assembly line sequencing problem. *Advanced Engineering Informatics, 21*, 85-99.

140. Raiffa, H. (1969). *Preferences for Multi-attributed Consequences. Technical report, RM-5868-DOT.* Santa Monica, California: The RAND Corporation.

141. Reeves, G., & Reid, R. (1988). Minimum values over the efficient set in multiple objective decision making. *European Journal of Operational Research, 36*, 334–338.

142. Reis, R. J. (2007). *Solving the Car Sequencing Problem from a Multiobjective Perspective .*

143. Ribiero, C. C., Aloise, D. N., & Urrutia, S. (2007). A hybrid heuristic for a multi-objective real-life car sequencing. *European Journal of Operational Research*, doi:10.1016/j.ejor.2007.04.034.

144. Romero, C. (1991). *Handbook of critical issues in goal programming.* Oxford: Pergamon Press.

145. Roy, B. (1976). From Optimisation to Multicriteria Decision Aid: Three Main Operational Attitudes. *Proceedings of a Conference Jouy-en-Josas, France May 21–23, 1975* (σσ. 1-34). Berlin: Springer Berlin Heidelberg.

146. Roy, B. (1985). *Methodologie Multicritere d Aide a la Decision.* Paris: Economica.

147. Roy, B., & Bouyssou, D. (1993). Aide multicritere la decision: Methodes et cas, . *Economica, Paris.*

148. Sabuncuoglu, I. (1998). Scheduling with neural networks: a review of the literature and new research directions. *Production Planning and Control,9*, 2-12.

149. Sabuncuoğlu, İ., Gocgun, Y., & Erel, E. (2008). Backtracking and exchange of information: Methods to enhance a beam search algorithm for assembly line scheduling. *European Journal of Operational Research, Volume 186, Issue 3*, 915-930.

150. Satoshi Kitayama, K. Y. (2012). Compromise point incorporating trade-off ratio in multi-objective optimization. *Applied Soft Computing 12:8*, 1959–1964.

151. Sawik, T. (1998). A lexicographic approach to bi-objective loading of a flexible assembly system. *European Journal of Operational Research,107: 3*, 656–668.

152. Sawik, T. (2007). A lexicographic approach to bi-objective scheduling of single-period orders in make-to-order manufacturing. *European Journal of Operation Research, 180:3*, 1060–1075.

153. Serafini, P. (1985). *Mathematics of Multi Objective Optimization.* Springer-Verlag.

154. Shahnazari-Shahrezaei, P., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Kazemipoor, H. (2013). Solving a multi-objective multi-skilled manpower scheduling model by a fuzzy goal programming approach. *Applied Mathematical Modelling, Volume 37, Issue 7*, 5424-5443.

155. Shin, W., & Ravindrav, A. (1991). Interactive Multiple Objective Optimization: Survey I -- Continuous Case. *Computers and Operations Research, 18*, 97--114.

156. Siskos, Y., & Spyridakos, A. (1999). Intelligent multicriteria decision support: Overview and perspectives. *European Journal of Operational Research, 113(2)*, 236-246.

157. Solnon, C., Cung, V.-D., & Artigues, C. (2007). The car sequencing problem: overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF'2005 challenge problem. *European Journal of Operational Research*, doi:10.1016/j.ejor.2007.04.033.

158. Stadler, W. (1988). Natural structural shapes (A unified optimal design philosophy). *Multicriteria Optimization in Engineering and in the Sciences, Ed. W Stadler, New York Plenum* , 355-390.

159. Steuer, R. (1977). Multiple objective linear programming with interval criterion weights. *Management Science, 23*, 305-316.

160. Steuer, R. E. (1989). *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application.* Krieger Publishing Company.

161. Steuer, R. E., & Choo, E.-U. (1983). An interactive weighted Tchebycheff procedure for multiple objective programming. *Mathematical Programming 1983, Volume 26, Issue 3*, 326-344 .

162. Taha, H. A. (1975). *Integer Programming Theory.* Elsevier Science & Technology Books.

163. Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rahimi-Vahed, A. (2006). Multi-criteria sequencing problem for a mixed-model assembly line in a JIT production system. *Applied Mathematics and Computation, 181*, 1471-1481.

164. Teodorovića, D., & Stojkovića, G. (1990). Model for operational daily airline scheduling. *Transportation Planning and Technology, 14:4*, 273-285.

165. T'kindt, V., & Billaut, J.-C. (2001). Multicriteria scheduling problems: a survey. *RAIRO-Operations Research, 35*, 143–163.

166. T'Kindt, V., & Billaut, J.-C. (2005). *Multicriteria Scheduling- Theory, Models and Algorithms, 2nd Edition.* Berlin: Springer.

167. Vincke, P. (1976). Une méthode interactive en programmation linéaire à plusieurs fonctions économiques. *RAIRO, 10(6)*, 5-20.

168. White, D. (1990). A bibliography on the applications of mathematical programming multiple- objective methods. *Journal of Operational Research Society, 41(8)*, 669–691.

169. Wierzbicki, A. P. (1981). A Mathematical Basis for Satisficing Decision Making. *Proceedings of the Fourth International Conference on Multiple Criteria Decision Making, University of Delaware, Newark, August 10–15, 1980* (σσ. 465-486). Berlin: Springer Berlin Heidelberg.

170. Winston, W. L., & Venkataramanan, M. (2002). *Introduction to Mathematical Programming: Applications and Algorithms, Volume 1.* C.

171. Wright, M B. (2005). Scheduling fixtures for New Zealand Cricket. *IMA Journal of Management Mathematics. 16,*, 99-112.

172. Yolmeh, A., & Kianfar, F. (2012). An efficient hybrid genetic algorithm to solve assembly line balancing problem with sequence-dependent setup times. *Computers & Industrial Engineering, Volume 62, Issue 4*, 936-945 .

173. Zeleny, M. (1974). A Concept of Compromise Solutions and the Method of the Displaced Ideal. *Computers and Operations Research*.

174. Zeleny, M. (1982). *Multiple Criteria Decision Making.* McGraw-Hill Companies, The.

175. Zeramdini, W., H., A., & Monden, Y. (2000). Bicriteria sequencing for just-in-time mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research, 38*, 3451-3470.

176. Zhang, W., & Gao, T. (2006). A min–max method with adaptive weightings for uniformly spaced Pareto optimum points. *Computers & Structures, Volume 84, Issue 28*, 1760–1769 .

177. Zhang, W., & Yang, H. (2001). A study of the weighting method for a certain type of multicriteria optimization problem. *Computers & Structures, 79: 31*, 2741-2749.

178. Zhu, J., & Ding, F. (2000). A transformed two-stage method for reducing the part-usage variation and a comparison of the product-level and part-level solutions in sequencing mixed-model assembly lines. *European Journal of Operational Research, 127*.

179. Zinflou, A., Gagné, C., & Gravel, M. (2008). Design of an Efficient Genetic Algorithm to Solve the Industrial Car Sequencing Problem. Στο X. Z. (Ed.), *Advances in Evolutionary Algorithms.* InTech.

180. Zinflou, A., Gagné, C., Gravel, M., & Price, W. L. (2006). Pareto memetic algorithm for multiple objectives optimization with an industrial application. *Journal of Heuristics*, doi: 10.1007/s10732-007-9042-2.

181. Zionts, S., & Wallenius, J. (1976). An Interactive Programming Method for Solving the Multiple Criteria Problem. *Management Science, 22*, 652–663.

182. Zionts, S., & Wallenius, J. (1983). An Interactive Multiple Objective Linear Programming Method for a Class of Underlying Nonlinear Utility Functions. *Management Science, 29*, 519–529.

183. Ασκούνης, Δ., Κουσουρής, Σ., & Παπαδέλης, Σ. (2008). *Διοίκηση Παραγωγής και Συστημάτων Υπηρεσιών.* ΕΜΠ.

184. Δατσέρης, Ι. (2007). *Δυναμικός προγραμματισμός και εφαρμογές.* ΤΕΙ Κρήτης.

185. Δούμπος, Μ. (2007). Πολυκριτήρια Συστήματα Αποφάσεων . *Σημειώσεις Μαθήματος*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης.

186. Ehrgott, M. (2000). *Multicriteria Optimization.* New York: Springer.

187. Ζλατάνης, Α. (2007). *Διπλωματική εργασία: Εναλλακτικές μέθοδοι μερικής απαρίθμησης σε προβλήματα ακεραίου προγραμματισμού .* Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα ΗΜΜΥ.

188. Κουϊκόγλου, Σ. Β. (2007). *Προγραμματισμός Παραγωγής, Σημειώσεις Μεταπτυχιακού Μαθήματος,.* Πολυτεχνείο Κρήτης.

189. Μαυρωτάς, Γ. (2000). *Πολυκριτηριακός προγραμματισμός σε συνθήκες αβεβαιότητας. Κατασκευή συστήματος υποστήριξης αποφάσεων και εφαρμογή στον ενεργειακό σχεδιασμό, Διδακτορική Διατριβή.* Αθήνα: ΕΜΠ.

190. Μεταξιώτης, Κ. (2001). *Ολοκληρωμένη Μεθοδολογία Μοντελοποίησης Συστήματος Διαχείρισης & Ευφυούς Χρονοπρογραμματισμού Παραγωγής σε ERP Περιβάλλον, Διδακτορική Διατριβή,* Αθήνα: ΕΜΠ.

191. Μπότσικας, Α. (2009). *Ευφυή και έμπειρα συστήματα διαχείρισης πόρων σε παραγωγικά συστήματα, Διδακτορική Διατριβή.* Αθήνα: ΕΜΠ.

192. Σακελλαρίου, Φ. (2007). *ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΦΑΣΕΟΛΟΓΙΑ.* Αθήνα: ΕΜΠ.

193. Σίσκος, Ι. (1998). *Γραμμικός προγραμματισμός.* Αθήνα: Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών.

194. Σίσκος, Ι. (2008). *Μοντέλα Αποφάσεων.* Αθήνα: Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών.

195. Ψαρράς, Ι. (1989). *Πολυκριτηριακός μαθηματικός προγραμματισμός: Εφαρμογές σε ενεργειακά συστήματα, Διδακτορική Διατριβή,* Αθήνα: ΕΜΠ.

196. Ψαρράς, Ι. (2010). *Συστήματα Αποφάσεων - Σημειώσεις Μαθήματος.* Αθήνα: ΕΣΑΔ - ΕΜΠ.

1

Παράρτημα

Παράρτημα:
Τυποποίηση και Οργάνωση Δεδομένων

Τα δεδομένα του προβλήματος που προσομοιάζουν δεδομένα παραγωγής μιας βιομηχανίας δίνονται σε 3 πακέτα / αρχεία δεδομένων ως ακολούθως:

- **Αρχείο Δεδομένων Παραγγελιών**:
Προσδιορισμός των παραγγελιών και των χαρακτηριστικών τους, για την περίοδο αναφοράς.
- **Αρχείο Δεδομένων Περιορισμών**:
Προσδιορισμός των ισχυόντων περιορισμών και των χαρακτηριστικών τους.
- **Αρχείο Περιορισμών Χρησιμοποίησης**:
Προσδιορισμός των παραμέτρων για τους σχετικούς περιορισμούς και τα σχετικά κριτήρια.

Αρχείο Δεδομένων Παραγγελιών:

Οι παραγγελίες των προϊόντων γίνονται ομαδοποιημένες σε οικογένειες, ήτοι σε σύνολα από παραγγελίες προϊόντων με τα ίδια τεχνικά και εμπορικά χαρακτηριστικά.

Δομή του αρχείου

Orders.dat

$1^{η}$ γραμμή:	nb_families nb_Os Q
$2^{η}$ γραμμή:	family_of_Os_1
$3^{η}$ γραμμή:	family_of_Os_2
...	...
(k+1)-η γραμμή:	family_of_Os_k
...	...

- *nb_families* είναι το πλήθος των οικογενειών,
- *nb_Os* είναι το πλήθος των εργασιών – προϊόντων που πρέπει να παραχθούν. Οι εργασίες είναι ομαδοποιημένες σε οικογένειες.
- *Q* είναι το πλήθος των τεχνικών χαρακτηριστικών που χαρακτηρίζει κάθε οικογένεια
- και η σειρά *family_of_Os_k* δίνει τον ορισμό (χαρακτηριστικά και δεδομένα) της k οικογένειας

Ορισμός μιας Οικογένειας (family of Os_i):

ID_O	*Creation*	*NB*	*line*	tc_1	tc_2	...	tc_{Q-1}	tc_Q	*priority*	*exp_pro*

- *ID_O*: Ο μοναδικός κωδικός της οικογένειας family_of_Os
- *creation*: Η ημερομηνία (σχετική ημέρα) δημιουργίας της οικογένειας (παραγγελίας) family_of_Os. Η παραγγελία-οικογένεια είναι άγνωστη στο σύστημα πριν την ημερομηνία αυτή.
- *NB*: πλήθος εργασιών στην οικογένεια
- *line*: γραμμή στην οποία οι εργασίες της οικογένειας μπορούν να παραχθούν

Αν *line*=1 οι εργασίες μπορούν να φορτωθούν μόνο στην γραμμή 1

Αν *line*=2 οι εργασίες μπορούν να φορτωθούν μόνο στην γραμμή 2

Αν *line*=3 οι εργασίες μπορούν να φορτωθούν είτε στην γραμμή 1, είτε στην γραμμή 2

- tc_i: τεχνικό χαρακτηριστικό i (i=1,...,Q)

  Αn tc_i=0, τότε η οικογένεια (άρα και οι εργασίες που την αποτελούν) δεν έχουν το χαρακτηριστικό αυτό

  Αn tc_i=1, τότε η οικογένεια (άρα και οι εργασίες που την αποτελούν) έχουν το χαρακτηριστικό αυτό

- *priority*: επίπεδο προτεραιότητας (0 ή 1, με αύξον επίπεδο σημαντικότητας)
- *exp_prod*: αναμενόμενη ημερομηνία παραγωγής (προθεσμία)

Παράδειγμα:

10	3	32	2	1	0	...	0	1	1	12

Αυτό ορίζει μια οικογένεια από 32 εργασίες και κωδικό 10.

Οι εργασίες δημιουργούνται την ημέρα 3 και αναμένεται να παραχθούν έως την ημέρα 12. Η προτεραιότητα είναι 1, και μπορούν να φορτωθούν μόνο στην γραμμή 2. Οι εργασίες διαθέτουν το 1ο χαρακτηριστικό, δεν διαθέτουν το 2ο, …, δεν διαθέτουν το προτελευταίο χαρακτηριστικό και διαθέτουν το τελευταίο.

Αρχείο Δεδομένων Περιορισμών δυναμικότητας και ημερολογιακών

Οι περιορισμοί δυναμικότητας, επιπέδου προμηθειών και ημερολογιακοί δίνονται στο αρχείο "**constr.dat**".

Δομή του Αρχείου

constr.dat

1η γραμμή:	nb_constraints
2η γραμμή:	first_day last_day
3η γραμμή:	minimum_length max_diff
4η γραμμή:	late_0 late_1
5η γραμμή:	constraint_line1_1
6η γραμμή:	constraint_line2_1
7η γραμμή:	constraint_line3_1
8η γραμμή:	constraint_line1_2
9th line:	constraint_line2_2
...	...

Όπου

- *nb_constraints* είναι το πλήθος των περιορισμών,
- *first_date* είναι το κάτω όριο για την ημέρα έναρξης της παραγωγής (συνήθως 1),
- *last_date* είναι το κάτω όριο για την ημέρα τερματισμού της παραγωγής στην συγκεκριμένη περίοδο (συνήθως 25),
- *minimum_length* είναι η ελάχιστη διάρκεια δρομολόγησης και για τις δύο γραμμές (σε ημέρες),
- *max_diff* είναι η μέγιστη διαφορά δρομολόγησης μεταξύ των γραμμών 1 και 2 (σε ημέρες),
- *late_i* η μέγιστη επιτρεπτή καθυστέρηση για της εργασίες με προτεραιότητα 1,
- και *constraint_linel_k* δίνει τον ορισμό του περιορισμού k (l=1, 2, 3; 3 γραμμές ανά περιορισμό).

Ορισμός και Περιγραφή ενός Περιορισμού

ID_CO	*Type*	*Opt*	*line*	*nb_tc*	*periodicity*

$co\_min_{first\_day}$	...	$co\_min_{first\_day}$

$co\_max_{first\_day}$	...	$co\_max_{first\_day}$

- *ID_CO*: ο μοναδικός κωδικός του περιορισμού
- *type*: τύπος του περιορισμού

  Αν *type*=1 ο περιορισμός αφορά μια γραμμή μια ημέρα

  Αν *type*=2 ο περιορισμός αφορά μια ημέρα, πολλές γραμμές

  Αν *type*=3 ο περιορισμός αφορά πολλές ημέρες, μια γραμμή

  Αν *type*=4 ο περιορισμός αφορά πολλές ημέρες, πολλές γραμμές

  Αν *type*=5 ο περιορισμός αφορά σε περιορισμό πλάνου παραγωγής και αφορά σε όλες τις οικογένειες)

- *opt*: Αριστοποίηση επί της τιμής του περιορισμού

αν *opt*=1 τότε just-in-time περιορισμός,

- *line*: γραμμή συν/σης στην οποία ισχύει ο περιορισμός

  Αν *line*=1 ο περιορισμός αναφέρεται στις εργασίες της γραμμής 1

  Αν *line*=2 ο περιορισμός αναφέρεται στις εργασίες της γραμμής 2

  Αν line=3 ο περιορισμός αναφέρεται στις εργασίες και των δύο γραμμών (1 & 2)

- *nb_tc*: ο κωδικός του τεχνικού χαρακτηριστικού που σχετίζεται και επηρεάζεται από τον περιορισμό. Μόνο οι εργασίες (οικογένειες) που *έχουν το χαρακτηριστικό αυτό, επηρεάζονται αντίστοιχα από τον περιορισμό.*
- co_min_i: Η ελάχιστη τιμή του περιορισμού για την ημέρα i
- co_max_i: Η μέγιστη τιμή του περιορισμού για την ημέρα i

Παράδειγμα:

12	3	1	1	35	1

50	50	50	40	...	40	40

50	50	50	45	...	45	45

Ο περιορισμός 12 είναι ένας περιορισμός πολλών ημερών – μιας γραμμής.

Αφορά στις εργασίες της γραμμής 1 που διαθέτουν το τεχνικό χαρακτηριστικό 35.

Αυτός ο περιορισμός συμμετέχει στην βελτιστοποίηση του κριτηρίου K_3 (ήτοι Ακρίβεια Παραγωγής Just-In-Time), (*opt*=1).

Αρχείο Περιορισμών Λόγου Χρησιμοποίησης Πόρων:

file "**resource_util_ratios.dat**".

Δομή του αρχείου

resource_util_ratios.dat

$1^η$ γραμμή:	nb_dr
$2^η$ γραμμή:	dr_line1_1
$3^η$ γραμμή:	dr_line2_1
$4^η$ γραμμή:	dr_line3_1
$5^η$ γραμμή:	dr_line4_1
$6^η$ γραμμή:	dr_line1_2
$7^η$ γραμμή:	dr_line2_2
...	...

Όπου

- *nb_dr* το πλήθος των λόγων χρησιμοποίησης
- και *dr_linel_x* δίνει τον ορισμό του *x-οστού* λόγου χρησιμοποίησης (l=1,...,3; 3 γραμμές ανά λόγο χρησιμοποίησης).

Ορισμός Περιγραφή ενός λόγου απόστασης χρησιμοποίησης

ID_DR	*nb_tc1*	*nb_tc2*	*Line*	*viol_cost*	*nb_val*

num_1	num_2	...	num_{nb_val}
$denom_1$	$denom_2$	...	$denom_{nb\_val}$
eng_cost_1	eng_cost_2	...	$eng\_cost_{nb\_val}$

- *ID_DR*: ο μοναδικός κωδικός του λόγου απόστασης χρησιμοποίησης
- *nb_tc1*: κωδικός του πρώτου από τα δύο τεχνικά χαρακτηριστικά που επηρεάζονται από τον συγκεκριμένο λόγο χρησιμοποίησης Μόνο οι εργασίες

(οικογένειες) που έχουν το χαρακτηριστικό αυτό επηρεάζονται από τον συγκεκριμένο λόγο.

- *nb_tc2*: κωδικός του δεύτερου τεχνικού χαρακτηριστικού που επηρεάζεται από τον συγκεκριμένο λόγο χρησιμοποίησης. Μόνο οι εργασίες (οικογένειες) που έχουν και τα δύο χαρακτηριστικά 1 επηρεάζονται από τον συγκεκριμένο λόγο. (συχνά χαρακτ.1 =χαρακτ.2)
- *line*: η γραμμή συναρμολόγηση για την οποία ορίζεται (εφαρμόζεται) ο συγκεκριμένος λόγος

  Αν *line*=1 τότε ο λόγος αφορά μόνο εργασίες της γραμμής 1

  Αν *line*=2 τότε ο λόγος αφορά μόνο εργασίες της γραμμής 2

  Αν *line*=3 τότε ο λόγος αφορά εργασίες και των δύο γραμμών

- *viol_cost*: το κόστος παραβίασης του λόγου αυτού .
- *nb_val*: το πλήθος των πιθανών τιμών του λόγου αυτού
- num_i: ο αριθμητής της i-οστής εναλλακτικής τιμής του λόγου αυτού
- $denom_i$: ο παρονομαστής της i-οστής εναλλακτικής τιμής του λόγου αυτού
- eng_cost_i: το κόστος που σχετίζεται με την επιλογή της i-οστής εναλλακτικής τιμής του λόγου αυτού

Παράδειγμα:

14	*4*	*26*	*2*	*1*	*3*

1	*1*	*2*

8	*2*	*3*

2	*6*	*10*

Ο λόγος χρησιμοποίησης 14 επηρεάζεται μόνο από τις εργασίες στην γραμμή 2 που διαθέτουν τα χαρακτηριστικά 4 και 26.

Ο λόγος χρησιμοποίησης 14 μπορεί να λάβει τρεις διαφορετικές τιμές 1/8, 1/2 και 2/3 με κόστος επιλογής αντίστοιχα 2, 6 και 10. Κάθε παραβίαση έχει κόστος 1.

2

Παράρτημα

Παράρτημα:

Κατάλογος Δημοσιεύσεων

Δημοσιεύσεις **σε έγκριτα διεθνή επιστημονικά περιοδικά με κριτές**:

1. Makarouni, I., Psarras, J., Siskos, E. (2013), Interactive bicriterion decision support for a large scale industrial scheduling system, Annals of Operations Research, 17 July 2013
2. Makarouni, I., Siskos, E. Psarras, J., (2013), Multiobjective large scale job sequencing optimization based on a synergy of compensatory and non compensatory methods, Journal of the Operational Research Society, *(under review: manuscript number:* JORS-13-0755-P*).*

Δημοσιεύσεις σε **επιστημονικά συνέδρια**:

1. Siskos, E., Makarouni, I., Psarras, J. Robust compromise programming of industrial scheduling jobs with variable criteria priorities, 9th HELORS Meeting on MCDA, Kavala 2012.
2. Makarouni, I., Psarras, J. and Siskos, Y. Multiobjective job sequencing optimisation in large scale industrial systems: Compensatory versus non compensatory approaches, 1st International Symposium &10th Balkan Conference on Operational Research (BALCOR 2011) 22 - 24 September 2011, Thessaloniki, Greece
3. Makarouni, I., Psarras, J. and Siskos, Y. A non-compensatory interactive approach for addressing bicriterion integer programming optimisation in large scale scheduling systems, 11ο Ειδικό Συνέδριο Ελληνικής Εταιρείας Επιχειρησιακών Ερευνών, (8η Συνάντηση Πολυκριτήριας Ανάλυσης Αποφάσεων), 2011, Eretria, Evia, Greece

4. Papadopoulou A., Doukas H., Karakosta C., Makarouni I., Ferroukhi R., Luciani, G., Psarras, J., “Tools and mechanisms fostering EU GCC cooperation on Energy Efficiency”, World Renewable Energy Congress 2011 (WREC 2011), 8-13 May 2011, Linkoping, Sweden.
5. Doukas H, Papadopoulou A, Makarouni I, Psarras J., “International Development Cooperation for the promotion of Renewable Energy Sources and Rational Use of Energy”, ARENEP, 3-4 May 2011, Athens, Greece.
6. Kostaras, G., Makarouni, I., Mitrou, G., Psarras, J., ”Solving Large Scale Multi-Criteria Job Sequencing Problems in Real Industrial Environments”, ICEIS 2000, 4-7 July 2000, Stafford, UK.
7. Psarras, J., Mitrou, G., Makarouni, I., Askounis, D., “A System based on CLP and Heuristics for Optimizing a real-world Scheduling problem in the Steel Industry”, 1st International Conference on Enterprise Information Systems, 27-30 March 1999, Setubal, Portugal,
8. Samouilidis J.-E., Makarouni, I., “Decision Support Tools for Sustainable City Planning: from the Ancient Greek “Polis” to the Modern Metropolis”, Conference “Sustainable Development of the Urban Environment”, May 27, 1999, Brussels, Belgium

Πολυκριτηριακή Μοντελοποίηση και Επίλυση προβλημάτων Χρονοπρογραμματισμού Παραγωγής μεγάλης κλίμακας

Ιωάννα Ν. Μακαρούνη

Η κα Ιωάννα Ν. Μακαρούνη είναι Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), με μεταπτυχιακό τίτλο σπουδών «Τεχνο-Οικονομικά Συστήματα». Εκπόνησε την διδακτορική διατριβή της στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (ΗΜΜΥ) του ΕΜΠ υπό την εποπτεία και την επιστημονική καθοδήγηση του Ομότιμου Καθηγητή ΕΜΠ κ. Ι.-Ε. Σαμουηλίδη.

Από τον Σεπτέμβριο του 1998 είναι ερευνήτρια στο Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης της Σχολής ΗΜΜΥ του ΕΜΠ.

Η πορεία της Ιωάννας Μακαρούνη χαρακτηρίζεται από ενδιαφέρουσα ερευνητική δραστηριότητα σε θέματα επιχειρησιακής έρευνας και διαχείρισης παραγωγικών συστημάτων, με ιδιαίτερη έμφαση στον πολυκριτηριακό μαθηματικό προγραμματισμό και στην εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα της βιομηχανίας. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής της, η Ιωάννα Μακαρούνη συνέβαλε ουσιαστικά στο διδακτικό και εργαστηριακό έργο του Εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης (μαθήματα, εργαστήρια, διπλωματικές, κ.λπ.). Έχει συμμετάσχει σε πλήθος ερευνητικών έργων στην Ελλάδα και στο εξωτερικό και έχει αποκτήσει ευρύτητα επιστημονικής εμπειρίας τόσο στο αντικείμενο έρευνάς της όσο και στην ευρύτερη περιοχή των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων και της Διοίκησης, ιδιαίτερα στα πεδία των Πληροφοριακών Συστημάτων Διοίκησης, της Διαλειτουργικότητας Συστημάτων και Οργανισμών αλλά και της Διοίκησης Ποιότητας, της Διαχείρισης Ενέργειας και της Διαχείρισης Έργων.

Η κα Μακαρούνη έχει παρουσιάσει την προτεινόμενη στην διατριβή μεθοδολογία σε μια σχετική δημοσίευση σε έγκριτο διεθνές επιστημονικό περιοδικό με κριτές και μεγάλο impact factor και έχει υποβάλει μια δεύτερη επίσης σε διεθνές έγκριτο περιοδικό με κριτές. Επίσης, έχει οκτώ δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων.