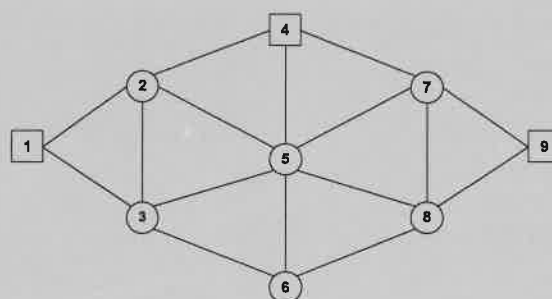


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΩΝΙΑΚΗΣ
ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΠΟΠΤΗΣ : ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ Α.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΡΑΜΜΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ
ΛΕΩΦΟΡΕΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΚΑΜΠΕΡΑΪ ΒΙΚΕΛ



ΑΘΗΝΑ , ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2003

ΤΙΤΛΟΣ : ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΡΑΜΜΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ
ΛΕΩΦΟΡΕΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΕΠΟΠΤΗΣ : Α. ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : Β.ΚΑΜΠΕΡΑΪ

ΣΥΝΟΨΗ

Αυτή η διπλωματική εργασία περιγράφει την διαδικασία σχεδιασμού των αστικών λεωφορειακών γραμμών. Είναι μια επιλεκτική σύνθεση μεθόδων και αλγορίθμων που οδηγούν γενικότερα όχι μόνο στην επίλυση αλλά και βελτιστοποίηση του συστήματος. Η διαδικασία σχεδιασμού περιλαμβάνει τον σχεδιασμό δικτύου και γραμμών και ειδικότερα τον καθορισμό των συχνοτήτων των λεωφορειακών γραμμών, τον προγραμματισμό των οχημάτων στις αντίστοιχες γραμμές και τέλος τον καθορισμό των υπηρεσιών των οδηγών των οχημάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην περιγραφή των προσεγγίσεων του πρώτου βήματος σχεδιασμού δικτύου λόγω της σημαντικής επιρροής της διαδικασίας αυτής στον γενικό κόστος του Οργανισμού. Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται σύνθετοι αλγόριθμοι γραμμικού και μη γραμμικού προγραμματισμού, επίσης ευρετικοί αλγόριθμοι και ακόμα σύμφωνα με την τελευταία τάση που υπάρχει, οι αλγόριθμοι μπορεί να είναι γενετικοί και χρησιμοποιούν κανόνες διασταύρωσης και μετάλλαξης για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων. Εφαρμογές γίνονται στο τέλος κάθε κεφαλαίου ή παρουσιάζονται αποτελέσματα των αλγορίθμων από παλιότερες εφαρμογές που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία. Τέλος αναφέρονται προγράμματα H/Y που υπάρχουν στην αγορά και επιλύουν το πρόβλημα που εξετάζεται καθώς και εισαγωγικά στοιχεία μάρκετινγκ και κόστους των λεωφορειακών γραμμών.

Λέξεις – Κλειδιά : Σχεδιασμός Λεωφορειακών Γραμμών, Σχεδιασμός Συχνοτήτων, Προγραμματισμός Λεωφορείων, Προγραμματισμός Υπηρεσιών, Γραμμικός Προγραμματισμός, Γενετικοί Αλγόριθμοι, Ευρετικοί Αλγόριθμοι, Κόστος και Μάρκετινγκ Λεωφορειακών Γραμμών.

TITLE : A REVIEW ON BUS NETWORK DESIGN AND URBAN TRANSIT
SCHEDULING

SUPERVISOR : A STATHOPOULOS

STUDENT : V. KAMBERAJ

ABSTRACT

This diploma thesis refers to The Public Bus Planning Procedure. It includes the four basic components performed in sequence; network route design, timetable design, scheduling vehicles to trips and assignment of drivers (crew). It is desirable that all four components be planned simultaneously to improve productivity and efficiency of the system. The methods require problem specific knowledge and programming skill from the scheduler's part. A number of mathematical methods are used for the optimal solution of the problem such as linear and non – linear programming, heuristic algorithms and genetic algorithms with specific genetic operators. The end of each chapter is dedicated to small or extended applications of such algorithms with conclusions and remarks. Finally, there is a reference to some well known software packages that deal with the components of Bus Planning Problem as well as some introduction to marketing and theories that evaluate the total cost from operator's point of view.

Key – Words : Bus network design, Bus frequency design, Multi – depot vehicle scheduling, Crew scheduling, Cost Allocation Models, Linear programming, Heuristic search, Genetic algorithms, Marketing.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επόπτη καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου κ. Αντώνη Σταθόπουλο για την καθοδήγηση και τις χρήσιμες πληροφορίες που χωρίς την βοήθεια και την εμπειρία του δεν θα μπορούσα να βρω. Ευχαριστώ τους καθηγητές μου που έλυσαν απορίες και μου έδωσαν χρήσιμες συμβουλές.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον Δ. Σαργιώτη, υπεύθυνος διαχειριστής του PC Lab των Πολιτικών Μηχανικών, για την βοήθεια του και για την χρησιμοποίηση των χώρων και του λογισμικού. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν στην βιβλιογραφική μου αναζήτηση στην κεντρική βιβλιοθήκη του ΕΜΠ, στην βιβλιοθήκη του ΟΑΣΑ και στην βιβλιοθήκη του ΤΕΕ. Θέλω να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπου που εργάζονται στον ΟΑΣΑ και μου μίλησαν σε μια σειρά από συζητήσεις, τον υπεύθυνο του τμήματος σχεδιασμού του ΟΑΣΑ, τους οδηγούς του Οργανισμού αλλά και τους σταθμάρχες της περιοχής της Καισαριανής. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που με στήριξαν στην διάρκεια της διπλωματικής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ειδικότερα τους γονείς μου, που με στηρίζουν χρόνια τώρα και μου παρέχουν την καθοδήγηση, την υπομονή τους, την αυτοθυσία τους, την ασφάλεια και θαλπωρή όπως και την οικονομική δυνατότητα να σπουδάζω και να μορφώνομαι.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΔΗΜΟΣΙΕΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΕΣ	7
1.1	ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΕΞΕΛΙΞΗ	7
1.2	ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΟΧΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ Δ.Σ.	9
2	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ	13
2.1	ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ	14
2.2	ΕΙΔΗ ΛΕΩΦΟΡΕΙΑΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ	16
2.3	ΠΡΟΤΥΠΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΛΕΩΦΟΡΕΙΑΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ	17
2.4	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	20
2.5	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΣΤΟΥΣ	22
2.5.1	Μοντέλα Κατανομής Κόστους	22
2.5.1.1	Περιγραφή	22
2.5.1.2	Μεθοδολογία	24
2.5.2	Αναλυτικός Καθορισμός του Κόστους Λειτουργίας	25
2.5.2.1	Περιγραφή	25
3	ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΩΝ	29
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	29
3.2	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΚΤΥΟΥ –ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	31
3.3	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΚΤΥΟΥ – ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	34
3.3.1	Σχεδιασμός Δικτύου Λεωφορειακών Γραμμών	35
3.3.1.1	Περιγραφή Προβλήματος	35
3.3.1.2	Εξεταζόμενες Παράμετροι	37
3.3.1.3	Μεθοδική Προσέγγιση Δύο Επιπέδων	40
3.3.1.3.1	Βασική Μαθηματική Διατύπωση, Επίπεδο I	44
3.3.1.3.2	Βασική Μαθηματική Διατύπωση, Επίπεδο II	44
3.3.1.4	Αλγόριθμος Κατασκευής Διαδρομών	46
3.3.2	Σχεδιασμός Γραμμών και Δικτύου των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς	48

3.3.2.1	Αναδρομή Ιδεών- Προσεγγίσεων	50
3.3.2.2	Μεθοδολογία	53
3.3.2.3	Μαθηματική Διατύπωση	57
3.3.3	Σχεδιασμός Γραμμών με την Μέθοδο Βραχείας Διαδρομής	58
3.3.3.1	Εισαγωγή	58
3.3.3.2	Μεθοδολογία	60
3.3.3.3	Δυνατά Σημεία Αναστροφής	62
3.3.3.4	Αλγόριθμος Minimax H	63
3.3.3.5	Βέλτιστη Επιμήκυνση των Καθορισμένων Βραχέων Δρομολογίων	65
3.3.4	Σχεδιασμός Δικτύου Λεωφορειακών Γραμμών με Γενετικούς Αλγόριθμους	66
3.3.4.1	Παρουσίαση του Μοντέλου και Μαθηματική Διατύπωση	67
3.3.4.2	Ο Γενετικός Αλγόριθμος	70
3.3.4.2.1	Αλγόριθμος Γένεσης Γραμμών	71
3.3.4.2.2	Γενετικοί Τελεστές	72
3.3.4.3	Συντονισμός των Χρονοαποστάσεων	76
3.4	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	77
3.4.1	ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1	77
3.4.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ 2	84
4	ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	91
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	91
4.2	ΚΛΑΣΣΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ	93
4.2.1	Προσεγγίσεις Μαθηματικού Προγραμματισμού	93
4.2.2	Προσέγγιση Βασισμένη στους Φόρτους των Επιβατών	94
4.3	ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ	96
4.3.1	Βέλτιστος Σχεδιασμός του Πίνακα A-A	97
4.3.1.1	Γραμμικό Μοντέλο	99
4.3.1.1.1	Βέλτιστες Αφίξεις – Αναχωρήσεις με Ομογενείς Συναρτήσεις Προγραμματισμένου Κόστους	101
4.3.1.1.2	Συνθήκες Βελτιστοποίησης	101
4.3.1.1.3	Ομοιόμορφη Κατανομή των Επιθυμητών Χρόνων Ταξιδιού	103
4.3.1.1.4	Βέλτιστες Αφίξεις – Αναχωρήσεις με Μη Ομογενείς Συναρτήσεις Προγραμματισμένου Κόστους	105
4.3.1.1.5	Συνθήκες Βελτιστοποίησης	105
4.3.1.1.6	Ομοιόμορφες Κατανομές των Επιθυμητών Χρόνων Αφίξης	107

4.3.1.2	Κυκλικό Μοντέλο	111
4.3.2	Μέγιστος Συγχρονισμός του Πίνακα Α-Α	112
4.3.2.1	Μαθηματική Διατύπωση Μοντέλου	115
4.3.2.2	Αποτελέσματα Μεθόδου	117
4.3.3	Εφαρμογές	119
4.3.3.1	Μέθοδος 1	120
4.3.3.2	Μέθοδος 2	121
4.3.3.3	Μέθοδος 3	121
4.3.3.4	Μέθοδος 4	122
5	ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	124
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	124
5.2	ΑΚΡΙΒΗΣ ΛΥΣΗ	126
5.3	ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΟΣ	127
5.3.1	Περιγραφή του Αλγόριθμου	129
5.3.2	Κατώτερο Όριο Μεγέθους Στόλου	131
5.4	ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ	132
5.4.1	Περιγραφή Προβλήματος	132
5.4.2	Μαθηματική Διατύπωση του Μοντέλου	134
5.4.3	Περιγραφή του Ευρετικού Αλγόριθμου	136
6	ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ	142
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	142
6.2	ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ	144
6.3	ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	150
6.4	ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ	152
6.5	ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΟΔΗΓΩΝ	154
6.5.1	Εισαγωγή	154
6.5.2	Περιγραφή προβλήματος	155
6.5.3	Μαθηματικό Μοντέλο Προβλήματος	155
6.5.4	Προσέγγιση Γρήγορων Βαρδιών	157

7	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	163
7.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ	166
7.1.1	Παρατηρήσεις στον σχεδιασμό του δικτύου των λεωφορειακών γραμμών.	166
7.1.2	Παρατηρήσεις στον σχεδιασμό γραμμών και δικτύου μέσω μαζικής μεταφοράς	167
7.1.3	Παρατηρήσεις στην στρατηγική βραχείας διαδρομής	168
7.1.4	Παρατηρήσεις στην κατασκευή του δικτύου με γενετικούς αλγόριθμους	169
7.1.5	Παρατηρήσεις στον βέλτιστο σχεδιασμό του πίνακα A – A	170
7.1.6	Παρατηρήσεις στον μέγιστο συγχρονισμό του πίνακα A-A	171
7.1.7	Παρατηρήσεις στην προσέγγιση συνάρτησης ελλείμματος	172
7.1.8	Παρατηρήσεις στο μοντέλο βελτιστοποίησης του προβλήματος προγραμματισμού οχημάτων μεγάλης κλίμακας	173
7.1.9	Παρατηρήσεις στον συνδυασμένο προγραμματισμό οχημάτων και οδηγών	174
7.2	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ Η/Υ	174
7.3	Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΜΑΡΚΕΤΙΝΓΚ	179
7.4	Η ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΜΑΡΚΕΤΙΝΓΚ ΣΤΙΣ ΔΗΜΟΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ	180
7.4.1	Η Εφαρμογή του Μάρκετινγκ στις Δημόσιες Μεταφορές	181
8	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	182
9	ΓΕΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	184
9.1	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΛΕΩΦΟΡΕΙΑΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ	184
9.2	ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	186
9.3	ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	188
9.4	ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ	190
10	ΕΙΔΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	192
11	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ	193

11.1	ΙΣΤΟΡΙΚΑ	193
11.2	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	193
11.3	ΤΕΧΝΙΚΕΣ	194
11.4	ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ	195
11.4.1	Γραμμικός Προγραμματισμός	195
11.4.2	Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	197
11.4.3	Μη Γραμμικός Προγραμματισμός	199
12	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	205
12.1	ΘΕΩΡΙΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	206
12.1.1	Ορισμοί Γραφημάτων	207
12.1.2	Παραδείγματα Γραφημάτων	208
12.1.3	Αλγόριθμος Συντομότερης Διαδρομής	209
12.1.4	Μέθοδος που Χρησιμοποιεί Πίνακες	210
12.1.5	Ο Αλγόριθμος του Dijkstra	211
12.2	ΘΕΩΡΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑΣ	212
12.2.1	Προβλήματα Απόφασης	213
12.2.2	Το ερώτημα $P = Np$	213
12.3	ΕΥΡΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	215
12.3.1	Γενικές Προσεγγίσεις	216
12.3.2	Παράδειγμα	217
12.4	ΠΟΛΥ-ΣΤΟΧΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ	218
13	ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	220
13.1	ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	220
13.2	Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΩΝ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	221
13.3	ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΓΑ	222
13.4	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	223
13.4.1	Δίλημμα του Φυλακισμένου	224
13.4.2	Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή	225
13.5	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΓΑ	226
13.6	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΕΙΨΙΑΣ	227

13.7	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ	229
13.8	ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	230
13.8.1	Γραμμικό Πρόβλημα Μεταφοράς	231
13.8.1.1	Κλασικός Γενετικός Αλγόριθμος	233
13.8.1.2	Συνάρτηση Υπολογισμού	233
13.8.1.3	Γενετικοί Τελεστές	234
13.8.1.4	Παρουσίαση σε Μορφή Μητρώου	234
13.8.2	Μη Γραμμικό Πρόβλημα Μεταφοράς	237

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΔΗΜΟΣΙΕΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΕΞΕΛΙΞΗ

Οι αστικές συγκοινωνίες όπως εμφανίζονται σήμερα, προέρχονται από μια διαδικασία συνεχείς εξέλιξης η οποία και άρχισε το έτος 1672, ή το 1678 κατά άλλες αναφορές. Τότε τα πρώτα (δημοτικά) μέσα μαζικών μεταφορών (MMM) είχαν σχεδιαστεί κατά γενική ομολογία για να ικανοποιήσουν τα μεσοαστικά στρώματα. Η εργατική τάξη κατοικούσε ακόμα στον τόπο εργασίας της στις βιομηχανικές περιοχές, ενώ η μεγαλοαστική τάξη χρησιμοποιούσε τα αμάξια και τα άλογα. Για αυτούς που δεν μπορούσαν να έχουν δική τους άμαξα, υπήρχαν τα «αμάξια της πιάτσας» που λειτουργούσαν σαν τα σημερινά ταξί.

Όπως ήταν λογικό τα αμάξια αυτά άρχισαν να οργανώνονται και να δρομολογούνται σε συγκεκριμένες διαδρομές, οι οποίες και εξασφάλιζαν το κέρδος της εποχής στους κατόχους τους. Με την εξέλιξη και το πέρασμα των χρόνων, η μεταφορική ζήτηση αυξήθηκε και επομένως οι άμαξες άρχισαν να μεγαλώνουν τους χώρους τους με αποτέλεσμα η χωρητικότητα να αυξηθεί, σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια.

Αυτά τα μεγάλα αμάξια που προορίζονταν για κοινή χρήση, ονομάστηκαν omnibus (από το λατινικό omnius στην αφαιρετική πτώση - bus = για όλους) ενώ στα ελληνικά χρησιμοποιήθηκε ο όρος «παμπορείο», αυτό δηλαδή που μεταφέρει τους πάντες. Αργότερα, το 1860 και μετά από διαγωνισμό της εταιρίας Αδελφών Χρηστομάνου, που εκμεταλλευόταν τα λεωφορεία, προτιμήθηκε ο όρος «λεωφορείο», δηλαδή αυτό που μεταφέρει το λαό. Αυτός ο όρος έχει επικρατήσει μέχρι και σήμερα [Σαρηγιάννης Γ.Μ. (2000)].

Τα πρώτα λεωφορεία εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στους δρόμους του Παρισιού από το 1672-1678, είχαν 8-12 θέσεις και τα έσερναν 4-8 άλογα. Πολύ αργότερα, το 1832 ιδιωτική εταιρία ,έπειτα από σύμβαση με τις παρισινές δημοτικές αρχές, δρομολόγησε omnibus σε συγκεκριμένες διαδρομές. Το κάθε omnibus είχε 14 θέσεις και ως προς το κόστος είχαν προβλέψει τρεις τιμές εισιτηρίων (πρώτη, δεύτερη και τρίτη θέση).

Από επιχειρηματικής άποψης αυτό ήταν μια απλή εξέλιξη καθότι είχαν προηγηθεί τέτοια ανοίγματα σε άλλες γαλλικές πόλεις όπως στη Νάντη και το Μπορντώ με αυξημένα κέρδη πάντα.

Αργότερα κάνουν την εμφάνιση τους τα πρώτα μέσα σταθερής τροχιάς. Αυτό ήταν επακόλουθο της αυξημένης ζήτησης για μετακίνηση αφού η απόσταση μεταξύ τόπου διαμονής και εργασίας όλο και αυξανόταν. Το 1842 εμφανίστηκε στους δρόμους της Νέας Υόρκης το πρώτο Τραμ, από τον γάλλο Loumbat. Αμέσως μετά εμφανίστηκε στο Παρίσι με την ονομασία L'American Train (από το αγγλικό tramway) [Νάθενας Γ. (2000)].

Με την αύξηση των πληθυσμών των πόλεων, το τραμ δεν εξυπηρετούσε πια ικανοποιητικά. Έτσι αναπτύχθηκαν σιδηρόδρομοι και αργότερα οι μητροπολιτικοί σιδηρόδρομοι, με ταυτόχρονο δίκτυο, κάτω από τους δρόμους οι οποίοι είχαν παραδοθεί ολοκληρωτικά στα αυτοκίνητα (σε ένα σύστημα που ευνοούσε τα Ι.Χ.). Το ρεύμα αυτό δημιουργήθηκε στις αρχές του 20ου αιώνα στην Αμερική και μάλιστα μετά από την ανάπτυξη της βιομηχανίας που οδήγησε σε μαζική παραγωγή του αυτοκινήτου.

Πολλές Ευρωπαϊκές πόλεις έδωσαν τους δρόμους στα Ι.Χ., ενώ υπήρχε π.χ. στην Δυτική Γερμανία, μέχρι και σύνθημα όπως το « die Autogerechte Stadt » (η πόλη η σχεδιασμένη για το αυτοκίνητο), με το οποίο και καταστράφηκαν ιστορικά κέντρα, έγιναν διαπλατύνσεις και ανισόπεδοι κόμβοι.

Φυσικά και μετά από μερικά χρόνια σχεδόν όλες οι μεγάλες πόλεις πέρασαν στο άλλο άκρο. Ήταν η Ευρωπαϊκή αντίδραση στην αμερικάνικη «Πολεοδομία του Ι.Χ.» με πολλές αναπλάσεις κέντρων και πεζοδρομήσεις. Μια από αυτές τις πόλεις ήταν και η Βιέννη η οποία και ανέτρεψε την κυριαρχία του Ι.Χ. και προώθησε ταυτόχρονα τα δημόσια και δημοτικά μέσα μεταφορών.

Μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου τα λεωφορεία άρχισαν να είναι πολύ ανταγωνιστικά και σαν αποτέλεσμα αυτού άρχισαν να εκτοπίζουν το τραμ σαν μέσο μεταφοράς. Εξ' άλλου στην Αμερική αυτό είχε γίνει από το 1930. Κλασικό παράδειγμα η πόλη του Los Angeles, η οποία το 1935 αποφάσισε να ξηλώσει τις γραμμές τραμ που είχε. Το ίδιο είχε γίνει και στην Ελλάδα, ενώ οι γραμμές είχαν πολύ καλή απόδοση [Μαζαρίδης Πρ.,(1984)]. Σήμερα συζητείται η επανατοποθέτηση κάποιων γραμμών σε περιοχές όπως στο κέντρο της Αθήνας και παραλιακά, δίπλα σε λεωφόρους.

1.2 ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΟΧΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ Δ.Σ.

Σήμερα η πόλη της Αθήνας, όπως και άλλες πόλεις της Ευρώπης, χρησιμοποιούν λεωφορειακές γραμμές σαν κύριο μέσο μεταφοράς ενώ από σχετικές μετρήσεις που έχουν γίνει, παρατηρείται μείωση της επιβατικής κίνησης. Η μείωση αυτή εξηγείται από την αύξηση των μετακινήσεων με Ι.Χ. Από το 1960 και μετά έχουμε συνεχώς αυξανόμενο αριθμό Ι.Χ., με όλα τα σχετικά επακόλουθα στο δίκτυο, στο περιβάλλον αλλά και στους ανθρώπους (κατοίκους χρήστες).

Έχοντας υπόψη τα στοιχεία από το παρελθόν, υπάρχει μόνος ένας τρόπος να είναι οι δημόσιες συγκοινωνίες και ειδικότερα οι λεωφορειακές γραμμές, ανταγωνιστικές ως προς το Ι.Χ. Από την αρχή της πορείας της εξέλιξης, σημαντικό ρόλο έπαιξαν τα χαρακτηριστικά της δρομολόγησης, χωρητικότητας και του κόστους. Αυτές είναι έννοιες που εντάσσονται στον Σχεδιασμό των Δημόσιων Συγκοινωνιών καθώς και στην Οργάνωση και την Πολιτική Ευνόησης των Δημόσιων Συγκοινωνιών.

Οι στόχοι όπως αναφέρονται σήμερα μπορούν να διακριθούν στο τι πρέπει να επιτευχθεί στο άμεσο ή μεσοπρόθεσμο μέλλον. Δηλαδή συνήθως προτιμάται ένα χρονικό διάστημα των 5-10 ετών για την σχεδίαση και την οργάνωση όπως την αναμένουν οι χρήστες.

Ακόμα πρέπει να υπάρχει διάκριση ανάμεσα σε λειτουργικούς στόχους και στόχους που αφορούν την οργάνωση της υπηρεσίας.

Παρακάτω αναφέρουμε κατηγορίες στόχων ως προς την λειτουργικότητα, βάση και διεθνής βιβλιογραφίας.

1. Αποδοτικότητα του συστήματος

Η αποδοτικότητα του συστήματος αναφέρεται στην σχέση μεταξύ των χρησιμοποιούμενων πόρων και του έργου που παράγεται. Οι ειδικότεροι στόχοι είναι :

- ▲ Ο λόγος έσοδα προς λειτουργικό κόστος να είναι εντός κάποιων ορίων.
- ▲ Ελαχιστοποίηση των αυξήσεων στο λειτουργικό κόστος μέσα από την μείωση των επικαλύψεων στις αρμοδιότητες των επιμέρους τμημάτων του φορέα. Μέσω της αύξησης της παραγωγικότητας του προσωπικού, μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, σωστή συντήρηση των οχημάτων κλπ.
- ▲ Μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας των οχημάτων για παραγωγικά χιλιόμετρα.
- ▲ Καθιέρωση ενός βέλτιστου από οικονομική άποψη συστήματος προληπτικής συντήρησης και αντικατάστασης οχημάτων.

- ▲ Μεγιστοποίηση της χρήσης νέων τεχνικών ελέγχου και παρακολούθησης της λειτουργίας του συστήματος, π.χ. χρήση ασύρματης επικοινωνίας, ηλεκτρονικών υπολογιστών για την δρομολόγηση κτλ.

2. Αποτελεσματικότητα του συστήματος

Με τον όρο αποτελεσματικότητα εννοείται το αποτέλεσμα κυρίως ως προς την ποιότητα και ποσότητα της προσφερόμενης εξυπηρέτησης.

- ▲ Ελαχιστοποίηση των ατυχημάτων μέσα και έξω από το όχημα.
- ▲ Αύξηση της αξιοπιστίας των δρομολογίων, δηλαδή συγκεκριμένα ποσοστά απόκλισης σε σχέση με τα δημοσιευμένα δρομολόγια (από σχεδιασμό)
- ▲ Εκπαίδευση του προσωπικού και βελτίωση της συμπεριφοράς του με το κοινό (επιβατικό και μη)
- ▲ Μεγιστοποίηση του συντονισμού και της συνεργασίας με άλλα μεταφορικά μέσα που λειτουργούν στην περιοχή.
- ▲ Αποφυγή υπερφορτώσεων των οχημάτων (τήρηση του συντελεστή πλήρωσης)
- ▲ Παροχή ελάχιστης εξυπηρέτησης σε περιοχές ακόμα και τις ώρες ελάχιστης ζήτησης.
- ▲ Ελαχιστοποίηση των μετεπιβιβάσεων
- ▲ Εντοπισμός των σημείων που απαιτούνται μετεπιβιβάσεις και εξυπηρέτηση της ζήτησης που παρουσιάζεται.
- ▲ Παροχή διευκολύνσεων στα άτομα με ειδικές ανάγκες ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους, με την ίδια ευκολία.
- ▲ Κάλυψη δικτύου με τέτοιο τρόπο ώστε οι αποστάσεις βαδίσματος να βρίσκονται εντός επιθυμητών ορίων.

3. Χρήση του συστήματος από το κοινό.

Οι συγκεκριμένοι στόχοι αναφέρονται στην :

- ▲ Ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους ανά μεταφερόμενο επιβάτη.
- ▲ Ελαχιστοποίηση της αναγκαίας επιδότησης ανά μεταφερόμενο επιβάτη.
- ▲ Μεγιστοποίηση των μετακινήσεων με λεωφορείο, ετησίως στην εξεταζόμενη περιοχή.

- ▲ Μεγιστοποίηση των παραγωγικών επιβατών ανά διανυόμενο οχηματοχιλιόμετρα.
- ▲ Μεγιστοποίηση των επιβατών μέσα στα όριο επιθυμητής πληρότητας ανά όχημα.

4. Πολιτική Κομίστρων

Τα έσοδα είναι για όλους τους οργανισμούς πολύ σημαντικά και οι στόχοι που συνήθως τίθενται είναι :

- ▲ Ύπαρξη ενός κοινωνικά δίκαιου και εξισορροπημένου συστήματος κομίστρων που θα λαμβάνει υπόψη την ώρα της ημέρας, το είδος της υπηρεσίας, την απόσταση μεταφοράς, το επίπεδο εξυπηρέτησης κτλ. Σε σχέση με το κόστος λειτουργία του φορέα και την πρακτική συλλογής των κομίστρων.
- ▲ Το ύψος των κομίστρων να δημιουργεί έσοδα που να καλύπτουν το έξοδα του συστήματος.
- ▲ Τα έσοδα που «χάνονται» στο επιθυμητό ποσοστό της ασκούμενης πολιτικής από την επιβλέπουσα αρχή να επιστρέφουν στον φορέα ως επιδοτήσεις.
- ▲ Τα κόμιστρα πρέπει να ενθαρρύνουν την χρήση των λεωφορείων από ειδικές κατηγορίες μετακινουμένων που δεν έχουν την δυνατότητα επιλογής άλλου μέσου.
- ▲ Τα κόμιστρα πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένα με τις προβλεπόμενες τιμές και συντονισμένα με άλλα μέσα συγκοινωνίας που μπορεί να υπάρχουν στην περιοχή. Αυτό για λόγους συμπληρωματικότητας και όχι ανταγωνιστικότητας μεταξύ των μέσων μεταφοράς.

5. Διοίκηση Συγκοινωνιακών Φορέων

Η διοίκηση θα είναι υπεύθυνη για :

- ▲ Τακτική συλλογή στατιστικών στοιχείων που να προσδιορίζουν επαρκώς την λειτουργία του συστήματος.
- ▲ Αυστηρούς ελέγχους της εξέλιξης των μεγεθών του προϋπολογισμού.
- ▲ Καθιέρωση και διατήρηση προγραμμάτων εκπαίδευσης και αξιολόγησης του προσωπικού.
- ▲ Ενημέρωση του κοινού στα θέματα λειτουργίας και ανάπτυξης του φορέα.

- ▲ Διαμόρφωση και προώθηση ρεαλιστικών προγραμμάτων ανάπτυξης σε ετήσια και επαναλαμβανόμενη βάση.
- ▲ Συντονισμός με πολεοδομικούς και οικονομικούς στόχους ανάπτυξης της περιοχής που λειτουργεί το σύστημα.
- ▲ Χρήση νέων τεχνολογιών και μεθόδων ως προς την λειτουργία και τον έλεγχο της εκμετάλλευσης του δυναμικού του συστήματος.
- ▲ Καθιέρωση λειτουργικών προτύπων για όλους τους τομείς της λειτουργία του φορέα.
- ▲ Μεγιστοποίηση της συμμετοχής του κοινού στην οργάνωση και ανάπτυξη της εξυπηρέτησης που προσφέρεται από το σύστημα.
- ▲ Μεγιστοποίηση των ειδικών παροχών προς το προσωπικό της υπηρεσίας.
- ▲ Πρόβλεψη και συνεχής ενημέρωση σχεδίων για έκτακτες ανάγκες και δυσμενής καιρικές συνθήκες.

6. Δημόσιες σχέσεις και Marketing

Βασικά στοιχεία και πολύ καθοριστικά για την γενική εικόνα ενός οργανισμού είναι οι δημόσιες σχέσεις, η διαφήμιση και η προώθηση των συμφερόντων του φορέα στην γενικότερη αγορά.

Αν και όπως πολύ εύστοχα λέγεται ότι το καλό προϊόν δεν χρειάζεται διαφήμιση, μάλλον θα πρέπει να συμβαδίζουμε με την εποχή μας και να δεχτούμε ότι δεν υπάρχει κακή διαφήμιση, όπως αναφέρεται και πως οτιδήποτε που μπορεί να αυξήσει τα έσοδα, μέσα στα πλαίσια της ηθικής μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Έτσι λοιπόν στόχος είναι η «παραγωγή» ιδεών και τεχνικής Marketing του αντίστοιχου τομέα του φορέα. Απώτερος στόχος μπορεί να είναι η προσέλκυση του επιβατικού κοινού μέσω λογότυπων και φράσεων του τύπου « Χρησιμοποιήστε Λεωφορείο, Κερδίστε Χρόνο » κλπ .

Οι παραπάνω κατηγορίες βέβαια διαθέτουν και αντικρουόμενους στόχους που θα πρέπει οι μελετητές ή η διοίκηση να αξιολογήσει και να επιλέξει συντελεστές βαρύτητας. Αυτό σημαίνει πως δεν θα ικανοποιούνται όλοι οι στόχοι ταυτοχρόνως και προφανώς σε συγκεκριμένες εφαρμογές θα πρέπει να επιλεγούν κατάλληλα.

Η συγκεκριμένη διπλωματική θα ασχοληθεί με θέματα οργάνωσης και σχεδιασμού των δημόσιων συγκοινωνιών, αλλά δεν θα θίξει διοικητικούς στόχους και στόχους από την πολιτική των δημόσιων σχέσεων και του Marketing. Στο τέλος παραθέτονται κάποιες εισαγωγικές έννοιες οι οποίες είναι απαραίτητες λόγω της μεγάλης διάδοσης και εφαρμογής των τεχνικών μάρκετινγκ στην Ελλάδα αλλά και στο εξωτερικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ

Αντικείμενο μελέτης, όπως ειπώθηκε στην εισαγωγή θα είναι κατά κύριο λόγο η ανάπτυξη των μεθόδων που οδηγούν στον σχεδιασμό της λειτουργίας μιας λεωφορειακής γραμμής. Η κάθε διαδικασία που ακολουθείται συσχετίζεται και με συγκεκριμένο πρόβλημα που θα αναλυθεί σε ιδιαίτερο κεφάλαιο και θα δίνεται σημασία κάθε φορά και στην εφαρμογή που θα ακολουθεί, βάση των προηγούμενων μαθηματικών διατυπώσεων. Η ανάπτυξη θα βασίζεται σε παλιότερες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν αλλά σε συνδυασμό με τις νεώτερες που έχουν παρουσιαστεί ή θα παρουσιαστούν. Κατά την ανάπτυξη της διπλωματικής θα υπάρξουν συγκεκριμένες διαδικασίες που αποτελούν το πλαίσιο του προβλήματος σχεδιασμού και μέθοδοι επίλυσης των προβλημάτων αυτών σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί στο παρελθόν ή που θα ήταν σκόπιμο να προτείνει η διπλωματική λόγω της διάδοσης και της ευρείας αποδοχής που απολαμβάνουν.

Ακολουθούνται οι εξής διαδικασίες κατά τον σχεδιασμό :

1. Σχεδιασμός δικτύου και γραμμών
2. Καθορισμός συχνοτήτων
3. Καθορισμός δρομολογίων
4. Καθορισμός υπηρεσιών

Εξ' αρχής μπορούμε να πούμε πως υπάρχει για κάθε διαδικασία που εξετάζεται διαφορετική αντιμετώπιση ως προς τους παραμέτρους, με αποτέλεσμα ο κάθε μελετητής να έχει και μια διαφορετική λύση του ιδίου προβλήματος. Βέβαια και υπάρχει σύγκληση ιδεών όταν το πρόβλημα εξετάζεται από την ίδια οπτική γωνία. Όλα αυτά θα αναφερθούν στα κεφάλαια 3,4,5,6 με πολλές λεπτομέρειες.

Αξίζει βέβαια να τονισθεί ότι ως προς τις εφαρμογές, ακόμα και όταν έχουμε εκτεταμένη χρήση υπολογιστών, δεν υπάρχει ένα πρότυπο το οποίο και να χρησιμοποιείται και σε άλλες περιοχές. Δηλαδή παρόλο που η ανάλυση και τα συμπεράσματα είναι γενικής μορφής υπάρχουν επιφυλάξεις για το τι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση σχεδιασμού, είτε διαδικασίας είτε σχεδιασμού της λειτουργίας του όλου συστήματος. Αυτό ισχύει ακόμα περισσότερο στους αλγόριθμους των προγραμμάτων Η/Υ. Αυτός είναι εξ' άλλου και ο λόγος που η παραπάνω

διαδικασίες δεν μπορούν να επιλυθούν ταυτόχρονα και ο ανθρώπινος παράγοντας δεν μπορεί να παρακαμφθεί από τα προγράμματα Η/Υ.

Θεωρείται χρήσιμο να αναφερθούν εισαγωγικές έννοιες πριν την εξέταση των μεθόδων καθότι θα ευνοηθεί και η ανάπτυξη τους αργότερα. Θα εξετάσουμε την μορφή του δικτύου, την πυκνότητα των λεωφορειακών γραμμών και την οργάνωση των λεωφορειακών γραμμών από την σκοπιά των εγκαταστάσεων.

2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ

Το δίκτυο των λεωφορειακών γραμμών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην λειτουργία και στην εξυπηρέτηση του επιβατικού κοινού.

Από την μια πλευρά μπορεί κάποιος να πει πως δεν υπάρχουν πολλές επιλογές για το δίκτυο αφού το δίκτυο των λεωφορειακών γραμμών στις περισσότερες των περιπτώσεων ακολουθεί την χάραξη του οδικού δικτύου. Όμως αυτό δεν είναι αναγκαστικό. Έτσι ενώ έχουμε ένα ορθογωνικό οδικό δίκτυο μπορεί να μας συμφέρει να χρησιμοποιήσουμε ένα δίκτυο ακτινικής μορφής για τις λεωφορειακές γραμμές.

Από την άλλη πλευρά υπάρχει το ζήτημα της εξυπηρέτησης του επιβατικού κοινού και επομένως στο προηγούμενο παράδειγμα ο σχεδιασμός σε ακτινικό δίκτυο των λεωφορειακών γραμμών να είναι απαραίτητος ή να μην μας εξυπηρετεί καθόλου εν' τέλει.

Παρακάτω αναφέρονται βασικές μορφές δικτύων και κάποια βασικά μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα [Φραντζεσκάκης, Ι.Μ. και Γιαννόπουλος, Γ.Α. (1986)].

Α) Ακτινική Μορφή Δικτύου

Ένα δίκτυο με αυτή την μορφή αναμένεται να εξυπηρετεί την ζήτηση από την περιφέρεια στο κέντρο, ακτινικά. Αυτό ως συνέπεια έχει την συγκέντρωση των μεταφερομένων στο κέντρο και άρα δεν συνιστάται για πόλεις με μεγάλο πληθυσμό (αναφέρεται μια τιμή στην βιβλιογραφία μέχρι 20000 κατοίκους). Συνήθως στο κέντρο χρειάζεται να υπάρχουν εγκαταστάσεις όπως αφετηρίες και τέρματα με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται το περιβάλλον και να υπάρχει στενότητα χώρου.

Β) Ορθογωνική Μορφή Δικτύου ή Κάνναβος

Για να έχουμε μια ορθογωνική μορφή δικτύου θα πρέπει οι γραμμές να δημιουργούν ένα ορθογώνιο πλέγμα. Το πλέγμα αυτό προφανώς θα περιλαμβάνει και το κέντρο όμως η βασική διαφορά με την ακτινική μορφή είναι στο ότι δεν έχουμε την σύγκλιση των γραμμών στο κέντρο και την δημιουργία σημείων συγκέντρωσης.

Το κύριο πλεονέκτημα της ορθογωνικής μορφής είναι ότι οι επιβάτες προσανατολίζονται πιο εύκολα αφού συνήθως οι στάσεις βρίσκονται σε συμμετρικές θέσεις για τις δύο κατευθύνσεις και άρα δεν είναι απαραίτητο κάποιος να γνωρίζει την περιοχή ενώ υπάρχει προσπελασιμότητα σε περισσότερες περιοχές.

Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι δημιουργεί πολλές μετεπιβάσεις και επομένως μεγαλύτερο όγκο μεταφερομένων καθώς και περισσότερα οχηματοχιλιόμετρα (δρομολόγια λεωφορείων) για την αντιμετώπιση της ζήτησης. Το τελευταίο μπορεί να σημαίνει σημαντική επιβάρυνση του οδικού δικτύου και άρα να χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην εφαρμογή αυτής της μορφής δικτύου προκειμένου να μην έχουμε κυκλοφοριακή συμφόρηση.

Πάντως το δίκτυο εφαρμόζεται σε μεγαλουπόλεις και γενικότερα όπου το φαινόμενο της αστυφιλίας είναι έντονο.

Γ) Γραμμική ή Μικτή Μορφή Δικτύου

Ένα τέτοιο δίκτυο διαθέτει γραμμές κορμού μεταξύ αστικών περιοχών σε συνδυασμό με τοπικές γραμμές οι οποίες μπορεί να είναι ακτινικής ή ορθογωνικής μορφής. Επομένως μπορούμε να πούμε πως είναι ένας συνδυασμός των παραπάνω δικτύων που αναφέρθηκαν.

Δεν είναι τυχαίο εξάλλου ότι βασικό πλεονέκτημα είναι η δημιουργία επικάλυψεων των γραμμών των λεωφορείων. Αυτό βέβαια δεν είναι στόχος και μάλιστα το θεωρούμε μειονέκτημα πολλές φορές, όμως σε συνδυασμό με τις αυξημένες απαιτήσεις δρομολογίων από το ορθογωνικό δίκτυο, ασφαλώς θεωρείται πλεονέκτημα αφού χρειάζονται λιγότερες δρομολογήσεις λεωφορείων. Για παράδειγμα θεωρείται μειονέκτημα να υπάρχει επικάλυψη σε μια περιοχή που δεν υπάρχει μεταφορική ζήτηση αλλά η επικάλυψη ευνοεί την μεταφορά επιβατών σε μια περιοχή κοντά στο κέντρο όπου η ζήτηση είναι μεγάλη και το κόστος θα αυξανόταν υπέρμετρα εάν δρομολογηθούν περισσότερα λεωφορεία. Στην τελευταία περίπτωση η επικάλυψη γραμμών είναι ευνοϊκή. Η έννοια της επικάλυψης είναι σημαντική για αυτό και καθορίζεται στο επόμενο υποκεφάλαιο ως πρότυπο και αναλύεται περισσότερο.

2.2 ΕΙΔΗ ΛΕΩΦΟΡΕΙΑΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ

Οι λεωφορειακές γραμμές κατατάσσονται συνήθως σε δύο κατηγορίες

- α. Συνεχούς λειτουργίας ,δηλαδή έχουν στις περισσότερες των περιπτώσεων ωράριο 6 το πρωί με 12 το βράδυ ή λειτουργούν όλο το εικοσιτετράωρο.
- β. Μερικής λειτουργίας ,δηλαδή λειτουργούν μόνο τις ώρες αιχμής για να καλύψουν την ζήτηση.

Η παραπάνω κατάταξη γίνεται με βάση τις ώρες λειτουργίας. Εάν η κατάταξη γίνει με βάση τις στάσεις και την διαδρομή, θα είχαμε :

- α. Σταθερή διαδρομή και σταθερές στάσεις
Δηλαδή δεν αλλάζει η διαδρομή και έχουν καθοριστεί και οι στάσεις των λεωφορείων. Ο οδηγός οδηγεί το λεωφορείο από στάση σε στάση.
- β. Σταθερή διαδρομή με μεταβλητές στάσεις
Αυτή είναι η περίπτωση κατά την οποία ο οδηγός ακολουθεί την ίδια διαδρομή όμως μπορεί ανάλογα με την ζήτηση να σταματά ή να μην σταματά σε μια στάση. Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν οι περισσότερες λεωφορειακές γραμμές της Αθήνας.
- γ. Μεταβλητή διαδρομή με σταθερές στάσεις
Σε αυτή την περίπτωση ο οδηγός (ή καλύτερα η υπηρεσία του Οργανισμού που υπάρχει για αυτή την περίπτωση πίσω από αυτή την απόφαση) έχει την δυνατότητα να καθορίσει την διαδρομή του με βάση της κυκλοφοριακές συνθήκες, ενώ πρέπει να εξυπηρετεί επιβάτες σε σταθερές στάσεις.
- δ. Μεταβλητή διαδρομή με μεταβλητές στάσεις
Είναι η περίπτωση κατά την οποία η διαδρομές και οι στάσεις είναι συνάρτηση καθαρά της ζήτησης και επομένως χρειάζεται καθοδήγηση ως προς την διαδρομή και την στάση κάθε φορά. Αυτή η καθοδήγηση μπορεί να γίνει από πρόγραμμα Η/Υ το οποίο θα έχει την ευθύνη της συλλογής στοιχείων για την ζήτηση και τον προορισμό, ενώ μέσω περίπλοκων διεργασιών θα γίνεται σχεδιασμός γραμμής σε πραγματικό χρόνο και προφανώς η υποδομή που χρειάζεται σε μια τέτοια περίπτωση είναι μεγάλη και το κόστος πολύ αυξημένο.

2.3 ΠΡΟΤΥΠΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΛΕΩΦΟΡΕΙΑΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ

Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες ανά τον κόσμο ως προς τα σωστά πρότυπα και τις σωστές προδιαγραφές. Δεδομένου ότι τα πρότυπα κάνουν την ζωή μας πιο εύκολη μια μεγάλη προσπάθεια έχει καταβληθεί ώστε να δημιουργηθούν τα πρότυπα αυτά και να τα συμβουλεύονται οι μελετητές κάθε φορά.

Μια μεγάλη προσπάθεια προς αυτή την κατεύθυνση έχει γίνει συγκεκριμένα στην Αμερική από το Transit Cooperative Research Program το οποίο και χρηματοδοτείται από το The Federal Transit Administration [TCRP Synthesis 10]. Τα μέλη που συμμετέχουν στο πρόγραμμα αυτό ασχολούνται με τις μετακινήσεις ατόμων είτε στον ιδιωτικό τομέα μέσω των εταιριών, είτε στα πανεπιστήμια μέσω ερευνητικών προγραμμάτων.

Στα επόμενα θα αναφερθούν βασικές αρχές χάραξης και λειτουργίας λεωφορειακών γραμμών. Γενικά μπορούμε να πούμε πως όταν χρειάζεται χάραξη που να εξυπηρετεί ένα υφιστάμενο δίκτυο, αυτό που κάνουμε είναι να προσαρμοστούμε στην υπάρχουσα κατάσταση και να λάβουμε υπόψη τους περιορισμούς που το υπάρχον δίκτυο θέτει. Από την άλλη όμως αυτό που ζητείται κατά την χάραξη μιας νέας λεωφορειακής γραμμής είναι να παρέχει την καλύτερη δυνατή εξυπηρέτηση στους κατοίκους μιας περιοχής με το λιγότερο κόστος σαν βασικό περιορισμό, ώστε η εταιρία να είναι βιώσιμη και αυτό να επιφέρει τα αναμενόμενα κέρδη.

Έχοντας τα παραπάνω ως γνώμονα, αναφέρουμε της βασικές αρχές λειτουργίας και χάραξης γραμμής :

A. Δημιουργία γραμμών ελάχιστης απόστασης

Ως προς την απόσταση της λεωφορειακής γραμμής αυτό που συνήθως ζητείται είναι να περιορίζεται σε κάποιο θεμιτό μήκος και να ακολουθεί μια ευθύγραμμη χάραξη, δεδομένο ότι ο πιο σύντομος δρόμος είναι η ευθεία.

Αυτό σημαίνει πως ανάμεσα στο τέρμα και την αφετηρία προτείνεται η λιγότερη παρέκκλιση από την ευθεία και τον μικρότερο δυνατό χρόνο σε κυκλικές διαδρομές, οι οποίες δημιουργούν καθυστερήσεις και κυκλοφοριακές εμπλοκές. Βέβαια αυτό δεν είναι πάντα εφικτό όμως

πρέπει να γίνει η καλύτερη δυνατή προσαρμογή στο υπάρχον οδικό δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα ο μέγιστος χρόνος διαδρομής του λεωφορείου μέσα στην παρέκκλιση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 λεπτά, στα οποία και περιλαμβάνονται τα λεπτά που χρειάζονται για τις στάσεις του λεωφορείου.

Για την διαδρομή του λεωφορείου, το μήκος της γραμμής πρέπει να τέτοιο ώστε οι παρέκκλιση που θα γίνεται εάν συγκριθεί με την διαδρομή ενός Ι.Χ. να είναι μεταξύ 20 % (επιθυμητή) – 40 % (μέγιστη).

Για τον μέσο χρόνο διαδρομής του επιβάτη έχει οριστεί ότι η παρέκκλιση δεν πρέπει να ξεπερνά το 25% του χρόνου της λεωφορειακής γραμμής.

Ως προς τις παρεκκλίσεις από την θεωρητική ευθεία, αυτές δεν πρέπει να ξεπερνάνε σε αριθμό την μέγιστη τιμή 2.

Η παρέκκλιση δε στην μέση της γραμμής δεν συνιστάται και πρέπει να εφαρμόζεται σε εξαιρετικές περιπτώσεις εξυπηρέτησης πυκνοκατοικημένων περιοχών.

Τέλος τα παραπάνω κριτήρια πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα για να δικαιολογείται μια παρέκκλιση. Εάν έστω και ένα από τα παραπάνω δεν ισχύει, τότε η παρέκκλιση πρέπει να απορρίπτεται.

Β. Ύπαρξη μιας ικανοποιητικής επιβατικής ζήτησης

Όταν σχεδιάζεται μια νέα γραμμή ή μια επέκταση της υφιστάμενης γραμμής τότε το βασικό κριτήριο είναι η μέγιστη εξυπηρέτηση του επιβατικού κοινού. Με αυτό το κριτήριο αντισταθμίζουμε τα επιπλέον έξοδα που θα προκύψουν από μια τέτοια επέκταση με τα επιπλέον έσοδα που θα έχει η εκάστοτε εταιρία. Δηλαδή υπολογίζεται εάν από την πλευρά της εταιρίας μια τέτοια κίνηση είναι επιχειρηματικά επιτυχημένη. Βεβαίως εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν έννοιες όπως το «Social Optimum» (Βέλτιστο για την κοινωνία) και «User Optimum» (Βέλτιστο για τον χρήστη), οι οποίες έρχονται να υπενθυμίσουν εάν το σύστημα όπως έχει σχεδιάσει ή θα σχεδιαστεί εξυπηρετεί το κέρδος της εταιρίας ή την απόλυτη εξυπηρέτηση των επιβατών. Τα ζητήματα αυτά είναι πολύ λεπτά και καθορίζουν πολλές φορές ακόμα και την ίδια την διαδικασία σχεδιασμού. Το κόστος, τέλος εκφράζεται διαφορετικά και γενικός είναι ένας παράγοντας ο οποίος πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Δεδομένο όμως ότι μιλάμε για Δημόσιες Συγκοινωνίες και ειδικότερα για λεωφορεία, εξ' αρχής ξεκαθαρίζουμε ότι πρέπει να είναι οικονομικά αυτόνομη μια τέτοια εταιρία ενώ το σύστημα να είναι βέλτιστο για τον χρήστη. Δηλαδή επιζητείται κάθε φορά η “χρυσή τομή” και όχι η μονόπλευρη ευνόηση των συμφερόντων των εταιριών ή της κοινωνίας

(πολιτικά συμφέροντα κλπ). Απορρέει ότι ο κύριος λόγος που υπαγορεύει σύνεση και προφανώς βαθιά γνώση του αντικειμένου από την πλευρά του μελετητή είναι η εύρεση της « χρυσής τομής ».

Με γνώμονα τα παραπάνω προτείνονται τα εξής :

1. Να προσδιορισθεί η άμεση επιβατική κίνηση που η γραμμή θα εξυπηρετεί. Λέγοντας άμεση εννοούμε την επιβατική κίνηση που αναμένουμε να εξυπηρετήσουμε στον πρώτο ή δεύτερο μήνα μετά την λειτουργία της γραμμής. Ο τρόπος προσδιορισμού δεν ξεκαθαρίζεται και αφήνεται στην κρίση του μελετητή.
2. Να αναμένεται μια αυξημένη επιβατική κίνηση που δημιουργείται στις περιοχές από τις οποίες θα περνά η λεωφορειακή γραμμή. Αυτή η επιβατική κίνηση δημιουργείται ως επί των πλείστον μετά τα πρώτα έτη λειτουργίας της γραμμής (τα πρώτα 5 έτη).
3. Να ξεκαθαριστεί εάν η προβλεπόμενη επιβατική κίνηση είναι μικρότερη από 1800-2000 και αν αυτό συμβαίνει να απορριφθεί η λύση μιας γραμμής συνεχής λειτουργίας και να εξεταστεί αν μπορεί να εφαρμοστεί μια γραμμή περιοδικής λειτουργίας. Αν τέλος η επιβατική κίνηση που περιμένουμε άμεσα να εξυπηρετήσουμε είναι μικρότερη από 100 (την ώρα αιχμής), τότε πρέπει να απορρίψουμε την δημιουργία λεωφορειακής γραμμής.

Γ. Αποφυγή αλληλοεπικαλύψεων των λεωφορειακών γραμμών

Σε ένα ιδεατό δίκτυο η εξυπηρέτηση της περιοχής γίνεται μόνο με μία λεωφορειακή γραμμή η οποία μάλιστα βρίσκεται σε μια απόσταση βαδίσματος για τους επιβάτες, σταθερής και προκαθορισμένης τιμής.

Επικάλυψη έχουμε λοιπόν όταν δύο οι περισσότερες λεωφορειακές γραμμές εξυπηρετούν μια δεδομένη περιοχή.

Βασικά επικάλυψη στην πράξη εννοούμε όταν οι γραμμές που εξυπηρετούν είναι τουλάχιστον 3 και πάνω.

Ο λόγος που θέλουμε να αποφύγουμε τις επικαλύψεις είναι προφανώς το αυξημένο κόστος το οποίο και δεν αντισταθμίζεται από τα έσοδα από τα κόμιστρα των λεωφορείων. Αυτός είναι ο κύριος και αναμφισβήτητος λόγος.

Όμως υπάρχουν κάποιες προϋποθέσεις, οι οποίες αν πληρούνται, μπορούμε να έχουμε επικαλύψεις των λεωφορειακών γραμμών. Αυτές είναι τρεις και ισχύουν μόνο για κεντρικές περιοχές στις οποίες η επιβατική κίνηση πρέπει να ευνοείτε και δεν συμφέρει ο συνωστισμός.

Οι προϋποθέσεις αυτές είναι :

1. Οι επικαλύψεις στις προκαθορισμένες συχνότητες των δρομολογίων στις στάσεις των λεωφορείων να είναι της τάξης των 3 ή περισσότερων λεπτών την ώρα αιχμής. Εκτός των ωρών αιχμής η επικάλυψη των συχνοτήτων να είναι 6-8 λεπτά.
2. Ο μέσος βαθμός πλήρωσης των λεωφορείων στο επικαλυπτόμενο τμήμα της διαδρομής να μην είναι μικρότερος από το 60% της μέγιστης επιτρεπόμενης πλήρωσης για το είδος των χρησιμοποιούμενων λεωφορείων.
3. Το μήκος του δικτύου πάνω στο οποίο υπάρχει επικάλυψη να μην είναι πάνω από 50% του συνολικού μήκους κάθε μιας από τις επικαλυπτόμενες γραμμές.

Τέλος να σημειωθεί ότι όταν τα κριτήρια αυτά δεν ισχύουν δεν πρέπει να υπάρχει επικάλυψη γραμμών. Η τεχνική που εφαρμόστηκε σε διάφορες περιπτώσεις, κατά τις οποίες μετακινήθηκαν οι στάσεις σε συγκεκριμένες γραμμές, αποδείχτηκε ότι δεν βοηθά την κατάσταση. Αυτό γιατί στο επιβατικό κοινό δημιουργείται σύγχυση από την μια και από την άλλη δεν παύουν οι γραμμές να είναι επικαλυπτόμενες και ίδια προβλήματα να συνεχίζουν να υφίστανται.

2.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Για να υπάρξει σαφέστερη εικόνα και μεγαλύτερη αμεσότητα ως προς την εννοιολογική σημασία των αντίστοιχων αγγλικών όρων στην συνέχεια, θεωρείται σκόπιμο να αναφερθούν οι κυριότερες έννοιες που θα μας απασχολήσουν στην συνέχεια της διπλωματικής.

☐ Πίνακας δρομολογίων (Time schedule or timetable)

Περιλαμβάνει το χρονικό πρόγραμμα της γραμμής και τις ώρες αναχώρησης των λεωφορείων από τους τερματικούς σταθμούς της γραμμής καθώς και τις ώρες διέλευσης από τις ενδιάμεσες στάσεις.

☐ Πρόγραμμα Οχημάτων (Vehicle or Bus Schedule)

Είναι το πρόγραμμα που περιγράφει πλήρως τις μετακινήσεις των οχημάτων της γραμμής κατά τη διάρκεια της ημέρας. Προκύπτει θεωρικά σωστό ενώ στην πράξη τροποποιείται από τους σταθμάρχες.

☐ Πρόγραμμα Προσωπικού (Crew Schedule)

Πρόκειται για το πρόγραμμα που εξασφαλίζει την επάνδρωση των οχημάτων με οδηγούς, όλες τις ώρες κίνησης τους τηρώντας πάντα τους κανόνες απασχόλησης του προσωπικού.

☐ Πρόγραμμα Εργασίας και Ανάπαυσης (Duty Roster)

Είναι το πρόγραμμα που προσδιορίζει τις συγκεκριμένες υπηρεσίες και ημέρες ανάπαυσης μέσα στον ορίζοντα προγραμματισμού (αλλιώς και Scheduling Horizon), σύμφωνα με τους ισχύοντες κανόνες απασχόλησης των εργαζομένων.

☐ Χρονοαπόσταση (Headway)

Πρόκειται για την χρονική περίοδο μεταξύ διαδοχικών διελεύσεων των λεωφορείων από ένα σημείο μιας λεωφορειακής γραμμής.

☐ Σημεία αλλαγής (Relief Points)

Είναι κατά κανόνα η αφετηρία ή το τέρμα μιας λεωφορειακής γραμμής. Σε αυτά τα σημεία προβλέπεται ο οδηγός να ξεκουράζεται ή να σταματά ή να αρχίσει την βάρδια του. Δεδομένο ότι υπάρχουν εγκαταστάσεις για την διευκόλυνση του οδηγού δεν συνηθίζονται να υφίστανται σε ενδιάμεσες θέσεις (στάσεις) της γραμμής.

☐ Υπηρεσία Οδηγού (Duty)

Είναι το σύνολο των δρομολογίων που αποτελούν το ημερήσιο πρόγραμμα του οδηγού.

☐ Ασυνεχής Υπηρεσία Οδηγού (Split Duty)

Είναι η υπηρεσία του οδηγού συμπεριλαμβανομένου και ενός μεγάλου διαλείμματος διάρκειας τριών μέχρι πέντε ωρών. Αυτό σημαίνει πως ο οδηγός εργάζεται για δέκα με δώδεκα ώρες την ημέρα και για αυτό συνήθως αποφεύγεται.

☐ Μπλοκ (Block)

Είναι τα σύνολο των δρομολογίων που εκτελούνται από ένα λεωφορείο μετά την έξοδο του από το αμαξοστάσιο.

☐ Πρόγραμμα Λεωφορείου (Bus Schedule)

Είναι ο συνδυασμός των δρομολογίων που εκτελούνται από το λεωφορείο από την στιγμή της εξόδου του λεωφορείου από το αμαξοστάσιο μέχρι την στιγμή της επιστροφής του.

□ Νεκρές Διαδρομές (Deadhead Trips)

Πρόκειται για τις διαδρομές που το λεωφορείο υποχρεούται να κάνει χωρίς να αποφέρει έσοδα στην εταιρεία. Είναι δηλαδή για διαδρομές χωρίς επιβάτες ,είτε διαδρομές από και προς αμαξοστάσιο είτε γενικά εκτός υπηρεσίας διαδρομές.

□ Νεκρός Χρόνος Οχήματος (Vehicle Waiting Time)

Αποτελεί το χρόνο που απαιτούν οι νεκρές διαδρομές καθώς και τον χρόνο παραμονής στα σημεία αλλαγής .

2.5 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΣΤΟΥΣ

Στα πλαίσια της διπλωματικής, θεωρώντας πως όλες οι ενέργειες που γίνονται κατά τον σχεδιασμό, έχουν άμεσο αντίκτυπο στο κόστος, θα προσπαθήσουμε να αναφέρουμε τις πιο σύγχρονες μεθόδους υπολογισμού κόστους λεωφορειακών γραμμών [Lindquist E. (1999)].

Έτσι θα αναφερθούμε σε δύο βασικούς τρόπους κοστολόγησης.

A. Με την χρήση συνολικών στοιχείων κόστους ανά χιλιόμετρο, ή οχηματοχιλιόμετρο ,ή όχημα κ.λ.π Στην περίπτωση αυτή γίνεται λόγος για τα γνωστά Μοντέλα Κατανομής Κόστους (Cost Allocation Models).

B. Με αναλυτικό υπολογισμό του κόστους για την συγκεκριμένη κάθε φορά περίπτωση.

Ο πρώτος τρόπος είναι πιο ταχύς και εύχρηστος και ενδείκνυται για συχνούς και ταχύς ελέγχους της οικονομικότητας τμημάτων του δικτύου ή και ολόκληρου του φορέα.

Ο δεύτερος, ενώ είναι πιο αναλυτικός και πιο αργός τρόπος ενώ έχει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης ακρίβειας στους υπολογισμούς.

2.5.1 Μοντέλα Κατανομής Κόστους

2.5.1.1 Περιγραφή

Τα μοντέλα κατανομής κόστους εφαρμόζονται στο εξωτερικό σε μεγάλο βαθμό αλλά στην βιβλιογραφία δεν έχουν μια ενιαία μεθοδολογία. Στην

απλούστερη μορφή τους βασίζονται στον καθορισμό κάποιου μέσου κόστους λειτουργίας ανά μονάδα έργου (συνήθως χιλιόμετρα ή οχηματοχιλιόμετρα). Δηλαδή καθορίζεται κάποιο μέσο κόστος λειτουργίας και αυτό εφαρμόζεται.

Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι φυσικά ότι το μέσο αυτό κόστος είναι αρκετά ανελαστικό και ανάλογο με τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε λεωφορειακή γραμμή μπορεί να αλλάξει. Αυτό συμβαίνει κυρίως ως προς την λειτουργία και την εκμετάλλευση (ταχύτητες, κυκλοφοριακή συμφόρηση κ.τ.λ.).

Η πιο συνηθισμένη μορφή είναι εκείνη που στον αρχικό τύπο περιλαμβάνονται κατηγορίες από κόστη και που η κάθε κατηγορία επηρεάζει το συνολικό κόστος με κάποιο συντελεστή βαρύτητας.

Έτσι θα μπορούσαμε να έχουμε τον παρακάτω τύπο που να εκφράζει την τυπική μορφή των μοντέλων κατανομής κόστους :

$$K = K_x(V_x) + K_m(V_m) + K_o(V_o)$$

Όπου :

- K Συνολικό μοναδιαίο κόστος για την συγκεκριμένη γραμμή, τμήμα γραμμής ή τύπο υπηρεσίας.
- K_x Μοναδιαίο κόστος που σχετίζεται με τον χρόνο λειτουργίας (οχηματο-ώρες) της υπό εξέτασης γραμμής ή υπηρεσίας.
- V_x Ο συνολικός αριθμός των οχηματο-ωρών λειτουργίας.
- K_m Το μοναδιαίο κόστος που σχετίζεται με τα διανυόμενα χιλιόμετρα (οχηματοχιλιόμετρα).
- V_m Ο συνολικός αριθμός των διανυομένων οχηματοχιλιομέτρων.
- K_o Το μοναδιαίο κόστος που σχετίζεται με τον αριθμό των οχημάτων.
- V_o Ο αριθμός των οχημάτων που χρησιμοποιείται στην λεωφορειακή γραμμή (ή στην υπηρεσία) την ώρα αιχμής.

Χαρακτηριστικό είναι ότι τα μοντέλα κατανομής κόστους έχουν μια ενιαία φιλοσοφία αντιμετώπισης του προβλήματος εύρεσης του συνολικού κόστους αλλά ο τρόπος με τον οποίο αυτό επιτυγχάνεται κάθε φορά είναι διαφορετικός. Έτσι το είδος του μοναδιαίου κόστους μπορεί να είναι διαφορετικό και ο τρόπος προσδιορισμού της σχέσης μπορεί να είναι διαφορετικός, είτε αυτό γίνεται με μέσους όρους είτε με γραμμική παλινδρόμηση.

2.5.1.2 Μεθοδολογία

Όσον αφορά την κατασκευή των μοντέλων κατανομής η μεθοδολογία που ακολουθείται κάθε φορά σχετίζεται με τα παρακάτω βασικά βήματα:

- ▲ Συλλογή των απαραίτητων ετησίων στοιχείων κόστους κατά κατηγορία, που αφορούν το προηγούμενο έτος. Ανάλογα με την ανάλυση αλλά και το είδος του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί διαλέγονται και τα κατάλληλα στοιχεία. Εδώ προτείνονται διάφοροι πίνακες με συσχέτιση στοιχείων κόστους με τις μονάδες αναγωγής τους όπως από την UMTA.
- ▲ Ταξινόμηση των στοιχείων κόστους κατά την μονάδα αναγωγής ανάλογα με την μονάδα που επηρεάζει περισσότερο. Για παράδειγμα το κόστος συντήρησης των οχημάτων πρέπει να αναχθεί στον αριθμό των διανυόμενων οχηματοχιλιομέτρων ή ακόμα και στον αριθμός των οχημάτων.
- ▲ Υπολογισμός των μοναδιαίων τιμών κόστους με διαίρεση του συνολικού κόστους κατά κατηγορία με τον συνολικό αριθμό των διανυόμενων χιλιομέτρων, των ωρών λειτουργίας ή όποιων άλλων μονάδων αναγωγής έχουν αποφασιστεί.
- ▲ Τελική διαμόρφωση του μοντέλου σε μορφή παρόμοια με την μορφή που παρουσιάσαμε στην περιγραφή των μοντέλων κατανομής κόστους.

Όπως μπορεί να αντιληφθεί κανείς η δυσκολία της διαδικασίας εστιάζεται στο βήμα κατανομής στοιχείων κόστους και στις διάφορες αιτίες τους, δηλαδή στις μονάδες αναγωγής. Από αυτό το σημαντικό βήμα τα μοντέλα πήραν την ονομασία Μοντέλα Κατανομής Κόστους. Ο κάθε Οργανισμός κάνει την δική του συσχέτιση και κατανομή όμως για μια μεγαλύτερη ευκολία έχουν προταθεί διάφοροι πίνακες και στην Ελλάδα που συμφωνούν με τις Αμερικάνικες οδηγίες. Πιο συγκεκριμένα ο Αμερικανικός Οργανισμός Αστικών Μαζικών Συγκοινωνιών (Urban Mass Transit Association – UMTA) έχει από 30ετίας υποχρεώσει με σχετική ομοσπονδιακή νομοθεσία όλους τους φορείς Δημόσιων Αστικών Συγκοινωνιών στις Η.Π.Α. να συλλέγουν και να παραδίδουν στο Ομοσπονδιακό Υπουργείο Μεταφορών μια σειρά από λεπτομερειακά στοιχεία σχετικά με την λειτουργία τους.

Τέλος τονίζεται πως τα στοιχεία κόστους που μπορεί να είναι αμοιβές προσωπικού, αγορές υλικών, έξοδα, ασφάλιση, φόροι εισφορές κ.τ.λ. πρέπει να κατανέμονται είτε ως προς τον χρόνο (οχηματο-ώρες) είτε ως

προς την απόσταση διάνυσης (οχηματο-χιλιόμετρα) είτε τέλος ως προς τα οχήματα, το μέγεθος στόλου δηλαδή.

2.5.2 Αναλυτικός Καθορισμός του Κόστους Λειτουργίας

2.5.2.1 Περιγραφή

Ο αναλυτικός καθορισμός του κόστους λειτουργίας των λεωφορειακών γραμμής γίνεται με την λογική της ανάλυσης σε επιμέρους μικρότερα κόστη όπως και για το λειτουργικό κόστος των οχημάτων [Αμπακούμκιν Κ. & Σταθόπουλος Α. (2000)].

Εδώ στοιχεία κόστους ονομάζονται όλες οι κατηγορίες κόστους που συνθέτουν το συνολικό τελικό κόστος λειτουργίας του φορέα το οποίο και είναι το ζητούμενο. Μια συνήθη ταξινόμηση των στοιχείων αυτών είναι :

1. Κόστος κίνησης οχημάτων
2. Αμοιβές προσωπικού
3. Αμοιβές τρίτων
4. Διοίκηση
5. Αποσβέσεις
6. Τόκοι δανείων
7. Ασφάλιστρα
8. Φόροι
9. Καθυστερήσεις παραγγελιών, αποθέματα κ.λ.π.
10. Κόστος συντήρησης και επισκευών
11. Διάφορα

Όπως αντιλαμβάνεται κανείς για κάθε φορέα και ανάλογα με την πολιτική που ακολουθεί, τα παραπάνω αλλάζουν ως προς τις τιμές τους. Ακόμα υπάρχει μια μεγαλύτερη ανάγκη να γίνει καλύτερος προσδιορισμός του κάθε κόστους έτσι ώστε να μην υπάρχει σύγχυση. Παρακάτω θα αναφερθούν για μεγαλύτερη ακρίβεια τι εννοείται αναφέροντας την έννοια της κάθε κατηγορίας.

1. Κόστος Κίνησης Οχημάτων

Είναι το κόστος που έχει σχέση με την κίνηση των οχημάτων. Δηλαδή καύσιμα λιπαντικά, ελαστικά κ.λ.π. Η δαπάνη του προσωπικού κίνησης δεν περιλαμβάνεται εδώ και αποτελεί άλλη κατηγορία. Γενικότερα το

κόστος κίνησης των οχημάτων είναι όλο το κόστος των υλικών, εξαρτημάτων που χρειάζονται στην κίνηση των οχημάτων.

2. Αμοιβές Προσωπικού

Είναι όλο το κόστος που σχετίζεται με τις απολαβές του προσωπικού. Εδώ περιλαμβάνονται μισθοί, δώρα, υπερωρίες, άδειες, διάφορα επιδόματα, εισφορές, ασφάλιση και γενικότερα ότι χρησιμοποιείται από το Προσωπικό ή προσφέρει ο Οργανισμός. Ακόμα περιλαμβάνονται κόστη από επιμόρφωση και εκπαίδευση του προσωπικού καθώς και οι εκδρομές και τα ταξίδια στο εξωτερικό για το παραπάνω σκοπό.

3. Αμοιβές Τρίτων

Εδώ περιλαμβάνονται όλες οι αμοιβές που καταβάλλονται σε πρόσωπα που δεν έχουν σύμβαση εργασίας με την επιχείρηση για την παροχή υπηρεσιών τους. Τέτοιες αμοιβές μπορεί να είναι αμοιβές δικηγόρων και μηχανικών, δαπάνες εξωτερικής λειτουργίας όπως ΔΕΗ, ΟΤΕ, ΕΥΔΑΠ, μπορεί να είναι η διαφημίσεις και οι δημόσιες σχέσεις όπως επίσης και αμοιβές συμβούλων και προσωπικού marketing (σε περίπτωση που δεν έχουν ενσωματωθεί στον Οργανισμό).

4. Κόστος Διοίκησης

Το κόστος διοίκησης έχει σχέση με τις αμοιβές της διοίκησης της επιχείρησης. Δηλαδή με τις αμοιβές των μελών του Διοικητικού Συμβουλίου και του προέδρου, έξοδα παραστάσεων, μισθοί γραμματέων και γενικά ότι έχει σχέση με την διοίκηση του φορέα.

5. Απόσβεση

Είναι γενικά το κόστος που αντιπροσωπεύει την ελάττωση της αξίας ενός περιουσιακού στοιχείου με το πέρασμα του χρόνου και την αντίστοιχη αποταμίευση που πρέπει να γίνεται για την μελλοντική αποκατάσταση του. Η ελάττωση μπορεί να οφείλεται σε φυσική φθορά ή στην οικονομική απαξίωση λόγω νέας τεχνολογίας κ.α. Σχετικά με την απόσβεση τίθενται δύο βασικά ερωτήματα. Το πρώτο είναι το πραγματικό μέγεθος της αξίας και δεύτερο πως θα γίνει ο υπολογισμός της μείωσης της αξίας διαχρονικά. Το χρονικό περιθώριο που γίνεται ο υπολογισμός της απόσβεσης είναι ο χρόνος και η μέθοδος που επιλέγεται εξαρτάται από τον φορέα.

6. Τόκοι Δανείων

Οι τόκοι των δανείων του φορέα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Τους παθητικούς και τους τεκμαρτούς. Παθητικοί είναι οι τόκοι που η επιχείρηση πληρώνει πραγματικά σε τρίτους για δανειακά κεφάλαια και τεκμαρτοί είναι εκείνοι που αντιστοιχούν στο κεφάλαιο που οι ίδιοι οι μέτοχοι επένδυσαν στην επιχείρηση. Οι τόκοι είναι μια δαπάνη που επιβαρύνει το συνολικό κόστος λειτουργίας ενός Οργανισμού σε αρκετά μεγάλο βαθμό.

7. Ασφάλιστρα

Το κόστος των ασφάλιστρων είναι μια δαπάνη που προκύπτει από την ασφάλιση της περιουσίας του Οργανισμού από αιτιολογημένο κίνδυνο όπως είναι τρακαρίσματα λεωφορείων, πυρκαγιές κ.λ.π.

8. Φόροι

Όπως σε κάθε επιχείρηση έτσι και σε έναν φορέα που διαχειρίζεται την λειτουργία των λεωφορειακών γραμμών οι φόροι πληρώνονται ως προς το Δημόσιο σαν φόροι επί των κερδών, σαν φόροι μεταβίβασης κ.λ.π.

9. Κόστος Αποθεμάτων

Πρόκειται για το κόστος των αποθεμάτων που με την σειρά του περιλαμβάνει το κόστος αποθήκευσης και το κόστος παραγγελιών. Η μη ύπαρξη αποθέματος (π.χ. ανταλλακτικών) έχει κάποιο κόστος που εκφράζεται σαν κάποια εισοδήματα που χάνονται είτε με την καθυστέρηση της λειτουργίας των οχημάτων είτε για λόγους αξιοπιστίας (απομάκρυνση πελατών).

10. Διάφορα

Εδώ πρέπει να συμπεριληφθούν όσες δαπάνες δεν αναφέρθηκαν πιο πάνω όπως τα τέλη κυκλοφορίας και άδειες οχημάτων, αλλά και διάφορα έξοδα που γίνονται απρόβλεπτα.

11. Κόστος Συντήρησης και Επισκευών

Το κόστος συντήρησης και επισκευών περιλαμβάνει όλα τα έξοδα που απαιτούνται για την συντήρηση των οχημάτων και τις επισκευές όλων των βλαβών τους.

1. Μισθοδοσία προσωπικού συντήρησης
2. Στολές προσωπικού συντήρησης
3. Συντήρηση μηχανών (ανταλλακτικών)
4. Ενοίκια και γενικά αμοιβές τρίτων για υπηρεσίες συντήρησης
5. Διάφορες αποσβέσεις μηχανών συντήρησης
6. Διάφορες δαπάνες συντήρησης (υλικά)

Με αυτή την κατηγοριοποίηση υπάρχει η άμεση δυνατότητα σύγκρισης με άλλους Οργανισμούς αλλά και η παρακολούθηση της πορείας του κόστους του Οργανισμού από έτος σε έτος. Είναι μια διαδικασία που χρειάζεται χρόνο για να ολοκληρωθεί για αυτό και δεν χρησιμοποιείται συνήθως σε τακτά χρονικά διαστήματα μικρότερα του έτους. Αντίθετα τα μοντέλα κατανομής κόστους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τακτά διαστήματα (μικρότερα του έτους) για να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης και παρακολούθησης των εξόδων.

Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου ξεκαθαρίζεται ότι οι αλγόριθμοι και οι μέθοδοι που η διπλωματική προτείνει για την επίλυση των προβλημάτων, λόγω της πολυπλοκότητας της συνολικής διαδικασίας σχεδιασμού των αστικών λεωφορειακών γραμμών, δεν είναι απόλυτοι. Αυτό σημαίνει πως δεν αποδεικνύεται ότι εφαρμόζοντας τα παραπάνω θα προκύψει η βέλτιστη λύση η οποία αναζητείται. Η κάθε μέθοδος έχει την δική της βαρύτητα και τεκμηριώνεται από τους συγγραφείς η επιστημονική ορθότητα ως προς το στόχο που έχει τεθεί. Για να υπάρξει η πεποίθηση ότι εφαρμόζοντας τις μεθόδους που έχουν επιλεγεί, θα επέλθει βελτιστοποίηση σε ένα τόσο δύσκολο θέμα όπως είναι ο συνολικός σχεδιασμός, θα πρέπει να γίνουν εκτεταμένες εφαρμογές αυτών των μεθόδων σε πραγματικές (ελληνικές) συνθήκες και σε πολλά επίπεδα. Οι εφαρμογές αυτές λογικό είναι να μην μπορούν να ολοκληρωθούν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, ωστόσο τονίζεται ότι μέσω παραδειγμάτων και εφαρμογών μικρής έκτασης που υπάρχουν στην διπλωματική καθώς και δημοσιεύσεις από τους μελετητές που εφαρμόζουν τις μεθόδους τεκμηριώνουν την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο του τρίτου κεφαλαίου της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη των μεθόδων που χρησιμοποιούνται ώστε να γίνει ο σωστός σχεδιασμός του δικτύου των λεωφορειακών γραμμών.

Παρόλο που η διαδικασία σχεδιασμού των λεωφορειακών γραμμών προϋποθέτει την ανάπτυξη πρώτα του δικτύου, μετά τον σχεδιασμό των συχνοτήτων και τέλος τον καθορισμό οχημάτων σε διαδρομές και οδηγών σε οχήματα, δεν είναι όπως θα δούμε και παρακάτω ο σκοπός να έχουμε μια και μοναδική ανάπτυξη. Δηλαδή μόνο ο στόχος δεν αλλάζει, ενώ όλες οι επιμέρους διαδικασίες μπορούν να αλλάξουν. Αυτό γίνεται γιατί σε διαφορετικές χρονικές περιόδους στον σχεδιασμό είναι δυνατό να διαθέτουμε κάποια στοιχεία ήδη και επομένως να μην γίνεται λόγος για εξ' αρχής σχεδιασμό αλλά απλά για μια επέμβαση, βελτιωτική σε μια συγκεκριμένη γραμμή. Κατά τα άλλα η παρακάτω ανάπτυξη μπορεί να είναι το πρώτο βήμα του σχεδιασμού, εάν δεν συντρέχουν άλλοι λόγοι.

Αρχικά αξίζει να αναφέρουμε πως στην Ελλάδα το δίκτυο των λεωφορειακών γραμμών έχει δημιουργηθεί κατά εμπειρικό τρόπο. Αυτό έγινε ώστε να καλυφθεί το αίτημα κατοίκων, κάποιων περιοχών για την σύνδεση τους λεωφορειακά με τα κέντρα έλξεων μετακινήσεων. Συνέπεια του εμπειρικού αυτού τρόπου κατασκευής δικτύου είναι να παρουσιάζονται σήμερα δίκτυα Δημόσιων Αστικών Συγκοινωνιών που περιέχουν γραμμές με σαφώς αντιοικονομική εκμετάλλευση, ανομοιογενή κάλυψη περιοχής κ.ο.κ.

Από την άλλη σκόπιμο είναι από την αρχή να οριστεί ένα πλαίσιο με κάποιους κανόνες σε περίπτωση που γίνει μια αναδιάρθρωση των υπάρχοντων γραμμών. Έτσι λοιπόν πρώτο μέλημα είναι η ολοκληρωμένη θεώρηση των λεωφορειακών γραμμών της περιοχής σαν ένα ενιαίο δίκτυο. Δεύτερο είναι το ζήτημα των άλλων μεταφορικών μέσων που ενδεχομένως να υπάρχουν στο δίκτυο. Πρέπει να γίνει σοβαρή ανάλυση των επιχειρημάτων υπέρ και κατά καθώς και της αλληλοεπirroής των μεταφορικών μέσων.

Στόχος της διαδικασίας σχεδιασμού δικτύου γραμμών είναι να επιτύχει μια εξισορρόπηση, από την μια πλευρά της ζήτησης για μετακίνηση όπως

αυτή εμφανίζεται τόσο διαχρονικά όσο και στο χώρο, πάνω στην αστική περιοχή, από την άλλη του κόστους εκμετάλλευσης για τον φορέα. Η χρυσή τομή επιτυγχάνεται όταν ολόκληρη η ζήτηση που υπάρχει για μετακινήσεις με δημόσιες συγκοινωνίες εξυπηρετείται από το προσφερόμενο δίκτυο γραμμών και συχνότητες και συγχρόνως ελαχιστοποιείται ο αριθμός των απαιτούμενων λεωφορείων και γενικότερα του ολικού κόστους εκμετάλλευσης.

Βασικά στοιχεία λοιπόν που οφείλει ο μελετητής να έχει είναι η επιβατική ζήτηση σε σχέση με την ώρα της ημέρας αλλά και την εξέλιξη της στο χρόνο, τα χαρακτηριστικά της χρήσης γης και την πολιτική που θα ακολουθήσει ο φορέας στην εξυπηρέτηση των επιβατών.

Αυτά τα στοιχεία δεν δίνονται πάντα και επομένως ο μελετητής πρέπει είτε να χρησιμοποιήσει στοιχεία παρόμοιων δικτύων, είτε να κάνει πρόβλεψη και να βασιστεί στην εμπειρία του.

Ως προς την πολιτική του φορέα το μόνο το οποίο προφανώς δεν αλλάζει διαχρονικά, άσχετα με την τεχνική του μάρκετινγκ, είναι η ελαχιστοποίηση του στόλου των λεωφορείων.

Παρακάτω θα προταθούν μέθοδοι που θα αναλύουν με λεπτομέρεια όλες της πτυχές του προβλήματος. Για παράδειγμα έστω ότι έχουμε μια περιοχή με συγκεκριμένους κόμβους οι οποίοι έχουν μια συγκεκριμένη ζήτηση προς τους άλλους γειτονικούς κόμβους. Η σύνδεση ανάμεσα στους κόμβους εκφράζει την μεταφορά μεταξύ των κόμβων και η μεταφορά αυτή μπορεί να γίνει σε ένα χρόνο που εμείς μπορούμε να προσδιορίσουμε και να το έχουμε σαν δεδομένο του προβλήματος.

Κάποιοι κόμβοι μπορούν να συμβολίσουν τις αφετηρίες των λεωφορείων ή τερματικούς σταθμούς. Το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί είναι να σχεδιαστεί η βέλτιστη διαδρομή μεταξύ αυτών των κόμβων έτσι ώστε να ικανοποιούνται κάποιοι περιορισμοί. Αυτοί οι περιορισμοί προέρχονται από τις εμπειρικές παρατηρήσεις και στόχοι Οργανισμού στην κατασκευή των δικτύων των λεωφορειακών γραμμών που θα αναφερθούν παρακάτω εκτενέστερα. Αν δεν υπήρχαν οι περιορισμοί η κατασκευή θα μπορούσε να γίνει μέσω του αλγόριθμου του Dijkstra, ο οποίος και περιγράφεται στο υποκεφάλαιο της συνδυαστικής βελτιστοποίησης του Παραρτήματος Ι. Ανάλογα με τις παραμέτρους που θεωρούνται κάθε φορά προτείνονται διάφορες πιο σύγχρονες μέθοδοι που θα προταθούν αργότερα με εμπλοκή ακόμα και πολύ-στοχικού προγραμματισμού για την παρουσίαση των πιο πιθανών λύσεων. Η εύρεση της λύσης θα είναι επακόλουθο των βημάτων :

1. Εφαρμογή αλγόριθμου για την εύρεση συνόλου βέλτιστων διαδρομών
2. Βελτιστοποίηση του χρόνου αναμονής, του χρόνου ταξιδιού και των θέσεων που δεν χρησιμοποιούνται στο όχημα (ως προς τον χρόνο) και του στόλου
3. Αναζήτηση επιπλέον στην γειτονιά των βέλτιστων λύσεων σαν μια διαδικασία ανάλυσης ευαισθησίας
4. Επιλογή και γραφική απεικόνιση των βέλτιστων λύσεων μέσω διαδικασίας πολύ-στοχικού προγραμματισμού με κριτήριο την καλύτερη απόδοση.

Τα στοιχεία που αναφέρονται συνοπτικά παραπάνω θα αναλυθούν σε μεγαλύτερη έκταση στα αντίστοιχα υποκεφάλαια. Η προτεινόμενη διαδικασία λύσεως του προβλήματος συμφωνεί με ένα μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια.

3.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΚΤΥΟΥ –ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Η κατασκευή του δικτύου των λεωφορειακών γραμμών παλιότερα γινόταν εμπειρικά ,όπως προαναφέρθηκε, λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένα στοιχεία τα οποία και θα παραθέσουμε.

Λόγο της περιορισμένης ελληνικής βιβλιογραφίας πάνω στο θέμα αυτό θα αναφερθούμε κυρίως σε παραδείγματα του εξωτερικού και συγκεκριμένα στις ΗΠΑ [National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 69].

Μια έρευνα αντίστοιχη της δεκαετίας του 80 που έγινε με σκοπό την θέσπιση προτύπων σε μελέτη που ανέθεσε η Ελληνική Εταιρία για την Τοπική Ανάπτυξη και Αυτοδιοίκηση, μας παρέχει κάποιες προδιαγραφές, ενώ αξίζει να αναφερθεί, αφού ήταν η πρώτη προσπάθεια αντίστοιχη του εξωτερικού που έγινε στην Ελλάδα.

Η αρχές που ακολουθούν και η σωστή εφαρμογή τους προσδιόριζαν κατά πόσο το δίκτυο ήταν λειτουργικό, εξυπηρετικό και γενικά επιτυχημένο.

1.Ευθύτητα Γραμμής και Παρέκκλιση

Η γραμμές πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο ευθείες και ξεκάθαρες. Γραμμές που χρησιμοποιούν περιστροφές και κύκλους πρέπει να

αποφεύγονται. Η απλές γραμμές είναι μικρότερες σε μήκος και πιο οικονομικές, από την πλευρά της λειτουργίας αλλά και οι επιβάτες τις καταλαβαίνουν καλύτερα και τις χρησιμοποιούν περισσότερο.

Για την διαδρομή του λεωφορείου, το μήκος της γραμμής πρέπει να τέτοιο ώστε οι παρέκκλιση που θα γίνεται εάν συγκριθεί με την διαδρομή ενός Ι.Χ. να είναι μεταξύ 20 % (επιθυμητή) – 40 % (μέγιστη).

Για τον μέσο χρόνο διαδρομής του επιβάτη έχει οριστεί ότι η παρέκκλιση δεν πρέπει να ξεπερνά το 25% του χρόνου της λεωφορειακής γραμμής.

Στην πραγματικότητα μια πολύ λεπτή ισορροπία πρέπει να διατηρηθεί μεταξύ ευθύτητα γραμμής και εξασφάλιση υπηρεσιών σε θέσεις με υψηλή ζήτηση. Η απόφαση για παρέκκλιση μια γραμμής εξαρτάται από παράγοντες όπως ευνόηση της κίνησης, τον χρόνο και την απόσταση της παρέκκλισης και τον αριθμό των άλλων παρεκκλίσεων που έχουν ήδη γίνει στην διαδρομή. Σε κάθε περίπτωση μια διακλάδωση ή μια άλλη γραμμή είναι προτιμότερη από την παρέκκλιση.

Τέλος πρέπει να αναφέρουμε εδώ ότι η γραμμή θα πρέπει να λειτουργεί στις δύο κατευθύνσεις, στον ίδιο δρόμο καθώς αυτό είναι και πιο εύκολα αντιληπτό από τους επιβάτες. Ωστόσο δρόμοι που έχουν μονοδρομηθεί χρειάζονται άλλη αντιμετώπιση και προφανώς για την ευκολία των επιβατών, προτείνεται μια απόσταση μεταξύ τους, δύο οικοδομικών τετράγωνων (μέγιστο) ή 400 μέτρα. Μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των γραμμών μειώνουν την κάλυψη που προσφέρεται και αυξάνει την απόσταση βαδίσματος. Ακόμα δημιουργεί την αίσθηση της σύγχυσης στους πιθανούς επιβάτες και επομένως, δεν προτιμάται.

2. Απόσταση Γραμμής

Μια λεωφορειακή γραμμή πρέπει να είναι όσο γίνεται πιο μικρή σε μήκος και με συγκεκριμένη προσφορά υπηρεσίας για την κάλυψη της ζήτησης της περιοχής.

Επίσης οι επιπτώσεις στην κυκλοφορία είναι σημαντικές από την κίνηση των λεωφορείων και για αυτό συνιστάται οι μεγάλες γραμμές να πάνσουν να υφίστανται και να αντικατασταθούν με μικρότερες. (Λόγω του ότι δεν μπορούν να τηρηθούν τα δρομολόγια όπως έχουν σχεδιαστεί). Κόβοντας μια μεγάλη σε μήκος γραμμή σε περισσότερα μέρη έχει παρατηρηθεί ότι η κάθε επιμέρους γραμμή έχει την δυνατότητα να εξυπηρετήσει μεγαλύτερη ζήτηση στην ίδια χρονική περίοδο και ακόμα οι συνδέσεις μεταξύ των περιοχών μπορούν να χρονομετρηθούν για μια καλύτερη συνεργασία σε περίπτωση που μειωθούν τα δρομολόγια.

Η διαδρομή σε χιλιόμετρα προτείνεται να είναι μικρότερη των 40 για τις δύο κατευθύνσεις ή σε χρόνο ταξιδιού 2 ώρες. Μέγιστο αναφέρεται η τιμή των 55 χιλιομέτρων ή 3 ώρες.

Μια άλλη λογική αντιμετώπισης (μείωσης) των πολλών χιλιομέτρων που διανύονται από τα λεωφορεία είναι η δημιουργία γραμμών από άκρη σε άκρη. Αυτές οι γραμμές είναι πολύ μεγάλες και γενικά πρέπει να συντρέχουν αρκετοί λόγοι ώστε να είναι οικονομικά παραδεκτές. Γενικά αρκεί να πούμε πως σε μικρές περιοχές επιλέγονται, ενώ σε μεγάλα δίκτυα οι διαχειριστές συμφωνούν στο ότι ο συντονισμός των επιμέρους γραμμών καθώς και η αξιοπιστία είναι μειωμένη και επομένως δεν πρέπει να υφίστανται.

3. Διακλαδώσεις Γραμμής και Αλληλοεπικάλυψη

Το ιδανικό σενάριο εδώ θα ήταν να υπάρχει μια λεωφορειακή γραμμή για κάθε αρτηρία με εξαίρεση την περιοχή γύρο από τον προορισμό της συνολικής ζήτησης για μετακίνηση ή σε πόλεις με ασυνήθιστο σύστημα οδών. Ο στόχος των σταθερών χρονοαποστάσεων μεταξύ λεωφορείων και καλύτερη αντίληψη του δικτύου από τους επιβάτες, επιτυγχάνονται καλύτερα όταν υπάρχει μια γραμμή ανά οδό και το πολύ δύο γραμμές ανά οδό.

Δεν πρέπει να υπάρχουν πάνω από δύο διακλαδώσεις για κάθε γραμμή κορμού, τέσσερις θεωρείται η μέγιστη τιμή και μόνο σε ειδικές περιπτώσεις. Οι διακλαδώσεις πρέπει να έχουν την ίδια χρονοαπόσταση με την γραμμή κορμού. Γενικά όσο μικραίνει η χρονοαπόσταση μεταξύ διαδοχικών λεωφορείων τόσο πιο επιθυμητή είναι η χρησιμοποίηση διακλαδώσεων για την κάλυψη κυκλικών διαδρομών στις άκρες των γραμμών.

Η αλληλοκάλυψη των γραμμών αυξάνει τα έξοδα του οργανισμού, περιπλέκει τις χρονοαποστάσεις και αυξάνει την σύγχυση των επιβατών. Αν και μερικές φορές μπορεί να εξυπηρετεί κάποιους επιβάτες αυτό συμβαίνει με μη αποδεκτό κόστος ή με ανεπιθύμητα λειτουργικά χαρακτηριστικά.

Κατά τα άλλα οι προϋποθέσεις, με βάση τα ελληνικά δεδομένα, για αλληλοεπικάλυψη γραμμών είναι :

1. Οι επικαλύψεις στις προκαθορισμένες συχνότητες των δρομολογίων στις στάσεις των λεωφορείων να είναι της τάξης των 3 ή περισσότερων λεπτών την ώρα αιχμής. Εκτός των ωρών αιχμής η επικάλυψη των συχνοτήτων να είναι 6-8 λεπτά.
2. Ο μέσος βαθμός πλήρωσης των λεωφορείων στο επικαλυπτόμενο τμήμα της διαδρομής να μην είναι μικρότερος από το 60% της μέγιστης επιτρεπόμενης πλήρωσης για το είδος των χρησιμοποιούμενων λεωφορείων.

3. Το μήκος του δικτύου πάνω στο οποίο υπάρχει επικάλυψη να μην είναι πάνω από 50% του συνολικού μήκους κάθε μιας από τις επικαλυπτόμενες γραμμές.

Αυτές οι αρχές αποτελούσαν τους κανόνες για τους μελετητές και προφανώς η επιτυχία του σχεδιασμού ήταν αποτέλεσμα σωστής κρίσης και πείρας από πλευρά των σχεδιαστών δικτύων.

Σήμερα έχουν αναπτυχθεί άλλες μέθοδοι και η αποτελεσματικότητα των μελετητών είναι μεγάλη αφού υπάρχουν τα πρότυπα, όπως είχαν οριστεί στο παρελθόν αλλά και νέες τεχνικές που αξιοποιούν την υπολογιστική δύναμη των Η/Υ.

3.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΚΤΥΟΥ – ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Προκειμένου να αναφέρουμε τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν κατά καιρούς και τις νέες ιδέες και τεχνικές στον σχεδιασμό του δικτύου των λεωφορειακών γραμμών, πρέπει να πούμε πως οι τεχνικές αυτές εφαρμόστηκαν με την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού. Μεγάλη συμβολή έχουμε στο θέμα, τα τελευταία χρόνια, από την ανάπτυξη των αλγορίθμων και γενικότερα των υπολογιστών.

Αξίζει να αναφέρουμε πως τα λογισμικά τα οποία αναπτύσσονται με σκοπό την κατασκευή δικτύου αλλά και με τον σχεδιασμό των λεωφορειακών γραμμών, γενικότερα, έχουν πολύ μεγάλο κόστος και χρειάζεται να δίνεται προσοχή στο θέμα της επιλογής και αξιοποίησης από τα κέντρα αποφάσεων.

Επίσης οι αλγόριθμοι που υπόσχονται την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής έχουν αναπτυχθεί πολύ σε σχέση με το παρελθόν και συνεχώς βελτιώνονται. Αν και όπως τονίζεται οι αλγόριθμοι είναι το μυστικό των μεγάλων λογιστικών πακέτων, σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να αντικατασταθεί, ο ανθρώπινος παράγοντας και η σωστή κρίση του μελετητή είναι αναντικατάστατη.

Θα παρουσιαστούν διαδικασίες σχεδιασμού δικτύου όπως προτάθηκε από τον Avishai Ceder ο οποίος ασχολήθηκε και ασχολείται με το θέμα αυτό για περισσότερα από 20 χρόνια τώρα.

3.3.1 Σχεδιασμός Δικτύου Λεωφορειακών Γραμμών

Όπως έχει ήδη ειπωθεί το θέμα του σχεδιασμού δικτύου είναι ιδιαίτερα σοβαρό και οι διαφορετικές λύσεις που προτείνονται από τους μελετητές είναι αποτέλεσμα δικής τους εμπειρίας και γνώσης.

Η γνώση αυτή θα πρέπει να εφαρμόζεται με μεγάλη προσοχή καθότι οι αλλαγές σε ένα δίκτυο οδηγούν σε τέτοια σύγχυση το επιβατικό κοινό αλλά και τον σχεδιασμό γενικότερα που οι διαχειριστές του Οργανισμού δεν επιθυμούν αυτές τις αλλαγές. Παρόλα αυτά οι αλλαγές σε ένα παλιό δίκτυο, επιβάλλεται να γίνουν και μάλιστα μια τέτοια διαδικασία πρέπει να υφίσταται κάθε 2 με 3 χρόνια.

3.3.1.1 Περιγραφή Προβλήματος

Το πρόβλημα της Κατασκευής Δικτύου είναι το πρώτο βήμα του γενικότερου προβλήματος Σχεδιασμού Λεωφορειακών Γραμμών (bus planning process). Τα υπόλοιπα προβλήματα είναι, όπως έχουν αναφερθεί, ο Σχεδιασμός των Συχνοτήτων, Σχεδιασμός των Δρομολογίων και ο Καθορισμός των Οδηγών σε Δρομολόγια. Μάλιστα τα προβλήματα αυτά τοποθετούνται σε αντίστοιχα επίπεδα και η λύση κάθε προβλήματος τροφοδοτεί το επόμενο επίπεδο, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη αλληλεπίδραση μεταξύ των προβλημάτων και προφανώς αυτό που ονομάζουμε λύση του γενικού προβλήματος να μην ορίζεται μονοσήμαντα αλλά να είναι όπως θα δούμε μια περιοχή με όρια τα οποία και ορίζουμε.

Προκειμένου να λύσουμε τα προβλήματα τα οποία αναφέρθηκαν χρησιμοποιούνται προγράμματα για την διευκόλυνση των μελετητών, τουλάχιστον για το κάθε πρόβλημα χωριστά.

Από τα πιο εύκολα προβλήματα είναι αυτό των κατωτέρων επιπέδων που αναφέρονται ως Bus Scheduling και Driver Scheduling και οι εταιρίες σκόπιμα επικεντρώθηκαν εκεί διότι με την λογική της μείωσης του κόστους λειτουργίας των λεωφορείων, ήθελαν να μην υπάρχουν οδηγοί που να μην δουλεύουν, αφού ο μιστός τους εθεωρείτο βασική σημαντική δαπάνη. Άλλος λόγος που αναπτύχθηκαν προγράμματα από νωρίς για αυτά τα στάδια είναι γιατί οι υπολογισμοί είναι περίπλοκοι και πολύ χρονοβόροι. Εξάλλου η αυτοματοποίηση αυτού του μέρους δίνει την αυτοπεποίθηση στον σχεδιαστή ότι τα αποτελέσματα έχουν ακρίβεια και μπορούν να εφαρμοστούν. Ακόμα δίνεται ο χρόνος που χρειάζεται σε

άλλα προβλήματα ανωτέρων επιπέδων που σε άλλες εποχές, η αλλαγή και τροποποίηση φάνταζε δύσκολη και περίπλοκη.

Διαθέσιμη Επιχορήγηση Διαθέσιμος Στόλος Λεωφορείων Τακτική Δρομολογίων Δεδομένοι Επιβαίνοντες	<u>Επίπεδο Β</u> Προσδιορισμός Συχνοτήτων -	Συχνότητες Γραμμής
Ζήτηση Ανάλογα με την Ωρα Χρόνοι Πρώτων και Τελευταίων Δρομολογίων Χρόνοι Λειτουργίας	<u>Επίπεδο C</u> Ανάπτυξη Πινάκων Αφίξεων - Αναχωρήσεων	Χρόνοι Αναχωρήσεων Δρομολογίων Χρόνοι Αφίξεων Δρομολογίων
Νεκροί Χρόνοι Χρόνοι Ανάκτησης Περιορισμοί Σχεδιασμού Δόμηση Κόστους	<u>Επίπεδο D</u> Σχεδιασμός Λεωφορείων	Καθορισμό Λεωφορείων
Εργασιακό Καθεστώς Οδηγών Δόμηση Κόστους Λειτουργίας	<u>Επίπεδο Ε</u> Σχεδιασμός Οδηγών	Καθορισμός Υπηρεσιών

Σχήμα 1 Επίπεδα Σχεδιασμού Λεωφορειακών Γραμμών
Πηγή Ceder et al. 'Bus Network Design'

Σχετικά με το πρόβλημα Σχεδιασμού Δικτύου πολλές λύσεις έχουν δοθεί αλλά παραμένει ακόμα άγνωστο εάν έχει κατασκευαστεί ο τέλειος αλγόριθμος. Ακόμα εδώ θα θεωρήσουμε πως δεν υπάρχει κάποια σταθερή δομή δικτύου που να μας περιορίζει, εξ' αρχής. Πολλοί προσπάθησαν να συνεισφέρουν στο δύσκολο αυτό πρόβλημα καθορισμού δικτύου όμως από τους πιο επιτυχημένους μελετητές ήταν ο Hasselstrom, ο οποίος και κατάφερε να συνδυάσει τις προσεγγίσεις που είχαν γίνει ως τότε. Αυτός με την σειρά του πρόσθεσε μια άλλη διαδικασία επίλυσης και τα αποτελέσματα ήταν τόσο ενθαρρυντικά που συμπεριλήφθηκε στο Volvo Transit Planning Package.

3.3.1.2 Εξεταζόμενες Παράμετροι

Χωρίς περαιτέρω καθυστέρηση δίνονται οι περιγραφές των παραμέτρων που μας ενδιαφέρουν και που επηρεάζουν την λύση του προβλήματος του Σχεδιασμού Δικτύου Λεωφορειακών Γραμμών.

ο Ζήτηση

Η ζήτηση για μετακίνηση όπως αναφέρεται, μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ανεξάρτητη από την ποιότητα εξυπηρέτησης ανάμεσα στα ζευγάρια Προέλευσης- Προορισμού, ή κυμαινόμενη. Όλες οι λύσεις του προβλήματος θεωρούν την ζήτηση ως σταθερή εκτός από τις λύσεις των Dubois et al και Hasselstrom. Ο μεν πρώτος υπολογίζει το ολικό μητρώο μετακινήσεων και μετά υπολογίζει τον επιμερισμό στα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς χρησιμοποιώντας μια Καμπύλη Παροχέτευσης (Diversion Curve) με βάση τον προσδοκώμενο χρόνο μεταφοράς. Ο Hasselstrom από την άλλη χρησιμοποίησε ένα μοντέλο απευθείας ζήτησης για να υπολογίσει ένα ‘επιθυμητό μητρώο’ βασισμένο στην παροχή υψηλής ποιότητας εξυπηρέτησης από τα M.M.M, σε όλη την περιοχή. Ταυτόχρονα το μοντέλο μείωνε την ζήτηση αφού ο καθαυτός σχεδιασμός εξελίσσυνόλοαι παρέχοντας λιγότερη από την ιδανική εξυπηρέτηση μεταξύ κάποιων ζευγαριών Προέλευσης – Προορισμού.

Ο λόγος τώρα που η ζήτηση τις περισσότερες φορές θεωρείται σταθερή είναι το ότι ενώ μας φαίνεται λογικό να υποθέτουμε μεταβλητή ζήτηση στην πραγματικότητα δεν υπάρχει καμία απόδειξη ώστε να υποθέσουμε ότι τα υπάρχοντα μοντέλα ζήτησης είναι αξιόπιστα όσον αφορά αλλαγές στις γραμμές ή το δίκτυο του συστήματος των M.M.M . Ακόμα στις μητροπολιτικές περιοχές οι εταιρίες αντιπαθούν παραμέτρους που αυξάνουν το ρίσκο, έχουν μικρή εμπιστοσύνη στα μοντέλα ζήτησης και ενδιαφέρονται περισσότερο σχετικά με τις επιρροές των αλλαγών στους επιβάτες παρά για το ενδεχόμενο δημιουργίας νέων δρομολογίων. Για αυτούς τους λόγους και διότι το πρόβλημα απλοποιείται κάπως, προτιμάται ένα μοντέλο σταθερής ζήτησης, στην φάση του σχεδιασμού, αν και αυτό μας αναγκάζει να τοποθετήσουμε περιορισμούς στον αλγόριθμο για την εξασφάλιση του ελάχιστου ορίου εξυπηρέτησης. Πάντως, εάν αυτό χρειάζεται μετά τον σχεδιασμό μπορεί να αλλάξει και πάλι η ζήτηση και να γίνει μια επανάληψη στην επίλυση (2° σενάριο). Αξίζει όμως να ειπωθεί πως η συλλογή στοιχείων (Data Collection) για την περίπτωση μεταβλητής ζήτησης, αποτελεί για την εταιρία ένα επιπλέον οικονομικό βάρος αφού ξεφεύγει από την συνηθισμένη ρουτίνα συλλογής στοιχείων.

ο Αντικειμενική Συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση όπως έχει χρησιμοποιηθεί ήταν είτε για την ελαχιστοποίηση του γενικευμένου κόστους (ή χρόνου) ή μεγιστοποίηση της εξυπηρέτησης των επιβατών.

Για θεωρήσεις μοντέλων σταθερής ζήτησης , η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση του γενικού κόστους (ή χρόνου), εκτός από την προσέγγιση του Rea που δεν χρησιμοποιεί σαφή, ρητή αντικειμενική συνάρτηση αλλά ψάχνει μια λύση που ικανοποιεί κάποιους περιορισμούς όπως ‘προσδιορισμό εξυπηρέτησης’ που έχουν τεθεί από την εταιρία. Ο Hasselstrom χρησιμοποιεί την μεγιστοποίηση της εξυπηρέτησης των επιβατών. Η υπόθεση μεταβλητής ζήτησης δεν χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση του γενικευμένου κόστους αφού τα αποτελέσματα, αν και αποδεκτά δεν συμβαδίζουν με την πραγματικότητα.

Όμως ενώ χρησιμοποιούμε ελαχιστοποίηση γενικού κόστους με σταθερή ζήτηση πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στους συντελεστές βάρους για τον χρόνο βαδίσματος, χρόνο αναμονής, χρόνο διαδρομής, χρόνο μεταφοράς, αριθμό των μεταφορικών μέσων και τον συνωστισμό.

ο Μέγεθος Στόλου

Στις προηγούμενες διατυπώσεις υπήρχε περιορισμός είτε στο γενικευμένο κόστος της εταιρίας είτε στον αριθμό των οχημάτων που μπορούν να δρομολογηθούν και να λειτουργούν στο σύστημα. Το κόστος της εταιρίας είναι στενά συνδεδεμένο με το μέγεθος του στόλου αλλά υπάρχουν σημαντικές διαφορές στο κόστος ανάλογα με την ζήτηση για λεωφορεία, κατά την διάρκεια της ημέρας. Η διατύπωση αυτού του περιορισμού αποτελεί και το πιο δύσκολο ζήτημα προς επίλυση του προβλήματος Σχεδιασμού Δικτύου και Λεωφορειακών Γραμμών. Δηλαδή η αδυναμία υπολογισμού του δικτύου χωρίς να προσδιορίσουμε τον αριθμό των οχημάτων για κάθε γραμμή. Είναι ο καθορισμός του αριθμού των οχημάτων αυτό που καθορίζει την αποτελεσματικότητα και το κόστος σχεδιασμού. Άρα όταν αναφερόμαστε στο πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου αναφερόμαστε επίσης στο πρόβλημα κατανομής λεωφορείων (bus allocation problem).

Σαν μέρος του υποπροβλήματος κατανομής λεωφορείων, όλες οι διατυπώσεις συμπεριλαμβάνουν περιορισμούς που κυβερνούν το μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό επιβατών, εκφρασμένο σαν συνάρτηση του μεγέθους του στόλου. Για να είναι οι περιορισμοί αυτοί αποτελεσματικοί, το μητρώο ζήτησης και η επίλυση της κατανομής των λεωφορείων πρέπει να οριστεί για τις μεγαλύτερες περιόδους λειτουργίας, την ημέρα (πρωινή αιχμή , μεσημέρι, απογευματινή αιχμή και το βράδυ. Ακόμα και αν ο σχεδιασμός του δικτύου δεν αλλάζει σε αυτές τις περιόδους της ημέρας, το συνολικό κόστος θα εξαρτηθεί από την κατανομή των

λεωφορείων, όπως ορίζεται από τις ελάχιστες ώρες λεωφορείου και τους περιορισμούς της χωρητικότητας της γραμμής που πρέπει να ικανοποιούνται σε κάθε χρονική περίοδο. Ακόμα μπορεί να ισχύει η μη λειτουργία μερικών γραμμών κατά την διάρκεια της ημέρας.

ο Προσδιορισμός Διαδρομής

Υπάρχει μια βασική διαφορά ανάμεσα στις προσεγγίσεις που θεωρούν πως όλοι οι επιβάτες που ταξιδεύουν μεταξύ κάποιου ζεύγους Προέλευσης – Προορισμού, χρησιμοποιούν την ίδια διαδρομή (γραμμή και ακολουθία γραμμών) και σε αυτούς που θεωρούν πως οι επιβάτες μπορούν να επιλέξουν πολλαπλάσιες (διαφορετικές) διαδρομές. Ο Rea και ο Mandl χρησιμοποιούν προσδιορισμό μιας διαδρομής (single path assignment) και όπως φαίνεται είναι περισσότερο ακριβές όταν η δομή του δικτύου είναι απλή και προσφέρει λίγες διαδρομές ή καμία εναλλακτική διαδρομή. Όλες οι άλλες προσεγγίσεις βασίζονται σε πολλαπλό προσδιορισμό διαδρομής (multiple path assignment) των επιβατών, με τον ορισμό της παραδοχής της διαδρομής ανάλογα με το ποσοστό των επιβατών που χρησιμοποιούν την κάθε παραδεκτή διαδρομή, να είναι ίδια με την πιθανότητα του πρώτου λεωφορείου που θα καταφτάσει να εξυπηρετήσει την διαδρομή. Η διατύπωση του προβλήματος πολλαπλού προσδιορισμού διαδρομής αν και είναι μια ρεαλιστική προσέγγιση για τα περισσότερα συστήματα, είναι πολύ πιο περίπλοκη και ειδικά εάν κάποιες διαδρομές έχουν περιορισμούς χωρητικότητας στην τελική λύση.

ο Προσεγγίσεις του Προβλήματος

Από την άποψη της προσέγγισης του προβλήματος και την λύση του μπορούμε να πούμε πως όλες ακολουθούν την γενική μέθοδο του χωρισμού σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος ασχολείται με τον σχεδιασμό των γραμμών και το δεύτερο με τον καθορισμό των συχνοτήτων. Αυτός ο χωρισμός είναι αναγκαστικός λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος αλλά και μας υπενθυμίζει πως οι επιπλοκές στον καθορισμό των συχνοτήτων ενσωματώνονται στον σχεδιασμό των γραμμών. Έτσι οι Lampkin και Saalmans στην εργασία τους, ο Silman et al και Dubios et al , χρησιμοποιούν μια διαδικασία γένεσης διαδρομών η οποία και κατασκευάζει τον σκελετό των γραμμών αποτελούμενο από μερικούς σημαντικούς κόμβους μεταξύ επιτρεπόμενων τερματικών σταθμών. Ύστερα τοποθετούνται επιπλέον κόμβοι για να ορισθεί έτσι η κάθε διαδρομή. Σε κάθε επανάληψη ο σκελετός γραμμής που έχει την μεγαλύτερη συνεισφορά στους περιορισμούς της αντικειμενικής συνάρτησης, επιλέγεται για τον συνυπολογισμό στο σύνολο των υποψηφίων γραμμών και οι επαναλήψεις συνεχίζονται με αυτό τον τρόπο έως ότου και κάποιο κριτήριο που έχουμε θέσει, ικανοποιηθεί.

Αυτό το κριτήριο βασίζεται στην συνεισφορά στον περιορισμό των νέων γραμμών ή στον συνολικό αριθμό των γραμμών που δημιουργούνται. Ο Silman et al επιτρέπει την δημιουργία περισσότερων γραμμών από αυτές που στην πραγματικότητα θα λειτουργήσουν, με την επαναληπτική διαγραφή κάποιων γραμμών και την προσθήκη άλλων και στηρίζεται στην διαδικασία καθορισμού συχνοτήτων για να επιλέξει το τελικό σύνολο βέλτιστων γραμμών. Οι Mandl και Rea επικεντρώνονται περισσότερο στην αποδοχή της σύνδεσης των κόμβων, οι οποίες συνδέσεις αθροίζονται για τον σχηματισμό γραμμών. Ο Rea το κάνει αυτό με την εμπλοκή των ίδιων των μελετητών, ενώ ο Hasselstrom χρησιμοποιεί μια περίπλοκη βελτιστοποίηση δύο επιπέδων για την δημιουργία των γραμμών, στην οποία και η γραμμές δημιουργούνται από τον αρχικό προσδιορισμό των επιθυμητών μετακινήσεων σε ένα δίκτυο αποτελούμενο από όλες τις μεταφορικές συνδέσεις. Οι γραμμές σχηματίζονται χρησιμοποιώντας κριτήρια εμπειρικά όπως η απόσταση γραμμής, περιορισμοί τερματικών σταθμών και διακυμάνσεις της κίνησης (ροής).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί από όλες τις μεθόδους αυτές μόνο η μέθοδος του Hasselstrom έχει εφαρμοσθεί ευρέως αφού συμπεριλήφθηκε στο Volvo Transit Planning Package. Χωρίς αντίρρηση, είναι η πιο εξεζητημένη προσέγγιση και καθώς φαίνεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στον επανασχεδιασμό των γραμμών. Ωστόσο είναι και αρκετά ακριβή μέθοδος αφού χρειάζεται συλλογή δεδομένων για το πρόγραμμα αλλά και ώρες προσωπικού που θα το διαχειρίζεται.

3.3.1.3 Μεθοδική Προσέγγιση Δύο Επιπέδων

Λόγο των πολλών παραγόντων, εσωτερικών και εξωτερικών που υπεισέρχονται στην διαδικασία σχεδιασμού, είναι επιθυμητή ο διαμερισμός των προβλημάτων σε επίπεδα πολυπλοκότητας. Άλλωστε η αποδοχή από τις εταιρίες και τους οργανισμούς της λύσης εξαρτάται από την απλότητα, ευελιξία και πρακτικότητα.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια τέτοια προσέγγιση, βασισμένη σε πέντε κυρίως στόχους [Ceder & Wilson, 1984]:

- I. Η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για τον βέλτιστο σχεδιασμό δικτύου ώστε η γραμμές να εξυπηρετούν όλα τα ζεύγη Π-Π και να συμμορφώνεται με τους περιορισμούς της διαδρομής, τους χρόνους μεταφοράς και χρόνους αναμονής.
- II. Η ανάπτυξη κριτηρίων απόδοσης από την σκοπιά των επιβατών, του οργανισμού που έχει την λειτουργία καθώς και της κοινωνίας.

- III. Ο συνδυασμός με άλλες συνιστώσες της λειτουργίας και του σχεδιασμού (Κατασκευή Πίνακα Αφίξεων – Αναχωρήσεων και δρομολόγηση στόλου) με τις διαδικασίες σχεδιασμού δικτύων.
- IV. Η ανάπτυξη της ανάλυσης ευαισθησίας στο πρόβλημα με σκοπό την ανάλυση της ελαστικότητας λόγω των δυνατών αλλαγών στην ζήτηση και των περιορισμών.
- V. Η ανάπτυξη ενός αλληλεπιδρούν συστήματος ανθρώπου μηχανής, έτσι ώστε ο μελετητής να μπορεί να αλλάζει περιορισμούς ή γραμμές κατά την διαδικασία σχεδιασμού.

Η μεθοδολογία που προτείνεται φαίνεται στο διάγραμμα ροής Σχήμα 2. Μέσα στην διαδικασία , οι διαδρομές μπορούν να επιλεγούν σε δύο επίπεδα. Επίπεδο I – θεωρώντας τον σχεδιασμό από την σκοπιά των επιβατών και Επίπεδο II – θεωρώντας ότι ο σχεδιασμός ικανοποιεί επιβάτες και τον Οργανισμό. Προφανώς το Επίπεδο II παρουσιάζει μια πιο δύσκολη προσπάθεια ανάπτυξης. Ωστόσο , ασχολείται με τους περιορισμούς που οριοθετούνται από Επιβάτες και Οργανισμό και άρα αυξάνουν οι πιθανότητες ώστε η προτεινόμενη αλλαγές των γραμμών ή ο σχεδιασμός δικτύου να γίνει αποδεκτός. Πάραυτα, είναι πιθανό το Επίπεδο II να πρέπει να βασίζεται σε ευρετικές διαδικασίες (λύση), ενώ το Επίπεδο I είναι απλά πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ακόμα για μεγάλα δίκτυα και για αναθεώρηση πολλών γραμμών ταυτόχρονα , θα είναι προφανώς δύσκολη η εφαρμογή ή και αδύνατη η λύση στο πρόβλημα του Επιπέδου II που μετά απαιτεί την χρήση λιγότερη λεπτομερής ανάλυση στο Επίπεδο I.

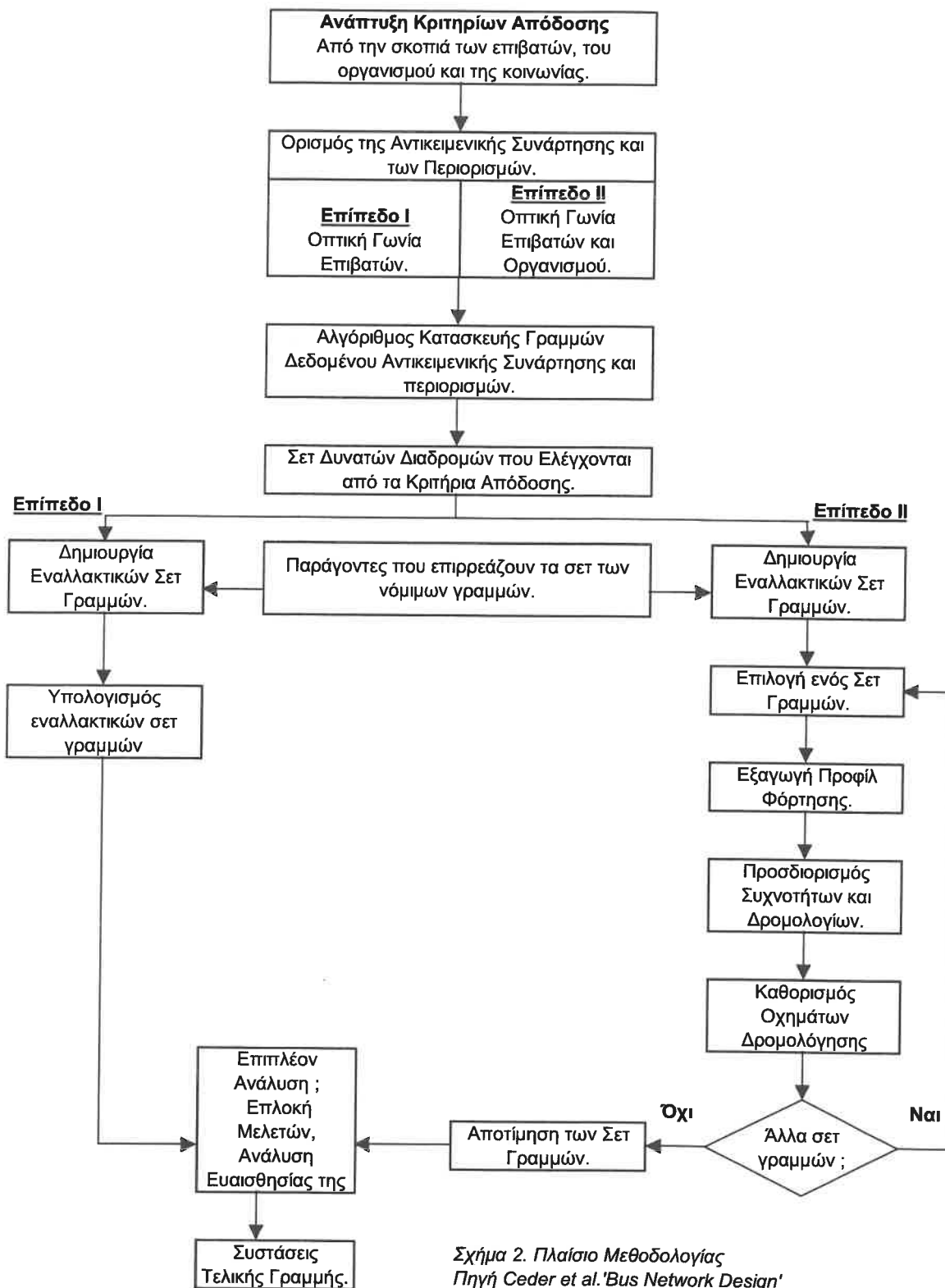
Στα δύο Επίπεδα I και II, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, ο μελετητής έχει την δυνατότητα να εισάγει τα δεδομένα ενός επιθυμητού δικτύου όπως τοπογραφικοί παράγοντες και διαμόρφωση δικτύου σε όρους κατάταξης γραμμής. Ακόμα ως προς τα χαρακτηριστικά δικτύου μπορούν να εισαχθούν στοιχεία ως προς την κάλυψη περιοχής, προσβασιμότητα και πολιτική μεταφοράς.

Ορίζουμε τώρα όλες τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται αργότερα για την επίλυση ενός δικτύου μέσου του αλγορίθμου που προτείνεται.

$G = \{N, A\}$ ένα δίκτυο δρόμων με N κόμβους και A τροχιές (πορείες)

$D = \{D(i,j)\}$ το μητρώο ζήτησης σε όρους αναμενόμενων αριθμό επιβατών από το i στο $j \mid i, j \in N$

$R = \{j\}$ σύνολο των δυνατών μεταφορών στους κόμβους, με $j \in N$



Σχήμα 2. Πλαίσιο Μεθοδολογίας
Πηγή Ceder et al. 'Bus Network Design'

- $T = \{ i \}$ σύνολο των δυνατών τερματισμών γραμμών, με $i \in N$, $T \in R$
- $\{ r(i,j) \}$ ολικός χρόνος μεταφοράς επιβατών από το i στο j , $\forall i, j \in N$
(σε επιβατο-ώρες)
- $\{ t(i,j) \}$ μητρώο χρόνου μεταφοράς από το i στο j , $\forall i, j \in N$
- $\{ t_m(i,j) \}$ μητρώο του ελάχιστου χρόνου μεταφοράς από το i στο j , $\forall i, j \in N$
- $\{ p_H(i,j) \} = \{ D(i,j) * t_m(i,j) \}$ μητρώο άμεσων επιβατο-ωρών από το i στο j , $\forall i, j \in N$
- $\{ \Delta p_H(i,j) \}$ μητρώο που δηλώνει την διαφορά σε επιβατο-ώρες μεταξύ χρόνου μεταφοράς γραμμής και του ελάχιστου χρόνου μεταφοράς από το i στο j , $\forall i, j \in N$ δηλαδή
 $\{ \Delta p_H(i,j) \} = D(i,j) * [t(i,j) - t_m(i,j)]$
- L_k είναι το μήκος της γραμμής k εκφρασμένο σαν χρόνος λειτουργίας
- L_1, L_2 είναι κάτω και πάνω όρια στο μήκος γραμμής, $L_1 * L_k * L_2$
- n ο αριθμός των γραμμών
- m άνω όριο στον αριθμό των γραμμών
- Z αριθμός των οχημάτων που χρειάζονται για να λειτουργεί το σύστημα
- F_k η συχνότητα εξυπηρέτησης στην γραμμή k
- F_m η ελάχιστη συχνότητα εξυπηρέτησης θεσπισμένη από τον Οργανισμό (μέγιστη χρονοαπόσταση οχημάτων)
- C_1 η αξία μιας επιβατο-ώρας του χρόνου ταξιδιού
- C_2 η αξία ενός οχήματος, συμπεριλαμβανομένου κεφαλαίου και λειτουργικού κόστους στην χρονική περίοδο
- $\{ t'(i,j) \}$ μητρώο (υπολογισμένου) χρόνου αναμονής σε

επιβατο-ώρες για την ζήτηση από το i στο j , $\forall i, j \in N$

$\{ a(i,j) \}$ μητρώο επιτρεπόμενου παραπανίσιου χρόνου μεταφοράς.
Είναι η διαφορά μεταξύ πραγματικού και ελάχιστου χρόνου ταξιδιού εκφρασμένος σαν ένα ποσοστό ελάχιστου χρόνου ταξιδιού γραμμής(ων) που συνδέονται από το i στο j , $\forall i, j \in N$ με $a(i,j) \geq 0$.

W μέγιστος ή ο ήδη υπάρχον στόλος από οχήματα που λειτουργούν στο σύστημα.

3.3.1.3.1 Βασική Μαθηματική Διατύπωση, Επίπεδο I

Για διαφορετικά σύνολο γραμμών, έτσι ώστε για κάθε σύνολο να εξυπηρετείται το μητρώο ζήτησης η αντικειμενική συνάρτηση θα είναι :

$$\min \left\{ \sum_{(i,j) \in N} \Delta p H(i,j) + \sum_{(i,j) \in N} r(i,j) \right\}$$

Με περιορισμούς

$$\frac{t(i,j)}{t_m(i,j)} \leq 1 + a(i,j),$$

$$L_1 \leq L_k \leq L_2,$$

$$n \leq m.$$

3.3.1.3.2 Βασική Μαθηματική Διατύπωση, Επίπεδο II

Επίσης για διάφορα σύνολο γραμμών εξετάζεται εάν ικανοποιείται η ζήτηση με την εξής αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμούς :

$$\min \left\{ C_1 \left[\sum_{(i,j) \in D} \Delta p H(i,j) + \sum_{(i,j) \in D} r(i,j) + \sum_{(i,j) \in D} t'(i,j) \right] + C_2 Z \right\}$$

Με περιορισμούς

$$\frac{t(i,j)}{t_m(i,j)} \leq 1 + a(i,j),$$

$$L_1 \leq L_k \leq L_2,$$

$$n \leq m,$$

$$F_k \geq F_m,$$

$$\sum_k (L_k F_k) \leq W.$$

Όπου και εδώ προστέθηκαν η ελάχιστη συχνότητα και ο περιορισμός στόλου.

Εύκολα καταλαβαίνει κανείς πως η διατύπωση η μαθηματική είναι περιορισμένη στην απόδοση της λειτουργικότητας ,λόγω του πρώτου περιορισμού. Εάν υπήρχαν και άλλες μεταβλητές ελέγχου της λειτουργικότητας θα μπορούσε να εισαχθούν είτε σαν επιπλέον περιορισμοί είτε στην αντικειμενική συνάρτηση. Σαν παράδειγμα, εάν η αξία του χρόνου αναμονής των επιβατών ή του χρόνου μεταφοράς ήταν διαφορετική από τον χρόνο στο όχημα ή η μεταφορά η ίδια είναι δύσκολη στον επιπλέον χρόνο, τότε η αντικειμενική συνάρτηση θα μπορούσε να τροποποιηθεί ανάλογα.

Το επιβατικό κοινό θεωρεί πως ένα καλό δίκτυο λεωφορειακών γραμμών είναι αυτό που δεν έχει πάρα πολλές γραμμές, μεγάλες σε μήκος (σε χιλιόμετρα ή χρόνο) που ούτε ο ένας ή άλλος θεωρείται αρκετά αναξιόπιστο αφού δεν θα εφαρμόζονται αυτά που έχουν σχεδιαστεί, να μην υπάρχουν κυκλικές διαδρομές ή να χρειάζονται μετεπιβιβάσεις σε άλλο μεταφορικό μέσο.

Ο Οργανισμός που διαχειρίζεται τα λεωφορεία οραματίζεται ένα καλό δίκτυο λεωφορειακών γραμμών σαν ένα δίκτυο που αρέσει στο επιβατικό κοινό και ταυτόχρονα να μην χρειάζεται εκτεταμένες πηγές μελετητικών ικανοτήτων που να σχετίζονται με περίπλοκους σχεδιασμούς και λειτουργικές πολυπλοκότητες.

Αυτά έχουν ληφθεί υπόψη στην προσέγγιση δύο επιπέδων και στην μαθηματική διατύπωση αυτών.

Άλλο ζήτημα είναι η ανάλυση ευαισθησίας που επιτρέπει την μεγιστοποίηση των αλλαγών σε ζήτηση και επίπεδο εξυπηρέτησης. Αρκεί να σημειώσουμε πως η αλλαγές ή η νέες γραμμές προφανώς θα αλλάξουν τις τιμές της ζήτησης και άρα θα ληφθεί υπόψη σαν νέο δεδομένο του προβλήματος. Η ανάλυση ευαισθησίας είναι επιθυμητή να γίνεται σε δύο βήματα :

- i) Πριν την αναθεώρηση των γραμμών
- ii) Μετά την εφαρμογή των νέων ή των διορθωμένων γραμμών

Λόγω του ότι η αλλαγές στις λεωφορειακές γραμμές είναι μη συχνές η ανάλυση ευαισθησίας θα περιλαμβάνει και το όριο πέραν του οποίου επιβάλλεται μια αλλαγή στο δίκτυο. Έτσι, εάν η αντικειμενική συνάρτηση δεν αυξάνει πέραν κάποιου ορίου, οι γραμμές δεν αλλάζουν και τροποποιήσεις μπορούν να γίνουν μόνο ως προς τις συχνότητες οχημάτων και των προγραμματισμό των οδηγών και οχημάτων.

3.3.1.4 Αλγόριθμος Κατασκευής Διαδρομών

Το μητρώο $\{ t_m(i,j) \}$ αναπαριστά τον ελάχιστο χρόνο ταξιδιού από το i στο j , ενώ $\{ t(i,j) \}$ είναι ο χρόνο που χρειάζεται να ταξιδέψει κανείς από το i στο j στο προτεινόμενο δίκτυο. **Ο προτεινόμενος αλγόριθμος που κατασκευάζει τις διαδρομές βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ έμμεσων και άμεσων επιβατο-ωρών.** Αυτή η προσέγγιση επιχειρεί να μειώσει τον χρόνο υπολογισμού που συνήθως είναι μεγάλος για τέτοιου είδους προβλήματα βελτιστοποίησης που προσπαθούν να ελέγξουν όλες τις δυνατές διαδρομές.

Ο αλγόριθμος ξεχωρίζει τις διαδρομές ανάλογα με τις τιμές του μητρώου $\{ a(i,j) \}$. Δηλαδή η δεδομένη ζήτηση $D(i,j)$ δεν μπορεί να αντιστοιχηθεί σε λεωφορειακή γραμμή εάν ο χρόνος ταξιδιού $t(i,j)$ ξεπεράσει την ελάχιστη τιμή του χρόνου ταξιδιού από το i στο j , δηλαδή $t_m(i,j)$, περισσότερο από ένα δεδομένο ποσοστό $a(i,j)$. Μαθηματικά αυτό μεταφράζεται ως :

$$t(i,j) \leq \left[1 + \frac{a(i,j)}{100} \right] t_m(i,j)$$

$\forall i, j \in N.$

Αυτά είναι τα οκτώ βήματα του αλγορίθμου, όπως παρουσιάζονται από τον Ceder.

Βήμα 0 : Έναρξη , $q = 1$

Βήμα 1 : Αρχή κατασκευής διαδρομών από τον τερματικό σταθμό (r_q) που έχει την μεγαλύτερη ζήτηση όπως εκφράζεται σε επιβατο-ώρες, επιλογή $r_q \in T$ ώστε :

$$\sum_{j \in N} pH(r_q, j) = \max_{i \in T, j \in N} \sum pH(i, j)$$

Βήμα 2 : Τίθεται ο τερματικός σταθμός ως κόμβος αρχής ($a = r_q$) και σημείωση της πρώτης προσπάθειας για αναζήτηση ($l = 1$) από r_q .

Βήμα 3 : Σημείωση διαδρομής μεταξύ τερματικού σταθμού και κόμβου j , $P(r_q, j)$ και ορισμός των κόμβων j_a^l , που μπορούν να συνδεθούν από τον κόμβο αρχής (a) αφαιρώντας τους κόμβους που ανήκουν στην διαδρομή από τον κόμβο αρχής μέχρι τους προηγούμενους θεωρούμενους κόμβους αρχής. Αλλιώς :

$$p(r_q, j) = \{(r_q, i_1)(i_1, i_2) \dots (i_m, j)\} = \{(r_q, j)\}$$

Ορισμός του σύνολο $j_a^l(r_q, j) = \{j: (a, j) \in A\} - \{i: i \in p(r_q, a)\}$

Βήμα 4 : Έλεγχος εάν ο χρόνος ταξιδιού από το επιλεγθέν τερματικό σταθμό σε κάθε κόμβο στο σύνολο j_a^l ικανοποιεί τον περιορισμό της εξίσωσης :

$$t(r_q, i_1, i_2, \dots, i_m, j) \leq \left[1 + \frac{a(r_q, j)}{100} \right] t_m(r_q, j)$$

όπου

$$t(r_q, i_1, i_2, \dots, i_m, j) = t(r_q, i_1) + t(i_1, i_2) + \dots + t(i_m, j),$$

εάν ΔΕΝ ισχύει :

και $j_a^l(r_q, j) = [j_a^l(r_q, j) = j]$ συνεχίζουμε.

Εάν $j_a^l(r_q, j) = \&$ πάμε Βήμα 6.

Βήμα 5 : Για την διαδρομή από τον επιλεγμένο τερματικό σταθμό στο κόμβο j , $p(r_q, j)$, υπολογίζουμε την διαφορά σε επιβατο-ώρες μεταξύ αυτής της διαδρομής και του ελαχίστου χρόνου ταξιδιού, ΔpH .

Βήμα 6 : Επιλογή του επόμενου κόμβου j που ανήκει στο σύνολο j_a^l και ορίζουμε αυτό σαν κόμβο αρχής ($a = j$), για πιθανή επέκταση της διαδρομής που έχει βρεθεί Αυξάνουμε τις μετρούμενες προσπάθειες κατά μια μονάδα ($l = l+1$).

Εάν δεν υπάρχουν άλλοι κόμβοι για επιλογή, συνεχίζουμε παρακάτω.

Αλλιώς επαναλαμβάνουμε την διαδικασία από το Βήμα 3.

Βήμα 7 : Θεωρούμε νέο σύνολο από κόμβους με αύξηση κατά μια ακόμα διαδρομή, j^{l+1}_a , (λόγω μεγαλύτερης προσπάθειας), από το τερματικό σταθμό που είχαμε επιλέξει, r_q .

Εάν δεν υπάρχει τέτοιο σύνολο, συνεχίζουμε παρακάτω.

Αλλιώς εξαντλούμε όλες τις δυνατές διαδρομές επαναλαμβάνοντας από το Βήμα 6.

Βήμα 8 : Διαγραφή του τερματικού σταθμού που είχαμε θεωρήσει από το σύνολο T , ώστε να θεωρήσουμε άλλο τερματικό σταθμό σαν αρχή, ($q = q+1$). Αρχίζει εξ' αρχής η διαδικασία που περιγράφηκε, από το Βήμα 1. Εάν έχουν εξετασθεί όλοι οι τερματικοί σταθμοί τότε τερματίζεται η αναζήτηση.

Ο αλγόριθμος παράγει τις δυνατές διαδρομές με τις επιπλέον επιβατο-ώρες που απαιτούνται. Φυσικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την ανάλυση σε Επίπεδο I ή Επίπεδο II όπως περιγράφηκε νωρίτερα και φαίνεται στο Σχήμα 2.

3.3.2 Σχεδιασμός Γραμμών και Δικτύου των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς

Ο Σχεδιασμός της Λειτουργίας των Λεωφορειακών Γραμμών φαίνεται σαν δομή στο Σχήμα 3. Υπάρχουν οι δύο τελευταίες διαδικασίες σχεδιασμού που μπορούν να χωριστούν σε επιμέρους βήματα, όμως όλα τα άλλα βήματα είναι αυτούσια όπως τα συναντάμε σε όλη σχεδόν την βιβλιογραφία.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα παρουσιάσουμε την διαδικασία σχεδιασμού δικτύου και γραμμών των μέσων μαζικής μεταφοράς, έχοντας υπόψη πως ούτος η άλλως τα λεωφορεία είναι από τα πιο απαιτητικά μέσα μεταφοράς ως προς την κατασκευή του δικτύου, αφού δεν υπάρχει μια δεδομένη συνιστώσα ταχύτητας και δεν έχουμε σταθερές τροχιές. Υπάρχει μια ελευθερία κίνησης αρκετά μεγάλη που περιπλέκει την διαδικασία σχεδιασμού. Αυτό από την άλλη δεν σημαίνει πως ότι σχεδιάζεται για τα λεωφορεία δεν μπορεί να εφαρμοστεί στα άλλα μέσα μεταφοράς όπως το τρένο, το μετρό, το τρόλεϊ ή το τραμ. Μπορούμε να πούμε πως, ως προς τον σχεδιασμό γραμμών, τα υπόλοιπα μέσα είναι πολύ παρεμφερή και ο σχεδιασμός απλοποιείται, αν και αναδύονται

ταυτόχρονα άλλες ερωτήσεις-ζητήματα που απαιτούν την ίδια προσοχή στην αντιμετώπιση τους.

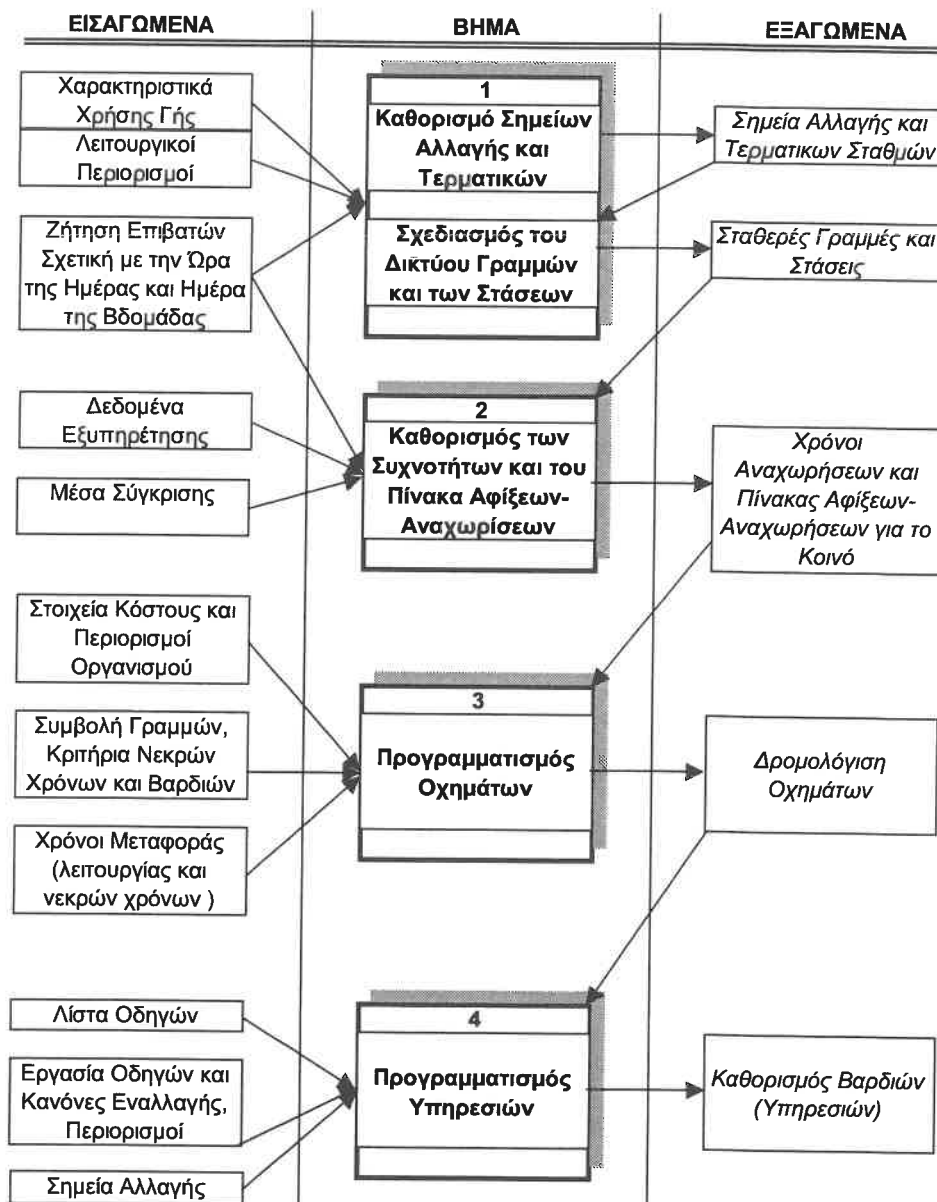
Θεωρώντας λοιπόν ότι μιλάμε για λεωφορειακές γραμμές μπορούμε να πούμε πως αναφερόμαστε και σε γραμμές μετρό ή τραμ, αναφορικά πάντα με τον σχεδιασμό δικτύου.

Βέβαια οι ιδιαιτερότητες κάθε μέσου δεν αμφισβητούνται και αυτές είναι ευθύνη των αντίστοιχων μελετητών να παρουσιασθούν και προκειμένω να γίνει σωστός σχεδιασμός, να ικανοποιηθούν.

Παρακάτω θα αναφερθεί μια άλλη προσέγγιση στο σχεδιασμό δικτύων, εμπνευσμένη από τον Avishai Ceder [Lam & Bell, 2003], χρόνια μετά την προηγούμενη λογική που παρουσιάστηκε. Αυτή την φορά δεν δίνεται σημασία μεγάλη στο αλγόριθμο που χρησιμοποιείται για να διαγραφούν όλες οι δυνατές διαδρομές, αλλά στην μαθηματική διατύπωση που πραγματικά φαίνεται να είναι πιο ρεαλιστική και να συμβαδίζει με την εποχή μας. Δίνεται σημασία στην διαδικασία επιλογής της βέλτιστης λύσης η οποία βεβαίως και στηρίζεται στην επιλογή κάποιων βέλτιστων γραμμών από τον αλγόριθμο που καλύπτει το πρόβλημα κάλυψης (set covering problem) και που ακόμα θεωρείται ‘τέχνη’ (state of the art).

Το σημαντικό εδώ είναι ότι στο τέλος η όλη διαδικασία προσφέρει στον υπεύθυνο για την απόφαση (decision maker) μια ολοκληρωμένη και εποπτικά λύση, η οποία και θα περιλαμβάνει μια περιοχή των βέλτιστων λύσεων, που είναι οικονομικά εφικτές.

Χωρίς περαιτέρω καθυστέρηση θα προχωρήσουμε στην περιγραφή αυτής της προσέγγισης που γίνεται από τον Ceder, αναλυτικά υπενθυμίζοντας έννοιες που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο.



Σχήμα 3. Δομή Σχεδιασμού Λεωφορειακών Γραμμών
Πηγή Lam & Bell 'Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning'

3.3.2.1 Αναδρομή Ιδεών- Προσεγγίσεων

Γενικά μιλώντας λίγοι σχεδιαστές έχουν ερευνήσει την αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων-στοιχείων σχεδιασμού. Η αλληλεπίδραση αυτή υπάρχει σε δύο κατευθύνσεις :

- i) Κάθε σύνολο από γραμμές προέρχεται από την ζήτηση, από ένα σύνολο συχνοτήτων και πίνακα αφίξεων-αναχωρήσεων και τελικά από το απαιτούμενο στόλο λεωφορείων.
- ii) Το κόστος λειτουργίας που απορρέει από τα στοιχεία σχεδιασμού και το επίπεδο εξυπηρέτησης του επιβάτη επηρεάζουν αποφασιστικά την αναζήτηση για το βέλτιστο σχεδιασμό γραμμών ενώ στηριζόμαστε στον συμβιβασμό Οργανισμού και Επιβάτη.

Η εμπειρική μέθοδος σχεδιασμού, όπως έχει αναφερθεί, στηρίζεται στην εξέταση κάθε γραμμής, χωριστά και βελτιώσεις πάνω σε αυτές που είναι υποψήφιες προς αναθεώρηση. Όμως υπάρχει η πεποίθηση ότι αλλάζοντας όλες τις γραμμές ενός δικτύου υπάρχει μεγαλύτερο όφελος από την διαδικασία, συνολικά και επομένως συνιστάται. Ακόμα υπάρχουν Οργανισμοί που δεν έχουν εισάγει αυτή την φιλοσοφία της αλλαγής και αναθεώρησης των γραμμών τους στην διαδικασία σχεδιασμού και δεδομένου ότι πρέπει να γίνεται κάθε 2 με 3 χρόνια, αποτελεί μια καλή ευκαιρία η εφαρμογή της νέας μεθόδου που προτείνεται. Η μέθοδος έχει σαν κύριο σκοπό να μεταφερθεί η ζήτηση μεταξύ των κόμβων του δικτύου στον προορισμό, με την λιγότερη επίδραση στο κόστος. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός προβλήματος σχεδιασμού γραμμών είναι :

- i) Η ζήτηση από τους επιβάτες είναι κατανεμημένη σε όλο το δίκτυο και εκφράζεται σαν μητρώο Π-Π.
- ii) Η ζήτηση πρέπει να μεταφερθεί ταυτόχρονα.
- iii) Η μεταφορά αυτή σχεδιάζεται σε κάποιο χρονικό ορίζοντα, κατά το οποίο το δίκτυο δεν αλλάζει, έως το τέλος της περιόδου σχεδιασμού.

Προηγούμενες προσεγγίσεις του προβλήματος σχεδιασμού δικτύου μπορούν να ενταχθούν σε 2 κατηγορίες, εκείνες που ασχολούνται με ιδανικά δίκτυα (ideal networks) και εκείνες που στηρίζονται στο μαθηματικό προγραμματισμό (mathematical programming).

Τα μοντέλα προσομοίωσης (Simulation Models) εμφανίσθηκαν παλιότερα και παρουσιάζονται στους Dial & Bunyan (1968), Heathington et al (1968) και στους Vandebona & Richardson (1985). Αυτά τα μοντέλα χρειάζονται πολλά δεδομένα και η προσέγγιση της βέλτιστης λύσης είναι αμφίβολη.

Οι μέθοδοι των ιδανικών δικτύων βασίζονται σε μια μεγάλη γκάμα παραμέτρων σχεδιασμού και στόχων που εξυπηρετούν το συμφέρον του Επιβάτη και του Οργανισμού. Τέτοιες μέθοδοι παρουσιάζονται από τους

Kocur & Henrickson (1982), Tsao & Schonfeld (1984) και στους Kuah & Perl (1988). Αυτές οι μέθοδοι είναι ικανοποιητικές για ξεκαθάρισμα γραμμών ή ανάλυση της πολιτικής του Οργανισμού, στις οποίες προσδιορίζονται προσεγγιστικοί παράμετροι σχεδιασμού παρά γίνεται ολοκληρωτικός σχεδιασμός. Επομένως αυτές οι μέθοδοι δεν μπορούν να εκπροσωπούν αληθινές καταστάσεις.

Τα μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού διαιρούνται σε μοντέλα Σχεδιασμού Γενικών Δικτύων και μοντέλα ειδικά για προβλήματα Σχεδιασμού Δικτύων Δημοσίων Συγκοινωνιών. Κάποια μοντέλα Σχεδιασμού Γενικών Δικτύων συνοψίζονται και αναφέρονται στους Kim και Barnhart (1999) ενώ σαν παράδειγμα μπορεί κάποιος να δει ο μοντέλο των Farvolden και Powel (1994). Τα μοντέλα Σχεδιασμού Δικτύων Δημοσίων Συγκοινωνιών είναι στο σύνολο τους ευρετικά λόγω των μεγάλων προσπαθειών (από άποψη υπολογισμών και χρόνου) που χρειάζονται για την εύρεση της λύσης. Η βελτιστοποίηση (μέρους του προβλήματος) εμφανίζεται στον Hasselstrom (1981), Dubois et al (1979), Lampkin & Saalmans (1967), Silman et al (1974), Rea (1971), Mandl (1979), Marwah et al (1984), Sharp (1974) & Keudel (1988). Όπως έχει αναφερθεί εκτός από την προσέγγιση του Hasselstrom που ενσωματώθηκε Volvo public transport planning package, τα άλλα μοντέλα δεν έχουν εφαρμοστεί. Ωστόσο το μοντέλο του Hasselstrom είναι αρκετά πολύπλοκο, δεν είναι φιλικό προς τον χρήστη και πολύ ακριβό και ως προς τα δεδομένα και ως προς της ώρες υπηρεσίας που χρειάζονται για την όλη διαδικασία.

Βασικά μειονεκτήματα των μοντέλων που υπάρχουν στο μαθηματικό προγραμματισμό αναφέρονται παρακάτω :

- i) Δεν μπορούν να επιλύσουν μεγάλα δίκτυα δημόσιων συγκοινωνιών
- ii) Δεν λαμβάνουν υπόψη κατάλληλες αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμούς ως προς την βελτιστοποίηση.
- iii) Ο προσδιορισμός της συχνότητας των οχημάτων βασίζεται οικονομικούς παραμέτρους παρά στην εκτίμηση επιβατών.
- iv) Δεν μπορούν να επιλύσουν ταυτόχρονα τρία από τα τέσσερα μέρη του σχεδιασμού (σχεδιασμού δικτύου, ορισμός των αφίξεων-αναχωρήσεων και δρομολόγηση οχημάτων). Συγκεκριμένα τα μοντέλα δεν μπορούν να υπολογίσουν το δίκτυο εάν δεν ορισθεί ο αριθμός των οχημάτων που απαιτείται για κάθε γραμμή και άρα δεν υπάρχει αποτελεσματικότητα ως προς το κόστος του σχεδιασμού.
- v) Δεν μπορούν να χειριστούν μη ποσοτικές παραμέτρους όπως το να συμπεριληφθούν κάποιες 'βέβαιες' (σίγουρες) συνδέσεις

στις δημόσιες συγκοινωνιακές γραμμές καθώς και λειτουργικές στρατηγικές.

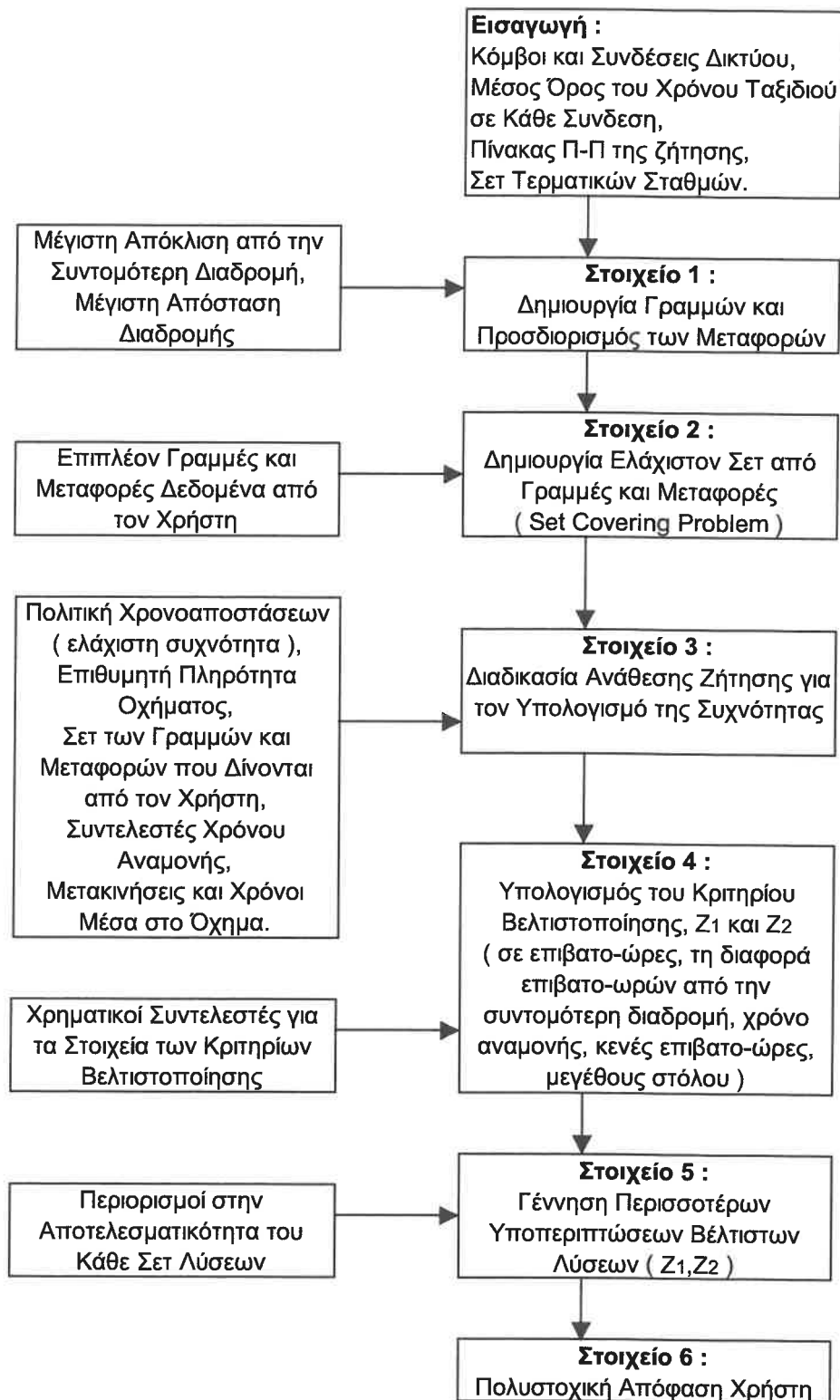
Άλλη κατηγορία άρθρων που σχετίζονται με το πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύου των δημόσιων συγκοινωνιών είναι το πρόβλημα προσδιορισμού (ανάθεσης) των δημοσίων συγκοινωνιών (public transport assignment problem). Πολύ καλή βιβλιογραφική ανασκόπηση υπάρχει στους Spiess και Florian (1989) και Wu et al (1994).

Η λύση στο πρόβλημα καθορισμού των δημοσίων συγκοινωνιών θεωρεί μόνο την σκοπιά του χρήστη, ενώ υποθέτει ότι οι επιβάτες θέλουν ελαχιστοποίηση του μήκους βαδίσματος, των χρόνων αναμονής και ταξιδιού, ή μια μέση τιμή όλων αυτών των χρόνων. Το δεδομένο του προβλήματος είναι ένα υπάρχον δίκτυο γραμμών δημόσιων συγκοινωνιών και το ερώτημα είναι πώς να κατανεμηθεί η ζήτηση για δημόσια συγκοινωνία στο δεδομένο δίκτυο γραμμών. Οι Spiess & Florian (1989) ανέπτυξαν έναν διμερή αλγόριθμο για τον καθορισμό της ζήτησης επιβατών. Το πρώτο μέρος του αλγορίθμου υπολογίζει τον συνολικό χρόνο ταξιδιού μεταξύ προέλευσης προορισμού, ενώ εξετάζει τις δυνατές μεταφορές. Στο δεύτερο μέρος, η ζήτηση των επιβατών ανατίθεται βάση μια στρατηγικής βελτιστοποίησης.

3.3.2.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που προτείνεται αποτελείται από 6 στοιχεία και φαίνεται στο Σχήμα 4.

Στο πρώτο στοιχείο ο αλγόριθμος παράγει όλες τις δυνατές διαδρομές και μεταφορές (σε όλο το δίκτυο), από όλους τους τερματικούς σταθμούς συμπεριλαμβανομένου και τον υπολογισμό της μικρότερης διαδρομής. Αρχικά το δίκτυο περιέχει τους μέσους χρόνους ταξιδιού σε δεδομένο χρονικό παράθυρο, που είναι στην πραγματικότητα η περίοδο αιχμής. Αυτοί οι μετρημένοι μέσοι χρόνοι είναι τα δεδομένα εισαγωγής (input) στον υπολογισμό της πιο σύντομης διαδρομής μεταξύ κάθε προέλευσης-προορισμού. Κάθε διαδρομή που παράγεται πρέπει να ικανοποιεί τον περιορισμό του μέγιστου μήκους διαδρομής. Με άλλα λόγια, μια διαδικασία, στο συγκεκριμένο στοιχείο είναι να παραχθούν οι διαδρομές με βάση το μέγιστο μήκος που έχουμε ορίσει σαν όριο. Ακόμα υπάρχει περιορισμός στον μέσο χρόνο ταξιδιού μεταξύ κάθε ζευγαριού



Σχήμα 4. Μεθοδολογία Σχεδιασμού Δικτύου Γραμμών
Πηγή Lam & Bell 'Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning'

προέλευσης –προορισμού. Αυτό σημαίνει πως μια ζήτηση για δημόσιες μεταφορές, συνήθως τις ώρες αιχμής, δεν μπορεί να αντιστοιχηθεί σε μια εξεταζόμενη διαδρομή εάν ο μέσος χρόνος ταξιδιού υπερβαίνει τον χρόνο τις συντομότερης διαδρομής περισσότερο από κάποιο δεδομένο ποσοστό. Οι δυνατές μεταφορές βασίζονται στην εξής μέθοδο :

Καθορισμός επιπλέον άμεσων διαδρομών μεταξύ ζευγαριών Π-Π που χαρακτηρίζονται από υψηλή ζήτηση (προαποφασισμένα Π-Π). Αυτές οι άμεσες διαδρομές ξεκινούν ή / και τερματίζουν σε μη τερματικούς κόμβους και συνεπώς ταξίδια εκτός λειτουργίας (με νεκρούς χρόνους) πρέπει να υπάρχουν για να γίνει η σύνδεση με τους τερματικούς σταθμούς. Επίσης μια χαμηλή ζήτηση Π-Π, χωρίς άμεσες διαδρομές δεν θεωρείται πως μπορεί να προσφέρει εξυπηρέτηση (δηλαδή δεν εξετάζεται). Ο αλγόριθμος που παράγει τις διαδρομές ασχολείται με την πιθανότητα διακλάδωσης γραμμών με έλεγχο των περιορισμών. Αυτά εφαρμόζονται σε μη συνδεδεμένα ζευγάρια Π-Π αλλά και σε συνδεδεμένα ζευγάρια Π-Π.

Στο δεύτερο στοιχείο της διαδικασίας έχουμε την δημιουργία των ελάχιστων σύνολο διαδρομών και της συσχετισμένες με αυτές μεταφορές, έτσι ώστε η σύνδεση μεταξύ των κόμβων να διατηρείται και η συνολική απόκλιση από την συντομότερη διαδρομή να ελαχιστοποιείται. Το πρόβλημα αυτό ορίζεται σαν Πρόβλημα Κάλυψης (Set Covering Problem), το οποίο και είναι δύσκολο στην επίλυση. Το SCP μπορεί να προσδώσει το ελάχιστο σύνολο από διαδρομές από το μητρώο των δυνατών διαδρομών. Σε αυτό το μητρώο κάθε γραμμή αντιπροσωπεύει είτε δυνατή διαδρομή είτε δυνατή μεταφορά.

Στο τρίτο στοιχείο της διαδικασίας όλη η ζήτηση Π-Π ανατίθεται στις επιλεγμένες διαδρομές (σύνολο διαδρομών). Ο αλγόριθμος ανάθεσης ο οποίος έχει αναπτυχθεί από τους Israel and Ceder, 1996 περιλαμβάνει βήματα που σχετίζονται με μια Έρευνα Απόφασης Επιλογής Διαδρομής (Route-choice decision investigation). Π.χ. Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει μια συνάρτηση πιθανότητας για επιβάτες που είναι σε θέση να επιλέξουν το μέσο μαζικής μεταφοράς (εν προκειμένω για μας αριθμό λεωφορείου) ή να περιμένουν για κάποιο πιο γρήγορο μέσο. Η στρατηγική των επιβατών είναι η ελαχιστοποίηση των χρόνων αναμονής και χρόνων μέσα στο όχημα. Η μεθοδολογία είναι ίδια με αυτή που αναπτύχθηκε από τους Marguier and Ceder, 1984 αλλά με διαφορετική συνάρτηση πιθανότητας. Οι προσεγγίσεις από τους Spiess and Florian (1989) και Wu et al (1994) μπορούν να εισαχθούν σε αυτό το στοιχείο της διαδικασίας ωστόσο χρειάζονται εκτεταμένο υπολογιστικό χρόνο και δεν πρέπει να εκτελούνται σε μεγάλο αριθμό από εναλλακτικά δίκτυα δημοσίων μεταφορών.

Το τέταρτο στοιχείο της διαδικασίας αντιπροσωπεύει το κριτήριο βελτιστοποίησης από την πλευρά του Επιβάτη ,του Οργανισμού και της

Κοινωνίας. Σε αυτό το στοιχείο έχουμε τις μεταβλητές Z_1 που είναι το κριτήριο σε μονάδες επιβατο-ωρών και Z_2 είναι αντίστοιχα ο αριθμός του στόλου που απαιτείται. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μεγέθους του στόλου βασίζεται στην Θεωρία Συνάρτησης Ελλείμματος (Deficit Function Theory) που προτείνεται από τους Ceder and Stern (1981) και γενικεύεται από τον Ceder (2002). Η ανάπτυξη της θεωρίας αυτής θα ακολουθήσει σε διαφορετικό κεφάλαιο το οποίο και θα περιγράφεται το πρόβλημα καθορισμού των οχημάτων (Vehicle scheduling).

Το πέμπτο στοιχείο είναι υπεύθυνο για την κατασκευή εναλλακτικών σύνολο διαδρομών με σκοπό την αναζήτηση επιπλέον τιμών (Z_1, Z_2) στην γειτνίαση των βέλτιστων χαρακτηριστικών. Η διαδικασία για αυτό το ψάξιμο στηρίζεται σε αυξητικές αλλαγές στο σύνολο των διαδρομών, όπως στις μεθόδους μειωμένης κλίσης (reduced gradient methods). Έχοντας το σύνολο των διαδρομών που σχετίζεται με την ελάχιστη τιμή Z_1 , η διαδρομή η χειρότερη που συνεισφέρει στο Z_1 διαγράφεται τότε το Πρόβλημα Κάλυψης επιλύεται στο δεύτερο βήμα, ενώ ακολουθείται από τα στοιχεία τρία και τέσσερα της διαδικασίας σχεδιασμού. Αυτή η διαδικασία μπορεί να συνεχιστεί αλλά δεν υπάρχει εγγύηση ότι δεν θα επαναληφθεί μια προηγούμενη διαδρομή. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα κατασκευάζεται ένα μητρώο νέο με σκοπό την εύρεση των ελάχιστων και χειρότερων σύνολο από διαδρομές προς διαγραφή σε κάθε επανάληψη. Ακόμα κατά την διάρκεια της διαδικασίας μια συλλογή από διαδρομές ορίζονται ως απαγορευμένες στήλες, αφού έχουμε τις υποψήφιες διαδρομές σε στήλες, λόγω του ότι είναι οι μοναδικές στην μεταφορά συγκεκριμένης ζήτησης. Οι τελευταίες απαγορευμένες διαδρομές δεν περιλαμβάνονται στην λύση μας και αυτό το εξασφαλίζουμε δίνοντας τους ψευδές υψηλό κόστος. Ακόμα αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει κάποια όρια ώστε να συγκλίνει σε λύση μετά από κάποιο επιθυμητό αριθμό επαναλήψεων ή αριθμούς λύσεων (Z_1, Z_2).

Το έκτο και τελευταίο στοιχείο διαδικασίας περιλαμβάνει πολυστοχικό προγραμματισμό των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων Z_1 και Z_2 . Δεδομένου των σύνολο των διαδρομών που προέκυψαν από το πέμπτο στοιχείο, ο σκοπός είναι να ερευνήσουμε τις διάφορες εναλλακτικές όσον αφορά την πιο αποτελεσματική λύση (Z_1, Z_2). Η μέθοδος που έχει επιλεγεί λέγεται Μέθοδος Συμβιβασμού (Compromise Set Method , Zeleny 1973, 1974). Η μέθοδος συμβιβάζει γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις με ξέχωρες μεταβλητές. Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι ένα θεωρητικό σημείο στο οποίο (Z_1, Z_2) επιτυγχάνεται η σχετική ελάχιστη τιμή.

Τα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν σε πίνακα ή σε γράφημα δύο διαστάσεων το οποίο και δείχνει την ανταλλαγή μεταξύ των Z_1 και Z_2 . Αυτά τα αποτελέσματα ακόμα δείχνουν την βέλτιστη περιοχή (ή

αλλιώς pareto front). Έτσι ο υπεύθυνος για την απόφαση (Decision maker) μπορεί να αποφασίσει την προτεινόμενη λύση. Τέλος ο υπεύθυνος για την απόφαση μπορεί με αυτό τον τρόπο να δει πόσο αυξάνει η τιμή της Z_1 μειώνοντας την τιμή Z_2 και αντίστροφα.

3.3.2.3 Μαθηματική Διατύπωση -

Η μαθηματική διατύπωση των παραπάνω ακολουθεί και γίνεται

$$\min Z_1 = a_1 \sum_{i,j \in N} \Delta PH(i,j) + a_2 \sum_{i,j \in N} WH(i,j) + a_3 \sum_r E H_r$$

$$\min Z_2 = FS$$

όπου :

$\Delta PH(i,j)$ = Διαφορά των επιβατο-ωρών (Passenger Hours Difference), για την ζήτηση μεταξύ των κόμβων i και j με $i,j \in N$, μεταξύ των δημοσίων συγκοινωνιακών γραμμών και της συντομότερης γραμμής (αυτοκινήτου) ορισμένο σαν χρόνος ταξιδιού επιβατών σε όχημα δημοσίων μεταφορών σε ωριαία βάση, μείον τον συνολικό χρόνο επιβατών, εάν ταξιδεύουν στην συντομότερη γραμμή (διαδρομή). Ουσιαστικά μετρά τι επιπλέον χρόνο ξοδεύουν οι επιβάτες των μέσων μαζικής μεταφοράς μεταξύ δύο κόμβων.

$WH(i,j)$ = Χρόνος Αναμονής (Waiting Time) μεταξύ των κόμβων i και j με $i,j \in N$, ορισμένο σαν ο χρόνος στις στάσεις των δημοσίων μεταφορών και στα σημεία μεταφορών, σε ωριαία βάση. Μετρά πόσο χρόνο αναμονής χρειάζεται μεταξύ δύο κόμβων.

$E H_r$ = Κενές θέσεις επιβατο-ωρών (Empty Space-Hours) στην γραμμή r , που ορίζεται σαν μη χρησιμοποιούμενες θέσεις στο μέσο δημοσίων μεταφορών σε ωριαία βάση. Ακόμα οι κενές θέσεις επιβατο-ωρών μετρούν σε πια χωρητικότητα λειτουργούν τα μέσα δημοσίων μεταφορών.

FS = Μέγεθος Στόλου (Fleet Size). Ο αριθμός των οχημάτων δημοσίων μεταφορών που απαιτούνται για να εξυπηρετήσουν όλες της επιλεγμένες διαδρομές.

$a_{i=1,2,3}$ = Δυνατοί Συντελεστές Βαρύτητας (Possible Monetary Weights) για την ελαχιστοποίηση του κόστους.

Η όλη διαδικασία μπορεί να ειπωθεί ότι δεν είναι γραμμική αλλά περισσότερο ορίζεται σαν μη-γραμμική μαθηματική διατύπωση με μικτό προγραμματισμό ακεραίων (non-linear and mixed integer programming).

Η αντικειμενική συνάρτηση όπως φαίνεται λαμβάνει υπόψη την οπτική γωνία του Επιβάτη, του Οργανισμού και της Κοινωνίας. Μια γραμμή εκ τω πραγμάτων πρέπει να εξυπηρετεί όλες τις εμπλεκόμενες πλευρές και προφανώς ο βέλτιστος προγραμματισμός και σχεδιασμός που λαμβάνει υπόψη αυτό το γεγονός.

Έτσι η διαφορά επιβατο-ωρών ($\Delta PH(i,j)$) αντιπροσωπεύει την οπτική γωνία του επιβάτη και της κοινωνίας. Του επιβάτη γιατί στον επιβάτη αναφέρεται αλλά και της κοινωνίας γιατί οι χαμένες ώρες ή οι ώρες που ξοδεύονται στα λεωφορεία ενδιαφέρουν την πολιτεία και πρέπει να βρεθεί τρόπος να μειωθούν δραματικά προκειμένου τα μέσα μαζικής μεταφοράς να είναι ελκυστικά και να μπορούν να συναγωνιστούν το Ι.Χ.

Ο χρόνος αναμονής ($WH(i,j)$) αναφέρεται στον επιβάτη αρχικά και μπορούμε να πούμε πως 'πληρώνεται' από αυτόν. Όμως και πάλι μια πολιτεία με επιβάτες να περιμένουν στις στάσεις δεν μπορεί να πει πως εκμεταλλεύεται τον χρόνο και ο συνωστισμός δεν είναι πάντα ευχάριστος.

Από την άλλη άδεια λεωφορεία ή υπερβολικά γεμάτα είναι στοιχείο από τον άμεσα ενδιαφερόμενο Οργανισμό καθορισμένο και προφανώς επηρεάζει την διάθεση του επιβάτη να ταξιδέψει, δεδομένου ότι καθορίζεται έτσι το επίπεδο εξυπηρέτησης του μέσα στο όχημα (ο βαθμός πλήρωσης).

Τελευταίο στοιχείο είναι το μέγεθος του στόλου που και πάλι καθορίζει άμεσα τα έξοδα του Οργανισμού αλλά επηρεάζει τον Επιβάτη ως προς την συχνότητα εξυπηρέτησης του και την Κοινωνία ως προς τις επιπτώσεις των δρομολογίων και γενικά της κίνησης στο περιβάλλον, μέσω των ρύπων και το κυκλοφοριακό πρόβλημα.

3.3.3 Σχεδιασμός Γραμμών με την Μέθοδο Βραχείας Διαδρομής

3.3.3.1 Εισαγωγή

Η στρατηγική βραχείας διαδρομής (Short Turn Strategy) εφαρμόζεται από τους μελετητές ως μέθοδος για την μείωση του κόστους. Το κόστος του στόλου επηρεάζει άμεσα το κόστος λειτουργίας των οχημάτων και των ημερομισθίων των οδηγών. Η μέθοδος έχει αρκετές αναφορές δεδομένου ότι προσφέρει διαδρομές απελευθερωμένες από δεσμεύσεις τερματικών σταθμών. Αυτή η λογική εξυπηρετεί την επιπλέον ζήτηση που εμφανίζεται στους κόμβους του δικτύου τις ώρες αιχμής.

Ο ορισμός είναι πολύ απλός. Θεωρούμε βραχεία διαδρομή μια διαδρομή που ξεκινά σε κόμβο μετά την αφετηρία και τερματίζει πριν το κανονικό τέρμα. Η δυνατότητα να δημιουργήσουμε συντομότερες (μικρότερες σε μήκος) διαδρομές δίνει την ευκαιρία να λειτουργούν οχήματα, ενώ εξασφαλίζουμε ότι σε κάθε τμήμα της διαδρομής τηρείται η επιθυμητή χωρητικότητα (βαθμός πλήρωσης).

Στην καθημερινή πρακτική, στους περισσότερους Οργανισμούς που διαχειρίζονται λεωφορειακές γραμμές η μέθοδος εφαρμόζεται συχνά από τους μελετητές με σκοπό την μείωση του κόστους. Οι διαδικασίες που συνήθως εφαρμόζονται από τους μελετητές βασίζονται στην εποπτεία (παρακολούθηση) του προφίλ φόρτου όπως κατανέμεται σε όλη την διαδρομή. Έτσι κάποιο πιθανό σημείο στροφής καθορίζεται στο πιο ικανοποιητικό χρονικό σημείο (στάση στην πραγματικότητα) στο οποίο υπάρχει μια απότομη αύξηση ή μείωση του επιβατικού φόρτου. Όμως ενώ μια τέτοια λογική φαίνεται εκ πρώτης όψεως σωστή, οι μελετητές, ενστικτωδώς δεν μπορούν να ξέρουν εάν όλες οι βραχείες διαδρομές χρειάζονται για να μειωθεί το μέγεθος στόλου. Από την άλλη κάθε φορά που εφαρμόζεται μια βραχεία διαδρομή, μειώνεται το επίπεδο εξυπηρέτησης που τείνει να επηρεάσει την απόφαση πραγματοποίησης του ταξιδιού από τον Επιβάτη.

Οι σημαντικότεροι στόχοι τις μεθοδολογίας είναι [Lam & Bell, 2003] :

1. Η αναγνώριση των δυνατών σημείων αναστροφής βασισμένη στα στοιχεία του προφίλ φόρτου.
2. Ο καθορισμός του ελάχιστου μεγέθους στόλου απαιτούμενου για την εφαρμογή ενός δεδομένου πίνακα αφίξεων-αναχωρήσεων συν του νεκρού χρόνου.
3. Η προσαρμογή των αριθμών των αναχωρήσεων σε κάθε σημείο αναστροφής ανάλογα με τα στοιχεία του φόρτου, δεδομένου ότι ο μέγιστος νεκρός χρόνος που προκύπτει, ελαχιστοποιείται.
4. Η ελαχιστοποίηση του αριθμού των βραχέων διαδρομών δεδομένου ότι η ελαχιστοποίηση του μεγέθους του στόλου διατηρείται. Αυτό οδηγεί για δεδομένο πίνακα αφίξεων-αναχωρήσεων σε αύξηση του επιπέδου εξυπηρέτησης που προσφέρεται στον Επιβάτη.
5. Η δημιουργία μπλοκ (blocks) δηλαδή προγραμματισμένων δρομολογίων για το τελικό πίνακα αφίξεων-αναχωρήσεων.

Ακόμα μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι αυτοί που προσπάθησαν έως τώρα να αναπτύξουν διαδικασίες και αλγόριθμους κάνουν την υπόθεση ότι τα στοιχεία που χρειάζονται είναι γνωστά στους Οργανισμούς πράγμα το οποίο και δεν είναι απόλυτα σωστό. Έτσι τα όσα θα αναφερθούν παρακάτω δεν θεωρούν πως υπάρχουν στοιχεία Προέλευσης-

Προορισμού στον Οργανισμό αλλά ακόμα και αν υπάρχουν, με τις κατάλληλες μετατροπές μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

3.3.3.2 Μεθοδολογία

Η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι η διαδικασία όπως προτείνεται από τον Avishai Ceder (1990,1991) ενώ πριν μια γενικότερη σύνοψη σε στρατηγικές βραχείας διαδρομής, σε γραμμές της περιοχής του κέντρου είχε πραγματοποιηθεί από τον Furth et al το 1984.

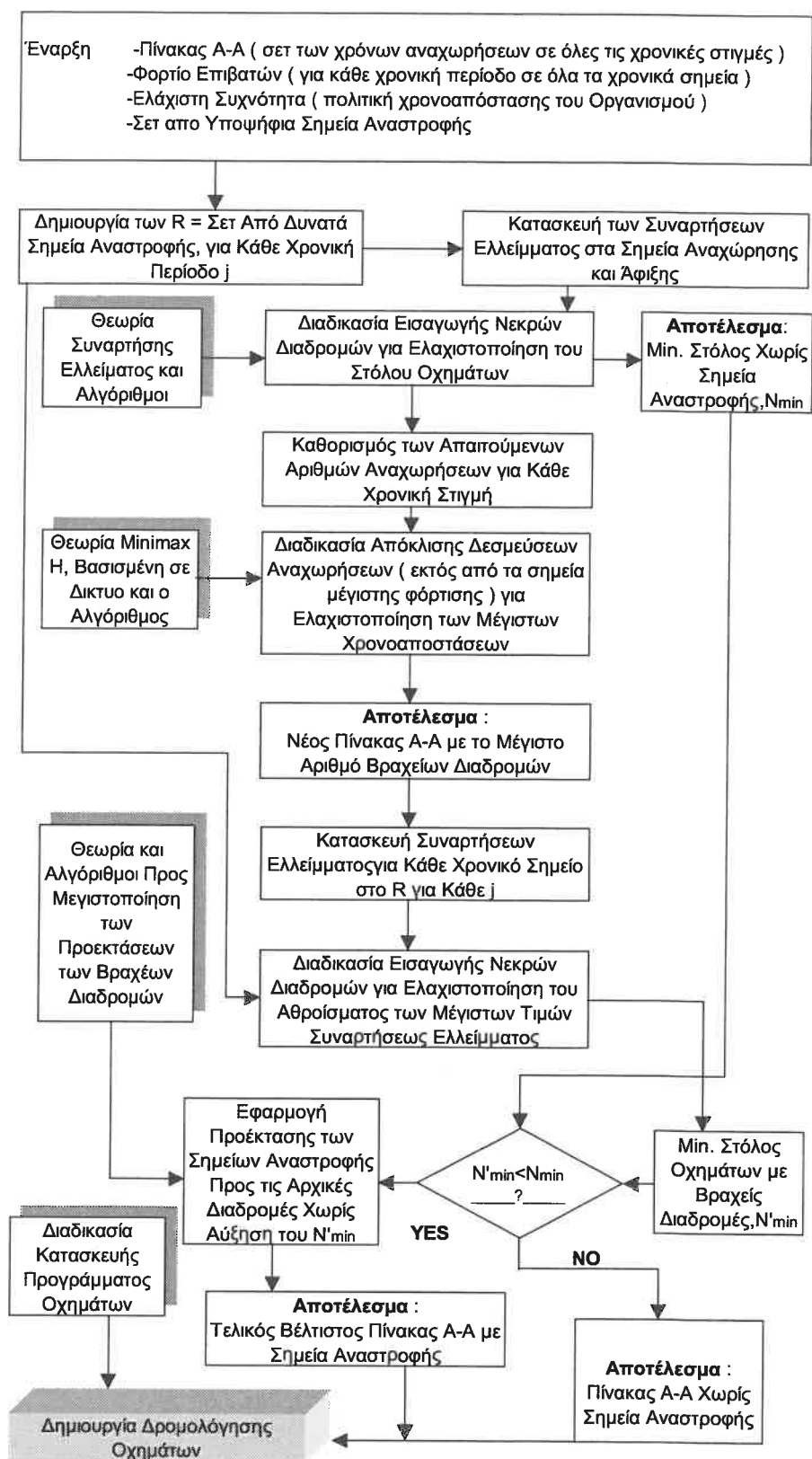
Έτσι οι βασικές πληροφορίες που χρειάζονται για την κατασκευή βραχέων διαδρομών στηρίζονται στα εξής :

1. Ένας ολοκληρωμένος πίνακας αφίξεων-αναχωρήσεων σε όλες τις χρονικές στιγμές της γραμμής.
2. Το φορτίο επιβατών για κάθε χρονική περίοδο κατά μήκος των χρονικών σημείων.
3. Ελάχιστη συχνότητα ή πολιτική εφαρμοζόμενης χρονοαπόστασης.
4. Ένα σύνολο από υποψήφια σημεία αναστροφής.

Αυτές οι πληροφορίες πρέπει να δίνονται για κάθε γραμμή και στις δύο κατευθύνσεις. Ένας ολοκληρωμένος Πίνακας A-A μπορεί να δοθεί από τους σχεδιαστές ή να προκύψει από τα στοιχεία φόρτου των επιβατών. Υποψήφιο σημείο αναστροφής μπορεί να θεωρηθεί κάθε (μεγάλη) στάση.

Το ολικό σχέδιο προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι παρουσιάζεται σε διάγραμμα ροής στο Σχήμα 5.

Η διαδικασία ξεκινά με τον καθορισμό των δυνατών σημείων αναστροφής R_j από το σύνολο των σημείων που έχουμε εισάγει σαν υποψήφια σημεία. Ύστερα η θεωρία της συνάρτησης ελλείμματος χρησιμοποιείται για να εξάγουμε τον ελάχιστο αριθμό οχημάτων $N_{\min}$ που απαιτούνται για να πραγματοποιηθούν τα δρομολόγια στις δύο κατευθύνσεις. Ο απαιτούμενος αριθμός των αναχωρήσεων καθορίζεται σε κάθε δυνατό σημείο αναστροφής. Μετά εφαρμόζεται ο επονομαζόμενος αλγόριθμος Minimax H. Ο αλγόριθμος βασίζεται στην απόκλιση μερικών αναχωρήσεων από τον Πίνακα A-A, ώστε να λάβουμε τις απαιτούμενες αναχωρήσεις. Στην διαδικασία ο αλγόριθμος ελαχιστοποιεί την μέγιστη διαφορά χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών αναχωρήσεων (headway). Σε αυτό το σημείο εφαρμόζεται η μέθοδος συνάρτησης ελλείμματος από όπου και απορρέει ο ελάχιστος αριθμός οχημάτων $N'_{\min}$ που απαιτείται με σημεία αναστροφής. Εάν αυτό το



Σχήμα 5. Διάγραμμα Ροής Σχεδιασμού Βραχέων Διαδρομών
Πηγή Lam & Bell 'Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning'

ελάχιστο είναι μικρότερο από μέγεθος στόλου που απαιτείται χωρίς σημεία αναστροφής, τότε εφαρμόζεται μια άλλη διαδικασία. Η τελευταία διαδικασία εισάγει πίσω τον μέγιστο αριθμό αναχωρήσεων, ανάμεσα των όσων είχαν αποκλειστεί, δεδομένου ότι ο ελάχιστος αριθμός οχημάτων, $N'_{\min}$, διατηρείται. Το τελικό βήμα της όλης διαδικασίας είναι η δημιουργία της δρομολόγησης οχημάτων για την κάλυψη των δρομολογίων που εμφανίζονται στον τελευταίο Πίνακα Α-Α και των δύο κατευθύνσεων.

3.3.3.3 Δυνατά Σημεία Αναστροφής

Τα σημεία αναστροφής συνήθως τα επιλέγουμε να είναι πάνω στην γραμμή και πιο συχνά σε στάση, δεδομένου ότι το όχημα μπορεί να γυρίσει πίσω χωρίς να ανακατευθεί (παρεμποδίζει) με την υπόλοιπη κυκλοφορία. Έτσι αναμένεται να δίνεται για κάθε γραμμή ένα βασικό σύνολο από υποψήφια σημεία. Εάν δηλαδή θεωρήσουμε ότι ένα σύνολο από σημεία αναστροφής συμβολίζεται R_1 κατά την μια διεύθυνση και R_2 κατά την άλλη τότε το R_1 δεν αποτελείται απαραίτητα από το R_2 .

$$R_1 = \{r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1n}\}$$

$$R_2 = \{r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2q}\}$$

όπου r_{ij} είναι δυνατά σημεία αναστροφής, τα οποία είναι n και q στο σύνολο, στην κατεύθυνση j , ενώ $j = 1, 2$.

Για μια δεδομένη χρονική περίοδο η αυξομείωση του φορτίου των επιβατών κατά μήκος της διαδρομής μπορεί στην πραγματικότητα να φανερώνει τα πλεονάζοντα σημεία αναστροφής. Θεωρητικά κάθε διάστημα μεταξύ διαδοχικών σημείων αναστροφής μπορεί να χειριστεί ανεξάρτητα, βάση απλά της απαιτούμενης συχνότητας. Αυτή η συχνότητα καθορίζεται από την μέγιστη παρατηρούμενη φόρτιση στο διάστημα. Ωστόσο στην στρατηγική βραχείας διαδρομής όλα τα δρομολόγια πρέπει να εξυπηρετούν το δυσμενέστερο διάστημα φόρτιση σε όλη την γραμμή και σαν αποτέλεσμα κάποια σημεία αναστροφής μπορεί να είναι μη απαραίτητα. Η αφαίρεση αυτών των επιπλέον σημείων σε κάθε χρονική περίοδο j καταλήγει σε ένα σύνολο από δυνατά σημεία αναστροφής, R_j και αυτό το ξεκαθάρισμα είναι σημαντικό από την πλευρά της μείωσης του υπολογιστικού χρόνου.

3.3.3.4 Αλγόριθμος Minimax H

Βασική πληροφορία όπως αναφέρθηκε για τον καθορισμό των σημείων αναστροφής είναι το προφίλ της φόρτισης σε όλη τη διαδρομή. Αυτό το δεδομένο είναι γνωστό σε όλες σχεδόν τις εταιρίες μεταφορών και επιτρέπει να εξεταστεί το διάστημα αυτό χωριστά. Έτσι ο απαιτούμενος αριθμός δρομολογίων μεταξύ σημείων $(k-1)$ και k για μια γνωστή κατεύθυνση θα είναι :

$$F_k = \max\left(\frac{P_k}{d}, F_{\min}\right)$$

όπου P_k είναι το μέγιστο φορτίο παρατηρούμενο μεταξύ δύο διαστημάτων σημείων αναστροφής

d είναι η επιθυμητή κατάληψη (συντελεστής πληρότητας)

$F_{\min}$ είναι η ελάχιστη απαιτούμενη συχνότητα

Εάν τώρα έχουμε ως P_m το μέγιστο φορτίο όπως παρατηρείται κατά μήκος όλη της γραμμής σε μια χρονική περίοδο τότε η συχνότητα για τιμές μεγαλύτερες από $F_{\min}$ είναι :

$$F_m = \frac{P_m}{d}, \quad P_m = \max P_k$$

Έτσι για να δημιουργηθούν διαδρομές με σημεία αναστροφής ο μελετητής πρέπει να αφαιρέσει κάποιους χρόνους αναχώρησης ώστε η συχνότητα στο σημείο αναστροφής k από F_m να γίνει F_k . Η διαδικασία αυτή γίνεται επειδή πιστεύουμε ότι έτσι μειώνουμε τον αριθμό των οχημάτων που χρειάζονται για ένα Πίνακα A-A. Αποτέλεσμα αυτού είναι στα σημεία αναστροφής ο επιβάτης πρέπει να αυξήσει τον χρόνο αναμονής του. Για να ελαχιστοποιήσουμε αυτήν την επίδραση θέτουμε το minimax H κριτήριο :

Αφαιρούμε τους χρόνους αναχώρησης στο k , $F_m - F_k$ με σκοπό να ελαχιστοποιήσουμε την μέγιστη χρονοαπόσταση που προκύπτει.

Έχουμε υποθέσει ότι από το πρότυπο άφιξη των επιβατών, ο χρόνος αναμονής είναι η μισή χρονοαπόσταση. Επομένως το αναφερθέν κριτήριο επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει τον μέγιστο χρόνο αναμονής.

Η περιγραφή σε γενικές γραμμές του αλγόριθμου είναι αυτή :

1) Κατασκευή ενός ειδικού δικτύου $G_m = \{N_m, A_m\}$ που αποτελείται από πεπερασμένο αριθμό κόμβων N_m και πεπερασμένο αριθμό A_m με προσανατολισμένες συνδέσεις s . Γενικά, η αναχωρήσεις δίνονται από τον ολοκληρωμένο Πίνακα Αφίξεων-Αναχωρήσεων και όπως απαιτείται θα

μείνουν μόνο $m < n$, ικανοποιώντας το κριτήριο $\minimax H$. Η κατασκευή του δικτύου βασίζεται σε $(m-2)$ ίσων αποστάσεων χρόνοι αναχωρήσεων μεταξύ του πρώτου (t_1) και του τελευταίου δοσμένου χρόνου αναχώρησης (t_n). Αυτές οι αναχωρήσεις ίσων χρονοαποστάσεων συμβολίζονται με $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{m-1}$ και έχουν την ίση χρονοαπόσταση $t_c = (t_n - t_1) / (m - 1)$, ενώ το G_m έχει τα ακόλουθα έξη χαρακτηριστικά :

- i) Το G_m αποτελείται από m γραμμές όπου η πρώτη και η τελευταία γραμμή είναι η t_1 και t_n αντίστοιχα και υπάρχει γραμμή για κάθε $t_j, j=2,3,\dots,m-1$
- ii) Κάθε κόμβος στο N_m εκπροσωπεί ένα χρόνο αναχώρησης στο σύνολο των αναχωρήσεων, όμως δεν είναι απαραίτητο όλες οι δοσμένες αναχωρήσεις να περιλαμβάνονται στο N_m .
- iii) Οι κόμβοι της κάθε γραμμής οργανώνονται ώστε να είναι με αύξουσα σειρά χρόνων από τα αριστερά στα δεξιά.
- iv) Οι προσανατολισμένες συνδέσεις στο A_m συνδέουν μόνο κόμβους από την k γραμμή στην $(k+1)$ με $k=1,2,\dots,m-1$.
- v) Μια προσανατολισμένη σύνδεση από t_i στο t_j περιλαμβάνεται στο A_m εάν $t_i < t_j$ και μια σύνδεση από το t_j στο t_i εάν και μόνο αν χωρίς αυτή την σύνδεση το G_m είναι αποσυνδεδεμένο.
- vi) Το μήκος μιας σύνδεσης από το t_i στο t_j είναι ακριβώς $t_j - t_i$.

2) Μετά την κατασκευή του G_m χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος συντομότερης διαδρομής τροποποιημένος σε σχέση με τον αρχικό, που είχε προταθεί από τον Dijkstra (1959). Η μέθοδος του Dijkstra βασίζεται σε προσωρινή επιγραφική λέξη στον κόμβο. Αυτός ο προσδιορισμός αποτελούσε ένα άνω όριο στο μήκος της διαδρομής από τον κόμβο Προέλευσης στον κόμβο Προορισμού. Τα όρια αυτά άλλαζαν με μια επαναληπτική διαδικασία, στην διάρκεια της οποίας έστω και ένα κάθε φορά γινόταν μόνιμο, δεδομένου ότι δεν είναι πια άνω όριο αλλά το σωστό μήκος της συντομότερης διαδρομής από την Προέλευση στον Προορισμό.

Η τροποποίηση γίνεται στο υπολογιστικό βήμα κατά το οποίο οι 'ταμπέλες' ενημερώνονται :

$$\begin{aligned} \text{από} \quad \Pi(t_i) &= \min \{ \Pi(t_i), \Pi^*(t_k) + (t_i - t_k) \} \\ \text{σε} \quad \Pi(t_i) &= \min [\Pi(t_i), \max \{ \Pi^*(t_k), (t_i - t_k) \}] \end{aligned}$$

όπου και $\Pi(t_i)$ = προσωρινός προσδιορισμός του t_i
 $\Pi^*(t_k)$ = μόνιμος προσδιορισμός του t_k

Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται στο G_m όπου και ο κόμβος Προέλευσης είναι t_1 και ο τερματίζεται όταν ο προσωρινός προσδιορισμός στο t_n γίνει μόνιμος .

3) Ο αλγόριθμος minimax Η εξασφαλίζει ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα θα περιλαμβάνει ακριβώς τον απαιτούμενο αριθμό αναχωρήσεων. Ενώ δρα ο τροποποιημένος αλγόριθμος συντομότερης διαδρομής στο G_m και καθορίζει την minimax τιμή της χρονοαπόστασης, δεν εξασφαλίζει ότι το αποτέλεσμα θα περιλαμβάνει τον απαιτούμενο αριθμό αναχωρήσεων. Λεπτομερέστατη περιγραφή του τρίτου αυτού μέρους δίνεται στον Ceder (1991) μαζί με μια διαδικασία χειρισμού πολλών αναχωρήσεων (περισσότερο από μια Αναχώρηση για ένα δοσμένο Πίνακα A-A).

3.3.3.5 Βέλτιστη Επιμήκυνση των Καθορισμένων Βραχέων Δρομολογίων

Η επιμήκυνση των δρομολογίων αυτών βελτιώνουν την προσφερόμενη (το επίπεδο εξυπηρέτησης) υπηρεσία στον επιβάτη. Αυτές οι επιμηκύνσεις γίνονται κατά μήκος του σημείου τερματισμού της αρχικής διαδρομής. Μερικά συμπεράσματα έχουν προκύψει :

Κάθε αναχώρηση δρομολογίου σε ένα σημείο που αυξάνει το έλλειμμα του σημείου κατά μια μονάδα ,μπορεί να επεκταθεί στο αρχικό σημείο αναχώρησης. Εάν οι αναχωρήσεις αυξάνουν κατά μια μονάδα το έλλειμμα αυτού του σημείου, τότε προσθέτοντας ένα σημείο στην αρχική διαδρομή τότε το έλλειμμα του προηγούμενου σημείου θα μειωθεί κατά μια μονάδα ενώ το έλλειμμα του σημείου που κάναμε την επιμήκυνση θα αυξηθεί κατά μια μονάδα.

Κάθε άφιξη δρομολογίου στο προηγούμενο σημείο που δεν θα αυξήσει το έλλειμμα κατά μια μονάδα, μπορεί να επιμηκυνθεί στο αρχικό σημείο αναχώρησης. Αλλιώς, ο αριθμός οχημάτων δεν θα αλλάξει.

Κάθε συνδυασμός των χρονοαποστάσεων δρομολογίων μπορεί να γίνει, εάν διατηρείται ο αριθμός των οχημάτων είτε με επιμήκυνση μια αναχώρησης ή μια άφιξης.

3.3.4 Σχεδιασμός Δικτύου Λεωφορειακών Γραμμών με Γενετικούς Αλγόριθμους

Από τις πιο πρόσφατες προσεγγίσεις για την επίλυση του προβλήματος που συζητείται σε αυτό το κεφάλαιο είναι αυτή των γενετικών αλγόριθμων. Ως επί το πλείστον λόγω του ότι οι αλγόριθμοι αυτοί είναι νέας γενιάς υπάρχει η αμφιβολία κατά πόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην διαδικασία σχεδιασμού των λεωφορειακών γραμμών. Παρόλα αυτά σε άλλους τομείς οι αλγόριθμοι έχουν αποδειχτεί αρκετά αποτελεσματικοί.

Εδώ επιχειρείται δίπλα στις ομολογουμένως επιτυχημένες ‘συνταγές’ που δίνει ο Avishai Ceder επί πολλές δεκαετίες στο πρόβλημα του σχεδιασμού των δικτύων και λεωφορειακών γραμμών, να παρουσιαστεί η λύση του προβλήματος με την βοήθεια ενός γενετικού αλγόριθμου, κατασκευασμένο από τον Somnuk Ngamchai και David J. Lovell που και παρουσιάζεται στην συνέχεια [9]. Στο παρελθόν έχουν προταθεί και άλλα μοντέλα για την επίλυση του προβλήματος δικτύου. Οι Baaj & Mahmassani (1990) παρουσίασαν μια προσέγγιση βασισμένη σε τεχνητή νοημοσύνη (AI) που χρησιμοποιούσε ειδικές γνώσεις για να οδηγήσει της τεχνικές ψαξίματος της τεχνητής νοημοσύνης. Εκείνη η μέθοδος είχε εφαρμοστεί σε μια διαδικασία τριών βημάτων. Τα βήματα αυτά ήταν η γένεση γραμμής, ανάλυση γραμμής και βελτίωση γραμμής. Ο Pattnaik et al (1998) παρουσίασε ένα μοντέλο γενετικού αλγόριθμου με πολλή γενική ισχύ. Ο Lee και ο Vuchic παρουσίασαν μια επαναληπτική προσέγγιση η οποία και βασιζόταν στην δυναμική σχέση μεταξύ Μεταβλητής Ζήτησης και Βέλτιστου Δικτύου.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα γίνει λόγος για ένα μοντέλο σχεδιασμένο να εξετάζει τρία σημαντικά στοιχεία του σχεδιασμού δικτύου. Αυτά είναι η ζήτηση για μετακίνηση, τοποθεσία των σημείων μεταφοράς και σωστός σχεδιασμός της χρονοαπόστασης υπό συντονισμό. Ένας γενετικός αλγόριθμος έχει προταθεί προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα. Αναλύονται η ιδιότητες του αλγόριθμου που προσφέρουν ιδιαίτερη γνώση στο πρόβλημα. Παρουσιάζεται νέοι γενετικοί χειριστές που αυξάνουν την αποδοτικότητα και οδηγούν την αναζήτηση για μια βέλτιστη λύση. Ακόμα το μοντέλο εφαρμόζεται σε διάφορα τεστ και θα παρουσιαστούν τις λύσεις.

3.3.4.1 Παρουσίαση του Μοντέλου και Μαθηματική Διατύπωση

Το μοντέλο αναπτύσσυνολοι για την βελτιστοποίηση δικτύου λεωφορειακών γραμμών και της συχνότητας εξυπηρέτησης σε κάθε γραμμή χωριστά. Αποτελείται από τρία μέρη (βήματα) τα οποία σχεδιάζονται για την απόκτηση όσο το δυνατό πιο αποδοτική λύση.

Ο αλγόριθμος κατασκευής γραμμών δημιουργεί ένα σύνολο από δυνατές γραμμές σαν λύση του προβλήματος. Ο αλγόριθμος αξιολόγησης γραμμών σχεδιάζει τις συχνότητες σε κάθε γραμμή και εφαρμόζει τεχνικές συντονισμού χρονοαπόστασης στα σημεία μεταφοράς για να μειώσει τον χρόνο μεταφοράς στις γραμμές με σκοπό την μείωση που θα επιφέρει αυτό στο κόστος. Τέλος, ο αλγόριθμος βελτίωσης γραμμών αλλάζει την διαμόρφωση των υπαρχόντων γραμμών κάνοντας αλλαγές όπως αλλάζοντας την τοποθεσία μεταφοράς στο σύστημα και ερευνώντας συντομότερες διαδρομές μεταξύ συγκεκριμένες Προελεύσεις και Προορισμούς για τον έλεγχο νέων στοιχείων των διαδρομών.

Τα ζητήματα που ενδιαφέρουν περισσότερο εδώ είναι η διαμόρφωση του δικτύου, συντονισμός των χρονοαποστάσεων μεταξύ των επιλεγμένων γραμμών και ιδιαίτερα την τοποθεσία των σημείων μεταφορών στο σύστημα. Το μοντέλο αναπτύχθηκε ειδικά για να ερευνηθούν αυτά τα ζητήματα. Ακόμα έχουν γίνει οι παρακάτω παραδοχές για να μειωθούν οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο πρόβλημα.

1. Ο Πίνακας (Πρότυπο) Ζήτησης είναι στατικός και σταθερός για όλη την περίοδο που εξετάζουμε.
2. Οι επιβάτες θα επιλέξουν την γραμμή που θα ταξιδέψουν βασισμένοι στην πιο σύντομη χρονικά διαδρομή.
3. Κάθε λεωφορείο στο σύστημα ταξιδεύει με σταθερή ταχύτητα σε όλες τις διαδρομές.
4. Η ζήτηση για μεταφορά είναι συμμετρική στο σύστημα.
5. Οι γραμμές μπορούν να έχουν επικάλυψη, ωστόσο γραμμές που διασταυρώνονται δεν μπορούν να επαναδιασταυρωθούν.
6. Οι γραμμές μπορούν να έχουν περιστροφική πορεία ή δύο διευθύνσεων στην οποία περίπτωση οι κόμβοι διασχίζονται κάθετα, διαδοχικά πρώτα με την κανονική φορά και μετά με την αντίθετη.
7. Όλα τα λεωφορεία έχουν την ίδια χωρητικότητα.

Έτσι έχοντας ένα δίκτυο το πρώτο πράγμα που έχουμε να κάνουμε είναι επιλέξουμε ή να συνθέσουμε την διαδρομή η οποία και θα είναι η συντομότερη. Εδώ γίνεται μέσω του αλγόριθμου Floyd & Warshall (1962) που βρίσκει όλες τις σύντομες διαδρομές.

Το ολικό κόστος μπορεί να υπολογιστεί από τα τρία στοιχεία του. Δηλαδή το κόστος του Οργανισμού ή τους στόλου θα μπορούσε να είναι μια συνάρτηση του μεγέθους του στόλου που απαιτείται για την ικανοποίηση της ζήτησης. Το κόστος του χρήστη λόγω της παρουσίας του στο όχημα υπολογίζεται από τον χρόνο που δαπανάται στο όχημα. Τέλος, το κόστος του χρόνου αναμονής αποτελείται από τον χρόνο που αναμένει ο χρήστης στην στάση Προέλευσης και τον χρόνο μεταφοράς του μεταξύ κάποιων γραμμών.

Άρα ο στόχος είναι να μειώσουμε αυτό το τελικό κόστος :

$$TC = FC + UVC + UWC$$

όπου TC είναι το τελικό κόστος του συστήματος

FC είναι το κόστος στόλου

UVC είναι το κόστος του χρήστη μέσα στο όχημα

UWC είναι το κόστος αναμονής

Για κάθε γραμμή k το μήκος της συμβολίζεται με d_k και η χρονοαπόσταση λειτουργίας της θα είναι h_k . Το R συμβολίζει το σύνολο των γραμμών και η ταχύτητα στο δίκτυο είναι V. Το κόστος λειτουργία ανά ώρα θα είναι C_v . Άρα το κόστος του απαιτούμενου στόλου θα είναι :

$$FC = \frac{2C_v}{V} \sum_{k=1}^R \frac{d_k}{h_k}$$

Εάν το μήκος της συντομότερης διαδρομής (από ένα δεδομένο σύνολο από γραμμές) μεταξύ κάποια προέλευσης i και προορισμού j είναι D_{ij} και η τιμή της αξίας του χρήστη μέσα στο όχημα από γ_v τότε το κόστος μέσα στο όχημα θα είναι :

$$UVC = \frac{\gamma_v}{V} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} D_{ij}$$

Επιτρέπουμε η τιμή της αξίας της αναμονής να είναι γ_w διαφορετική από γ_v . Ένα σύνολο από μεταβλητές απόφασης στο μοντέλο αφορούν την αντιστοίχιση των ροών Π-Π στην αρχική γραμμή. Έστω ότι $a_{ijk} = 1$ εάν η ροή (i,j) αρχίζει το ταξίδι της στην διαδρομή k ή εάν η ροή (i,j) μεταφέρεται στην διαδρομή k με μη συντονισμένο τρόπο, και μηδέν διαφορετικά. Αυτά τα $\{ a_{ijk} \}$ που ικανοποιούν τον προηγούμενο περιορισμό αναγνωρίζονται εύκολα από της μεταβλητές ανάθεσης (αντιστοίχισης), ενώ ο τελευταίος περιορισμός βασίζεται συντονισμένες αποφάσεις. Χωρίς να ξέρουμε από την αρχή το πρόγραμμα (σχεδιασμό) μπορούμε να πούμε ότι το κόστος αναμονής θα είναι :

$$UWC = \frac{\gamma_w}{2} \sum_{k=1}^R \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} a_{ijk} h_k$$

αυτός είναι ένας μικτός υπολογισμός του κόστους αναμονής του χρήστη. Η γνώση του χρήστη σχετικά με τα δρομολόγια τείνει να μειώσει την επιρροή ενώ διακυμάνσεις στην χρονοαπόσταση την αυξάνουν.

Η χρονοαπόσταση για μια γραμμή k που είναι δυνατή από την πλευρά της ζήτησης και βέλτιστη διότι ελαχιστοποιεί το κόστος δίνεται από την σχέση :

$$h_k = \min \left(\sqrt{\frac{4d_k C_v}{V \gamma_w \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} a_{ijk}}}, h_k^{\max} \right)$$

όπου και $h_k^{\max}$ είναι η χρονοαπόσταση όπως καθορίζεται στις κρίσιμες συνδέσεις στην διαδρομή k . Έστω Ω_k ότι συμβολίζει ένα σύνολο από συνδέσεις (a,b) στην γραμμή k . Ακόμα θεωρούμε το σύνολο των μεταβλητών απόφασης γραμμής $\{ \beta_{ijab} \}$, όπου $\beta_{ijab} = 1$ εάν η ροή (i,j) θα ταξιδέψει στην σύνδεση (a,b) και μηδέν στην αντίθετη περίπτωση. Τότε η ροή στην κρίσιμη σύνδεση της γραμμής k θα είναι :

$$q_k^{cr} = \max_{(a,b) \in \Omega_k} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \beta_{ijab} q_{ij}$$

Εάν η χωρητικότητα ενός λεωφορείου είναι K και εάν ο συντελεστής πληρότητας είναι L , τότε αυτή η μέγιστη χρονοαπόσταση μπορεί να υπολογιστεί ως :

$$h_k^{\max} = \frac{KL}{q_k^{cr}}$$

Ο συντονισμός της χρονοαπόστασης μπορεί να επηρεάζει το κόστος ταξιδιού που με την σειρά του επηρεάζει το ολικό κόστος. Για το σύνολο των γραμμών που μοιράζονται ένα κοινό κόμβο και για τον οποίο υπάρχει ζήτηση για μεταφορά, η απουσία του συντονισμού της χρονοαπόστασης επιβάλει επιπλέον χρόνο αναμονής στον συγκεκριμένο κόμβο. Από την άλλη τέλειος συντονισμός εξομαλύνει αυτή την ποινή. Σε αυτό το μοντέλο ο συντονισμός της χρονοαπόστασης ενθαρρύνεται σε εκείνα τα σύνολο γραμμών που μοιράζονται κοινούς κόμβους που εκθέτουν την μεγαλύτερη ζήτηση για μεταφορά.

Εάν η γραμμή k πρέπει να συντονιστεί με άλλες γραμμές, έστω Γ_k είναι το σύνολο των γραμμών που θα συντονιστούν με την k . Τότε $k \in \Gamma_k$. Για όποιες γραμμές k που δεν έχουν συντονιστεί, $\Gamma_k = \emptyset$. Τότε η χρονοαπόσταση δίνεται από την σχέση :

$$h_k = \min \left(\sqrt{\frac{4 \left(\sum_{n \in \Gamma_k} d_n \right) C_v}{V \gamma_w \left(\sum_{n \in \Gamma_k} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} a_{ijn} \right)}}, \max_{n \in \Gamma_k} \{h_n^{\max}\} \right)$$

Φαίνεται ότι εάν όλες οι γραμμές είναι συντονισμένες, τότε η ποινή μεταφοράς δεν εξαλείφεται, ενώ το κόστος αναμονής αναμένεται να αποτελείται μόνο από καθυστερήσεις στις στάσεις προέλευσης. Σε αυτή την περίπτωση $a_{ij} = 1$ για κάθε i και j . Σε άλλες περιπτώσεις a_{ij} θα είναι από την προέλευση συν όποιες μη συντονισμένες μεταφορές. Εάν η k δεν είναι συντονισμένη (π.χ. $\Gamma_k = \emptyset$) και εάν η ροή Π - Π (i,j) μεταφέρεται σε αυτή την γραμμή, τότε $a_{ijk} = 1$.

3.3.4.2 Ο Γενετικός Αλγόριθμος

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (GA) είναι πιθανοτικοί αλγόριθμοι βασισμένη στην αναλογία της φυσικής εξέλιξης (Michalewicz 1999). Ο αλγόριθμος μιμείται την φυσική διεργασία της εξελικτικής προσαρμογής στον πληθυσμό που αποτελείται από χρωμοσώματα (πιθανές λύσεις). Όλοι οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν κάποια κοινά στοιχεία. Στον καθένα η λύση του μοντέλου πρέπει να δοθεί σαν απεικόνιση χρωμοσωμάτων και ο βασικός πληθυσμός των χρωματοσωμάτων πρέπει να δημιουργηθεί.

Η αντικειμενική συνάρτηση καθορίζει την τιμή του κάθε χρωμοσώματος. Ένα σύνολο από κανόνες (γενετικοί τελεστές) αποφασίζει πως θα εξελιχθεί ο πληθυσμός από επανάληψη σε επανάληψη και η σχετική φόρμα των διαφορετικών χρωμοσωμάτων μπορεί να παίξει ρόλο στην πιθανότητα συνεισφοράς στον νέο πληθυσμό με κάποιο τρόπο. Με αυτό τον τρόπο ο πληθυσμός εξελίσσύνολοι με το χρόνο και σε κάποιο σημείο επικαλείται ένα κανόνας διακοπής της διεργασίας. Πάντως δεν είναι σίγουρο ότι η λύση που θα έχουμε θα είναι η βέλτιστη αφού οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν μπορούν να αναγνωρίσουν μια βέλτιστη λύση. Γενικότερα τα γενετικά μοντέλα ασχολούνται με ερωτήσεις όπως :

1. Με τη μοιάζει ένα μέλος του πληθυσμού ;
2. Πως έχουμε έναν αρχικό πληθυσμό ;
3. Πως εξελίσσύνολοι ένας πληθυσμός ;
4. Πότε σταματάμε να δουλεύουμε με τον πληθυσμό ;

Το πρώτο από αυτά τα ερωτήματα έχει απαντηθεί στην προηγούμενη παράγραφο. (Στην δική μας περίπτωση το μέλος πληθυσμού μπορεί να

είναι μια διαδρομή). Το μέγεθος του πληθυσμού είναι ένα ζήτημα που απασχολεί του μελετητές των γενετικών αλγορίθμων αφού είναι ένα πάρε – δώσε μεταξύ της υπολογιστικής ταχύτητας και μιας μεγάλης γάμα πληθυσμού. Στην περίπτωση μας κρατάμε 10 δυνατές λύσεις.

3.3.4.2.1 Αλγόριθμος Γένεσης Γραμμών

Ο αλγόριθμος αυτός φτιάχνεται για να δημιουργήσει γραμμές για το δίκτυο με την προϋπόθεση ότι όλοι οι κόμβοι πρέπει να εξυπηρετηθούν. Σε αυτό τον αλγόριθμο ενώ δημιουργούνται οι γραμμές η ζήτηση αγνοείται. Η επιτευξιμότητα εξασφαλίζεται από την σωστή επιλογή της χρονοαπόστασης, όπως περιγράφηκε. Ο αλγόριθμος δημιουργεί γραμμές με την τεχνική των κλάδων (Branching technique). Δύο διεργασίες θα περιγραφούν χωριστά αφού η κατασκευή της πρώτης γραμμής είναι διαφορετική από των άλλων γραμμών.

Ο πρώτος κόμβος της πρώτης γραμμής επιλέγεται τυχαία από όλα τα σύνολο. Ο δεύτερος κόμβος επιλέγεται παρόμοια μόνο που θεωρούνται μόνο κόμβοι που συνδέονται με τον πρώτο κόμβο. Μόλις συνδέσουμε δύο κόμβους πρέπει να παρθεί μια απόφαση για το εάν θα τερματιστεί η γραμμή και να συνεχίσουμε με μια άλλη γραμμή ή όχι. Χρησιμοποιούμε μια παράμετρο P_e για να εκφράσουμε την σταθερή πιθανότητα να τερματιστεί η διαδρομή. Η τιμή αυτής της παραμέτρου επιλέγεται από τον σχεδιαστή. Κάθε φορά που φτάνουμε σε μια απόφαση για να συνεχίσουμε να εργαζόμαστε στην διαδρομή πρέπει να επιλέγεται ένας άλλος κόμβος. Με την ίδια πιθανότητα αυτός ο κόμβος θα συνδεθεί στο τέλος ή στην αρχή της διαδρομής μας . Αφού αυτή η απόφαση έχει παρθεί, η επιλογή του σύνολο των νέων κόμβων περιλαμβάνει ελεύθερους κόμβους που συσχετίζονται, συν (εάν η διαδρομή αποτελείται από τρεις ή περισσότερους κόμβους) τον κόμβο τέλους της διαδρομής, εάν αυτός συνδέεται με τον αρχικό κόμβο. Όλα είναι το ίδιο δυνατό να γίνουν. Εάν ο κόμβος τέλους έχει επιλεγεί , τότε η γραμμή έχει γίνει κυκλική και η διαδικασία κατασκευής σε αυτή την γραμμή τερματίζεται.

Οι κανόνες για την δεύτερη γραμμή και τις επόμενες είναι λίγο πιο διαφορετικές. Ο πρώτος κόμβος για την γραμμή k πρέπει να είναι ελεύθερος κόμβος που είναι συνδεδεμένος σε κάποια από τις υπάρχουσες γραμμές από 1 έως $(k-1)$. Ο δεύτερος κόμβος τότε είναι κάποιο από τους κόμβους των υπάρχοντων γραμμών που συνδέονται με τον πρώτο. Επειδή αυτό μας εξασφαλίζει ότι θα υπάρχει διασταύρωση της νέας γραμμής και της παλιάς, θα υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός από σημεία μεταφοράς στο δίκτυο. Από αυτό το σημείο και μετά η απόφαση

για τερματισμό ή όχι λαμβάνει χώρα για κάθε επιπλέον κόμβο. Οι κόμβοι προστίθενται είτε στο τέλος είτε στην αρχή, όπως και προηγουμένως. Σε κάθε βήμα η επιλογή των σύνολο περιλαμβάνει συνδεδεμένους κόμβους όχι στην εξεταζόμενη γραμμή, συν το αντίθετο άκρο της εξεταζόμενης γραμμής. Πιο συγκεκριμένα αυτό σημαίνει ότι επιπλέον κόμβοι σε υπάρχοντες γραμμές μπορούν να υπάρχουν, οδηγώντας έτσι σε μια πιθανότητα ότι μερικές γραμμές θα έχουν μερική επικάλυψη. Άρα είναι αδύνατον να δημιουργηθούν δύο ταυτόσημες γραμμές. Ακόμα επειδή η κατασκευή αρχίζει με ελεύθερο κόμβο τότε ο κάθε κόμβος θα ανήκει σε μια γραμμή.

3.3.4.2.2 Γενετικοί Τελεστές

Οι γενετικοί τελεστές που περιγράφονται εδώ χρησιμοποιούνται να μετασχηματίσουν μια δυνατή λύση μέσω των επαναλήψεων. Εδώ υπάρχει διαφορά με άλλα GA γιατί έχει προσπάθεια οι τελεστές να οδηγήσουν την εξέλιξη της λύσης.

Όπως είπαμε σε αυτό τον αλγόριθμο ο πληθυσμός πάντα αποτελείται από 10 δυνατές λύσεις. Κατά την διάρκεια κάθε επανάληψης κάθε λύση επιλέγεται τυχαία σαν στόχος για γενετικό τελεστή. Ενώ είναι φυσικό να επιλεγεί τελεστής ομοιόμορφης κατανομής, φαίνεται καθαρά αργότερα στην ανάλυση ευαισθησίας ότι διαφορετικοί τελεστές έχουν διαφορετικό επίπεδο δυναμικότητας. Άρα οι πιθανότητες (που είναι παράμετροι) που σχετίζονται με την χρησιμοποίηση του καθένα μπορεί να λεχθεί ότι καθορίζονται από τον χρήστη. Παρακάτω περιγράφονται οι γενετικοί τελεστές που χρησιμοποιούνται.

Τελεστής Συνένωσης Γραμμών

Αυτός ο τελεστής θα προσπαθεί να συνενώσει γραμμές που έχουν κοινό τέλος. Πρώτα επιλέγεται μια κύρια γραμμή τυχαία. Δεύτερον εάν υπάρχουν πολλές πιθανές γραμμές με τις οποίες η γραμμή I μπορεί να ενωθεί, η επιλογή γίνεται και πάλι τυχαία αλλά η πιθανότητα είναι ανάλογη της ζήτησης μεταφοράς :

$$P(j \text{ συνδέεται με } i) = \frac{\text{Μεταφορική ζήτηση απο } i \text{ στο } j}{\sum_k \text{Μεταφορική ζήτηση απο } i \text{ στο } k}$$

Επομένως αυτός ο τελεστής τείνει να ανακουφίζει την καθυστέρηση μεταφορών. Εάν η επιλεγμένη πρώτη γραμμή δεν έχει κοινό τέρμα με άλλη γραμμή, η επανάληψη τερματίζεται.

Τελεστής Διακοπής Γραμμής

Αυτό ο τελεστής χρησιμοποιείται να διορθώσει για γραμμές που ξεπερνούν μια σημαντική απόκλιση στην ζήτηση κατά μήκος τους. Σε κάθε γραμμή η διαφορά μεταξύ της σύνδεσης ροής ελάχιστης και της δεύτερης ελάχιστης καταγράφεται. Επιλέγεται η γραμμή για την οποία η διαφορά είναι η μεγαλύτερη και θα χωριστεί μέχρι και σε τρία κομμάτια. Η σύνδεση με την ελάχιστη ροή θα γίνει ανεξάρτητη γραμμή. Λόγω της μειωμένης ροής, μπορεί να λειτουργεί με μεγαλύτερες χρονοαποστάσεις. Επομένως μείωση του μεγέθους του στόλου. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή η διαδικασία θα καταλήξει στον χωρισμό μια αρχικής γραμμής σε τρία, γιατί τα τμήματα και στις δύο άκρες της σύνδεσης με την μικρότερη ροή είναι κομμένες γραμμές καθαυτές. Εάν η λιγότερη λειτουργική σύνδεση τύχει να είναι στο τέρμα της αρχικής γραμμής, μόνο δύο γραμμές μπορούν να προκύψουν.

Τελεστής Ανάπτυξης Γραμμής

Η ιδέα πίσω από τον τελεστή ανάπτυξης γραμμής είναι η αντίθετη από την ιδέα του προηγούμενου τελεστή. Εδώ αναγνωρίζουμε την πιο υψηλή και δεύτερη πιο υψηλή σύνδεση ροών σε μια γραμμή (την υψηλότερη που είχαμε προηγουμένως ονομάσει την κρίσιμη σύνδεση ροής, διότι αυτή κυβερνάει τις απαιτήσεις χρονοαποστάσεων) και ύστερα υπολογίζουμε την διαφορά. Η γραμμή στην οποία αυτός ο τελεστής θα δράσει επιλέγεται με μια πιθανοτική αναλογία σε αυτή την 'κριτική διαφορά ζήτησης'.

Στην γραμμή που έχουμε επιλέξει, η κρίσιμη σύνδεση επιλέγεται να γίνει μια νέα αυτούσια γραμμή. Σε αντίθεση με τον προηγούμενο τελεστή όμως δεν χωρίζεται με κανένα τρόπο. Προφανώς , υψηλή ζήτηση μπορεί να εξυπηρετηθεί από επικαλυπτόμενες γραμμές, επιτρέποντας σε κάθε μια να λειτουργεί με πιο διαλλακτική χρονοαπόσταση.

Τελεστής Πρόσθεσης Σύνδεσης Γραμμών

Ο αλγόριθμος κατασκευής γραμμών παράγει ένα σύνολο από αρχικές γραμμές που έχουν κριθεί εφικτές απλά επειδή όλοι οι κόμβοι εξυπηρετούνται. Άρα η εξασφάλιση ότι όλη η ζήτηση εξυπηρετείται θα έρθει από την επιλογή ικανοποιητικής χρονοαπόστασης. Όμως δεν μπορεί να ξέρουμε πως όλες οι συνδέσεις έχουν χρησιμοποιηθεί σε γραμμές. Πιο συγκεκριμένα, συνδέσεις που μπορεί να συμβόλιζαν βραχείες διαδρομές για κάποια ροή Π-Π, όπου η Προέλευση και ο

Προορισμός χωρίζονται από μόνο μια σύνδεση φαίνεται επιθυμητό να περιλαμβάνονται στην δομή της γραμμής. Αυτό παρεμποδίζει της κρίσιμες ροές Π-Π να περιπλέκονται στο δίκτυο χάνοντας πολύτιμο χρόνο.

Ένας τελεστή πρόσθεσης σύνδεσης γραμμών σχεδιάζεται για να αναγνωρίζει αυτές τις ‘χαμένες συνδέσεις’ και να προσθέσει μια στην δομή της γραμμής, με μια πιθανοτική αναλογία στην ροή Π-Π που εκπροσωπεί.

Τελεστής Αφαίρεσης Σύνδεσης Γραμμών

Αυτός ο τελεστή σε αντίθεση με τον προηγούμενο επιχειρεί να αφαιρέσει συνδέσεις ελάχιστα χρησιμοποιήσιμες από τις γραμμές της δεδομένης λύσης. Βέβαια μια σύνδεση δεν θα αφαιρεθεί εάν έτσι απομονώνεται κόμβος ή χωρίζεται το δίκτυο σε διαλυμένα δίκτυα. Αν και η τελευταία απόφαση μπορεί να ακούγεται λογική για κάποια δίκτυα, αυτή η απόφαση περιλαμβάνει στοιχεία πολιτικής του Οργανισμού και αυτές οι αποφάσεις καλύτερα να εξυπηρετηθούν από ανθρώπους παρά την Τεχνική Νοημοσύνη. Μια σειρά από μεθόδους και τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση της ‘αποκοπής’ σε γράφημα και η θεωρία γραφήματος (graph theory) μπορεί να δώσει λύση. Για παράδειγμα πολλά βιβλία πραγματεύονται με άνω όρια στην απόσταση γραμμής μεταξύ ζευγαριών Π-Π (Newell 1980). Κάποιος θα μπορούσε να επικολλήσει σε μια σύνδεση την ερώτηση μιας ιδεατής απόστασης μεγαλύτερης από το άνω όριο ροής Π-Π στο δίκτυο. Εάν ο υπολογισμός μια συντομότερης διαδρομής σε όλα τα ζευγάρια Π-Π αποκάλυπτε κάποια διαδρομή μεγαλύτερη από αυτή της απόστασης της ιδεατής διαδρομής, αυτό είναι σημάδι ότι είναι κρίσιμη διαδρομή στην σύνδεση ολόκληρου του δικτύου. Αυτός ο τελεστής είναι παρόμοιος με τον τελεστή διακοπής γραμμής, μόνο που αντί να χωρίζονται υπολειτουργικές συνδέσεις ώστε να εξυπηρετηθούν με λιγότερη συχνότητα, διαγράφονται από την τρέχουσα λύση. Σε κάποιο σημείο μέσω του τελεστή πρόσθεσης σύνδεσης γραμμών μπορούν να επιστρέψουν στην λύση. Για να γίνει αυτή η διαδικασία, όλες οι χρησιμοποιούμενες συνδέσεις αναγνωρίζονται (δίνεται ταυτότητα). Έστω ότι το σύνολο αυτών των συνδέσεων ονομάζεται Λ τότε ο αριθμός αυτών δίνεται από το $|\Lambda|$. Επειδή ο στόχος αυτού του τελεστή είναι να αφαιρεί υπολειτουργικές συνδέσεις, μια σύνδεση εξετάζεται για αφαίρεση με μια πιθανότητα αντιστρόφως ανάλογη της ροής της :

$$P(\text{επιλογή σύνδεσης } l \in \Lambda) = \frac{1}{|\Lambda| - 1} \left(1 - \frac{q_l}{\sum_{\lambda \in \Lambda} q_\lambda} \right)$$

όπου q_1 είναι μια κατάλληλη ονομασία για την ροή στη σύνδεση 1.

Μόλις η σύνδεση επιλέγεται εξετάζεται με την διαδικασία που περιγράψαμε εάν μπορεί να διαγραφεί με ασφάλεια. Εάν μπορεί, γίνεται, αλλιώς η λειτουργία σταματά. Μια διαδικασία εναλλακτική που όμως δεν έχει εξεταστεί επαρκώς είναι μια στην οποία δεν θα υπάρχει πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (και άρα μιας άσκοπης επανάληψης) αλλά θα εξετάζονται όλες οι συνδέσεις από το 'κρίσιμο κριτήριο' πρώτα και μετά να συμπεριληφθούν στο σύνολο αφαίρεσης εκείνες οι συνδέσεις οι οποίες δεν θα (δια)χωρίσουν το δίκτυο. Εξετάζοντας όλες τις συνδέσεις είναι υπολογιστικά πιο χρονοβόρα διαδικασία από την εξέταση μια υποψήφιας σύνδεσης. Ωστόσο σε δίκτυα με μια δεδομένη ποσότητα πλεονάσματος, αξίζει τον κόπο να δοκιμαστεί και η δεύτερη μέθοδος.

Τελεστής Διασταύρωσης Γραμμών

Ο τελεστής αυτός μοιάζει αρκετά με τον τελεστή που υπάρχει στους γενετικούς αλγόριθμους των 'πεζοδρομίων', σε αυτή την περίπτωση όμως ο τελεστής έχει σχέση με την δομή των γραμμών στο πρόβλημα και άρα μπορούμε να πούμε πως είναι πιο 'έξυπνος'.

Λέγοντας διασταύρωση εννοείται η επιλογή ενός σημείου (κόμβου) τομής μεταξύ δύο οι περισσότερων γραμμών, το σπάσιμο των γραμμών σε αυτό το σημείο και ανασυνδιάζοντας ανταλλάζοντας τα άκρα των τμημάτων αυτών.

Για να εισαχθεί αυτή η λειτουργία πρώτα επιλέγεται τυχαία μια αρχική διαδρομή. Σε περίπτωση που έχουμε μόνο μια γραμμή στην λύση μας τότε η διαδικασία σταματά. Αλλιώς όλες οι γραμμές που τέμνονται εξετάζονται ως προς την χρησιμότητα της διασταύρωσης. Όσες δεν περάσουν αυτή την δοκιμασία επιλέγονται ως σημεία τέρματος και για τις δύο γραμμές. Προφανώς η διασταύρωση δεν έχει νόημα σε αυτή την περίπτωση. Για κάθε διασταύρωση γραμμών υπάρχουν 4 δυνατές νέες γραμμές που αναδύονται για την επόμενη λύση.

Η πιθανότητα επιλογής μια νέας γραμμής είναι ανάλογη στην 'δυνατή εξοικονόμηση ζήτησης μεταφοράς' που είναι το άθροισμα των ροών Π-Π σε αυτή την γραμμή που διατρέχει αυτόν τον κόμβο. Ακόμα πιο προσεκτική παρατήρηση της διαδικασίας μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι επιλογές γραμμών γίνονται σε συσχετιζόμενα (συμμετρικά – αντισυμμετρικά) ζευγάρια. Η πιθανότητα να εξετασθεί μια συγκεκριμένη γραμμή άρα είναι το άθροισμα των πιθανοτήτων επιλογής σχετιζόμενη με το ζεύγος των γραμμών. Κάποιες γραμμές μπορεί να μην έχουν την ευκαιρία να επιλεγθούν άμεσα αφού δεν υπάρχει ενδεχόμενο για εξοικονόμηση μεταφορικής ζήτησης. Τότε η μόνη ευκαιρία που έχουν να υπάρχουν στην λύση είναι από το έτερον ήμισυ (την άλλη γραμμή του ζεύγους).

Ακόμα αυτός ο τελεστής μπορεί να χειριστεί και τομές γραμμών περίπλοκες .Οι ίδιες ιδιότητες εφαρμόζονται και ισχύουν.

Τελεστής Μεταφοράς Τοποθεσίας Γραμμών

Αυτός ο τελεστής προσπαθεί να αλλάξει την τοποθεσία της μεταφοράς μεταξύ δύο γραμμών. Πάλι η αρχική γραμμή επιλέγεται τυχαία. Κάθε γραμμή που τέμνει έχει τουλάχιστον ένα κόμβο μεταφοράς με την αρχική γραμμή.

Εάν δύο γραμμές είναι να αλλάξουν τοποθεσίες μεταφορών, τότε υπάρχουν μερικές προϋπόθεσης για τις εναλλακτικές υποψήφιες :

1. Πρέπει να είναι μέλος της αρχικής γραμμής (χωρίς να αποτελεί αυτό περιορισμό, δηλαδή κάθε άλλη γραμμή θα μπορούσε να είχε επιλεγεί πρώτα) με ίση πιθανότητα
2. Πρέπει να συνδέεται, με απλές συνδέσεις σε όποιους κόμβους της δεύτερης γραμμής που είναι γειτονικά του κόμβου μεταφοράς που εξετάζουμε

Όταν η στρατηγική μετεγκατάστασης έχει απαριθμηθεί, ένας (κόμβος) θα επιλεγεί με μια πιθανότητα ανάλογη της δυνατής εξοικονόμησης μεταφορικής ζήτησης, παρόμοια με τον τελεστή διασταύρωσης γραμμής.

3.3.4.3 Συντονισμός των Χρονοαποστάσεων

Σε αυτό το μοντέλο η μέθοδος συντονισμού θα εξαρτηθεί από το πρότυπο ζήτησης στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα ζευγάρια από γραμμές με υψηλή μεταφορική ζήτηση θα έχουν την υψηλότερη προτεραιότητα για συντονισμό. Υποθέτουμε πως κάθε γραμμή μπορεί να συντονιστεί μόνο σε ένα σημείο μεταφοράς.

Μετά την εφαρμογή των γενετικών τελεστών, μετά από κάθε επανάληψη θα εκτελείται ο συντονισμός των χρονοαποστάσεων και οι χρονοαποστάσεις που θα προκύψουν θα ανατεθούν στις συντονισμένες γραμμές. Οι γραμμές οι οποίες δεν συντονίζονται θα έχουν χρονοαπόσταση όπως έχει αναφερθεί :

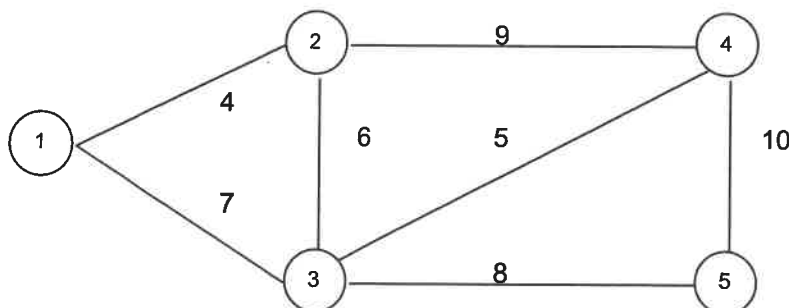
$$h_k = \min \left(\sqrt{\frac{4dkC_v}{V\gamma_w \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij}a_{ijk}}}, h_k^{\max} \right)$$

3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι εφαρμογές που ακολουθούν σκοπό έχουν να δώσουν μια πιο ξεκάθαρη άποψη για τον πως σκέφτεται ο μελετητής τον αντίστοιχο αλγόριθμο που προτείνει και έρχεται να συμπληρώσει κατά κάποιο τρόπο την μεθοδολογία που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.

3.4.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1

Έχοντας περιγράψει τον αλγόριθμο θα παρουσιάσουμε δικό μας παράδειγμα σε σχέση με τα όσα αναφέρθηκαν στην πρώτη μεθοδολογία δύο επιπέδων. Το παράδειγμα στηρίζεται στον αλγόριθμο του Ceder et al. 'Bus Network Design'. Εδώ θα αρκεστούμε να περιγράψουμε την λειτουργία του αλγόριθμου και την εξαγωγή των δυνατών διαδρομών.



Εικόνα 3.1 Παράδειγμα δικτύου

Έστω λοιπόν ένα δίκτυο το οποίο και αποτελείται από 5 κόμβους και με τις συνδέσεις όπως αυτές φαίνονται. Οι τιμές δίπλα στις συνδέσεις αναφέρονται στον χρόνο ταξιδιού $t(i,j)$ από τον κόμβο i στο j .

	1	2	3	4	5
1	0	4	7	12	15
2	4	0	6	9	14
3	7	6	0	5	8
4	12	9	5	0	10
5	15	14	8	10	0

Πίνακας 1. Μητρώο ελάχιστου χρόνου

	1	2	3	4	5
1	0	50	75	40	30
2	50	0	125	85	45
3	75	125	0	150	140
4	40	85	150	0	65
5	30	45	140	65	0

Πίνακας 2. Μητρώο Ζήτησης

Ο Πίνακας 1 δείχνει τον συντομότερο χρόνο ταξιδιού $t_m(i,j)$.

Δίνεται και το μητρώο ζήτησης στον Πίνακα 2 και άρα μπορούμε να βρούμε τον Πίνακα 3 ο οποίος εκφράζει τις άμεσες επιβατο-ώρες.

Εάν το όριο της μη αμεσότητας $a(i,j)$ είναι 40% μπορούμε να βρούμε τον μέγιστο επιτρεπόμενο χρόνο ταξιδιού και αυτός αυτό το μητρώο είναι ο Πίνακας 4.

Κάνουμε την παραδοχή ότι μόνο οι κόμβοι 1 και 4 είναι τερματικοί σταθμοί με συνολική παραγωγή ζήτησης 1655 και 2645 επιβατο-ώρες αντίστοιχα.

	1	2	3	4	5
1	0	200	525	480	450
2	200	0	750	765	630
3	525	750	0	750	1120
4	480	765	750	0	650
5	450	630	1120	650	0

Πίνακας 3. Μητρώο Άμεσων Επιβατο-ωρών

	1	2	3	4	5
1	0	5,6	9,8	16,8	21
2	5,6	0	8,4	12,6	19,6
3	9,8	8,4	0	7	11,8
4	16,8	12,6	7	0	14
5	21	19,6	11,8	14	0

Πίνακας 4. Μητρώο Μέγιστου Χρόνου

Εφαρμόζεται τώρα αναλυτικά ο αλγόριθμος που αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο Αλγόριθμος Κατασκευής Διαδρομών βήμα προς βήμα.

Βήμα 0 : Έναρξη , $q = 1$

Βήμα 1 : Αρχή κατασκευής διαδρομών από τον τερματικό σταθμό (r_q) που έχει την μεγαλύτερη ζήτηση όπως εκφράζεται σε επιβατο-ώρες, επιλογή $r_q \in T$ ώστε :

$$\sum_{j \in N} p_H(r_q, j) = \max_{i \in T, j \in N} \sum p_H(i, j)$$

Βήμα 2 : Τίθεται ο τερματικός σταθμός ως κόμβος αρχής ($a = r_q$) και σημείωση της πρώτης προσπάθειας για αναζήτηση ($l = 1$) από r_q .

Βήμα 3 : Σημείωση διαδρομής μεταξύ τερματικού σταθμού και κόμβου j , $P(r_q, j)$ και ορισμός των κόμβων j_a^1 , που μπορούν να συνδεθούν από τον κόμβο αρχής (a) αφαιρώντας τους κόμβους που ανήκουν στην διαδρομή

από τον κόμβο αρχής μέχρι τους προηγούμενους θεωρούμενους κόμβους αρχής. Αλλιώς :

$$p(r_q, j) = \{(r_q, i_1)(i_1, i_2) \dots (i_m, j)\} = \{(r_q, j)\}$$

Ορισμός του σύνολο $j_a^1(r_{q,j}) = \{j: (a,j) \in A\} - \{i: i \in p(r_q, a)\}$

Βήμα 4 : Έλεγχος εάν ο χρόνος ταξιδιού από το επιλεγθέν τερματικό σταθμό σε κάθε κόμβο στο σύνολο j_a^1 ικανοποιεί τον περιορισμό της εξίσωσης :

$$t(r_q, i_1, i_2, \dots, i_m, j) \leq \left[1 + \frac{a(r_q, j)}{100} \right] t_m(r_q, j)$$

όπου

$$t(r_q, i_1, i_2, \dots, i_m, j) = t(r_q, i_1) + t(i_1, i_2) + \dots + t(i_m, j),$$

εάν ΔΕΝ ισχύει :

και $j_a^1(r_{q,j}) = [j_a^1(r_{q,j}) = j]$ συνεχίζουμε.

Εάν $j_a^1(r_{q,j}) = \&$ πάμε Βήμα 6.

Βήμα 5 : Για την διαδρομή από τον επιλεγμένο τερματικό σταθμό στο κόμβο j , $p(r_q, j)$, υπολογίζουμε την διαφορά σε επιβατο-ώρες μεταξύ αυτής της διαδρομής και του ελαχίστου χρόνου ταξιδιού, Δp_H .

Βήμα 6 : Επιλογή του επόμενου κόμβου j που ανήκει στο σύνολο j_a^1 και ορίζουμε αυτό σαν κόμβο αρχής ($a = j$), για πιθανή επέκταση της διαδρομής που έχει βρεθεί. Αυξάνουμε τις μετρούμενες προσπάθειες κατά μια μονάδα ($1 = 1+1$).

Εάν δεν υπάρχουν άλλοι κόμβοι για επιλογή, συνεχίζουμε παρακάτω.

Αλλιώς επαναλαμβάνουμε την διαδικασία από το Βήμα 3.

Βήμα 7 : Θεωρούμε νέο σύνολο από κόμβους με αύξηση κατά μια ακόμα διαδρομή, j_a^{1+1} , (λόγω μεγαλύτερης προσπάθειας), από το τερματικό σταθμό που είχαμε επιλέξει, r_q .

Εάν δεν υπάρχει τέτοιο σύνολο, συνεχίζουμε παρακάτω.

Αλλιώς εξαντλούμε όλες τις δυνατές διαδρομές επαναλαμβάνοντας από το Βήμα 6.

Βήμα 8 : Διαγραφή του τερματικού σταθμού που είχαμε θεωρήσει από το σύνολο T , ώστε να θεωρήσουμε άλλο τερματικό σταθμό σαν αρχή, ($q = q+1$). Αρχίζει εξ' αρχής η διαδικασία που περιγράφηκε, από το Βήμα 1. Εάν έχουν εξετασθεί όλοι οι τερματικοί σταθμοί τότε τερματίζεται η αναζήτηση.

-Έναρξη

1.

$$r_1 = 4, \left[\sum_{j=1}^5 pH(4, j) > \sum_{j=1}^5 pH(1, j) \right]$$

$$a = 4, l = 1$$

$$2. J_4^1(4, j) = \{2, 3, 5\}$$

$$3. \text{ Έλεγχος } t(4, 2) = 9 < 12, 6 \quad \text{Ελάχιστο } \Delta pH(4, 2) = 0$$

$$t(4, 3) = 5 < 7 \quad \text{Ελάχιστο } \Delta pH(4, 3) = 0$$

$$t(4, 5) = 10 < 14 \quad \text{Ελάχιστο } \Delta pH(4, 5) = 0$$

$$4. a = 2, l = 2 \quad J_2^2(4, j) = \{1, 3, 4\} - \{4, 2\} = \{1, 3\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(4, 2, 1) = t(4, 2) + t(2, 1) = 13 < 12, 6$$

$$\Delta pH(4, 2, 1) = 80$$

$$t(4, 2, 3) = t(4, 2) + t(2, 3) = 15 > 7 \quad \Delta pH(4, 3) = 0$$

$$5. a = 3, l = 3 \quad J_3^3(4, j) = \{1, 2, 4, 5\} - \{4, 3\} = \{1, 2, 5\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(4, 3, 1) = t(4, 3) + t(3, 1) = 12 < 16, 8$$

$$\text{Ελάχιστο } \Delta pH(4, 3, 1) = 0.$$

$$t(4, 3, 2) = t(4, 3) + t(3, 2) = 11 < 12, 6$$

$$\Delta pH(4, 3, 2) = 80$$

$$t(4, 3, 5) = t(4, 3) + t(3, 5) = 13 < 14$$

$$\Delta pH(4, 3, 5) = 65$$

$$6. a = 5, l = 4 \quad J_5^4(4, j) = \{3, 4, \} - \{4, 5\} = \{3\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(4, 5, 3) = t(4, 5) + t(5, 3) = 18 < 7$$

$$\text{Ελάχιστο } \Delta pH(4, 3, 1) = 0.$$

$$7. J_2^2(4, j) = \{1\} \quad a = 1, l = 5 \quad J_1^5(4, j) = \{2, 3\} - \{4, 2, 1\} = \{3\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(4, 2, 1, 3) = t(4, 2) + t(2, 1) + t(1, 3) = 20 > 7$$

$$\Delta pH(4, 3, 1) = 0.$$

$$8. J_3^3(4, j) = \{1, 2, 5\} \quad a = 1, l = 6$$

$$J_1^6(4, j) = \{2, 3\} - \{4, 3, 1\} = \{2\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(4, 3, 1, 2) = t(4, 3) + t(3, 1) + t(1, 2) = 16 > 12, 6$$

$$a = 2, l = 7 \quad J_2^7(4, j) = \{1, 3, 4\} - \{4, 3, 2\} = \{1\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(4, 3, 2, 1) = t(4, 3) + t(3, 2) + t(2, 1) = 15 < 16, 8$$

$$\Delta pH(4, 3, 2, 1) = 85 + 80 + 150 = 315$$

$$a = 5, l = 8 \quad J_5^8(4, j) = \{4, 3\} - \{4, 3, 5\} = \{\emptyset\}$$

9. Επιλογή Επόμενου Τερματικού Σταθμού

$$r_2 = 1, \quad a = 1, \quad l = 2$$

$$10. J_1^1(1, j) = \{2, 3\}$$

$$11. \text{Έλεγχος } t(1, 2) = 4 < 5, 6 \Rightarrow \Delta p_H(1, 2) = 0$$

$$t(1, 3) = 7 < 9, 8 \Rightarrow \Delta p_H(1, 3) = 0$$

$$12. a = 2, \quad l = 2 \quad J_2^2(1, j) = \{1, 3, 4\} - \{1, 2\} = \{3, 4\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(1, 2, 3) = t(1, 2) + t(2, 3) = 10 > 9, 8$$

$$\Delta p_H(1, 2, 3) = 0$$

$$t(1, 2, 4) = t(1, 2) + t(2, 4) = 13 < 18, 8$$

$$\Delta p_H(1, 2, 4) = 80$$

$$13. a = 3, \quad l = 5 \quad J_3^3(1, j) = \{1, 2, 4, 5\} - \{1, 3\} = \{2, 4, 5\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(1, 5, 2) = t(1, 5) + t(3, 2) = 13 > 5, 6$$

$$\Delta p_H(1, 3, 2) = 0$$

$$t(1, 3, 4) = t(1, 3) + t(3, 4) = 12 < 16, 8$$

$$\text{Ελάχιστο } \Delta p_H(1, 3, 4) = 0$$

$$t(1, 3, 5) = t(1, 3) + t(3, 5) = 15 < 21$$

$$\Delta p_H(1, 3, 5) = 75$$

$$14. J_2^2(1, j) = \{3, 4\}$$

$$a = 3, \quad l = 4 \quad J_3^4(1, j) = \{1, 2, 4, 5\} - \{1, 2, 3\} = \{4, 5\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(1, 2, 3, 4) = t(1, 2) + t(2, 3) + t(3, 4) = 15 > 16, 8$$

$$\Delta p_H(1, 2, 3, 4) = 150 + 80 + 85 = 315$$

$$t(1, 2, 3, 5) = t(1, 2) + t(2, 3) + t(3, 5) = 18 < 21$$

$$\Delta p_H(1, 2, 3, 5) = 60 + 90 = 150$$

$$a = 4, \quad l = 5 \quad J_4^5(1, j) = \{2, 3, 5\} - \{1, 2, 4\} = \{3, 5\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(1, 2, 4, 3) = t(1, 2) + t(2, 4) + t(4, 3) = 18 > 9, 8$$

$$\Delta p_H(1, 2, 4, 3) = 0$$

$$t(1, 2, 4, 5) = t(1, 2) + t(2, 4) + t(4, 5) = 23 > 21$$

$$\Delta p_H(1, 2, 4, 5) = 0$$

$$15. J_3^3(1, j) = \{4, 5\}$$

$$a = 4, \quad l = 6 \quad J_4^6(1, j) = \{2, 3, 5\} - \{1, 3, 4\} = \{2, 5\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(1, 3, 4, 2) = t(1, 3) + t(3, 4) + t(4, 2) = 21 > 5, 6$$

$$\Delta p_H(1, 3, 4, 2) = 0$$

$$t(1,3,4,5) = t(1,3) + t(3,4) + t(4,5) = 22 > 21$$

$$\Delta p_H(1,3,4,5) = 0$$

$$a = 5, l = 7 J_5^7(1,j) = \{3,4\} - \{1,3,5\} = \{4\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(1,3,5,4) = t(1,3) + t(3,5) + t(5,4) = 25 > 16,8$$

$$\Delta p_H(1,3,5,4) = 0$$

$$16. J_3^4(1,2,3) = \{4,5\}$$

$$a = 4, l = 8 J_4^8(1,j) = \{2,3,5\} - \{1,2,3,4\} = \{5\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(1,2,3,4,5) = t(1,2) + t(2,3) + t(3,4) + t(4,5) = 25 > 21$$

$$\Delta p_H(1,2,3,4,5) = 0$$

$$a = 5, l = 9 J_5^9(1,j) = \{3,4\} - \{1,2,3,5\} = \{4\}$$

$$\text{Έλεγχος } t(1,2,3,5,4) = t(1,2) + t(2,3) + t(3,5) + t(5,4) = 28 > 16,8$$

$$\Delta p_H(1,2,3,5,4) = 0$$

17. –STOP Προετοιμασία του Πίνακα 5 με τις δυνατές διαδρομές και την απευθείας μέτρηση.

Οι γραμμές που παράγονται είναι κατ' ελάχιστο δύο και μέγιστο αριθμό κόμβων πέντε. Ακόμα βλέπουμε ότι μια διαδρομή με πέντε κόμβους δεν είναι και η πιο σύντομη από άποψη επιβατο-ωρών, για αυτό και δεν επιλέγεται.

Αναφερόμενοι στην μεθοδολογία δύο επιπέδων όπως περιγράφηκε και φαίνεται στο αντίστοιχο σχήμα, η λύση από τον αλγόριθμο κατασκευής γραμμών μπορεί να διοχετευτεί είτε στην την διαδικασία ανάλυσης στο Επίπεδο I είτε στο Επίπεδο II. Επιπλέον ανάλυση μπορεί να συμπεριληφθεί σε πρακτικές θεωρήσεις που δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν.

Σε ένα τόσο μικρό δίκτυο η ανάλυση μπορεί να γίνει είτε από τον σχεδιαστή είτε με την βοήθεια των μικροϋπολογιστών. Για μεγαλύτερα δίκτυα θα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ενδεχομένως μαθηματικός προγραμματισμός και ευρετικές μέθοδοι για την επίτευξης καλύτερης λύσης. Η προέκταση αυτής της μεθόδου που παρουσιάστηκε έχει παρουσιασθεί από τον Israeli (1985) αναφορικά με προβλήματα που συναντάμε σε μεγάλα δίκτυα. Επιπλέον έχει γίνει μια προσπάθεια να ενσωματωθεί η στρατηγική του μελετητή για τον σχεδιασμό δικτύου λεωφορείων στην προσεγγιστική ανάλυση. Η μεθοδολογία των δύο επιπέδων μπορεί να χρησιμεύσει σαν οδηγός για αυτό τον σκοπό.

Τερματικός Σταθμός Αρχής	Δυνατές Διαδρομές	Απευθείας Μέτρηση επιπλέον επιβατοώρες)
1	1--2	0--
	1--2--3	0--
	1--2--3--4	0--
	1--2--3--4--5	0--
	1--2--3--5	0--
	1--2--3--5--4	0--
	1--2--4	80--
	1--3	0--
	1--3--2	0--
	1--3--4--5	0--
	1--3--5	75--
	1--3--5--4	0--
4	4--2	0--
	4--2--1	80--
	4--3	0--
	4--3--1	0--
	4--3--2	80--
	4--3--2--1	315--
	4--3--5	65--
	4--5	0--

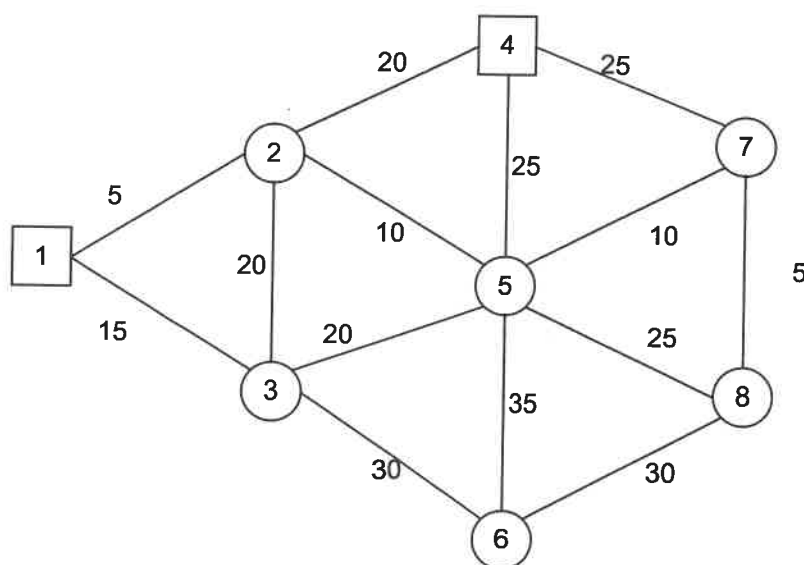
Πίνακας 5. Αποτελέματα Εφαρμογής : Δυνατές Γραμμές

3.4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 2

Προκειμένου να δείξουμε σημαντικά στοιχεία που ο Avishai Ceder με την μεθοδολογία του προτείνει θα παρουσιάσουμε ένα παράδειγμα στο οποίο και θα επισημάνουμε τα όσα αναφέρθηκαν στην μεθοδολογία σχεδίασης δικτύου γραμμών για δημόσια μεταφορικά μέσα αυτού του κεφαλαίου και που συνοπτικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.

Σκοπός εδώ είναι να ερευνηθεί ένα δίκτυο και να συγκριθεί η μεθοδολογία που ακολουθείται, με αυτή των προηγούμενων ετών. Έτσι έμφαση θα δοθεί στα στοιχεία (βήματα) τρία, τέσσερα, πέντε και έξη ενώ δεν θα εξετάσουμε τον αλγόριθμο που βρίσκει τα σύνολο των γραμμών, αν και εκ των προτέρων πρέπει να επισημάνουμε ότι όλες οι διαφοροποιήσεις που μπορεί να γίνουν έχουν μεγάλη σημασία στην βέλτιστη λύση , πόσο μάλλον ο αλγόριθμος συντομότερης διαδρομής που επιλέγεται κάθε φορά ο οποίος και θεωρείται τέχνη (state of the art).

Διαθέτουμε λοιπόν το παρακάτω δίκτυο και δίνονται οι τερματικοί σταθμοί στο 1 και 4 και οι χρόνοι μεταβίβασης από τον έναν κόμβο στον άλλον. Το δίκτυο αποτελείται από 8 κόμβους και το ζητούμενο είναι πως θα εξυπηρετείται η ζήτηση σε ένα τέτοιο δίκτυο, ελαχιστοποιώντας το κόστος.



Εικόνα 2. Δίκτυο 2^{ης} Εφαρμογής
Πηγή Lam & Bell 'Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning'

Δίνεται ο συντελεστής απόκλισης από την γραμμή $a = 0,40$

Μέγιστο βαθμός μεταφορών $= 2$

Χωρητικότητα Λεωφορείου $= 50$

Ακόμα δίνεται το μητρώο ζήτησης μεταξύ των κόμβων και το οποίο θεωρείται συμμετρικό. Παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Μεταφορική Ζήτηση μεταξύ των κόμβων

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	80	70	160	50	200	120	60
2	80	0	120	90	100	70	250	70
3	70	120	0	180	150	120	30	250
4	160	90	180	0	80	210	170	230
5	50	100	150	80	0	250	40	130
6	200	70	120	210	250	0	130	120
7	120	250	30	170	40	130	0	70
8	60	70	250	230	130	120	120	0

Πηγή Lam & Bell 'Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning'

Το πρώτο αποτέλεσμα του πρώτου στοιχείου που έχουμε είναι βάση της μέγιστης απόκλισης από την ελάχιστη διαδρομή ($a = 0,4$), η περιγραφή όλων των διαδρομών. Το αποτέλεσμα είναι ο Πίνακας 7. Αυτό σημαίνει πως το μήκος της γραμμής ή τμήμα της μπορεί να υπερβεί τον ελάχιστο χρόνο ταξιδιού περισσότερο από 40%.

Γραμμή #	Περιγραφή										
1	1	-->	2								
2	1	-->	2	-->	4						
3	1	-->	2	-->	5						
4	1	-->	2	-->	5	-->	6				
5	1	-->	2	-->	5	-->	7				
6	1	-->	2	-->	5	-->	7	-->	8		
7	1	-->	2	-->	5	-->	7	-->	8	-->	6
8	1	-->	3								
9	1	-->	3	-->	6						
10	4	-->	2								
11	4	-->	2	-->	1	-->	3				
12	4	-->	2	-->	1	-->	3	-->	6		
13	4	-->	2	-->	3						
14	4	-->	2	-->	3	-->	6				
15	4	-->	2	-->	5						
16	4	-->	2	-->	5	-->	6				
17	4	-->	5								
18	4	-->	5	-->	3						
19	4	-->	5	-->	6						
20	4	-->	5	-->	7						
21	4	-->	5	-->	7	-->	8				
22	4	-->	5	-->	7	-->	8	-->	6		
23	4	-->	7								
24	4	-->	7	-->	5						
25	4	-->	7	-->	5	-->	3				
26	4	-->	7	-->	5	-->	6				
27	4	-->	7	-->	8						
28	4	-->	7	-->	8	-->	6				

Πίνακας 7. Δημιουργία όλων των γραμμών από το πρώτο στοιχείο
 Πηγή Lam & Bell 'Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning'

Το πρώτο στοιχείο (βήμα) στηρίζεται σε ένα αλγόριθμο που βασικά δημιουργεί δυνατές μεταφορές σε όλο το δίκτυο. Το πρώτο βήμα του αλγόριθμου είναι να εγκαταστήσει επιπλέον ευθείες γραμμές μεταξύ ζευγαριών Π-Π που χαρακτηρίζονται από υψηλή ζήτηση. Αυτές οι ευθείες γραμμές αρχίζουν από και τερματίζουν σε τερματικούς κόμβους και μη, και νεκρά ταξίδια είναι υπεύθυνα για την σύνδεση των γραμμών με τους τερματικούς κόμβους στην δεύτερη περίπτωση. Ακόμα μια ζήτηση Π-Π χαμηλή θεωρούμε πως δεν πρέπει να εξυπηρετείται από ευθεία γραμμή. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται δημιουργεί τον Πίνακα 8. Στον Πίνακα 8 υπάρχει σε παρένθεση στην περιγραφή ο αριθμός της γραμμής όπως αυτή ορίστηκε στον Πίνακα 7.

Πηγή Lam & Bell 'Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning'

Μεταφορά #	Περιγραφή						
29(5,18,27)	3(18)	-->	5(5)	-->	7(27)	-->	8
30(5,18,28)	3(18)	-->	5(5)	-->	7(28)	-->	8
31(6,18)	3(18)	-->	5(6)	-->	7(6)	-->	8
32(6,25)	3(25)	-->	5(25,6)	-->	7(6)	-->	8
33(7,18)	3(18)	-->	5(7)	-->	7(7)	-->	8
34(7,25)	3(25)	-->	7(25,7)	-->	7(7)	-->	8
35(18,20,27)	3(18)	-->	5(20)	-->	7(27)	-->	8
36(18,20,27)	3(18)	-->	5(20)	-->	7(28)	-->	8
37(18,21)	3(18)	-->	5(21)	-->	7(21)	-->	8
38(18,22)	3(18)	-->	5(22)	-->	7(22)	-->	8
39(18,24,27)	3(18)	-->	5(24)	-->	7(27)	-->	8
40(18,24,28)	3(18)	-->	5(24)	-->	7(28)	-->	8
41(18,26,27)	3(18)	-->	5(26)	-->	7(27)	-->	8
42(18,26,28)	3(18)	-->	5(26)	-->	7(28)	-->	8
43(21,25)	3(25)	-->	5(25,21)	-->	7(21)	-->	8
44(22,25)	3(25)	-->	5(25,22)	-->	7(22)	-->	8
45(25,27)	3(25)	-->	5(25)	-->	7(27)	-->	8
46(25,28)	3(25)	-->	5(25)	-->	7(28)	-->	8

Πίνακας 8. Γραμμές που δημιουργούνται από το πρώτο βήμα

Ενώ στην στήλη που αναφέρονται οι μεταφορές ο αριθμός εκτός παρένθεσης αναπαριστά κόμβο ενώ ο αριθμός μέσα στην παρένθεση εκπροσωπεί την γραμμή.

Στο δεύτερο στοιχείο το σύστημα δημιουργεί τον ελάχιστο αριθμό σύνολο γραμμών και τις μεταφορές που σχετίζονται με αυτές τις γραμμές. Το πρόβλημα όπως έχει ειπωθεί αποτελεί το Πρόβλημα Κάλυψη (Set covering Problem) και είναι από τα πιο δύσκολα στην επίλυση (βλέπε Παράρτημα). Το Πρόβλημα Κάλυψης μπορεί να δώσει τον ελάχιστο σύνολο από γραμμές από το μητρώο των δυνατών γραμμών. Έτσι στο μητρώο τοποθετείται '1' όταν μια ζήτηση μπορεί να μεταφερθεί από την γραμμή και '0' στην αντίθετη περίπτωση. Η έννοια της λέξης 'κάλυψη' σημαίνει τουλάχιστον μια στήλη με '1' σε κάθε γραμμή. Οι μεταφορές είναι συνδυασμένες στο μητρώο του ΠΚ και αυτό αυξάνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται εδώ περιγράφεται από τους Israeli και Ceder (1996). Αναπτύχθηκε και ελέγχθηκε για ένα τυχαίο δίκτυο. Η λύση του έχει συγκριθεί με

- I. Βελτιστοποίηση ακεραίου προγραμματισμού, χωρίς θεώρηση μεταφορών.
- II. Μη γραμμικό προγραμματισμό χρησιμοποιώντας μεθόδους χαλάρωσης σε ακέραιες μεταβλητές για δίκτυα λεωφορείων με μεταφορές.
- III. Συνολική απαρίθμηση όλων των δυνατών σεναρίων

Ο ευρετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται αποτελείται από 3 στοιχεία. Το πρώτο είναι ότι διανύει μόνο την πιο σύντομη διαδρομή μεταξύ των ζευγαριών Π-Π. Το δεύτερο είναι ότι διανύει όλες τις διαδρομές Π-Π ενώ ελαχιστοποιεί τον αριθμό των γραμμών που δεν είναι οι συντομότερες και τέλος διανύει όλες τις διαδρομές και ελαχιστοποιεί τον συνδυασμένο χρόνο διαδρομών.

Σε αυτό το βήμα δημιουργούνται 9 σύνολο από γραμμές, βασισμένο όμως και στα υπόλοιπα στοιχεία (τρίτο τέταρτο και πέμπτο) που έχουμε αναφέρει. Αυτά τα σύνολο φαίνονται στον Πίνακα 9 και αναφέρονται στις γραμμές και τις μεταφορές που παρουσιάσαμε στους Πίνακες 7 και 8.

Σετ	Περιγραφή
1	{4,6,9,11,25,28,32,46}
2	{7,9,11,19,25,27,34,45}
3	{7,9,11,25,28,34,46}
4	{6,9,11,16,25,28,32,46}
5	{6,12,19,25,28,32,46}
6	{7,12,25,27,34,45}
7	{7,12,25,28,34,46}
8	{4,6,12,25,28,32,46}
9	{6,12,16,25,28,32,46}

Πίνακας 9. Δημιουργία γραμμών από το δεύτερο στοιχείο

Πηγή Lam & Bell 'Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning'

Στο τρίτο στοιχείο ολόκληρη η ζήτηση Π-Π ανατίθεται σε επιλεγμένο σύνολο γραμμών. Ο αλγόριθμος ανάθεσης που έχει αναπτυχθεί από τους Israeli και Ceder (1996) περιλαμβάνει βήματα που συνδέονται με την έρευνα επιλογής γραμμής. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται θεωρεί το μήκος της γραμμής και το μήκος μιας διαδρομής μεταφοράς μεταξύ ζευγαριών Π-Π, όπου και οι γραμμές και οι διαδρομές μεταφοράς διαιρούνται σε 'αργές' και 'γρήγορες' κατηγορίες. Η συχνότητα του λεωφορείου χρησιμοποιείται σαν μεταβλητή στην συνάρτηση και απορρέει από τον προφίλ του φορτίου των επιβατών της κάθε γραμμής. Το φορτίο σε κάθε γραμμή καθορίζεται από την ζήτηση και την μέθοδο ανάθεσης. Η ουσία του όλου στοιχείου είναι ένα σύστημα από εξισώσεις (τρίτης τάξης) που επιλύονται από μια μέθοδο επαναληπτική που αναπτύχθηκε ειδικά για αυτό το πρόβλημα. Το αποτέλεσμα του στοιχείου είναι οι συχνότητες των λεωφορείων που εξυπηρετούν τα 9 σύνολο γραμμών, το προφίλ φόρτου των επιβατών και η ανάθεση (κατανομή) της ζήτησης στα σύνολο των γραμμών.

Το τέταρτο στοιχείο υπολογίζει τις παραμέτρους βελτιστοποίησης ΔΡΗ, WH, EH για τον υπολογισμό του Z_1 και καθορίζει τον ελάχιστο αριθμό λεωφορείων που απαιτούνται για να ικανοποιείται το Z_2 . Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μεγέθους στόλου στηρίζεται

στην Θεωρία Συνάρτησης Ελλείμματος που προτάθηκε από τους Ceder και Stern (1981) και γενικεύτηκε από τον ίδιο τον Ceder το 2000.

Το πέμπτο στοιχείο είναι υπεύθυνο για την κατασκευή εναλλακτικών σύνολο γραμμών με σκοπό την αναζήτηση επιπλέον τιμών (Z_1, Z_2) στην γειτονιά των βέλτιστων τιμών.

Για το δικό μας παράδειγμα έστω $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$ (συντελεστές χρηματικού βάρους όπως είχαν οριστεί της αντικειμενική συνάρτησης). Χρησιμοποιείται κάτω όριο στο μέγεθος στόλου για τον υπολογισμό του FS (απαιτούμενου στόλου).

Πάλι έχουμε 9 σύνολα από ‘αποδεκτές’ γραμμές που παράγονται από το στοιχείο και φαίνονται στον Πίνακα 10, μαζί με τις τιμές (Z_1, Z_2).

Σετ	Z_1	$Z_2=FS$
1	788	106
2	900	109
3	1105	117
4	866	102
5	937	103
6	997	101
7	1213	113
8	869	103
9	961	105

Πίνακας 10. Εναλλακτικά σετ γραμμών και κόστος

Πηγή Lam & Bell ‘Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning’

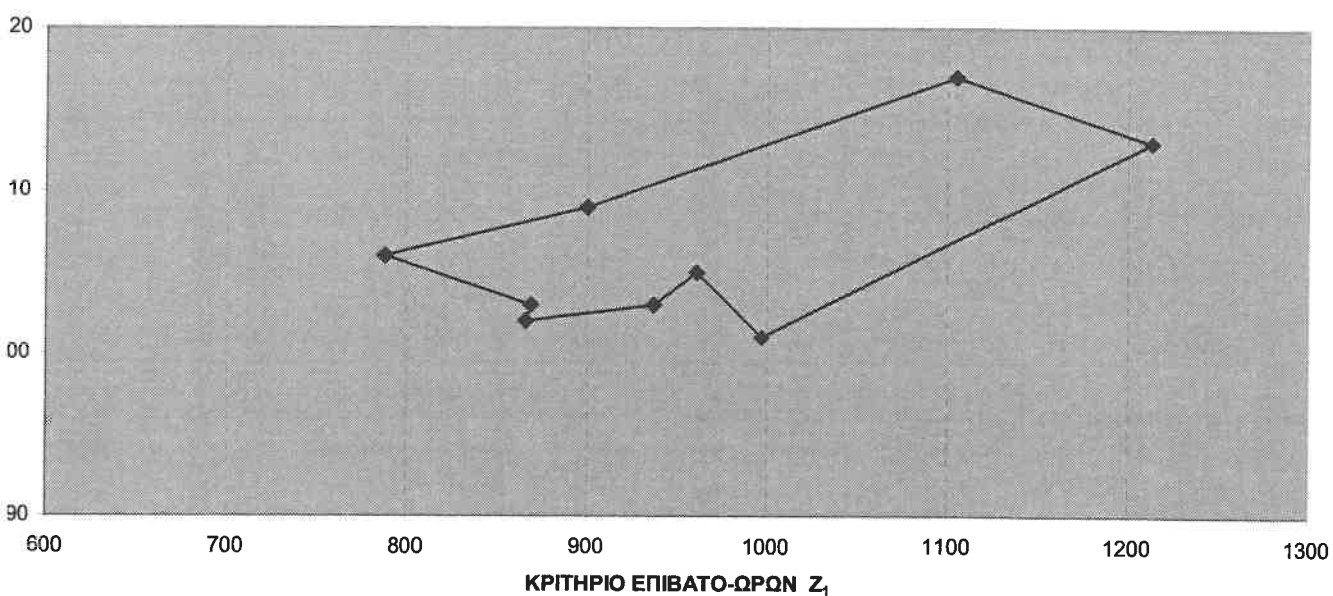
Το έκτο και τελικό στοιχείο του συστήματος περιλαμβάνει πολύ-στοχικό προγραμματισμό των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων Z_1 και Z_2 . Με δεδομένα τα σύνολο των εναλλακτικών γραμμών που προέκυψαν από το πέμπτο στοιχείο, ο σκοπός είναι η έρευνα τις εναλλακτικές λύσεις θεωρώντας στο τέλος τις πιο αποδοτικές λύσεις (Z_1, Z_2).

Για το δικό μας παράδειγμα απεικονίζοντας με την εξής σειρά τα σημεία (Z_1, Z_2), 1,2,3,7,6,9,5,4,8 και πάλι 1, δημιουργείται μια περιοχή (αν ενώσουμε τα σημεία) η οποία και μας δεικνύει την βέλτιστη περιοχή από άποψη βελτιστοποίησης των αντικειμενικών συναρτήσεων. Αυτό φαίνεται στο Γράφημα 1 [Για περισσότερα σχετικά με τον πολύ-στοχικό προγραμματισμό βλέπε Παράρτημα Ι].

Είναι ολοφάνερη η ευκολία που προσφέρεται με αυτόν τον τρόπο στον άνθρωπο που θα πάρει τελικά την απόφαση για την επιλογή της λύσης. Εδώ πιο συγκεκριμένα η απόφαση ταλαντεύεται μεταξύ δύο σημείων τα οποία και θεωρούνται τα βέλτιστα. Αυτά είναι τα (788,106) και (866,102) διότι προφανώς έχουν το μικρότερο συνδυασμό Z_1 και Z_2 .

Πηγή Lam & Bell 'Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning'

Γράφημα 1. Γράφική Απεικόνιση των Βέλτιστων Λύσεων



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δεύτερο βήμα αλλά εξίσου σημαντικό με το πρώτο είναι η δρομολόγηση λεωφορείων στις γραμμές που σχεδιάστηκαν, έτσι ώστε το επιβατικό κοινό να μείνει ευχαριστημένο με την εξυπηρέτηση που του προσφέρεται. Το δεύτερο λοιπόν βήμα ασχολείται με την διαδικασία σχεδιασμού των συχνοτήτων. Οι συχνότητες ενώ μπορεί να καθοριστούν από το πρώτο βήμα, προτιμάται να είναι ξεχωριστό βήμα για να αποδοθεί η κατάλληλη προσοχή. Με βάση αυτή την λογική υπάρχει η παρακάτω ανάλυση έχοντας υπόψη τα αποτελέσματα του σχεδιασμού του δικτύου του πρώτου βήματος.

Σε αντίθεση με τον σχεδιασμό του δικτύου των λεωφορειακών γραμμών στην διαδικασία σχεδιασμού των συχνοτήτων των λεωφορείων υπάρχει μια μεγάλη βιβλιογραφία και πολλοί μελετητές έχουν προσφέρει ώστε η διαδικασία να μπορεί να γίνεται όσο γίνεται με ενιαίο τρόπο αλλά και να κατασκευαστούν προγράμματα που θα αναλαμβάνουν το υπολογιστικό μέρος αυτής της διαδικασίας με οικονομία χρόνου και καλή ακρίβεια.

Γενικά μπορούμε να πούμε πως το πρόβλημα καθεαυτό έχει μια αποδεκτή λύση και δεν είναι δύσκολο να φτιαχτεί πρόγραμμα που να υπολογίζει τις συχνότητες των λεωφορείων. Αυτό το οποίο όμως πολλές φορές είναι όχι μόνο να έχουμε την καλύτερη δυνατή συχνότητα λεωφορείων αλλά και τον συγχρονισμό των αφίξεων αυτών ή ακόμα πιο δύσκολα τον συγχρονισμό των αφίξεων με άλλες αναχωρήσεις άλλων ΜΜΜ όπως τρένα, μετρό, τραμ κ.α. .

Άρα λοιπόν ανάλογα με τον σκοπό και τις προτεραιότητες που τίθενται από τον Οργανισμό που διαχειρίζεται τις λεωφορειακές γραμμές, γίνεται και ο σχεδιασμός. Ο σχεδιασμός όπως και προηγουμένως μπορεί να αρκετά εύκολος έως πολύ δύσκολος αν υπεισέρχονται παράμετροι άλλων Οργανισμών ΜΜΜ (συντονισμός).

Παρακάτω θα γίνει η διατύπωση του απλού προβλήματος σχεδιασμού συχνοτήτων λεωφορειακών γραμμών, ως προς τις κλασσικές μεθόδους (και μια σύγχρονη τάση πιο θεωρητική) και θα αναφέρουμε στην περίπτωση που χρειαζόμαστε ‘απόλυτο’ συγχρονισμό μεταξύ των λεωφορείων και πως μπορεί να υπολογιστεί, δηλαδή να μεταφραστεί σε μαθηματική διατύπωση αυτή η ανάγκη.

Οι ‘κλασσικές’ μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη τα παρακάτω στοιχεία :

- Απόσταση μεταξύ των στάσεων

- Επιθυμητή πληρότητα ανά διάστημα
- Μέγιστο χρονικό διαχωρισμό
- Αριθμός δρομολογημένων λεωφορείων
- Μέση τιμή φόρτισης μεταξύ των στάσεων, από τις μετρήσεις
- Συνολικός χρόνος κυκλικού ταξιδιού, συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου ασφαλείας
- Χωρητικότητα Λεωφορείων

Αυτά τα στοιχεία αναλύονται στο χρονικό διάστημα που ενδιαφέρει και ανάλογα με την μέθοδο που θα επιλεγεί θα καταλήξει ο μελετητής στις συχνότητες και τον χρονικό διαχωρισμό.

Εκ των σύγχρονων μεθόδων η ανάπτυξη γίνεται σε δύο κατευθύνσεις. Η μια κατεύθυνση λαμβάνει υπόψη την επιθυμία των επιβατών να ταξιδέψουν και προκειμένου να γίνει ο καθορισμός των συχνοτήτων εισάγεται η έννοια του κόστους καθυστέρησης που περιπλέκει την μαθηματική διατύπωση. Προτείνονται 2 μοντέλα. Το γραμμικό μοντέλο που θεωρεί πως οι χρόνοι ταξιδιού ανακατανέμονται σε ένα τμήμα της ημέρας και ότι ο επανασχεδιασμός των δρομολογίων δεν είναι δυνατός. Το κυκλικό θεωρεί πως οι επιθυμητοί χρόνοι ταξιδιού κατανέμονται σε όλη την διάρκεια του 24-ώρου και ο επανασχεδιασμός μεταξύ των ημερών επιτρέπεται. Η μέθοδος επιτρέπει, εκτός από τις συχνότητες, να βρεθεί το κόστος καθυστέρησης στους επιβάτες από την αύξηση ή μείωση του αριθμού των λεωφορείων. Ομολογουμένως όμως διαθέτει το μειονέκτημα ότι η συλλογή των στοιχείων σχετικά με τον σκοπό μετακίνησης των επιβατών πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή, αφού επηρεάζει άμεσα τα αποτελέσματα (το κόστος).

Με σκοπό να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του συστήματος και των συχνοτήτων προτείνεται μια μέθοδος μέγιστου συγχρονισμού του Πίνακα Αφίξεων – Αναχωρήσεων. Εδώ γίνεται λόγος για τα σημεία μετεπιβίβασης και το πώς θα χειριστούν αυτά ώστε :

1. Να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη συχνότητα.
2. Να χρησιμοποιείται στο μέγιστο ο στόλος.
3. Να υπάρχει συγχρονισμός συγκεκριμένων Αφίξεων.

Προκειμένου να γίνουν τα παραπάνω κατασκευάζεται ευρετικός αλγόριθμος που υπολογίζει, τους χρόνους αναχώρησης των γραμμών που γίνεται ο συγχρονισμός, τους κόμβους που οι γραμμές ‘τέμνονται’ και τον χρόνο κάθε φορά που αυτό συμβαίνει σε σχέση με τον χρόνο αναχώρησης της πρώτης γραμμής. Η μαθηματική διατύπωση γίνεται και σε μικτό ακέραιο προγραμματισμό που όμως δεν μπορεί να εφαρμοστεί για πρόβλημα συγχρονισμού μεγάλης κλίμακας.

4.2 ΚΛΑΣΣΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

Οι κλασσικές προσεγγίσεις αναφέρονται σε πλέον αποδεκτές μεθόδους που αναφέρθηκαν παλιότερα από διάφορους μελετητές. Ένας από αυτούς τους μελετητές είναι και ο Avishai Ceder ο οποίος και προσφέρει χρόνια τώρα στην διαδικασία του σχεδιασμού των λεωφορειακών γραμμών και συγκεκριμένα στην διαδικασία σχεδιασμού των συχνοτήτων.

4.2.1 Προσεγγίσεις Μαθηματικού Προγραμματισμού

Μέθοδοι Μαθηματικού Προγραμματισμού για τον υπολογισμό των συχνοτήτων και του Πίνακα Αφίξεων – Αναχωρήσεων έχουν προταθεί από Furth & Wilson (1981), Koutsopoulos et al. (1985), Ceder & Stern (1984) και Ceder and Tall (1999).

Ο στόχος στον Furth & Wilson (1981) είναι η μεγιστοποίηση του κοινωνικού οφέλους του δικτύου, αποτελούμενο από ωφέλημα δρομολόγια και ελάχιστους χρόνους αναμονής, που υπόκεινται σε περιορισμούς συνολικών κρατικών επιχορηγήσεων, μέγεθος στόλου και τα επίπεδα φόρτισης των επιβατών. Ο Koutsopoulos et al. (1985) επέκτεινε αυτή την μαθηματική διατύπωση εισάγοντας κόστος για την περίπτωση που οι επιβάτες ταλαιπωρούνται, στην αντικειμενική συνάρτηση και θεωρώντας το πρόβλημα χρονικά περιορισμένο από ζήτηση και εξυπηρέτηση. Το αρχικό τους πρόβλημα αποτελείται από την βελτιστοποίηση μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης με περιορισμούς γραμμικής μορφής. Αργότερα ο Ceder και Stern θεώρησαν το πρόβλημα που διατυπώνεται ως πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και η λύση γίνεται μέσω ευρετικής διαδικασίας και την εμπλοκή των μελετητών σε αποφάσεις του αλγόριθμου. Η πιο πρόσφατη προσέγγιση εστιάζεται στην ανακατασκευή του Πίνακα A-A όταν το μέγεθος στόλου είναι περιορισμένο. Τέλος ο Ceder και ο Tal (1999) χρησιμοποίησαν μικτό ακέραιο προγραμματισμό και ευρετικές διαδικασίες για την κατασκευή του Πίνακα A-A με μέγιστο συγχρονισμό. Αυτό σημαίνει μεγιστοποίηση του αριθμού των διαδοχικών αφίξεων των λεωφορείων στις στάσεις.

Πιο κάτω υπάρχουν γενικότερες πληροφορίες για την προσέγγιση βασισμένη στην μέτρηση του φόρτου των επιβατών. Οι επιβάτες και

μέτρηση αυτών είναι βασικοί παράγοντες στην διαδικασία σχεδιασμού των συχνοτήτων.

4.2.2 Προσέγγιση Βασισμένη στους Φόρτους των Επιβατών

Ένας Πίνακας A-A συνήθως κατασκευάζεται για ένα σύνολο από συχνοτήτες. Το βασικό κριτήριο για τον καθορισμό των συχνοτήτων είναι να δίνεται αρκετός χώρος για να ικανοποιούνται η ζήτηση των επιβατών και να υπάρχει μια ελάχιστη συχνότητα λειτουργίας (από την πολιτική ελαχίστων συχνοτήτων του Οργανισμού).

Ο Ceder περιγράφει τέσσερις μεθόδους για τον υπολογισμό των συχνοτήτων . Δύο από αυτές τις μεθόδους βασίζονται σε σημειακό έλεγχο που προκύπτει από την μέτρηση των επιβατών μέσα στο όχημα σε κάποιο καθορισμένο σημείο της διαδρομής. Οι άλλες δύο βασίζονται στον έλεγχο κατά μήκος διαδρομής, δηλαδή σε μέτρηση των επιβατών γενικά που ταξιδεύουν με το λεωφορείο στην συγκεκριμένη διαδρομή. Στις μεθόδους σημειακού ελέγχου, η συχνότητα προκύπτει από την διαίρεση του επιβατικού φόρτου στο μέγιστο σημείο φόρτισης (είτε κατά την διάρκεια της ημέρας, είτε ωριαία) με τον επιθυμητό συντελεστή πλήρωσης. Στις μεθόδους ελέγχου διαδρομής η συχνότητα είναι το η διαίρεση του μέσου ή περιορισμένου φόρτου των επιβατών και του επιθυμητού συντελεστή πληρότητας. Η μέση φόρτιση είναι η περιοχή κάτω από το προφίλ φόρτισης (σε επιβατο-χιλιόμετρα) διαιρούμενο από το μήκος της διαδρομής (σε χιλιόμετρα) ενώ το περιορισμένο μέσο είναι μια μεγαλύτερη τιμή από την μέση τιμή του φόρτου έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι ένα μέρος της διαδρομής θα τηρείται ο συντελεστής πληρότητας. Αυτός ο συντελεστής πληρότητας είναι το επίπεδο του επιβατικού φόρτου σε κάθε όχημα οποιαδήποτε ώρα της ημέρας.

Ειδικότερα για κάθε μέθοδο [Ceder A. (1986)] :

➤ Πρώτη Μέθοδο

Η πρώτη μέθοδος προτείνει να χρησιμοποιηθούν δεδομένα που συλλέγονται σε ένα σημείο της διαδρομής κατά την διάρκεια της ημέρας. Αυτό το σημείο συνήθως καθορίζεται από παλιότερα δεδομένου ελέγχου της φόρτισης ή από παρατηρητή που βρίσκεται μέσα στο λεωφορείο και ακολουθεί τη διαδρομή του. Το σημείο αυτό εκπροσωπεί το τμήμα μέγιστης ημερήσιας φόρτισης, κατά μήκος της διαδρομής , όπου και βασίζεται η διαδρομή.

➤ Δεύτερη Μέθοδος

Στην δεύτερη μέθοδο οι παρατηρητές κατανέμονται σε διαφορετικά σημεία της διαδρομής για μια χρονική περίοδο (συνήθως για ωριαίες) κάνοντας ταυτόχρονες μετρήσεις. Άρα η μέθοδος βασίζεται στην μέγιστη φόρτιση για κάθε χρονική περίοδο (ωριαία), σε όποιο σημείο της διαδρομής αυτή έχει παρατηρηθεί. Σε σχέση λοιπόν με την πρώτη μέθοδο, η δεύτερη είναι πιο οικονομική από την άποψη στοιχείων και μετρήσεων (λιγότερο το χρονικό διάστημα μέτρησης).

➤ Τρίτη Μέθοδος

Η τρίτη μέθοδος χρησιμοποιείται όταν κύριο κριτήριο είναι η διατήρηση και ο περιορισμός του μεγέθους στόλου με παράλληλη αύξηση του συντελεστή πληρότητας.

Η μέθοδος βασίζεται στο διάγραμμα φόρτισης για όλο το μήκος διαδρομής. Το διάγραμμα φόρτισης σχεδιάζεται σε σχέση με την απόσταση που διανύεται από την αφετηρία. Έτσι η επιφάνεια που ορίζεται από την καμπύλη φόρτισης και του άξονες x και y , χρησιμοποιείται ως μέτρο παραγωγικότητας, εκφρασμένο σε επιβατο-χιλιόμετρα. Η επιφάνεια αυτή διαιρούμενη με το μήκος της διαδρομής εκφράζει την μέση (σε αντιδιαστολή με την μέγιστη της μεθόδου 2) φόρτιση για κάθε χρονική περίοδο.

Πλεονέκτημα της μεθόδου φαίνεται να είναι ότι ο αριθμός των επιβατών στο τμήμα μέγιστης φόρτισης δεν μπορεί να ξεπεράσει τη χωρητικότητα του λεωφορείου. Μειονέκτημα θεωρείται ότι στην πράξη η μέση φόρτιση ξεπερνά την επιθυμητή πληρότητα, σε μεγάλο μήκος διαδρομής.

➤ Τέταρτη Μέθοδος

Η τέταρτη μέθοδος καθορίζει ένα επίπεδο εξυπηρέτησης, αναγνωρίζοντας την αδυναμία της τρίτης μεθόδου ως προς τον περιορισμό στην υπέρβαση της επιθυμητής πληρότητας. Αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής είναι η διατήρηση της υπέρβασης σε περιορισμένο μήκος διαδρομής.

Σε μια ανάλυση που ακολούθησε, ο Ceder (1984) ανέλυσε εναλλακτικούς τρόπους κατασκευής Πινάκων Α-Α. Αυτή η ανάλυση επιτρέπει ένα φάσμα από εναλλακτικές λύσεις Πινάκων Α-Α βασισμένη σε τρεις κατηγορίες δυνατοτήτων :

- a. Επιλογή τύπου χρονοαπόστασης
- b. Επιλογή μεθόδου υπολογισμού συχνοτήτων για κάθε περίοδο
- c. Επιλογή ειδικών περιπτώσεων

Στην πρώτη κατηγορία η χρονοαπόσταση μεταξύ διαδοχικών αναχωρήσεων μπορεί να είναι ίδια ή εξισορροπημένη. Ίσες χρονοαποστάσεις αναφέρονται στην περίπτωση ίσων χωρικά χρονοαποστάσεων. Η εξισορροπημένη περίπτωση αναφέρεται σε άνισες χωρικά χρονοαποστάσεις αλλά με ίσο μέσο όρο επιβατικού φόρτου στα ωριαία μέγιστα σημεία φόρτισης.

Στην δεύτερη κατηγορία είναι δυνατό να επιλεγεί για συγκεκριμένο διάστημα μία από τις προτεινόμενες τέσσερις μεθόδους που περιγράφηκαν πιο πάνω για τον καθορισμό των συχνοτήτων ή μια συχνότητα που θα δίνεται από τον μελετητή.

Στην τρίτη κατηγορία είναι δυνατό να εφαρμοστούν χρονοαποστάσεις της μιας ώρας που είναι που επαναλαμβάνονται και που είναι εύκολο στην απομνημόνευση ή / και σε περίπτωση περιορισμένων δυνατοτήτων να εφαρμόζονται συγκεκριμένος αριθμός αναχωρήσεων.

Το αποτέλεσμα του συνδυασμού των παραπάνω είναι ένα σύνολο από προαιρετικούς Πίνακες Α-Α που εκφράζονται σε αναχωρήσεις οχημάτων σε όλα τα συγκεκριμένα σημεία της διαδρομής, χρησιμοποιώντας στοιχεία από τους φόρτους των επιβατών. Κάθε Πίνακας Α-Α συνοδεύεται από δύο μέτρα σύγκρισης που χρησιμοποιούνται σαν δείκτες υπολογισμού σε σύνδεση με την εξοικονόμηση πόρων. Το πρώτο μέτρο είναι ο απαιτούμενος αριθμός των οχημάτων (που αναχωρούν) και το δεύτερο μέτρο σύγκρισης είναι ο υπολογισμός ελάχιστου αριθμού στόλου σε επίπεδο γραμμής μόνο.

4.3 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα προταθούν δύο μέθοδοι που η μία θα αναφέρεται στην ειδική περίπτωση που στην κατασκευή των συχνοτήτων λαμβάνεται υπόψη το κόστος καθυστέρησης των επιβατών ενώ η δεύτερη είναι μέθοδος που υπόσχεται συγχρονισμό των συχνοτήτων διαφορετικών γραμμών στο δίκτυο.

Στην πρώτη μέθοδο γίνεται η ανάλυση για ένα δεδομένο αριθμό οχημάτων σε μια μονή γραμμή λεωφορειακή όταν οι επιβάτες διαφέρουν ως προς τον χρόνο που προτιμούν να ταξιδέψουν και το κόστος που

προκύπτει αν ταξιδεύουν νωρίτερα ή αργότερα από την χρονική στιγμή που προτιμούν. Το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του προγραμματισμένου κόστους καθυστέρησης των επιβατών διατυπώνεται σε συνεχές χρόνο και αναγνωρίζονται πρώτης τάξης συνθήκες βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα μάλιστα συγκρίνονται με βάση δύο μοντέλα, ένα γραμμικό και ένα κυκλικό που οι επιβάτες δεν έχουν την ίδια κατανομή φόρτων.

Στην δεύτερη μέθοδο αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο θα έχουμε τον μεγαλύτερο συγχρονισμό στον Πίνακα A-A. Η μέθοδος προσπαθεί να μεγιστοποιήσει τον αριθμό των διαδοχικών αφίξεων σε έναν κόμβο του δικτύου. Οι μελετητές πολλές φορές θέλοντας να αυξήσουν την ικανοποίηση και την άνεση των επιβατών ψάχνουν τρόπους για τον μέγιστο συγχρονισμό στον Πίνακα A-A, ώστε να μεταφερθούν οι επιβάτες από την μια γραμμή στην άλλη με τον ελάχιστο δυνατό χρόνο αναμονής και άρα να μειώσουν τον χρόνο ταξιδιού των επιβατών. Συγκεκριμένα η μέθοδος προτείνεται με διατύπωση μικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού και ένας ευρετικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για να λύσει το πρόβλημα σε πολυωνυμικό χρόνο. Τέλος η αποδοτικότητα του αλγόριθμου συγκρίνεται με τις βέλτιστες λύσεις και βγαίνουν τα συμπεράσματα.

4.3.1 Βέλτιστος Σχεδιασμός του Πίνακα A-A

Η μέθοδος που αναφέρεται εδώ περιγράφεται για πρώτη φορά από τους Andre de Palma και Robin Lindsey το 1999 και με κάποιες διορθώσεις το 2000 [Palma A. & Lindsey R. (2000)]. Ο σκοπός είναι η δημιουργία Πίνακα A-A ώστε να ικανοποιηθούν η ζήτηση για μετακίνηση αλλά και ο χρόνος ταξιδιού των επιβατών. Άτομα που ταξιδεύουν αργά ή γρήγορα υπόκεινται σε καθυστερήσεις που δεν μπορούν να εξαλειφθούν δεδομένου ότι δεν έχουμε την δυνατότητα να δρομολογούμε λεωφορεία συνεχώς όλη την ώρα.

Η δημιουργία του Πίνακα A-A είναι μέρος του σχεδιασμού των λεωφορειακών γραμμών που αποτελείται από τον σχεδιασμό δικτύου, τον καθορισμό συχνοτήτων και Πίνακα A-A τον καθορισμό των οχημάτων και οδηγών σε γραμμές. Μάλιστα όπως έχει αναφερθεί το πρώτο στάδιο είναι από τα πιο δύσκολα προβλήματα σχεδιασμού δικτύου που υπάρχουν.

Εδώ η μέθοδος εστιάζει στο πρόβλημα δημιουργίας Πίνακα A-A που οι περισσότεροι γνωρίζουν ως πρόβλημα p-median στην επιχειρησιακή ερευνα. Το πρόβλημα αυτό έχει σαν στόχο να τοποθετήσει p υπηρεσίες

με σκοπό να ελαχιστοποιήσει κάποιο μέτρο απόστασης μεταξύ χρηστών και υπηρεσιών (όπως για παράδειγμα ένα ταχυδρομικό γραφείο). Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι υπηρεσίες είναι τα οχήματα μεταφοράς και οι χρήστες είναι οι επιβάτες που θέλουν να μεταφερθούν. Η απόσταση που τους χωρίζει δεν μετριέται σε μήκος αλλά σε χρόνο.

Παρόλο τον παραλληλισμό και τις ομοιότητες που έχουν τα δύο προβλήματα έτσι όπως αναφέραμε (το δικό μας και το p-median) υπάρχουν τρεις διαφορές που πρέπει να ξεκαθαρίσουμε από την αρχή :

- Πρώτον οι χρήστες και οι υπηρεσίες θεωρούμε πως βρίσκονται σε ξεχωριστούς κόμβους στο δίκτυο. Οι επιβάτες ωστόσο μπορεί να θελήσουν να αναχωρήσουν οποιαδήποτε στιγμή και άρα είναι πιο σωστό να μοντελοποιήσουμε την επιθυμία του χρόνου ταξιδιού σαν μια συνεχή συνάρτηση του χρόνου κατά την διάρκεια της ημέρας. Ακόμα τα οχήματα (δεδομένου των περιορισμών) μπορούν να δρομολογηθούν και αυτά οποιαδήποτε στιγμή. Άρα μπορούμε να θεωρήσουμε πως έχουμε μια συνεχή προσέγγιση που ταιριάζει στην ζήτηση και την προσφορά. Σύμφωνα λοιπόν με την ονομασία του Labbe et al (1995) το πρόβλημα αυτό ονομάζεται και πρόβλημα s-continuous p-median.
- Δεύτερο πρόβλημα μεταξύ προβλήματος Πίνακα A-A και p-median είναι ότι το προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης μπορεί να είναι διαφορετικό από την πρόωρη άφιξη από την αργοπορημένη άφιξη. Αυτό είναι λογικό, αφού για παράδειγμα κάποιος που έχει ένα σημαντικό ραντεβού θα έχει άλλο κόστος αν φτάσει πριν την καθορισμένη ώρα, παρά αργοπορημένος.
- Τέλος το προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης εξαρτάται από τον σκοπό του ταξιδιού, την οικογένεια, το εισόδημα και άλλα ατομικά και χαρακτηριστικά του ταξιδιού. Σχεδιάζοντας για ένα μέσο επιβάτη μπορεί, όπως θα προκύψει, να καταλήξουμε σε κόστος αρκετά μεγαλύτερο από το βέλτιστο.

Εδώ μελετάται μια απλή εκδοχή του προβλήματος κατασκευής Πίνακα A-A. Υπάρχει ένας αριθμός από επιβάτες που ταξιδεύουν σε μια μόνο γραμμή. Οι επιθυμητοί χρόνοι ταξιδιού και τα προγραμματισμένα κόστη καθυστέρησης για την πρόωρη άφιξη και αργοπορημένη άφιξη είναι διαφορετικά για κάθε επιβάτη. Η υπηρεσία εξυπηρέτησης αποτελείται από σταθερό αριθμό οχημάτων. Δεν λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί χωρητικότητας των οχημάτων, ώστε κάθε όχημα να εξυπηρετεί οποιοδήποτε αριθμό επιβατών χωρίς συνωστισμό. Ακόμα αγνοούνται προβλήματα τύπου Logistics όπως με ποιον τρόπο κάθε όχημα θα βρίσκεται στο σημείο αρχής της γραμμής σε μια συγκεκριμένη ώρα.

Αναπτύσσονται λοιπόν δύο μοντέλα, το γραμμικό (και το κυκλικό) που υποθέτουμε ότι οι επιθυμητοί χρόνοι ταξιδιού ανακατανέμονται σε ένα τμήμα (κατά την διάρκεια) της ημέρας και ότι ανασχεδιασμός των δρομολογίων μεταξύ των ημερών είναι αδύνατος (είναι δυνατός).

4.3.1.1 Γραμμικό Μοντέλο

Λόγω της οικονομίας στο μέγεθος του στόλου, η εξυπηρέτηση από τα μέσα μεταφορά γίνεται μέσω μεγάλων οχημάτων (συνήθως) και βάση κάποιου Πίνακα Α-Α που εμπεριέχει κάποιες χρονοαποστάσεις μεταξύ των οχημάτων. Οι περισσότεροι χρήστες MMM υπόκεινται σε προγραμματισμένη καθυστέρηση ακόμα και αν το σύστημα λειτουργεί αξιόπιστα και τα δρομολόγια τηρούνται. Αυτή είναι η διαφορά με το ΙΧ όπου και το ταξίδι μπορεί να αρχίσει την στιγμή που εμείς επιθυμούμαι. Όμως και τα ΙΧ όπως και τα MMM (γενικά) εκτός των απρόβλεπτων καθυστερήσεων μπορεί να συναντήσουν μποτιλιάρισμα και άρα να αυξηθεί ο χρόνος ταξιδιού. Αυτό είναι πιο ανησυχητικό όταν κάποιος ταξιδεύει με MMM και λεωφορεία ειδικότερα.

Για να υπάρχει μια απλή ανάλυση θεωρούμε πως δεν υπάρχει συμφόρηση στους δρόμους και υποτίθεται ότι ο παράγοντας του φόρτου των επιβατών δεν επηρεάζει την ταχύτητα ταξιδιού και τον χρόνο των λεωφορείων στις στάσεις. Ακόμα δεν λαμβάνεται υπόψη η δυσφορία των επιβατών από τον συνωστισμό στις στάσεις και μέσα στα οχήματα.

Το γραμμικό μοντέλο υποθέτει ότι υπάρχει μια γραμμή με αφετηρία και τερματισμό και ότι δεν υπάρχουν στάσεις ενδιάμεσα. Η περίπτωση που η αφετηρία ταυτίζεται με τον τερματισμό δεν θεωρείται ότι αξίζει να αναφερθεί. Το μόνο το οποίο αλλάζει είναι ο χρόνος που οι επιβάτες αποφασίζουν να ταξιδέψουν σε αυτή την γραμμή.

Απουσία κυκλοφοριακής συμφόρησης ο χρόνος ταξιδιού θα είναι σταθερός και ίσο με h . Άρα ένα όχημα που ξεκινά σε χρόνο t από την αφετηρία καταλήγει στον τερματισμό σε χρόνο $t_a = t + h$.

Κάθε επιβάτης θεωρείται ότι έχει ένα επιθυμητό χρόνο ταξιδιού που συμβολίζεται με t^* και προφανώς για να συμβεί μια προγραμματισμένη καθυστέρηση πρέπει $t \neq t^*$ όπου $t = t_a$ όταν $h = 0$, αλλά και γενικά για πιο εύκολη περιγραφή του t_a . Η συνάρτηση προγραμματισμένου κόστους καθυστέρησης θα εξαρτάται από την διαφορά των παραπάνω χρόνων και θα έχει γραμμική μορφή :

$$D(t - t^*) = \beta[t^* - t]^+ + \gamma[t - t^*]^+ \quad (4.3.1-1)$$

όπου β είναι το προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης για κάθε λεπτό που φτάνουμε πρόωρα (πριν το t^*) και γ είναι το προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης για αργοπορημένη άφιξη (μετά το t^*) και $[x]^+ \equiv \text{Max}[0, x]$. Η παραπάνω εξίσωση είναι ιδιαίτερα γνωστή στην βιβλιογραφία για την περίπτωση $\gamma = \beta$ αλλά και με άλλες μορφές όπου τα β και γ θεωρούνται με την σειρά τους συναρτήσεις για να εκφράσουν τις οριακές μεταβολές (και περιορισμένες αυξήσεις) των προγραμματισμένων κοστών, αν και έτσι υπάρχουν πιο δύσκολοι υπολογισμοί.

Ο αριθμός των επιβατών N είναι ανεξάρτητος από τα προγραμματισμένα κόστη καθυστερήσεων που συμβαίνουν σε μια διαδρομή. Η συνάρτηση F κατανομής των επιθυμητών χρόνων ταξιδιού θεωρούμε ότι ακολουθεί το κριτήριο Lebesgue με $F(0) = 0$ και $F(L) = N$ σε ένα διάστημα $[0, L]$ το οποίο και είναι το διάστημα που δεν αλλάζει ο προγραμματισμός των αφίξεων-αναχωρήσεων .

Εάν λειτουργούν n λεωφορεία σε χρόνους $T_1, T_2, \dots, T_n$ ώστε $T_i < T_j$ για $i < j$. Τότε κάθε επιβάτης θέλοντας να μειώσει το κόστος ταξιδιού του θα πρέπει να ταξιδέψει σε χρόνο T_i για κάποιο i . Ο επιβάτης θα επιλέξει το λεωφορείο με το μικρότερο προγραμματισμένο κόστος και άρα κάποιος με t^* θα επιλέξει το λεωφορείο 1 αν $t^* \leq T_1$ και το λεωφορείο n αν $t^* \geq T_n$. Εάν δεν ισχύουν οι ανισότητες αυτές έχουμε $T_i \leq t^* \leq T_{i+1}$ για κάποιο $i = 1, 2, \dots, n-1$. Δηλαδή θεωρώντας πως κάποιος ο οποίος είναι αδιάφορος επιλέγει το λεωφορείο που θα το μεταφέρει νωρίτερα στον προορισμό του. Τότε κάποιος με t^* που βρίσκεται $T_i \leq t^* \leq T_{i+1}$ επιλέγει

$$\beta(t^* - T_i) \leq \gamma(T_{i+1} - t^*)$$

το λεωφορείο i αν

ενώ σε αντίθετη περίπτωση επιλέγει το λεωφορείο $i+1$. Θεωρώντας τώρα και τις οριακές περιπτώσεις που είπαμε προηγουμένως έχουμε :

$$t^*_{i,i+1} = \begin{cases} (\beta T_i + \gamma T_{i+1}) / (\beta + \gamma), & i = 1, \dots, n-1, \\ 0 & i = 0, \\ 1 & i = n. \end{cases} \quad (4.3.1 - 2)$$

Στην περίπτωση που έχουμε $\beta = \gamma$ τότε η μετατόπιση της αγοράς θεωρούμε ότι δεν υπάρχει. Εάν το κόστος της πρόωρης άφιξης αυξηθεί τότε η μετατόπιση παρατηρείται να μετακινείται προς τα επόμενα λεωφορεία ($i+1$) ενώ σε διαφορετική περίπτωση προς τα λεωφορεία i .

4.3.1.1.1 Βέλτιστες Αφίξεις – Αναχωρήσεις με Ομογενείς Συναρτήσεις Προγραμματισμένου Κόστους

Ο όρος ομογενείς εδώ έχει την εξής σημασία ότι το προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης είναι ίδιο που μπορεί να μην συμφωνεί απαραίτητα με τους επιθυμητούς χρόνους ταξιδιού μεταξύ δύο επιβατών.

Οι μελετητές επιλέγουν $T_1, T_2, \dots, T_n$ για να ελαχιστοποιήσουν το συνολικό προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης των N επιβατών.

Το πρόβλημα όπως αναφέρθηκε στην αρχή έχει σχέση με το πρόβλημα s -continuous p -median της επιχειρησιακής έρευνας.

[Σε περίπτωση που υπάρχουν οι Αφίξεις-Αναχωρήσεις για n λεωφορεία και οι τιμές κόστους για την λειτουργία και τις σταθερές τιμές κόστους για κάθε λεωφορείο είναι δυνατό να λυθεί το πρόβλημα που για συγκεκριμένο αριθμό λεωφορείων θα βρεθεί το ελάχιστο άθροισμα των προγραμματισμένων κοστών καθυστέρησης των επιβατών και το κόστος του συστήματος των λεωφορείων. Αυτό το πρόβλημα λύνεται από τους Kraus & Yoshida (1999).]

4.3.1.1.2 Συνθήκες Βελτιστοποίησης

Αν f είναι συνάρτηση πυκνότητας που συσχετίζεται με την κατανομή των επιθυμητών χρόνων ταξιδιού F . Τότε για κάποιο Πίνακα $A-A$

$$\begin{aligned} C(T_1, \dots, T_n) = & \gamma \int_0^{T_1} (T_1 - t) f(t) dt + \beta \int_{T_1}^{t^{*,1,2}} (t - T_1) f(t) dt + \dots \\ & + \gamma \int_{t^{*,i-1,i}}^{T_i} (T_i - t) f(t) dt + \beta \int_{T_i}^{t^{*,i,i+1}} (t - T_i) f(t) dt + \dots \\ & + \gamma \int_{t^{*,n-1,n}}^{T_n} (T_n - t) f(t) dt + \beta \int_{T_n}^L (t - T_n) f(t) dt. \end{aligned}$$

$T_1, T_2, \dots, T_n$ το συνολικό προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης θα είναι :

Η πρώτη γραμμή δηλώνει το κόστος που συναντούν οι επιβάτες του πρώτου λεωφορείου στην δεύτερη γραμμή είναι το κόστος στο λεωφορείο i και η τελευταία γραμμή δηλώνει το προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης του λεωφορείου n .

Η συνάρτηση C πρέπει να ελαχιστοποιηθεί με την επιλογή συγκεκριμένων $T_1, \dots, T_n$ πράγμα καθόλου εύκολο αφού η C μπορεί να μην είναι κυρτή συνάρτηση των $T_1, \dots, T_n$. Σε αυτή την περίπτωση η

μέθοδος του Newton-Raphson για σύγκλιση μπορεί να μην δώσει αποτέλεσμα για την εύρεση συνολικού ελάχιστου (Global Minimum). Για να μπορέσουμε να προχωρήσουμε την ανάλυση θα θεωρήσουμε ότι η παράγωγος της (όπως αποδεικνύεται ακόμα και για την γενικότερη μορφή μη ομογενής περίπτωσης $\beta \neq \gamma$) $C(0)$ ορίζει όντως συνολικό ελάχιστο. Σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση πυκνότητας $f(0)$ ομοιόμορφη. Άρα για το πρώτο λεωφορείο θα έχουμε :

$$\begin{aligned} \frac{\partial C(T_1, \dots, T_n)}{\partial T_1} &= \gamma \int_0^{T_1} f(t) dt - \beta \int_{T_1}^{t_{1,2}^*} f(t) dt + \\ &+ \left[\beta (t_{1,2}^* - T_1) - \gamma (T_2 - t_{1,2}^*) \right] f(t_{1,2}^*) \frac{\partial t_{1,2}^*}{\partial T_1} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (4.3.1-3)$$

Υπάρχουν τρεις διακριτοί όροι στην παραπάνω εξίσωση που και εξηγούνται με την σειρά τους. Ο πρώτος όρος συμβολίζει την αύξηση του κόστους από την αργοπορημένη άφιξη για επιβάτες του λεωφορείου 1 που θέλησαν να ταξιδέψουν σε χρόνο νωρίτερο από T_1 . Ο δεύτερος όρος την μείωση στο κόστος από την πρόωρη άφιξη για επιβάτες του λεωφορείου 1 που δεν ταξίδεψαν σε χρόνο T_1 . Ο τρίτος όρος συμβολίζει την αλλαγή στο προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης για επιβάτες με $t^* = t_{1,2}^*$ οι οποίοι προτιμούν αντί να ταξιδέψουν και να φτάσουν αργά με το λεωφορείο 2, να ταξιδέψουν και να φτάσουν νωρίς με το λεωφορείο 1. Όμως ο τρίτος όρος είναι μηδέν (λόγω $t_{i,i+1}^*$) και άρα :

$$\gamma \int_0^{T_1} f(t) dt = \beta \int_{T_1}^{t_{1,2}^*} f(t) dt \quad (4.3.1-4)$$

και αυτό ισχύει για όλα τα λεωφορεία δηλαδή γενικότερα :

$$\gamma \int_{t_{i-1,i}^*}^{T_i} f(t) dt = \beta \int_{T_i}^{t_{i,i+1}^*} f(t) dt \quad (4.3.1-5)$$

όπου $t_{i,i+1}^*$ δίνονται από την εξίσωση όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω. Για ένα λεωφορείο ($n=1$) η λύση για μια άφιξη αναχώρηση θα ήταν :

$$F(T_1^0) = \frac{\beta}{\beta + \gamma} \quad (4.3.1-6)$$

για περισσότερα λεωφορεία αφού εμπλέκονται ολοκληρώματα αριθμητικές μέθοδοι έρχονται για να βοηθήσουν στην εύρεση λύσης.

4.3.1.1.3 Ομοιόμορφη Κατανομή των Επιθυμητών Χρόνων Ταξιδιού

Αν υποθέσουμε ότι οι χρόνοι t^* κατανέμονται ομοιόμορφα με :

$$\begin{aligned} f(t^*) &= N / L \quad \text{για } 0 \leq t^* \leq L \quad \text{και} \\ f(t^*) &= 0 \quad \text{διαφορετικά} \end{aligned}$$

και αν θεωρήσουμε πως έχουμε ένα λεωφορείο τότε αυτό το λεωφορείο θα βρίσκεται στο $[0, L]$ όταν :

$$T^0_1 = \frac{\beta}{\beta + \gamma} L \quad (4.3.1 - 7)$$

Όταν το λεωφορείο δρομολογηθεί νωρίτερα τόσο μεγαλύτερο θα είναι το κόστος / λεπτό αν αργοπορήσει σε σχέση με την πρόωρη άφιξη.

Για κάθε επιβάτη το μέσο προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης θα είναι :

$$c^0_{n=1} = \frac{1}{2} \frac{\beta \gamma}{\beta + \gamma} L \quad (4.3.1 - 8)$$

Βλέπουμε ακόμα ότι επιβάτες με τον πρόωρο επιθυμητό χρόνο $t^* = 0$ και επιβάτες με τον πιο αργό χρόνο $t^* = L$ υπόκεινται στα μεγαλύτερα προγραμματισμένα κόστη $\gamma T^0_{1,n=1} = [\beta \gamma / (\beta + \gamma)] L$ και $\beta (L - T^0_{1,n=1}) = [\beta \gamma / (\beta + \gamma)] L$. Ενώ ο επιβάτης με $t^* = T^0_{1,n=1}$ δεν υπόκειται σε κανένα κόστος καθυστέρησης.

Κατά τα άλλα αφού θεωρήσαμε ομοιόμορφη κατανομή βλέπουμε πως το μέσο προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης θα είναι το μισό του μέγιστου όπως φαίνεται από την εξίσωση (4.3.1-8).

Αν τώρα θεωρήσουμε ότι υπάρχουν n λεωφορεία τότε οι συνθήκες πρώτης παραγωγού στις (4.3.1-5) και (4.3.1-6) θα δίνουν :

$$\gamma \frac{N}{L} T_1 = \beta \frac{N}{L} (t^*_{1,2} - T_1) \quad (4.3.1 - 9)$$

$$\gamma \frac{N}{L} (T_i - T_{i-1,i}) = \beta \frac{N}{L} (t^*_{i,i+1} - T_i), \quad i = 2, \dots, n-1 \quad (4.3.1 - 10)$$

$$\gamma \frac{N}{L} (T_n - t^*_{n-1,n}) = \beta \frac{N}{L} (L - T_n) \quad (4.3.1 - 11)$$

Οι εξισώσεις (4.3.1-9)-(4.3.1-11) έχουν μοναδική λύση και είναι συνολικό μέγιστο όπως αναφέραμε προηγουμένως και μπορεί να αποδειχτεί.

Κάνοντας αντικατάσταση την (4.3.1-2) στις (4.3.1-9)-(4.3.1-11) έχουμε :

$$T_2 = \frac{2\beta + \gamma}{\beta} T_1 \quad (4.3.1-12)$$

$$T_{i+1} = 2T_i - T_{i-1} \quad (4.3.1-13)$$

$$T_n = \frac{(\beta + \gamma)L + \gamma T_{n-1}}{\beta + 2\gamma} \quad (4.3.1-14)$$

Γενικά δηλαδή από (4.3.1-12) και (4.3.1-13) θα έχουμε :

$$T_i = \frac{i\beta + (i-1)\gamma}{\beta} T_1 \quad (4.3.1-15)$$

Από (14) και (15) έχουμε ότι $T_1 = (\beta/\beta + \gamma)L/n$ και από την (4.3.1-15) καταλήγουμε στην :

$$T_{i,n}^0 = \left(i - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \right) \frac{L}{n}, \quad i = 1, \dots, n-1$$

Το συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι ο Πίνακας Α-Α θα είναι επαναλαμβανόμενος, περιοδικός. Κάθε λεωφορείο εξυπηρετεί επιβάτες με L/n και μεταφέρει N/n άτομα. Τα όρια της αγοράς τότε θα είναι :

$$t_{i,i+1}^* = i \frac{L}{n}, \quad i = 1, \dots, n-1$$

Το μέσο κόστος καθυστέρησης μπορεί να μειωθεί εάν στην (4.3.1-8) βάλουμε αντί για L το L/n :

$$c_n^0 = \frac{1}{2} \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{L}{n} \quad (4.3.1-16)$$

Η λύση έτσι έχει κάποιες ιδιότητες οι οποίες και αναφέρονται :

- Τα λεωφορεία χωρίζονται με απόσταση L/n και το καθένα μεταφέρει N/n επιβάτες.
- Ένα πηλίκο $(\beta/\beta + \gamma)$ από τους επιβάτες καταφτάνουν αργά και ένα πηλίκο $(\gamma/\beta + \gamma)$ καταφτάνουν πρόωρα .
- Το μέσο κόστος για την γρήγορη ή αργοπορημένη άφιξη είναι ίδιο και ίσο με c_n^0 .
- Το ποσοστό του κόστους των αργοπορημένων και των πρόωρων αφίξεων είναι β/γ .
- Αν $\beta = \gamma$ τότε τα λεωφορεία καθορίζονται με αποστάσεις $(1/2)L/n, (3/2)L/n, \dots, (2n-1/2)L/n$, το οποίο και αποτελεί λύση της Location Theory (πχ. Archibald et al. 1986).
- Αν οριακά $\beta/\gamma \rightarrow 0$, $T_{i,n}^0 \rightarrow (i-1)L/n$ για $i = 1, \dots, n$. Δηλαδή όταν των αργοπορημένων το κόστος απειρίζεται σχετικά με τις πρόωρες

αφίξεις, τα λεωφορεία δρομολογούνται ώστε να μην χρειαστεί κανένας να αργοπωρήσει. Προφανώς ισχύει και το αντίστροφο.

4.3.1.1.4 Βέλτιστες Αφίξεις – Αναχωρήσεις με Μη Ομογενείς Συναρτήσεις Προγραμματισμένου Κόστους

Όλα τα παραπάνω είχαν σαν αφετηρία το γεγονός ότι το κόστος ήταν ίδιο για όλους τους επιβαίνοντες στα οχήματα. Στην πραγματικότητα όμως το προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες και δεν είναι ίδιος προφανώς για τους επιβάτες. Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος είναι ο σκοπός του ταξιδιού, η πίεση χρόνου, το επάγγελμα, η ηλικία, το φύλο, το εισόδημα, η οικογενειακή κατάσταση κ.α. Για παράδειγμα ως προς το επάγγελμα, τα άτομα που δουλεύουν ανεξάρτητα όπως ποιητές, συγγραφείς, προγραμματιστές συνήθως δεν έχουν δυνατές επιθυμίες και πίεση χρόνου σε σχέση με εκείνους που πρέπει μια συγκεκριμένη ώρα να βρίσκονται σε συγκεκριμένο πόστο αφού συνεργάζονται με άλλους στην δουλειά τους, όπως λιμενεργάτες, αποθηκάριοι και δημόσιοι υπάλληλοι.

Έστω ότι υπάρχουν k κατηγορίες επιβατών, που συμβολίζονται και με k και η κατηγορία περιέχει N^k άτομα με κόστη αντίστοιχα β^k και γ^k και με μια συνάρτηση πυκνότητας (που εκφράζει την κατανομή των επιθυμητών χρόνων ταξιδιού) που συμβολίζεται με g^k . Μπορούμε τώρα να εκτιμήσουμε τα παραπάνω και πάλι με βάση της διαδικασία που ακολουθήσαμε και προηγουμένως.

4.3.1.1.5 Συνθήκες Βελτιστοποίησης

Ορίζουμε $f^k \equiv N^k g^k$. Η επιλογή του λεωφορείου από την κατηγορία k θα

$$t^{k*}_{i,i+1} = \begin{cases} (\beta^k T_i + \gamma^k T_{i+1}) / (\beta^k + \gamma^k) & i=1, \dots, n-1 \\ 0 & i=0, k=1, \dots, K \\ L & i=n \end{cases} \quad (4.3.1-17)$$

υπόκειται σε ανάλογα όρια με αυτής της εξίσωσης (4.3.1-2) :

Για ένα δεδομένο Πίνακα A-A $T_1, \dots, T_n$ το συνολικό κόστος για όλους τους χρήστες θα είναι:

$$C(T_1, \dots, T_n) = \sum_k \left[\gamma^k \int_0^{T_1} (T_1 - t) f^k(t) dt + \beta^k \int_{T_1}^{t^{k*}_{1,2}} (t - T_1) f^k(t) dt + \dots \right. \\ \left. + \gamma^k \int_{t^{k*}_{i-1,i}}^{T_i} (T_i - t) f^k(t) dt + \beta^k \int_{T_i}^{t^{k*}_{i,i+1}} (t - T_i) f^k(t) dt + \dots \right. \\ \left. + \gamma^k \int_{t^{k*}_{n-1,n}}^{T_n} (T_n - t) f^k(t) dt + \beta^k \int_{T_n}^L (t - T_n) f^k(t) dt \right]$$

Η πρώτη παράγωγος για τον χρόνο του πρώτου λεωφορείου είναι :

$$\frac{\partial C(T_1, \dots, T_n)}{\partial T_1} = \sum_k \left[\gamma^k \int_0^{T_1} f^k(t) dt - \beta^k \int_{T_1}^{t^{k*}_{1,2}} f^k(t) dt \right] \\ + \sum_k \left\{ \left[\beta^k (t^{k*}_{1,2} - T_1) - \gamma^k (T_2 - t^{k*}_{1,2}) \right] f^k(t^{k*}_{1,2}) \frac{\partial t^{k*}_{1,2}}{\partial T_1} \right\} = 0$$

(4.3.1-18)

Η εξίσωση (4.3.1-18) μπορεί να ερμηνευτεί με τον ίδιο τρόπο όπως και η (4.3.1-3) για ομογενείς επιβάτες. Όπως και στην εξίσωση (4.3.1-3) έτσι και ο όρος στις μεγάλες αγκύλες στην δεύτερη γραμμή είναι μηδέν για όλες τις k και αντίστοιχα με την εξίσωση (4.3.1-4) έχουμε :

$$\sum_k \left[\gamma^k \int_0^{T_1} f^k(t) dt \right] = \sum_k \left[\beta^k \int_{T_1}^{t^{k*}_{1,2}} f^k(t) dt \right] \quad (4.3.1-19)$$

και σε αναλογία με την εξίσωση (4.3.1-5) θα έχουμε :

$$\sum_k \left[\gamma^k \int_{t^{k*}_{i-1,i}}^{T_i} f^k(t) dt \right] = \sum_k \left[\beta^k \int_{T_i}^{t^{k*}_{i,i+1}} f^k(t) dt \right], \quad i = 2, \dots, n \quad (4.3.1-20)$$

Οι λύσεις από τις (4.3.1-19) και (4.3.1-20) θα ονομάζονται ετερογενής ασύμμετρης (Heterogeneous Asymmetric) S-continuous n-median των κατανομών f^k .

4.3.1.1.6 Ομοιόμορφες Κατανομές των Επιθυμητών Χρόνων Άφιξης

Εδώ υποθέτουμε ότι οι επιθυμητοί χρόνοι άφιξης σε κάθε κατηγορία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε διάστημα $[0, L]$. Με αυτή την προϋπόθεση είναι δυνατόν να βρούμε μια επιθυμητή βέλτιστη λύση Αφίξεων – Αναχωρήσεων και να αντιστοιχίζουμε την ομογενή λύση. Αν θεωρήσουμε ότι $\delta^k \equiv (\beta^k \gamma^k / \beta^k + \gamma^k)$, $\lambda^k \equiv N^k / N$ το ποσοστό του πληθυσμού που ανήκει σε αυτή την κατηγορία και τις μέσες τιμές των β^k και γ^k :

$$\begin{aligned} B &= \sum_k \lambda^k \beta^k, \\ \Gamma &= \sum_k \lambda^k \gamma^k, \\ \Delta &= \sum_k \lambda^k \delta^k. \end{aligned} \quad (4.3.1-21)$$

Για να μπορέσουμε να κάνουμε την σύγκριση με την λύση της ομογενούς περίπτωσης χρησιμοποιούμε

Λήμμα 1

Έστω ότι ορίζονται τα B, Γ, Δ όπως φαίνονται στην εξίσωση (4.3.1-21) τότε $B\Gamma \geq (B + \Gamma)\Delta$ ισχύει εκτός από την περίπτωση που γ^k / β^k είναι ίδιο για όλες τις κατηγορίες των επιβατών.

Πρόταση

Θεωρούμε το μη ομογενές μη συμμετρικό S-continuous n-median πρόβλημα στο διάστημα $[0, L]$ όταν οι επιθυμητοί χρόνοι ταξιδιού είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι για κάθε κατηγορία επιβατών. Τότε η βέλτιστη επιλογή (λύση) Αφίξεων-Αναχωρήσεων είναι:

$$T_{i,n}^0 = \frac{(i-1)B\Gamma + B\Delta}{(n-1)B\Gamma + (B + \Gamma)\Delta} L, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.3.1-22)$$

Με τα λεωφορεία να απέχουν απόσταση $(B\Gamma / ((n-1)B\Gamma + (B + \Gamma)\Delta))L$ ενώ τα όρια της αγοράς θα δίνονται από τον παρακάτω τύπο για κάθε κατηγορία k :

$$t_{i,i+1}^{k*} = \frac{(i-1)B\Gamma + B\Delta + \frac{\gamma^k}{\beta^k + \gamma^k} B\Gamma}{(n-1)B\Gamma + (B + \Gamma)\Delta} L, \quad i = 1, \dots, n-1 \quad k = 1, \dots, K$$

ενώ το προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης θα είναι:

$$c_n^0 = \frac{1}{2} \frac{B\Gamma\Delta}{(n-1)B\Gamma + (B+\Gamma)\Delta} L \quad (4.3.1-23)$$

Αν θυμηθούμε ότι για την ομογενή περίπτωση έχουμε αποστάσεις μεταξύ L/n με φόρτους ίσους N/n . Με τους μη ομογενείς επιβάτες έχουμε ομοιόμορφες αποστάσεις μεταξύ των λεωφορείων αλλά αυτές οι αποστάσεις θα είναι μεγαλύτερες. Η διαφορά στην απόσταση θα είναι σύμφωνα με την προηγούμενη πρόταση :

$$\frac{B\Gamma}{(n-1)B\Gamma + (B+\Gamma)\Delta} L - \frac{1}{2} L^s = B\Gamma - (B+\Gamma)\Delta \geq 0, \quad (4.3.1-24)$$

όπου η ισότητα με το s εννοεί ίδιο σε συμβολισμό. Σύμφωνα με το Λήμμα 1 το δεξί μέρος της εξίσωσης (4.3.1-24) είναι μεγαλύτερο από το μηδέν εκτός αν τα κόστη είναι ίδια. Τα άτομα που δεν θέλουν να αργήσουν (μεγάλο β^k / γ^k) εξυπηρετούνται από τον προγραμματισμό του πρώτου λεωφορείου νωρίς έτσι ώστε λίγοι επιβάτες να υποχρεωθούν στο να ταξιδέψουν αργά. Αντίστοιχα άτομα που δεν θέλουν να φτάσουν νωρίτερα (μικρό β^k / γ^k) εξυπηρετούνται από το τελευταίο λεωφορείο αργά. Συγκρίνοντας λοιπόν με τον Πίνακα Α-Α στην περίπτωση ομογενών επιβατών μπορούμε να πούμε πως τα λεωφορεία θα λειτουργούν σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κατά την διάρκεια της ημέρας όταν οι επιβάτες διαφέρουν ως προς τα κόστη καθυστέρησης πρόωρης και αργοπορημένης άφιξης.

Βρίσκουμε τώρα τους χρόνους που δρομολογούνται το πρώτο και το τελευταίο λεωφορείο όπως είχε γίνει νωρίτερα για την ομογενή περίπτωση, για την οποία ήταν $T_{1,n}^0 = (\beta/\beta+\gamma)L/n$ και $T_{n,n}^0 = [n-(\gamma/\beta+\gamma)]L/n$. Με μια κατηγορία $B = \beta$ και μια $\Gamma = \gamma$ τότε οι εξισώσεις μπορούν να γραφτούν και πάλι ως $T_{1,n}^0 = (B/B+\Gamma)L/n$ και $T_{n,n}^0 = [n-(\Gamma/B+\Gamma)]L/n$. Η σύγκριση των χρόνων για την περίπτωση των μη ομογενών επιβατών θα είναι :

$$T_{1,n}^0 - \frac{B}{B+\Gamma} \frac{L}{n} = \left[\frac{nB\Delta}{(n-1)B\Gamma + (B+\Gamma)\Delta} - \frac{B}{B+\Gamma} \right] \frac{L}{n} \stackrel{s}{=} (B+\Gamma)\Delta - B\Gamma \leq 0, \quad (4.3.1-25)$$

και για το τελικό λεωφορείο

$$T_{n,n}^0 - \left[n - \frac{\Gamma}{B+\Gamma} \right] \frac{L}{n} = \left[n \frac{(n-1)B\Gamma + B\Delta}{(n-1)B\Gamma + (B+\Gamma)\Delta} - \left(n - \frac{\Gamma}{B+\Gamma} \right) \right] \frac{L}{n} \stackrel{s}{=} B\Gamma - (B+\Gamma)\Delta \geq 0, \quad (4.3.1-26)$$

Ακόμα κάποιος μπορεί να υποψιαστεί ότι με αυτό το σύστημα ταξιδεύουν λιγότεροι επιβάτες για αυτό βρίσκουμε και τον αριθμός των επιβατών για το πρώτο και τελευταίο λεωφορείο :

$$N_1 = \sum_k \frac{N^k}{L} t_{1,2}^{k*} = \frac{B\Gamma + \left(\sum_{\kappa} (\gamma^{\kappa} / \beta^{\kappa} + \gamma^{\kappa}) N^{\kappa} / N \right) B\Gamma}{(n-1)B\Gamma + (B + \Gamma)\Delta} N, \quad (4.3.1 - 27)$$

Και

$$N_n = \sum_k \frac{N^k}{L} (L^k - t_{n-1,n}^{k*}) = \frac{B\Gamma + \Gamma\Delta - \left(\sum_{\kappa} (\gamma^{\kappa} / \beta^{\kappa} + \gamma^{\kappa}) N^{\kappa} / N \right) B\Gamma}{(n-1)B\Gamma + (B + \Gamma)\Delta} N. \quad (4.3.1 - 28)$$

Και ακόμα

$$N_1 - N_n - \frac{2}{n} N^s = -(n-2)[B\Gamma - (B + \Gamma)\Delta].$$

Το δεξί μέρος της παραπάνω εξίσωσης είναι αυστηρά αρνητικό για $n \geq 3$ από το Λήμμα 1, εκτός και αν γ^k / β^k είναι ίδια για όλες τις κατηγορίες. Ως εκ τούτου μπορούμε να πούμε πως το πρώτο και το τελευταίο λεωφορείο μεταφέρει λιγότερο από το μέσο όρο των του επιβατικού φόρτου.

Τέλος τονίζεται ότι ισχύει όπως και για την ομογενή περίπτωση πως όποιοι δεν θέλουν να αργήσουν μπορούν να εξυπηρετηθούν από το πρώτο λεωφορείο το οποίο δρομολογείται νωρίτερα ώστε να μην χρειαστεί να αργοπορήσουν οι επιβάτες και αντίστροφα. Αυτό προφανώς ισχύει για κάθε κατηγορία. Άρα είναι προς όφελος των μελετητών να εφαρμόζεται η περίπτωση αυτή στην πράξη.

Ακόμα ερχόμαστε σε μια ερώτηση η οποία διατυπώνεται ως εξής :

Αν θεωρήσουμε πως στον Πίνακα Α-Α δεν υπάρχει ετερογένεια τότε πόσο θα αυξηθεί το κόστος καθυστέρησης των επιβατών ;

Η απάντηση έρχεται μέσα από την θεώρηση ενός μέσου αντιπροσωπευτικού επιβάτη και υπολογίζοντας τον χρόνο και το κόστος καθυστέρησης του από την ομογενή θεώρηση, αυτά θα είναι :

$$T_{i,n}^R = \left(i - \frac{\Gamma}{B + \Gamma} \right) \frac{L}{n}, \quad i = 1, \dots, n$$

και

$$c_n^R = \frac{1}{2} \Delta \frac{L}{n}. \quad (4.3.1 - 29)$$

όπου αντί για γ και β τοποθετήσαμε Γ και B αντίστοιχα και η σημείωση R σημαίνει ότι είναι η προσέγγιση αντιπροσωπευτικού επιβάτη (Representative). Όπως προκύπτει μετά από (πολλές) πράξεις ο μέσος χρόνος καθυστέρησης θα είναι :

$$c_n^R = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{1}{n} \frac{B\Gamma - (B + \Gamma)\Delta}{\Delta(B + \Gamma)} \right\} \Delta \frac{L}{n} \quad (4.3.1 - 30)$$

Τέλος για να γίνει κατανοητή η διαφορά μεταξύ προσέγγισης αντιπροσωπευτικού επιβάτη και βέλτιστης λύσης δίνεται

$$\frac{c_n^R - c_n^0}{c_n^0} = \frac{n-1}{n^2} \left[\frac{(B\Gamma - (B + \Gamma)\Delta)^2}{B\Gamma(B + \Gamma)\Delta} \right] = \frac{n-1}{n^2} \left[\frac{\left(1 - \frac{(B + \Gamma)\Delta}{B\Gamma} \right)^2}{\frac{(B + \Gamma)\Delta}{B\Gamma}} \right] \quad (4.3.1 - 31)$$

θέλοντας να δοκιμάσουμε στην πράξη θεωρώντας ότι $\beta^1=1$ και $\gamma^1=1$ ενώ για μια κατηγορία 2, $\beta^2=1$ και υποθέτοντας ότι $\gamma^2/\beta^2 = r(\gamma^1/\beta^1)$ με $r \ll 1$ και έστω ότι έχουμε 2 λεωφορεία βάσει των παραπάνω εξισώσεων υπολογίζουμε το κόστος που θα είναι :

$$\frac{(B + \Gamma)\Delta}{B\Gamma} = \frac{(6 + 4r)(1 + 9r)}{10(1 + r)(1 + 4r)}$$

που σημαίνει ότι αν $\gamma^2/\beta^2 = \gamma^1/\beta^1$ τότε $r=1$ και όπως προκύπτει δεν υπάρχει λάθος (αύξηση) στην εκτίμηση του προγραμματισμένου κόστους καθυστέρησης (Αναμενόμενο).

Αν όμως γ^2/β^2 τότε το $r = 1/4$ που σημαίνει $(B + \Gamma)\Delta/B\Gamma = 0.91$ ενώ $(c_n^R - c_n^0 / c_n^0) \cong 0,025$ δηλαδή το κόστος αυξήθηκε μόνο κατά 2,5 %. Αν αυξήσουμε τα λεωφορεία σε 5 στον αριθμό το κόστος αυξάνει μέχρι και 10 % σε σχέση με την βέλτιστη λύση. Αν $\gamma = 0$ τότε $(B + \Gamma)\Delta/B\Gamma = 3/5$ και $(c_n^R - c_n^0 / c_n^0) = 1/6$.

Αυτό το γεγονός μας ωθεί στο συμπέρασμα ότι πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά η συλλογή πληροφοριών σχετικά με τον σκοπό μετακίνησης

των επιβατών διότι καθορίζει την συμπεριφορά τους και άμεσα το κόστος της καθυστέρησης.

4.3.1.2 Κυκλικό Μοντέλο

Έως τώρα είχαμε υποθέσει ότι η κατανομή των επιθυμητών χρόνων μετακίνησης γινόταν σε ένα μέρος της ημέρας και ότι τα δρομολόγια δεν μπορούσαν να επανασχεδιαστούν από την μια μέρα στην άλλη. Εδώ πια θεωρούμε πως γίνεται κατανομή κατ' όλη την διάρκεια του 24-ώρου και ο επανασχεδιασμός μεταξύ των ημερών επιτρέπεται. Αυτό απλά σημαίνει πως κάποιος επιβάτης που προτιμά να ταξιδεύει την ημέρα d ΔΕΝ θα πάρει απαραιτήτως το πρώτο λεωφορείο της ημέρα d αλλά το τελευταίο της ημέρας $d-1$. Ομοίως αν κάποιος θέλει να ταξιδέψει μετά το λεωφορείο n της μέρας d μπορεί να επιλέξει να πάρει το πρώτο λεωφορείο της ημέρας $d+1$.

Το γραμμικό μοντέλο όπως και το κυκλικό χρησιμοποιούνται για να βγουν συμπεράσματα σχετικά με τον σκοπό μετακίνησης των επιβατών αν και αυτός δεν μπορεί να είναι γνωστός πάντα, έχουμε δηλαδή μια εξιδανίκευση της πραγματικότητας όμως παρόλα αυτά τα συμπεράσματα είναι αξιοσημείωτα και χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής.

Στο κυκλικό μοντέλο η ανάλυση δεν αλλάζει στην ουσία. Η μόνη διαφορά με το γραμμικό μοντέλο θα είναι η διαφορά στον ορισμό των ορίων της αγοράς των λεωφορείων στην εξίσωση (4.3.1-17). Αν L τώρα συμβολίζει την διάρκεια του 24-ώρου αντί για $t_{0,1}^{k*} = 0$ έχουμε $t_{n,1}^{k*} = (\beta^k(T_n - L) + \gamma^k T_1 / (\beta^k + \gamma^k))$. Αντί για $t_{n,n+1}^{k*} = L$ θα έχουμε $t_{n,n+1}^{k*} = (\beta^k T_n + \gamma^k(T_1 - L) / (\beta^k + \gamma^k))$. Αν προσέξουμε όμως θα δούμε πως οι εξισώσεις είναι ίδιας μορφής αφού το $n+1$ λεωφορείο είναι το 1 λεωφορείο της επόμενης ημέρας. Άρα θα έχουμε :

$$t_{i,i+1}^{k*} = \frac{\beta^k T_i + \gamma^k T_{i+1}}{\beta^k + \gamma^k}, \quad i=1, \dots, n \quad k=1, \dots, K \quad (4.3.1-33)$$

Με $T_0 = T_n - L$ και $T_{n+1} = T_1 + L$

Που σημαίνει ότι τα όρια των λεωφορείων στο τέλος της ημέρας εξαρτώνται από την απόφαση των επιβάτες και όχι από τους περιορισμούς για το τελευταίο λεωφορείο. Ενώ αυτή η μικρή αλλαγή φαίνεται ανώδυνη σε ετερογενής περίπτωση των επιβατών επηρεάζει την λύση του Πίνακα Α-Α με ποιοτικό τρόπο.

Για να μπορέσουμε να δούμε την διαφορά θα υπολογίσουμε και πάλι το μέσο κόστος καθυστέρησης για μια συγκεκριμένη κατηγορία k σε αναλογία με την (4.3.1-16):

$$c_n^{k0} = \frac{1}{2} \frac{\beta^k \gamma^k}{\beta^k + \gamma^k} \frac{L}{n}$$

και το μέσο κόστος καθυστέρησης για όλους τους επιβάτες όλων των κατηγοριών και αφού υπάρχει περιοδικότητα των Αφίξεων – Αναχωρήσεων :

$$c_n^0 = \sum_k \lambda^k c_n^{k0} = \frac{1}{2} \left(\sum_k \lambda^k \frac{\beta^k \gamma^k}{\beta^k + \gamma^k} \right) \frac{L}{n} = \frac{1}{2} \Delta \frac{L}{n} \quad (4.3.1 - 34)$$

Η εξίσωση (4.3.1-34) είναι αντίστοιχη της (4.3.1-23) και προκειμένου να γίνει μια σύγκριση βρίσκουμε το κόστος ενός αντιπροσωπευτικού επιβάτη και πάλι για να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το κυκλικό μοντέλο σε σχέση με το γραμμικό μοντέλο δίνει μικρότερα κόστη καθυστέρησης αφού μπορεί να γίνει επανασχεδίαση από τους επιβάτες των δρομολογίων τους, από μέρα σε μέρα.

Κάνοντας τους υπολογισμούς αυτό που προκύπτει είναι ότι η μέθοδος αντιπροσωπευτικού επιβάτη αυξάνει τα σωστά κόστη κατά 10% για $r = 1/4$ και μέχρι $2/3$ για την περίπτωση που $r = 0$. Η μεγάλη αυτή διαφορά συμβαίνει γιατί δεν λαμβάνει υπόψη την επιλογή του επιβάτη για το λεωφορείο ανάλογα με το εάν επιθυμούν να ταξιδέψουν αργά ή γρήγορα.

Απορρέει λοιπόν ότι οι εταιρίες και οι οργανισμοί που θα στηριχθούν σε μια τέτοια ανάλυση πρέπει να προσέξουν για να μην υπάρχει μεγαλύτερο προβλεπόμενο κόστος που θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη επένδυση στην χωρητικότητα των λεωφορείων.

Τέλος εδώ έμφαση δόθηκε στα αποτελέσματα, τα οποία και βγαίνουν αβίαστα από την Location Theory ότι δηλαδή οι ιδιότητες των προβλημάτων ‘Κατανομής’ εξαρτώνται άμεσα από το εάν θεωρείται το γραμμικό μοντέλο ή το κυκλικό μοντέλο.

4.3.2 Μέγιστος Συγχρονισμός του Πίνακα A-A

Η μέθοδος που προτείνεται εδώ είναι των A. Ceder, B.Golany και O.Tal [Ceder et al (1999)] οι οποίοι και στηρίζονται ως επί των πλείστον στην Κλασσική Φιλοσοφία που έχει αναφερθεί από τους Ceder και Wilson (1986). Έτσι σύμφωνα με τον Ceder (1986) η συζήτηση για την δημιουργία Πίνακα A-A πρέπει να γίνει σε τρία επίπεδα.

1. Επιλογή του τύπου της χρονοαπόστασης. Αν δηλαδή θα είναι ίσες χρονοαποστάσεις ή μεταβλητές.
2. Επιλογή της μεθόδου για τον καθορισμό των συχνοτήτων (μέγιστο σημείο φόρτισης ή μια μέση φόρτιση).
3. Επιλογή ενός ή περισσοτέρων αντικειμενικών συναρτήσεων μέσο της οποίας θα πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός (για παράδειγμα ελαχιστοποίηση του κόστους του Οργανισμού, προσφέροντας επαρκεί εξυπηρέτηση ή μέσω συντελεστών βαρύτητας.).

Συνήθως μια γενική προσέγγιση που γίνεται από την πλευρά των επιβατών περιλαμβάνει μια ελαχιστοποίηση του χρόνου ταξιδιού και του χρόνου αναμονής και αν γίνεται και της απόστασης βαδίσματος. Εδώ θεωρούμε πως υπάρχει ένα δίκτυο ήδη που εξυπηρετεί τα ζεύγη Π-Π και η σημασία δίνεται στον μέγιστο συγχρονισμό μεταξύ των γραμμών. Ο μέγιστος συγχρονισμός αυτός είναι σημαντικός από την πλευρά εξυπηρέτησης των επιβατών αλλά και για τον Οργανισμό που προσφέρει συγκεκριμένο επίπεδο εξυπηρέτησης με κάποιο κόστος. Σε προηγούμενες αναλύσεις έχει προταθεί να μην υπάρχουν πολλά σημεία μεταφοράς (μετεπιβίβασης) επιβατών και αλλαγής γραμμής ή μέσου, από τον σχεδιασμό κιάλας του δικτύου λόγω της δυσανεξίας των επιβατών προφανώς. Όμως κανείς δεν μπορεί να πει πως δεν υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ αυτών των σημείων και του κόστους του Οργανισμού. Πρέπει λοιπόν να γίνει μια ισορροπημένη επιλογή τέτοιων σημείων ώστε να μειώνεται το κόστος του Οργανισμού αλλά να μην δυσχεραστούν οι επιβάτες. Με σκοπό να επιτραπεί ένα ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης οι μελετητές αντιμετωπίζουν ζητήματα συγχρονισμού των γραμμών ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος αναμονής στις στάσεις. Εάν αυτό επιτευχθεί οι μελετητές έχουν καταφέρει να κάνουν το σύστημα πιο ελκυστικό και υπάρχουν οι προϋποθέσεις να αυξηθούν οι επιβάτες που διαλέγουν τα λεωφορεία (αντίστοιχα θα μπορούσε να είναι οποιοδήποτε ΜΜΜ, αλλά τα λεωφορεία έχουν τις μεγαλύτερες δυσκολίες).

Λόγω της δυσκολία που υπάρχει σε ένα τέτοιο εγχείρημα οι προσεγγίσεις των μελετητών είναι περισσότερο βάση ενστίκτου και πείρας. Οι μελετητές αυτό που κάνουν στην πραγματικότητα είναι να προσπαθούν να φτιάξουν χρόνους Αναχώρησης που συμμορφώνονται με :

- i) Την απαιτούμενη συχνότητα.
- ii) Την ανάθεση δρομολογίων συγκεκριμένη γραμμής σε σύνολο λεωφορείων.
- iii) Συγχρονισμό συγκεκριμένων Αφίξεων

Παρακάτω θα παρουσιασθεί το πρόβλημα όπως διατυπώνεται σε μαθηματική μορφή, αλλά όχι αναλυτικά η επίλυση μέσω αλγόριθμου ευρετικού. Ωστόσο θα δοθεί έμφαση στα αποτελέσματα αυτής λύσης και τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν.

Το πρόβλημα όπως παρουσιάζεται εδώ δεν έχει μεγάλη βιβλιογραφία. Ο Voss (1992) διατύπωσε το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του χρόνου αναμονής των επιβατών στους κόμβους μεταφοράς (μετεπιβίβασης) ως Τετραγωνικό Πρόβλημα Ανάθεσης (Quadratic Assignment Problem) όπως αυτό εξηγείται από τους Lawler (1963) και Hillier & Connors (1966). Η εργασία του αναφέρεται σε περιπτώσεις που κάθε λεωφορείο i ενώνεται από $n(i)$ δυνατούς χρόνους αναχώρησης. Το πρόβλημα διαφοροποιείται όταν δύο διαφορετικές γραμμές πρέπει να χρησιμοποιήσουν μια ίδια χαραγμένη διαδρομή, θεωρώντας πως θα πρέπει να εισαχθούν αποστάσεις ασφαλείας. Ο Disilet και Rousseau (1992) περιέγραψαν ένα διαφορετικό μοντέλο, που επιλέγει για την αρχή κάθε διαδρομής ένα χρόνο αρχής από ένα σύνολο χρόνων T . Η αντικειμενική συνάρτηση θέλει να ελαχιστοποιήσει την ποινή που σχετίζεται με τις μεταφορές από την γραμμή i στην γραμμή j . Η συνάρτηση ποινής μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες μεθόδους και λαμβάνει υπόψη την τυχαιότητα των χρόνων ταξιδιού.

Ο Daganzo (1990) παρουσιάζει το πρόβλημα του συντονισμού ενός δικτύου θεωρώντας μόνο έναν κόμβο, στο οποίο εισερχόμενες και εξερχόμενες γραμμές τέμνονται. Ακόμα ο Lee και Schonfeld (1991) έκαναν μια προσπάθεια συντονισμού λεωφορειακής γραμμής και σιδηροδρομικής γραμμής με στοχαστικούς περιορισμούς. Αυτή η ανάλυση κατέληξε σε συμπέρασμα ότι δεν δικαιολογείται ο συγχρονισμός για καταστάσεις που επικρατούν μεγάλα ποσοστά από μεταβλητούς χρόνους Αφίξεων. Τέλος ο Chin & Schonfeld (1998) προσπάθησαν να βελτιστοποιήσουν το συνολικό κόστος ενώ ενοποίησαν την σιδηροδρομική γραμμή με τα λεωφορεία που την τροφοδοτούσαν, παρουσιάζοντας την πολυπλοκότητα του προβλήματος που αντιμετωπίζουν.

Σε τελική ανάλυση όλες οι παραπάνω αναλύσεις δεν πρόσφεραν στους μελετητές πρακτικές συμβουλές στο πρόβλημα του συγχρονισμού. Ο σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι να διατυπωθεί μαθηματικά το πρόβλημα των μελετητών και να τους δοθούν τα κατάλληλα εργαλεία για την αλλαγή του Πίνακα A-A ώστε να εξασφαλίζεται (σε ένα σύνολο από γραμμές) ο μέγιστος συγχρονισμός.

Ακολουθούν δύο μαθηματικές διατυπώσεις και ενώ περιγράφονται αναλυτικά και ο ευρετικός αλγόριθμος που απευθύνεται στους μελετητές δεν θα δοθεί σημασία στην παρουσίαση του αλλά στην ποιότητα της λύσης που προσφέρει.

4.3.2.1 Μαθηματική Διατύπωση Μοντέλου

Το δεδομένο δίκτυο λεωφορείου θα συμβολίζεται με $G = \{A, N^*\}$ όπου A είναι το σύνολο των συνδέσεων που εκφράζουν την διαδρομή του λεωφορείου στις γραμμές, N^* είναι κόμβοι μεταφοράς στο δίκτυο. Τα δεδομένα του προβλήματος είναι τα ακόλουθα :

T	είναι η περίοδος σχεδιασμού $[0, T]$
M	είναι ο αριθμός των λεωφορειακών γραμμών στο δίκτυο
N	είναι ο αριθμός των κόμβων μεταφοράς στο δίκτυο
H_{min_k}	είναι η ελάχιστη χρονοαπόσταση από τον Οργανισμό μεταξύ δύο γειτονικών χρόνων Αναχωρήσεων στην γραμμή k , $1 \leq k \leq M$
H_{max_k}	είναι η μέγιστη χρονοαπόσταση από τον Οργανισμό μεταξύ δύο γειτονικών χρόνων Αναχωρήσεων στην γραμμή k , $1 \leq k \leq M$
F_k	είναι ο αριθμός των αναχωρήσεων που προγραμματίζονται για την γραμμή k στο διάστημα $[0, T]$
T_{kj}	είναι ο χρόνος ταξιδιού από τον αρχικό κόμβο στην γραμμή k τον κόμβο j με $1 \leq k \leq M$ και $1 \leq j \leq N$. Μιλάμε προφανώς για τους μέσους χρόνους ταξιδιού.

Για να ισχύει η ανάλυση που θα γίνει υπάρχουν κάποιες προϋποθέσεις που οφείλουν να ικανοποιούνται για κάθε γραμμή k :

- Η πρώτη αναχώρηση λαμβάνει χώρα στο διάστημα $[0, H_{max_k}]$
- $H_{max_k} \geq H_{min_k}$ (4.3.2-1)
- $T \geq (F_k - 1) H_{min_k}$ (4.3.2-2)
- $T < F_k H_{min_k}$ (4.3.2-3)
- Αν η γραμμή k δεν περνά από τον κόμβο j τότε συμβολίζεται με $T_{kj} = -1$

Οι μεταβλητές απόφασης είναι :

- ▲ X_{ik} που αντιπροσωπεύει τον χρόνο αναχώρησης του i λεωφορείου στην γραμμή k με $1 \leq i \leq F_k$
- ▲ Z_{ikjqn} που αντιπροσωπεύει μια δυαδική μεταβλητή που δίνει την τιμή 1 αν το i λεωφορείο της γραμμής k συναντά το j λεωφορείο της γραμμής q σε κόμβο n , αλλιώς δίνει τιμή 0.

Αν τώρα $A_{kq} = \{ n : 1 \leq n \leq N, T_{kn} \geq 0, T_{qn} \geq 0 \}$

Η βασική μαθηματική μορφή του προβλήματος θα είναι :

$$\max \sum_{k=1}^{(M-1)} \sum_{i=1}^{F_k} \sum_{q=k+1}^M \sum_{j=1}^{F_q} \sum_{n \in A_{kq}} Z_{ikjqn}$$

s.t.

$$X_{1k} \leq H \max_k \quad 1 \leq k \leq M \quad (4.3.2-4)$$

$$X_{Fkk} \leq T \quad 1 \leq k \leq M \quad (4.3.2-5)$$

$$H \min_k \leq X_{(i+1)k} - X_{jk} \leq H \max_k \quad 1 \leq k \leq M, 1 \leq i \leq F_k - 1 \quad (4.3.2-6)$$

$$Z_{ikjqn} = \max[1 - |(X_{ik} + T_{kn}) - (X_{jq} + T_{qn})|, 0] \quad (4.3.2-7)$$

Ο περιορισμός (4.3.2-4) εξασφαλίζει ότι δεν θα υπάρχει πρώτος χρόνος αναχώρησης πέραν από τη μέγιστη χρονοαπόσταση.

Ο περιορισμός (4.3.2-5) εξασφαλίζει ότι η τελευταία αναχώρηση γίνεται μέσα στο διάστημα σχεδιασμού που έχει όριο το T.

Ο περιορισμός (4.3.2-6) δείχνει τα όρια της χρονοαπόστασης

Ο περιορισμός (4.3.2-7) ορίζει την δυαδική μορφή της μεταβλητής απόφασης.

Η εναλλακτική παρουσίαση του μοντέλου θα μπορούσε να είναι :

$$\max \sum_{k=1}^{(M-1)} \sum_{q=k+1}^M Y_{kq}$$

s.t.

$$Y_{kq} = \sum_{n \in A_{kq}} \sum_{i=1}^{F_k} \sum_{j=1}^{F_q} \max[1 - |(X_{ik} + X_{kn}) - (X_{iq} + X_{qn})|, 0] \quad (4.3.2-8)$$

Οι περιορισμοί (4.3.2-4) - (4.3.2-7) συνεχίσουν να ισχύουν, अपαράλλακτοι.

Η τελευταία παρουσίαση έχει την μορφή μη γραμμικού προγραμματισμού. Μπορεί λοιπόν να ξαναδιατυπωθεί έτσι ώστε να έχει την μορφή μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού το οποίο και μπορεί να λυθεί από ήδη υπάρχοντα υπολογιστικά προγράμματα τα οποία το μόνο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν είναι τα όρια ως προς το μέγεθος του προβλήματος.

Ο μη γραμμικός περιορισμός είναι η εξίσωση (4.3.2-8) την οποία και θα γράψουμε με διαφορετική μορφή. Έστω D_{nijkq} είναι μια δυαδική μεταβλητή (όπως και η Z_{ikjqn}) και B συμβολίζει έναν μεγάλο αριθμό ($B = T + \max_{i,j} T_{ij}$). Η εξίσωση (4.3.2-8) γίνεται αντικατάσταση με τους παρακάτω περιορισμούς :

$$BD_{nijkq} \geq X_{ik} + T_{kn} - (X_{jq} + T_{qn}), \quad (4.3.2-9)$$

$$BD_{nijkq} \geq X_{jk} + T_{qn} - (X_{ik} + T_{kn}), \quad (4.3.2-10)$$

$$Y_{qk} \leq \sum_{n \in A_{qk}} \sum_{i=1}^{F_k} \sum_{j=1}^{F_q} (1 - D_{nijkq}) \quad (4.3.2-11)$$

Αν $X_{ik} + T_{kn} = X_{iq} + T_{qn}$ τότε υπάρχει ταυτόχρονη άφιξη του λεωφορείου i της γραμμής k και του λεωφορείου j της γραμμής q στον κόμβο n . Τότε D_{nijkq} παίρνει την τιμή 1 και το Y_{qk} θα αυξηθεί κατά 1 σύμφωνα με την (4.3.2-11).

Αν $X_{ik} + T_{kn} \neq X_{iq} + T_{qn}$ τότε δεν υπάρχει συγχρονισμός και D_{nijkq} παίρνει μια τιμή που πρέπει να ικανοποιεί την (4.3.2-9) και (4.3.2-10). Ο αριθμός των ταυτόχρονων αφίξεων των k και q γραμμών Y_{qk} δεν θα αυξηθεί.

Μπορούμε να ορίσουμε ένα άνω όριο που μπορεί να πάρει ο αριθμός των ταυτοχρόνων αφίξεων :

$$Z^* = \sum_{k=1}^{(M-1)} \sum_{q=k+1}^M \sum_{n \in A_{qk}} \min(F_k, F_q)$$

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι ο χρόνος που στην πράξη θα απαιτηθεί για να λυθεί το πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού θα είναι $O(M^2, F^2)$ όπου $F = \max F_k$ και για μέσο όρο τεμνόμενων κόμβων 1 ή 2 που είναι συνήθως για μια γραμμή.

4.3.2.2 Αποτελέσματα Μεθόδου

Όπως αναφέραμε προκειμένου να δοκιμαστεί η μέθοδος κατασκευάστηκε ευρετικός αλγόριθμος ο οποίος θα μείωνε τον χρόνο υπολογισμού του μικτού ακέραιου προβλήματος. Για μικρά παραδείγματα όπως αναμένεται οι λύσεις συμπίπτουν. Ο ευρετικός αλγόριθμος βασικά έχει σαν σκοπό να δώσει τιμές χρόνων που αναχωρεί λεωφορείο από την γραμμή 1 και τιμές χρόνων που αναχωρεί από την γραμμή 2, να μετρήσεις τους κόμβους που συναντώνται τα λεωφορεία

και σε πόση ώρα συμβαίνει αυτό από την αρχική χρονική στιγμή που το πρώτο λεωφορείο ξεκίνησε. Αυτή είναι η ιδέα υπολογισμού και σε περίπτωση που υπάρχουν περισσότεροι κόμβοι που εμπλέκονται τότε δίνονται αποτελέσματα για κάθε κόμβο και χρόνοι που συγχρονίζονται οι γραμμές στον κόμβο αυτό.

Σε παράδειγμα από την πραγματική κατάσταση που υπάρχει στο δίκτυο στο Ισραήλ, προφανώς υπήρχαν περισσότερες γραμμές και χρειάστηκε άλλος ένας περιορισμός να μην συμπίπτουν γραμμές που χρησιμοποιούσαν το ίδιο μήκος διαδρομής. Αυτό αντιμετωπίστηκε αλλάζοντας τους χρόνους αναχώρησης αλλά διατηρώντας ίσες χρονοαποστάσεις. Ακόμα λεωφορεία αντίθετης κατεύθυνσης προφανώς διαγράφηκαν από το μητρώο T_{kj} αφού δεν ενδιαφέρει να συγχρονιστούν αυτά τα λεωφορεία με την δική μας κατεύθυνση εξυπηρέτησης. Δηλαδή από τα 14 λεωφορεία που εξυπηρετούσαν της γραμμές τους συνολικά εξετάστηκαν 7 που μας ενδιέφεραν ως προς την κατεύθυνση. Οι κόμβοι που αυτές οι γραμμές τέμνονταν ήταν 3 και το χρονικό παράθυρο εξέτασης του προβλήματος ήταν 2 ώρες και 54 λεπτά. $F_i = 12$ και οι μέγιστες και ελάχιστες χρονοαποστάσεις ήταν $H_{min_k} = 14$ και $H_{max_k} = 20$ για κάθε i . Λόγω του μεγέθους του προβλήματος δεν μπορεί να λυθεί από προγράμματα που λύνουν μικτό ακέραιο προγραμματισμό σε Pc. Δοκιμάστηκε λοιπόν ο ευρετικός αλγόριθμος και έδωσε σύνολο ταυτόχρονων αφίξεων 240 και Πίνακα Αφίξεων-Αναχωρήσεων για την μια κατεύθυνση και για την άλλη. Εκεί παρατηρούμε πως οι μελετητές θυσιάζουν προκειμένου να έχουν συγχρονισμό, της ίσες χρονοαποστάσεις μεταξύ των Αναχωρήσεων.

Ακόμα μπορεί το μοντέλο να χρησιμοποιηθεί σε Οργανισμούς που έχουν συστήματα πληροφόρησης των επιβατών real time με πολύ καλά αποτελέσματα.

Από την άλλη το μοντέλο μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να εισαχθούν συντελεστές βαρύτητας στους κόμβους που θα γίνει ο συγχρονισμός ή ως προς την κατεύθυνση.

Άλλη προέκταση του μοντέλου είναι αντί να έχουμε απόλυτο συγχρονισμό μεταξύ λεωφορειακών γραμμών να έχουμε συγχρονισμό με κάποια διαφορά χρόνου, την οποία και θα ορίζουμε εξ αρχής και αυτό θα θεωρούμε σαν συγχρονισμό.

4.3.3 Εφαρμογές

Εδώ θα λυθεί το πρόβλημα των συχνοτήτων για μια γραμμή υποθετική εφαρμόζοντας τις Κλασσικές Μεθόδους όπως περιγράφηκαν στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο. Οι εφαρμογές είναι βασισμένες στο Αμπακούμκιν & Σταθόπουλος 'Ειδικά Θέματα Μεταφορών'.

Πρέπει όμως να δοθεί πέραν των συχνοτήτων και μια μεγαλύτερη έμφαση στην κατάρτιση του Πίνακα Α-Α. Για αυτό τον σκοπό δίνονται τα συμπεράσματα που έχουν σημειωθεί από την πείρα των μελετητών:

Παρακάτω δίνονται σε μορφή πίνακα τα δεδομένα του προβλήματος των συχνοτήτων ενός συστήματος αστικών μαζικών μεταφορών. Τα δεδομένα αυτά στα πλαίσια αυτής της εφαρμογής δεν είναι μεγάλη έκτασης αλλά μέχρι το σημείο που θα βγαίνει το συμπέρασμα που επιθυμούμε. Εδώ έχει θεωρηθεί ένα χρονικό περιθώριο μεταξύ 6:00 μέχρι 9:00 το πρωί με σκοπό να μειωθούν οι πράξεις. Έχουμε λοιπόν:

- Απόσταση μεταξύ των στάσεων
- Επιθυμητή πληρότητα ανά διάστημα
- Μέγιστο χρονικό διαχωρισμό
- Αριθμός δρομολογημένων λεωφορείων
- Μέση τιμή φόρτισης μεταξύ των στάσεων, από τις μετρήσεις
- Συνολικός χρόνος κυκλικού ταξιδιού, συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου ασφαλείας
- Χωρητικότητα Λεωφορείων

Αυτά είναι τα στοιχεία που παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Σημαντικό στοιχείο ακόμα είναι η παραδοχή για τον ρυθμό άφιξης των επιβατών. Εδώ θεωρούμε ομοιόμορφο ρυθμό άφιξης, δηλαδή ότι ο αριθμός των επιβατών που μεταφέρονται στο πρώτο δρομολόγιο της κάθε ώρας μπορούν να επιλέξουν:

1. Το πρώτο δρομολόγιο στην αρχή της χρονικής περιόδου
2. Το τελευταίο δρομολόγιο της προηγούμενης χρονικής περιόδου.

Πίνακας 4-1. Στοιχεία Φόρτισης Διαδρομής

Απόσταση Μεταξύ των Στάσεων	Ονομασία Στάσης				
		Φόρτιση Σε Κάθε Χρονική Περίοδο			
		6:00-7:00	7:00-8:00	8:00-9:00	Συνολική Φόρτιση
0	Αφετηρία	80	260	120	460
3	Στάση 1	135	325	295	755
2	Στάση 2	120	400	230	750
2	Στάση 3	115	380	270	765
3	Αφετηρία	-	-	-	-

Ακόμα θεωρούμε πως η υπερφόρτιση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20 % του μήκους της συνολικής διαδρομής.

Πίνακας 4-2. Λειτουργικά Στοιχεία

	Χρονικές Περίοδοι		
	6:00-7:00	7:00-8:00	8:00-9:00
Αριθμός Δρομολογημένων Λεωφορείων	2	6	4
Επιθυμητή πληρότητα	50	65	65
Μέγιστος Χρονικός Διαχωρισμός (min)	30	30	30
Μέσος Συνολικός Χρόνος Κυκλικής Διαδρομής	55	67	55
Χωρητικότητα Λεωφορείου	80	80	80
Μέτρο Παραγωγικότητας	1095	3370	2220

-Το ζητούμενο είναι να γίνει ο καθορισμός της συχνότητας των λεωφορείων και να βρεθούν οι χρονικοί διαχωρισμοί.

Καταρχάς υπολογίζεται η τελευταία γραμμή του Πίνακα 2, που είναι το μέτρο παραγωγικότητας το οποίο ορίζεται σαν άθροισμα των φορτίσεων επί το μήκος των τμημάτων στις οποίες έγιναν αυτές οι φορτίσεις. Έτσι :

$$6:00-7:00 \quad 80*3 + 135*2 + 120*2 + 115*3 = 1095$$

$$7:00-8:00 \quad 260*3 + 325*2 + 400*2 + 380*3 = 3370$$

$$8:00-9:00 \quad 120*3 + 295*2 + 230*2 + 270*3 = 2220$$

4.3.3.1 Μέθοδος 1

Σύμφωνα με την Μέθοδο 1, η συχνότητα υπολογίζεται διαιρώντας τις ωριαίες φορτίσεις της Στάσης 3, αφού εκεί παρατηρείται το σημείο μέγιστης φόρτισης συνολικά για την περίοδο που εξετάσουμε, με την επιθυμητή πληρότητα για κάθε χρονικό διάστημα:

$$6:00-7:00 \quad 115 / 50 = 2,30$$

$$\begin{array}{lll} 7:00-8:00 & 380 / 65 & = 5,85 \\ 8:00-9:00 & 270 / 65 & = 4,15 \end{array}$$

Εν συνεχεία υπολογίζονται οι χρονικοί διαχωρισμοί σε min διαιρώντας το μήκος του χρονικού διαστήματος με την συχνότητα που υπολογίστηκε νωρίτερα.

$$\begin{array}{lll} 6:00-7:00 & 60 / 2,30 & = 26 \\ 7:00-8:00 & 60 / 5,85 & = 10 \\ 8:00-9:00 & 60 / 4,15 & = 14 \end{array}$$

4.3.3.2 Μέθοδος 2

Σύμφωνα με την Μέθοδο 2, εντοπίζουμε το σημείο μέγιστης ωριαίας φόρτισης για κάθε χρονικό διάστημα. Τα σημεία αυτά εδώ είναι οι στάσεις 1,2 και για την τρίτη ώρα η στάση 1. Η συχνότητα προκύπτει διαιρώντας τις φορτίσεις αυτές με την επιθυμητή πληρότητα.

$$\begin{array}{lll} 6:00-7:00 & 135 / 50 & = 2,70 \\ 7:00-8:00 & 400 / 65 & = 6,15 \\ 8:00-9:00 & 295 / 65 & = 4,54 \end{array}$$

και οι χρονικοί διαχωρισμοί

$$\begin{array}{lll} 6:00-7:00 & 60 / 2,70 & = 22 \\ 7:00-8:00 & 60 / 6,15 & = 10 \\ 8:00-9:00 & 60 / 4,54 & = 13 \end{array}$$

4.3.3.3 Μέθοδος 3

Σύμφωνα με την Μέθοδο 3, η συχνότητα είναι ο μέγιστος αριθμός που προκύπτει από τις μέγιστες φορτίσεις προς την χωρητικότητα του λεωφορείου και την παραγωγικότητα προς το γινόμενο συνολικής απόστασης διαδρομής (που εδώ είναι 10) και επιθυμητής πληρότητας.

$$\begin{array}{lll} 6:00-7:00 & \max[(135 / 80) , (1095 / (50*10))] & = 2,19 \\ 7:00-8:00 & \max[(400 / 80) , (3370 / (50*10))] & = 6,74 \\ 8:00-9:00 & \max[(295 / 80) , (2220 / (50*10))] & = 4,44 \end{array}$$

και οι χρονικοί διαχωρισμοί

6:00-7:00	60 / 2,19	= 27
7:00-8:00	60 / 6,74	= 9
8:00-9:00	60 / 4,44	= 14

Βρίσκουμε τα οχηματο-χιλιόμετρα που πραγματοποιούνται με φόρτιση μεγαλύτερη από αυτή που επιτρέπει η επιθυμητή πληρότητα.

6:00-7:00	(135-109,5)*2 + (120-109,5)*2 + (115-109,5)*3	= 88,5
7:00-8:00	(400-337)*2 + (380-337)*3	= 255
8:00-9:00	(295-222)*2 + (230-222)*2 + (270-222)*3	= 306

ενώ το μήκος σε χιλιόμετρα που αυτό συμβαίνει είναι όπως φαίνεται από τα πιο πάνω :

6:00-7:00	7 km ή 70 % του μήκους της συνολικής διαδρομής
7:00-8:00	5 km ή 50 % του μήκους της συνολικής διαδρομής
8:00-9:00	7 km ή 70 % του μήκους της συνολικής διαδρομής

4.3.3.4 Μέθοδος 4

Σύμφωνα με την Μέθοδο 4, οι συχνότητες θα προκύψουν από όπως με την Μέθοδο 1 με την διαφορά ότι πρέπει να βρεθούν οι φόρτοι που εξυπηρετούνται και η υπερφόρτωση να μην υπερβαίνει το 20 % του μήκους της διαδρομής ή για 2 km. Η επιλογή θα είναι τέτοια ώστε ο φόρτος να είναι κοντά στο μέσο φόρτο όχι όμως μικρότερος από την παραγωγικότητα / μήκος διαδρομής . Έτσι το μέσο επίπεδο φόρτισης θα είναι :

6:00-7:00	120 επιβάτες
7:00-8:00	380 επιβάτες
8:00-9:00	270 επιβάτες

και η συχνότητα με τον χρονικό διαχωρισμό θα είναι :

6:00-7:00	120 / 50	= 2,40
7:00-8:00	380 / 65	= 5,85
8:00-9:00	270 / 65	= 4,15

και

6:00-7:00	60 / 2,40	= 25
7:00-8:00	60 / 5,85	= 10
8:00-9:00	60 / 4,15	= 14

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά και για τις 4 Μεθόδους.

Χρονικό Διάστημα	Μέθοδος 1		Μέθοδος 2		Μέθοδος 3		Μέθοδος 4	
	f	h	f	h	f	h	f	h
6:00-7:00	2,3	26	2,7	22	2,19	27	2,4	25
7:00-8:00	5,85	10	6,15	10	6,74	9	5,85	10
8:00-9:00	4,15	14	4,54	13	4,44	14	4,15	14

Πίνακας 4-3 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Συχνοτήτων και Χρονικών Διαχωρισμών

Παρατηρούμε πως η μέθοδος 3 δίνει εξ ορισμού τις μικρότερες συχνότητες που σημαίνει ότι απαιτείται ο μικρότερος αριθμός λεωφορείων, ενώ αντίστοιχα η Μέθοδος 2 δίνει τις μεγαλύτερες.

Πέραν των όσων είπαμε για τις μεθόδους κατάρτισης Πίνακα Α-Α στην πράξη υπάρχουν πρακτικές μέθοδοι που **οι σταθμάρχες** εφαρμόζουν για να ‘μπαλώσουν’ τον Πίνακα Α-Α που τους δίνεται από τον Ο.Α.Σ.Α και από την δική τους πείρα και ένστικτο εξαρτώνται οι επιβάτες (και η φήμη του Οργανισμού) κάθε φορά που βγαίνουν εκτός προγραμματισμένων χρόνων τα δρομολόγια. Μετά από σχετική συζήτηση ένας σταθμάρχης μου είπε πως οι αποκλίσεις από τα δρομολόγια αποτελούν τον κανόνα σε καθημερινές τουλάχιστον. Τα αποτελέσματα των αλλαγών στους Πίνακες Α-Α σημειώνονται και αποστέλλονται πίσω για επιθεώρηση ή αξιολόγηση.

Φυσικά καμία μέθοδο ως τώρα, εφαρμοζόμενη στην Ελλάδα τουλάχιστον δεν έχει την δυνατότητα να προβλέψει έκτακτα γεγονότα τα οποία δεν συμβαίνουν σε καθημερινή βάση ή την κυκλοφοριακή συμφόρηση που προκαλείται από αυτά τα γεγονότα. Ο Ο.Α.Σ.Α πάντως έχει συγκεκριμένο χρόνο που τοποθετεί στα δρομολόγια σαν χρόνο ασφαλείας, προκειμένου αυτά τα γεγονότα να αντιμετωπιστούν σαν μέρος του χρόνου κύκλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχει στα προηγούμενα αναφερθεί η διαδικασία του σχεδιασμού των λεωφορειακών γραμμών (αστικού τύπου) αποτελείται από τέσσερα βήματα. Πρώτα γίνεται ο Σχεδιασμός του Δικτύου Γραμμών και των Στάσεων, μετά γίνεται ο καθορισμός των Συχνοτήτων και του Πίνακα Αφίξεων – Αναχωρήσεων, τρίτη είναι η διαδικασία Βέλτιστου Προγραμματισμού Οχημάτων και τελευταίο βήμα είναι ο Προγραμματισμός των Υπηρεσιών.

Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος κάθε βήμα λύνεται χωριστά και γίνεται δεδομένο στο βήμα που ιεραρχικά προηγείται. Κάποιες λύσεις βημάτων ιδίως στο Σχεδιασμό Δικτύου και των Συχνοτήτων μπορεί να διαφέρουν ως προς άλλες λύσεις, ανάλογα με τις παραμέτρους που οι μελετητές θεωρούν πως παίζουν καθοριστικό ρόλο. Έτσι λόγω των πολλών παραμέτρων η λύση με προγράμματα υπολογιστών φαίνεται πιο ανακουφιστική. Όμως και πάλι οι διαδικασίες για τον υπολογισμό της βέλτιστης λύσης αυξάνονται εκθετικά, με την αύξηση των παραμέτρων. Έτσι παραδοσιακές θεωρήσεις Μαθηματικού Προγραμματισμού δεν έχουν αποτελέσματα όταν οι παράμετροι ξεπερνούν κάποιο όριο. Οι μελετητές είναι αναγκασμένοι να κατασκευάζουν αλγόριθμους που να μπορούν να βρουν λύσεις. Τέτοιοι αλγόριθμοι με μεγάλη δύναμη και ευρέως γνωστοί είναι οι ευρετικοί αλγόριθμοι. Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν συμβάλει αποφασιστικά στον υπολογισμό των δύο τελευταίων βημάτων της διαδικασίας σχεδιασμού και έχουν δώσει την ανεξαρτησία στους μελετητές να επικεντρώσουν την προσοχή τους στα ανώτερα επίπεδα σχεδιασμού.

Παρ' όλες τις διάφορες προσεγγίσεις οι μελετητές συνεχίζουν να μελετούν το Πρόβλημα του Προγραμματισμού των Οχημάτων και να συμβάλουν έτσι στην μεγάλη βιβλιογραφία που υπάρχει σε αυτό το θέμα. Εδώ θα προταθούν τρεις τεχνικές που η μια έχει ήδη αναφερθεί στο Σχεδιασμό Δικτύου ενώ η άλλη είναι σχετικά καινούρια διαδικασία (2000) που όμως βελτίωσε σημαντικά τον Προγραμματισμό των Οχημάτων στην πόλη της Βαλτιμόρης στον Καναδά (1998). Η τρίτη που παρουσιάζεται και πρώτη είναι μια ακριβής λύση στο πρόβλημα με άμεση αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν από τον υπολογιστικό χρόνο που χρειάζεται, αφού εντάσσονται στα προβλήματα Np -hard.

Η μαθηματική διατύπωση της ακριβής λύσης αποτελείται από την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους η οποία με την σειρά της είτε είναι η τιμή του κόστους του οδηγού που δεν εργάζεται μεταξύ των i και j συν το κόστος των νεκρών χρόνων είτε υπολογίζει την οικονομία που γίνεται από την μείωση του στόλου κατά ένα λεωφορείο. Η διατύπωση είναι αρκετά απλή όμως το 0-1 πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού δεν είναι εύχρηστο για μεγάλους στόλους και η λύση στις περισσότερες δεν μπορεί να βρεθεί από τα γνωστά λογισμικά (γραμμικού προγραμματισμού). Αυτός είναι ο λόγος που στην συνέχεια προτείνεται η λύση μέσω της συνάρτησης ελλείμματος. Η συνάρτηση ελλείμματος είναι μια βαθμηδόν συνάρτηση η οποία και παρουσιάζει τον ελλειμματικό αριθμό οχημάτων σε ένα σύστημα πολλών αμαξοστασίων. Το μοναδικό στοιχείο που απαιτείται εδώ σαν δεδομένο είναι ένας Πίνακας $A - A$, που να καθορίζει τα απαιτούμενα δρομολόγια. Αξιοσημείωτο του αλγόριθμου που προτείνεται είναι όχι μόνη η ευρετική μορφή του αλλά το γεγονός ότι χρησιμοποιεί τις νεκρές διαδρομές προκειμένου να ‘ενεργοποιηθούν’ περισσότερα οχήματα ταυτόχρονα, ενώ οι περισσότερες θεωρήσεις αποφεύγουν την δημιουργία νεκρών διαδρομών.

Τέλος σαν μια άλλη αντιμετώπιση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των οχημάτων προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος που έχει σαν κύρια χαρακτηριστικά :

- ▲ Ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των οχημάτων, που σημαίνει ελαχιστοποίηση του κεφαλαίου ή κάποιου σταθερού κόστους των οχημάτων.
- ▲ Ελαχιστοποίηση των συνολικών νεκρών διαδρομών και των του κόστους λειτουργίας των νεκρών διαδρομών.
- ▲ Ελαχιστοποίηση ενός συνδυασμού των δύο παραπάνω.

Ακόμα η καινούρια έννοια που προστίθεται είναι το χρονικό παράθυρο στο οποίο εξετάζεται το πρόβλημα. Λόγω αυτού του στοιχείου τα δρομολόγια του γενικότερου προβλήματος χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, Πρωινά – Μεσημεριανά – Απογευματινά. Η αντικειμενική συνάρτηση που κατασκευάζεται ορίζεται σε λεπτά λειτουργίας και ελαχιστοποιείται. Εξασφαλίζεται ότι ο αριθμός των οχημάτων που εισέρχονται στο τερματικό σταθμό είναι ίδιος με τον αριθμό των οχημάτων που εξέρχονται για να εξυπηρετήσουν δρομολόγια. Τα οχήματα είναι επιθυμητό να επιστρέφουν στον ίδιο τερματικό σταθμό από τον οποίο ξεκίνησαν. Εξασφαλίζεται ακόμα ότι ο χρόνος γραμμής δεν θα ξεπεράσει τον μέγιστο επιτρεπόμενο χρόνο γραμμής, όπως έχει οριστεί πριν τον προγραμματισμό των οχημάτων. Η μέθοδος όμως δεν

σταματά εκεί αφού προτείνει τρόπους χειρισμού των πολλών μεταβλητών του αρχικού προβλήματος και μείωσης τους σε αριθμό που να μπορεί ένα Pentium Pc 200 MHz (με το κατάλληλο λογισμικό) να λύσει το πρόβλημα. Αναφέρεται ότι το πρόβλημα της δρομολόγησης των οχημάτων της πόλης της Βαλτιμόρης λύθηκε σε 2 ημέρες (υπολογιστικός χρόνος) και η λύση βελτίωσε τον σχεδιασμό κατά 6 % ως προς τον αριθμό των οχημάτων (κατά 8 %) και ως προς τον χρόνο λειτουργίας τους (κατά 4 %). Τέλος το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε εκτός των αρχικών δεδομένων για τους τερματικούς σταθμούς και τον αριθμό των οχημάτων απαιτεί το μήκος μεταξύ των τερματικών σταθμών που όμως μπορεί να βρεθεί με ένα παρεμφερές λογισμικό. Τονίζεται ότι η λύση προέκυψε συνολικά μετά από 2 ημέρες για την περίπτωση της πόλης της Βαλτιμόρης, ένας χρόνος αρκετά ανεκτός για σχεδιασμούς που γίνονται για μια μεγάλη χρονικά περιοχή εφαρμογής όπως είναι το έτος ή το εξάμηνο ή ακόμα και το τρίμηνο.

5.2 ΑΚΡΙΒΗΣ ΛΥΣΗ

Προσπάθειες για μια ακριβής λύση έχουν γίνει στο παρελθόν από αρκετούς μελετητές όπως Desrosiers et al (1995), Daduna και Paixao (1995), Lobel (1999) και Mesquita και Paixao (1999).

Το πρόβλημα συνήθως εξετάζεται σε σενάριο πολλών αμαξοστασίων και είναι ευρέως γνωστό Multi-Depot Vehicle Scheduling Problem (MDVSP) με πολυπλοκότητα Np-hard.

Η μαθηματική διατύπωση μιας τέτοιας λύσης δίνεται παρακάτω [Lam W. & Bell G. (2003)] :

$$\min \sum_{i=1}^{(n+1)} \sum_{j=1}^{(n+1)} c_{ij} y_{ij}$$

Αντικειμενική Συνάρτηση :

όπου i είναι το γεγονός του τέλους διαδρομής σε κάποιο χρόνο a_i ,
και j είναι το γεγονός της αρχής της διαδρομής σε κάποιο χρόνο b_j ,
 y_{ij} είναι δυαδική μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 όταν το τέλος συνδέεται με την αρχή, και μηδέν διαφορετικά.

Όταν $i=n+1$ τότε $y_{n+1,j} = 1$ σε περίπτωση που το αμαξοστάσιο διαθέτει όχημα για το j δρομολόγιο.

Όταν $j=n+1$ τότε $y_{i,n+1} = 1$ σε περίπτωση που μετά το τέλος του i δρομολογίου το όχημα επιστρέφει σε ένα αμαξοστάσιο.

Ο αριθμός $y_{n+1,n+1}$ είναι ο αριθμός των οχημάτων που μένει ακρησιμοποιήτα σε ένα αμαξοστάσιο.

Η Συνάρτηση Κόστους είναι :

$$c_{ij} = \begin{cases} K, & i = n+1, j = 1, 2, \dots, n \\ 0, & i = 1, 2, \dots, n, j = n+1 \\ L_{ij} + E_{ij}, & i, j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

Όπου

K είναι η αποταμίευση που λαμβάνει χώρα όταν μειώνεται το μέγεθος στόλου κατά ένα λεωφορείο.

L_{ij} είναι το άμεσο κόστος νεκρών χρόνων από το γεγονός i στο j

E_{ij} είναι το κόστος του οδηγού που δεν εργάζεται μεταξύ των i και j .

Αυτή η μαθηματική διατύπωση εμφανίζεται και στον Gravish et al. (1978) και καλύπτει διαδοχικά οχήματα από το αμαξοστάσιο στις γραμμές του δικτύου συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου που ο οδηγός δεν εργάζεται μεταξύ i και j και των νεκρών χρόνων, προς το αμαξοστάσιο. Αυτό είναι ένα πρόβλημα μηδέν-ένα ακέραιου προγραμματισμού το οποίο μπορεί να μετατραπεί σε Πρόβλημα Ανάθεση (Assignment Problem) μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, η ανάθεση των οχημάτων από τα αμαξοστάσια στις γραμμές μπορεί να θεωρηθεί μια διαδικασία, γνωστή στην βιβλιογραφία Επιχειρησιακή Έρευνας σαν Πρόβλημα Μεταφοράς (Transportation Problem).

Λόγω όμως των πολλών πράξεων που πρέπει να γίνουν όταν το πρόβλημα πρέπει να λυθεί με πραγματικά δεδομένα, ωθούμαστε σε διαδικασίες που δεν χρησιμοποιούν εξολοκλήρου τουλάχιστον Μαθηματικό Προγραμματισμό. Κατασκευάζονται για αυτές τις περιπτώσεις αλγόριθμοι ευρετικούς που συγκλίνουν στην λύση με σχετικά μεγάλη ταχύτητα.

5.3 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΟΣ

Η συνάρτηση ελλείμματος (Deficit Function) [Lam W. & Bell M. (2003)] είναι μια βαθμωτή συνάρτηση που περιγράφηκε για πρώτη φορά από τον Ceder και Stern (1981) για την ανάθεση του ελάχιστου αριθμού οχημάτων για ένα δεδομένο Πίνακα Αφίξεων – Αναχωρήσεων.

Η βαθμηδόν συνάρτηση ονομάζεται συνάρτηση ελλείμματος γιατί παρουσιάζει τον ελλειμματικό αριθμό οχημάτων σε ένα σύστημα πολλών αμαξοστασίων. Αυτό σημαίνει ότι η συνάρτηση αυξάνει κατά ένα για κάθε αναχώρηση δρομολογίου και μειώνεται κατά ένα για κάθε άφιξη λεωφορείου. Για την κατασκευή ενός συνόλου από τέτοιες συναρτήσεις η μόνη πληροφορία που απαιτείται είναι ο Πίνακας A-A για τα απαιτούμενα δρομολόγια. Το βασικό πλεονέκτημα της συνάρτησης είναι η εποπτική φύση της.

Έστω ότι $d(k,t,S)$ συμβολίζει την συνάρτηση ελλείμματος για τον τερματικό σταθμό k στην χρονική στιγμή t για έναν προγραμματισμό S . Η τιμή της $d(k,t,S)$ δίνει τον συνολικό αριθμό των αναχωρήσεων μείον τον συνολικό αριθμό των αφίξεων στο τερματισμό k , την χρονική στιγμή t . Η μέγιστη τιμή της $d(k,t,S)$ κατά την χρονική διάρκεια σχεδιασμού $[T_1, T_2]$ ορίζεται ως $D(k,S)$.

Αν t_s^i και t_e^i είναι οι χρόνοι αρχής και τέλους του δρομολογίου i , με $i \in S$, είναι δυνατό να χωρίσουμε το διάστημα σχεδιασμού σε εναλλακτικές διαδοχικές κοίλες και διαστήματα μέγιστου. Τα διαστήματα μέγιστου $[s_i^k, e_i^k]$, $i = 1, \dots, n(k)$ ορίζουν το χρονικό διάστημα στο οποίο $d(k,t)$ παίρνει την μέγιστη τιμή. Ένα διάστημα κοίλης H_i^k , $i = 0, 1, \dots, n(k)$ ορίζεται σαν το διάστημα μεταξύ δύο μεγίστων. Μια κοίλη μπορεί να αποτελείται από μόνο ένα σημείο και οπότε γραφικά θα συμβολίζεται ως μια τελεία (κουκίδα).

Εάν το σύνολο των τερματικών σταθμών ονομάζεται T , το άθροισμα $D(k)$ για όλα τα $k \in T$ ισούται με τον ελάχιστο αριθμό οχημάτων που απαιτείται για να το T . Αυτή είναι η γνωστή μαθηματική διατύπωση του μεγέθους στόλου. Μαθηματικά, για ένα σταθερό προγραμματισμό S :

$$D(S) = \sum_{k \in T} D(k) = \sum_{k \in T} \max_{t \in [T_1, T_2]} d(k,t)$$

Όπου

$D(S)$ είναι ο ελάχιστος αριθμός λεωφορείων που λειτουργούν στο δίκτυο.

Όταν οι νεκρές διαδρομές επιτρέπονται, ο αριθμός $D(S)$ όπως περιγράφηκε πιο πάνω μπορεί να μειωθεί ακόμα. Οι Ceder και Stern (1981) περιέγραψαν μια διαδικασία Αλυσίδα Νεκρών Διαδρομών Μοναδιαίας Μείωσης (Unit Reduction Deadheading Chain), που όταν περιλαμβάνεται στον σχεδιασμό επιτρέπει μια μοναδιαία μείωση του μεγέθους στόλου. Η διαδικασία συνεχίζεται (επαναλαμβάνεται) ως ότου δεν μπορεί να εισαχθούν άλλες νεκρές διαδρομές ή έχει επιτευχθεί το κάτω όριο στο μέγεθος στόλου.

Το κάτω όριο $G(S)$ καθορίζεται από την συνάρτηση ελλείμματος ως:

$$G(S) = \max_{t \in [T_1, T_2]} g(t, S)$$

όπου

$$g(t,S) = \sum_{k \in T} d(k,t,S)$$

Η $G(S)$ εκφράζει τον αριθμό των οχημάτων που λειτουργούν την στιγμή t . Αρχικά το κάτω όριο καθορίστηκε να είναι ο μέγιστος αριθμός των δρομολογίων που υπάρχουν σε έναν Πίνακα $A-A$ που στην περίοδο σχεδιασμού λειτουργούν ταυτόχρονα. Στο πρόβλημα του κάτω ορίου θα αναφερθεί παρακάτω.

5.3.1 Περιγραφή του Αλγόριθμου

Ο αλγόριθμος που υποστηρίζει την θεωρία συνάρτησης ελλείμματος είναι ευρετικός και περιγράφεται στους Ceder και Stern (1981) και δεν θα περιγραφεί σε μεγάλη έκταση. Θα αναφερθούν όμως κάποια χαρακτηριστικά στα οποία βασίζεται. Από τα αξιοσημείωτα είναι ο κανόνας επιλογής επόμενου τερματικού σταθμού και οι ρουτίνες Αλυσίδας Νεκρών Διαδρομών Μοναδιαίας Μείωσης (ANΔMM).

Η επιλογή του επόμενου τερματικού σταθμού με σκοπό την μείωση του μεγίστου της συνάρτησης ελλείμματος γίνεται είτε με βάση τον περιορισμό στην χωρητικότητα του τερματικού σταθμού, είτε με βάση τον τερματικό σταθμό που παρουσιάζει το μεγαλύτερο διάστημα κοίλης, είτε με βάση τον τερματικό σταθμό που παρουσιάζει το μικρότερο διάστημα μεγίστου (από την αρχή του πρώτου μεγίστου μέχρι του τελευταίου).

Η λογική είναι να διανοιχτεί η μεγαλύτερη ευκαιρία για να συμπεριληφθεί μια νεκρή διαδρομή ($N\Delta$). Στις ρουτίνες ANΔMM υπάρχουν τέσσερις κανόνες :

- ▲ $R = 0$ για εισαγωγή $N\Delta$ άμεσα από την επικοινωνία με τον μελετητή
- ▲ $R = 1$ για εισαγωγή υποψήφιας $N\Delta$ που έχει τον μικρότερο νεκρό χρόνο.
- ▲ $R = 2$ για εισαγωγή υποψήφιας $N\Delta$ που η κοίλη αρχίζει όσο πιο μακριά στα δεξιά.
- ▲ $R = 3$ για εισαγωγή υποψήφιας $N\Delta$ που η κοίλη τελειώνει όσο πιο μακριά στα δεξιά.

Σε αυτόματη κατάσταση ($R = 1,2,3$), αν ο αλγόριθμος δεν μπορεί να εισάγει μια ΝΔ τότε επιστρέφει στην λίστα με τις υποψήφιες ΝΔ και επιλέγει την επόμενη.

Αφού βρει όλες τις δυνατές ΝΔ και τις εισάγει τότε όλες οι διαδρομές συν τις νεκρές διαδρομές συνδέονται (σαν αλυσίδα, εξίσου και ο όρος) για την δημιουργία προγραμματισμένων οχημάτων σε διαδρομές (μπλοκ). Δύο κανόνες υπάρχουν για την δημιουργία της αλυσίδας :

- ▲ Πρώτος μέσα - Πρώτος έξω (First In – First Out)
- ▲ Διαδικασία απόσπασης αλυσίδας που περιγράφεται από τους Gertsbach και Guverich (1977).

Η διαδικασία FIFO απλά συνδέει τον χρόνο άφιξης ενός δρομολογίου με τον κοντινότερο χρόνο αναχώρησης άλλου δρομολογίου του ίδιου τερματικού σταθμού και συνεχίζει να κάνει αυτή την διαδικασία, διαγράφοντας τα δρομολόγια που έχουν εξεταστεί, έως ότου δεν υπάρχουν άλλες συνδέσεις.

Η διαδικασία απόσπασης αλυσίδας επιτρέπει μια σύνδεση άφιξης αναχώρησης ζευγαριών δρομολογίων που βρίσκονται σε διάστημα κοίλης, για κάθε συνάρτηση ελλείμματος.

Για παράδειγμα έστω ότι έχουμε :

8:00 άφιξη του δρομολογίου 1,
 9:00 άφιξη του δρομολογίου 2,
 10:00 άφιξη του δρομολογίου 3,
 11:00 αναχώρηση του δρομολογίου 4,
 12:00 αναχώρηση του δρομολογίου 5,
 13:00 αναχώρηση του δρομολογίου 6.

Εύκολα καταλαβαίνει κανείς ότι δημιουργείται μια κοίλη στην συνάρτηση ελλείμματος. Οι συνδέσεις που θα γίνουν θα έχουν ως εξής :

- Με τον κανόνα FIFO , (1 – 4), (2 – 5), (3 – 6)
- Άλλες δυνατές συνδέσεις, [(1 – 4), (2 – 6), (3 – 5)], [(1 – 5), (2 – 6), (3 – 4)], [(1 – 6), (2 – 4), (3 – 5)], [(1 – 5), (2 – 5), (3 – 6)], [(1 – 6), (2 – 5), (3 – 4)].

5.3.2 Κατώτερο Όριο Μεγέθους Στόλου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το μέγεθος του στόλου μπορεί να μειωθεί από τις ρουτίνες Αλυσίδας Νεκρών Διαδρομών από μια μονάδα κάθε φορά που εφαρμόζονται. Υπάρχουν όρια ως προς τις νεκρές διαδρομές όπως περιγράφηκε νωρίτερα αλλά και από ένα κατώτερο όριο του μεγέθους στόλου. Αρχικά κατώτερο όριο καθοριζόταν να είναι ο μέγιστος αριθμός των δρομολογίων του Πίνακα A-A που λειτουργούν ταυτόχρονα. Εδώ θα αναφέρουμε μια άλλη βελτιωμένη διαδικασία δημιουργίας κατώτερου ορίου.

Το βελτιωμένο κατώτερο όριο ήταν έμπνευση του Ceder και Stern (1983) και Ceder (2002) που ακολούθησαν τα παρακάτω βήματα για την διαδικασία :

1. Επιμήκυνση του κάθε χρόνου άφιξης έως τον χρόνο της πρώτης δυνατής αναχώρησης που μπορεί να συνδεθεί, μέχρι το τέλος του χρόνου σχεδιασμού.
2. Καθορισμό και πάλι της τιμής $G'(S')$, με επιμήκυνση στο προγραμματισμό S' , εύρεση της συνάρτησης ελλείμματος, και της συνάρτησης $g'(t,S)$.

Κατά τον σχεδιασμό S' είναι δυνατόν κάποια σημεία άφιξης δρομολογίων να επιμηκυνθούν έως την πρώτη αναχώρηση και δημιουργούν έτσι μια δυνατή σύνδεση. Ωστόσο στην τελική λύση του προβλήματος ελαχιστοποίησης του μεγέθους στόλου μόνο μια από αυτές τις επιμηκύνσεις θα συνδεθεί με μία μόνο αναχώρηση. Αυτή η παρατήρηση δίνει την ευκαιρία στην έρευνα περισσότερων σημείων άφιξης που θα επεκτείνονται, χωρίς βλάβη της γενικότητας και αποδεικνύεται ότι το βελτιωμένο κάτω όριο μειώνει σημαντικά το μέγεθος στόλου.

Ο Ceder (2002) περιγράφει ακόμα πιο αποτελεσματικό δυνατό κάτω όριο, που είναι πιο κοντά στην ελαχιστοποίηση του μεγέθους στόλου. Ακόμα αυτό το κάτω όριο είναι η καλύτερη απόδειξη για το πόσο μπορεί να μειώσει κανείς το μέγεθος στόλου μέσω νεκρών διαδρομών και να βοηθήσει στην μείωση του γενικότερου κόστους λειτουργίας της γραμμής και του δικτύου.

5.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει εμπνευστεί από τους Mohamadreza Banihashemi και Ali Haghani και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στον 79° Ετήσιο Συνέδριο της Transportation Research Board τον Ιανουάριο του 2000 [Haghani A. & Banihashemi M. (2000)]. Η ιδιαιτερότητα της εργασίας ήταν ότι έλαβε υπόψη περιορισμούς χρόνου στο καθεαυτό MDVS πρόβλημα (Multiple Depot Vehicle Scheduling με Time Restriction Constrains). Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου έγινε γνωστή από την σύγκριση των αποτελεσμάτων άλλων μοντέλων που χρησιμοποιούσε η Διοίκηση Μέσων Μεταφορών (Mass Transit Administration) της Βαλτιμόρης το 1998. Τα αποτελέσματα ήταν εντυπωσιακά αφού το νέο μοντέλο βελτίωνε τον αριθμό των οχημάτων κατά 8,36%, τον χρόνο λειτουργίας κατά 4,22% και το συνολικό κόστος κατά 5,65%.

Ωστόσο βέβαια δεν μπορεί να ανταποκριθεί με αυτά καθαυτά τα αποτελέσματα το μοντέλο που θα περιγραφεί εδώ αφού τα προβλήματα στην πραγματικότητα είναι πολύ μεγάλης κλίμακας. Βέβαια θα δούμε πως υπάρχουν δύο τρόποι για την μείωση αυτών σε προβλήματα που μπορούμε να διαχειριστούμε μέσω κοινών υπολογιστών και αυτοί αποτελούν την στρατηγική για την λύση των προβλημάτων της πραγματικότητας.

5.4.1 Περιγραφή Προβλήματος

Καταρχάς ας γίνει υπενθύμιση της κατάσταση του προβλήματος και των λύσεων που δίνονται. Στην αρχή υπήρχε το πρόβλημα MDVS (αλλιώς το Vehicle Scheduling αναφέρεται ως Blocking) το οποίο και καθορίστηκε από τον Bodin et al (1983). Αργότερα προστέθηκε ο Χρονικός Περιορισμός και το πρόβλημα ονομάστηκε MDVSTRC (Multiple Depot Vehicle Scheduling problem with Time Restriction Constrains). Γενικότερα το πρόβλημα αυτό ορίζεται σαν αλληλοσύνδεση δρομολογίων που δημιουργούν μια καθημερινή υπηρεσία για τα οχήματα μεταφοράς που ακολουθούν τους παρακάτω περιορισμούς :

- ▲ Μια συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται. Αυτή περιλαμβάνει συνήθως το κόστος κεφαλαίου καθώς και το κόστος λειτουργίας των οχημάτων.
- ▲ Κάθε δρομολόγιο γίνεται μόνο από ένα όχημα.
- ▲ Κάθε τερματικός σταθμός έχει περιορισμένο αριθμό οχημάτων.

- ▲ Κάθε όχημα καταλήγει στον τερματικό σταθμό από όπου ξεκίνησε.
- ▲ Ο συνολικός χρόνος που ένα όχημα μπορεί να απουσιάζει από τον τερματικό σταθμό είναι περιορισμένος και προκαθορισμένος.

Το MDVSTRC πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού. Λόγω της μεγάλης κλίμακας που υπάρχουν αυτά τα προβλήματα στην πραγματικότητα, δεν μπορούν να επιλυθούν με ακριβή λύση. Η λύση είναι η καλύτερη δυνατή μέσω ευρετικών αλγορίθμων (που ως γνωστό δεν εγγυούνται την καλύτερη λύση) και οι αντικειμενικές συναρτήσεις έχουν συνήθως τις παρακάτω μορφές :

- ▲ Ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των οχημάτων, που σημαίνει ελαχιστοποίηση του κεφαλαίου ή κάποιου σταθερού κόστους των οχημάτων.
- ▲ Ελαχιστοποίηση των συνολικών νεκρών διαδρομών και των του κόστους λειτουργίας των νεκρών διαδρομών.
- ▲ Ελαχιστοποίηση ενός συνδυασμού των δύο παραπάνω.

Από την εμπειρία, όπως είναι λογικό η πραγματική ελαχιστοποίηση επέρχεται από τον συνδυασμό της ελαχιστοποίησης κάποιου σταθερού κόστους και την ελαχιστοποίηση των νεκρών διαδρομών.

(Αυτή είναι η νοοτροπία της μεθόδου εδώ αλλά και ενστικτώδη κίνηση όμως χρήζει ιδιαίτερης προσοχής η λογική που παραθέσαμε πριν την αρχή αυτού του κεφαλαίου, στο προηγούμενο υποκεφάλαιο θεωρούσαμε όσο γίνεται περισσότερες νεκρές διαδρομές για την μείωση του στόλου των οχημάτων .)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι βασικοί περιορισμοί του προβλήματος είναι :

- ▲ Κάθε δρομολόγιο εξυπηρετείται από ένα μόνο όχημα
- ▲ Κάθε τερματικός σταθμός έχει περιορισμένο αριθμό οχημάτων
- ▲ Κάθε όχημα επιστρέφει στο τερματικό σταθμό από όπου ξεκίνησε
- ▲ Ο συνολικός χρόνος που ένα όχημα απουσιάζει από τον τερματικό σταθμό είναι περιορισμένος και προκαθορισμένος

5.4.2 Μαθηματική Διατύπωση του Μοντέλου

Η διατύπωση βασίζεται σε νέους περιορισμούς για το MDVS πρόβλημα. Για την παρουσίαση της διατύπωσης τα δρομολόγια χωρίζονται σε τρία σύνολα που περιλαμβάνουν ‘Πρωινά Δρομολόγια’, ‘Μεσημεριανά Δρομολόγια’ και τέλος ‘Απογευματινά Δρομολόγια’. Δύο δρομολόγια ονομάζονται συμβατά όταν με την ολοκλήρωση του ενός το ίδιο λεωφορείο μπορεί να ξεκινήσει το δεύτερο. Έτσι τα ‘Πρωινά Δρομολόγια’ είναι ‘Συμβατά των Τερματικών Σταθμών’ μαζί με τα ‘Απογευματινά Δρομολόγια’. Άρα δύο δρομολόγια είναι συμβατά ως προς τερματικούς σταθμούς όταν μετά την ολοκλήρωση του πρώτου δρομολογίου είναι πιο συμφέρον οικονομικά να επιστρέψει στον τερματικό σταθμό από το να βρίσκεται σταθμευμένο στην οδό.

Η προτεινόμενη μαθηματική διατύπωση είναι :

$$\min \sum_{d,i} a_{d,i} A_{d,i} + \sum_{d,i} e_{d,i} E_{d,i} + \sum_{i,j,d} c_{i,j,d} X_{i,j,d} + \sum_{d,i} b_{i,d} B_{i,d} + \sum_{d,i} f_{i,d} F_{i,d} \quad (5.4-1)$$

$$\sum_i A_{d,i} \leq r_d \quad (5.4-2)$$

$$\sum_d B_{i,d} + \sum_{j,d} X_{i,j,d} + \sum_d F_{i,d} = 1 \quad (5.4-3)$$

$$\sum_i E_{d,i} - \sum_i F_{i,d} = 0 \quad (5.4-4)$$

$$A_{d,i} + E_{d,i} + \sum_j X_{j,i,d} - B_{i,d} - F_{i,d} - \sum_j X_{i,j,d} = 0 \quad (5.4-5)$$

$$A_{d,t_1} + X_{t_1,t_2,d} + X_{t_2,t_3,d} + \dots + X_{t_{p-1},t_p,d} + B_{t_p,d} \leq p \quad (5.4-6)$$

s.t.

για κάθε d και i και για κάθε σύνολο δρομολογίων που εκτελούνται από το λεωφορείο μετά την έξοδο του από τον τερματικό σταθμό με χρόνο της διαδικασίας αυτής μεγαλύτερο από $T_{\max}$ και με όλες τις μεταβλητές να είναι ακέραιες τιμές

(5.4-7)

όπου

a_{di} είναι το κόστος ταξιδιού μεταξύ τερματικού σταθμού d και την αρχή του δρομολογίου i συν το (Σταθερό Κόστος)/2.

$e_{d,i}$ είναι το κόστος ταξιδιού μεταξύ τερματικού σταθμού d και αρχικού σημείου δρομολογίου i

Σταθερό Κόστος είναι το σταθερό κόστος ενός οχήματος που μετατρέπεται σε ισοδύναμο λειτουργικό κόστος

$A_{d,i}$ = 1 εάν i είναι το πρώτο δρομολόγιο που γίνεται από όχημα τερματικού σταθμού d .
= 0 σε διαφορετική περίπτωση

$E_{d,i}$ = 1 εάν το i είναι δρομολόγιο από το σύνολο ‘Απογευματινών Δρομολογίων’ και είναι το πρώτο δρομολόγιο που γίνεται από ένα όχημα τερματικού σταθμού d που επιστέφει στους δρόμους
= 0 σε διαφορετική περίπτωση

$X_{i,j,d}$ = 1 εάν συμβατά δρομολόγια i και j μπορούν να γίνουν διαδοχικά από όχημα του τερματικού σταθμού d (όχι από δρομολόγια συμβατά με τον τερματικό σταθμό d)
= 0 σε διαφορετική περίπτωση

$B_{i,d}$ = 1 εάν το i είναι το τελευταίο δρομολόγιο που γίνεται από όχημα του τερματικού σταθμού d .
= 0 σε διαφορετική περίπτωση

$F_{i,d}$ = 1 εάν το i δρομολόγιο βρίσκεται στο σύνολο των ‘Πρωινών Δρομολογίων’ και είναι το τελευταίο δρομολόγιο που γίνεται από όχημα του τερματικού σταθμού d , που επιστρέφει στον τερματικό σταθμό
= 0 σε διαφορετική περίπτωση

$C_{i,j,d}$ είναι το κόστος ταξιδιού του δρομολογίου i συν τον χρόνο μεταξύ τον χρόνο έναρξης του δρομολογίου j και του χρόνου τέλους του δρομολογίου i , εάν ένα ταξίδι προς τον τερματικό σταθμό d ΔΕΝ είναι εφικτό.

Το ελάχιστο της παραπάνω παράστασης και το συνολικό κόστος ταξιδιού από το δρομολόγιο i στον τερματικό σταθμό d και από τον τερματικό σταθμό d στο δρομολόγιο j , εάν είναι ένα ταξίδι προς τον τερματικό σταθμό d είναι εφικτό μεταξύ των δρομολογίων i,j

$b_{i,d}$ είναι το κόστος ταξιδιού από το τέλος του δρομολογίου i στον τερματικό σταθμό d συν τον χρόνο ταξιδιού του δρομολογίου i συν (Σταθερό Κόστος)/2

$f_{i,d}$ είναι το κόστος ταξιδιού από το τέλος του δρομολογίου i στον τερματικό σταθμό d συν τον χρόνο ταξιδιού του δρομολογίου i

r_d είναι ο αριθμός των οχημάτων στο τερματικό σταθμό d

p είναι ο αριθμός των δρομολογίων που αποτελούν το μπλοκ

t_i είναι το i δρομολόγιο του μπλοκ

$T_{\max}$ είναι ο μέγιστο επιτρεπόμενος χρόνος του μπλοκ

Η αντικειμενική συνάρτηση (5.4-1) ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας. Το κόστος ορίζεται σαν 'λεπτά λειτουργίας'. Ο περιορισμός στην (5.4-2) εξασφαλίζει ότι ο συνολικός αριθμός των μπλοκ που ξεκινούν από τα οχήματα από κάθε τερματικό σταθμό πρέπει να περιοριστεί στα οχήματα που είναι διαθέσιμα σε αυτόν τον τερματικό σταθμό. Ο περιορισμός (5.4-3) εξασφαλίζει ότι όλα τα δρομολόγια εξυπηρετούνται. Ο περιορισμός (5.4-4) εννοεί ότι ο αριθμός των οχημάτων που επιστρέφει στον τερματικό σταθμό στην μέση των μπλοκ είναι ίδιος με το αριθμός των οχημάτων που φεύγουν από τον τερματικό σταθμό για να συνεχίσουν τα δρομολόγια. Ο περιορισμός (5.4-5) εξασφαλίζει ότι τα οχήματα θα επιστρέψουν στον τερματικό σταθμό απ' όπου ξεκίνησαν. Ο περιορισμός (5.4-6) εξασφαλίζει ότι η κατασκευή των μπλοκ με τους χρόνους γραμμής δεν θα ξεπεράσει την τον μέγιστο επιτρεπόμενο χρόνο γραμμής. Τέλος ο περιορισμός (5.4-7) ολοκληρώνει την μαθηματική διατύπωση με τον περιορισμό ακέραιων τιμών. Το πρόβλημα χωρίς τον περιορισμό (5.4-6) αποτελεί το πρόβλημα MDVS (Multiple Depot Vehicle Scheduling).

5.4.3 Περιγραφή του Ευρετικού Αλγόριθμου

Όπως τονίστηκε προηγουμένως οι ευρετικοί αλγόριθμοι είναι οι πιο συνηθισμένοι αλγόριθμοι που στηριζόμαστε για να βρούμε μια δυνατή και μάλιστα λύση κοντά στην βέλτιστη την οποία και μπορεί να μην μάθουμε ποτέ πια είναι.

Εδώ θα περιγράψουμε τα βήματα λειτουργίας του ευρετικού αλγόριθμου που σε μεγαλύτερη έκταση περιγράφεται από τον Banihashemi (1998). Η διαδικασία περιλαμβάνει μια προσέγγιση δημιουργίας περιορισμών που χαλαρώνουν τους περιορισμούς χρόνου και τους προσθέτει στο πρόβλημα με μια επιτυχημένη διαδοχική σειρά. Τα βασικά βήματα του αλγόριθμου είναι :

- Βήμα 1. Λύση του MDVS προβλήματος με βελτιστοποίηση.
- Βήμα 2. Κατασκευή των ιδρυθέντων μπλοκ και αναγνώριση των μπλοκ που καταστρατηγούνται (παραβιάζονται).Εάν δεν υπάρχουν τέτοια μπλοκ τότε η βέλτιστη λύση που έχουμε είναι και βέλτιστη για το MDVSTRC πρόβλημα . ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ.
- Βήμα 3. Αντίστοιχα στο κάθε μπλοκ που παραβιάζεται με p δρομολόγια, υπάρχουν $p+1$ μεταβλητές που ισούνται με 1 στην λύση. Για κάθε παραβιασμένο μπλοκ που περιέχει p δρομολόγια μειώνουμε τον αριθμό των δρομολογίων ώσπου να γίνει νόμιμο μπλοκ. Κατασκευή ενός σύνολο από περιορισμούς που θα περιλαμβάνουν περιορισμούς ισότητας (μεταβλητή = 1) για όλες τις μεταβλητές που σχετίζονται με τα νόμιμα μπλοκ.
- Βήμα 4. Επίλυση του προηγούμενου προβλήματος χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες πληροφορίες, πρόσθεση των νέων περιορισμών, τροποποίηση του προβλήματος και επαναεπίλυσή του.
Επανάληψη από το Βήμα 2.

Η εφαρμογή του αλγόριθμου αυτού είχε πολύ καλά αποτελέσματα σε προβλήματα υποθετικά, ελέγχου. Για παράδειγμα δοκιμάστηκαν δοκιμάστηκαν 5 προβλήματα με 300, 400, 500 και 600 δρομολόγια και προβλήματα με 700, 800 και 900 δρομολόγια (ένα πρόβλημα σε κάθε κατηγορία).

Το συμπέρασμα που βγήκε ήταν ότι οι λύσεις για τα προβλήματα MDVSTRC και MDVS είναι πρακτικά ίδιες. Δεν μπορούσαμε να βρούμε βέλτιστη λύση για προβλήματα MDVSTRC με περισσότερα από 400 δρομολόγια ενώ μπορούσαμε να βρούμε λύση για όλα τα προβλήματα MDVS.

Το πρόβλημα όμως προκύπτει όταν ο ευρετικός αλγόριθμος πρέπει να εφαρμοστεί σε προβλήματα της πραγματικότητας που είναι κατά κανόνα μεγαλύτερης κλίμακας. Έτσι σε μια μεγάλη πόλη μπορεί να έχουμε αριθμό δρομολογίων 5000 και περισσότερα ενώ ο αριθμός των μεταβλητών φτάνει μέχρι και 20,000,000. Επομένως πρέπει να βρεθεί μια τεχνική που να μπορεί να μας επιτρέψει την διαχείριση τέτοιων προβλημάτων. Προτάθηκαν δύο τεχνικές για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος :

➤ Μείωση του Αριθμού των Δρομολογίων

Αυτή η μείωση επιτυγχάνεται μέσω της συνένωσης διαδοχικών δρομολογίων ώστε να θεωρούνται ως ένα δρομολόγιο *argiori*. Όλα τα ζευγάρια των συμβατών δρομολογίων εξετάζονται όπου το σημείο τερματισμού είναι ίδιο με το σημείο έναρξης του άλλου δρομολογίου. Η διαφορά του χρόνου μεταξύ τερματισμού του πρώτου δρομολογίου και έναρξης του δεύτερου ονομάστηκε ‘Πλεονάσμα Χρόνου Οχήματος’ (Layover Time) και επιλέγεται μια ελάχιστη τιμή πλεονάσματος χρόνου οχήματος. Επομένως επιλέγονται δρομολόγια συμβατά που έχουν πλεονάσμα χρόνου οχήματος ίσο ή μικρότερο της ελάχιστης τιμή πλεονάσματος που ορίσαμε και θεωρείται σαν ένα δρομολόγιο με χρόνο έναρξης και σημείο έναρξης, αυτά του πρώτου δρομολογίου και με τον χρόνο τερματισμού – σημείο τερματισμού του δεύτερου δρομολογίου. Τέλος ο χρόνος ταξιδιού θα είναι η χρονική διαφορά του χρόνου τερματισμού του δεύτερου δρομολογίου και του χρόνου έναρξης του πρώτου δρομολογίου.

➤ Μείωση του Αριθμού των Μεταβλητών

Ο αριθμός των μεταβλητών μπορεί να μειωθεί σε μια διαδικασία που μπορεί να προηγηθεί. Οι μεταβλητές που αντιστοιχούν σε συμβατά δρομολόγια (εδώ ονομάζονται $X_{i,j,d}$) είναι υποψήφιος για να συμβάλουν στην μείωση αυτή. Υπάρχει ένα κόστος που σχετίζεται με κάθε μεταβλητή $X_{i,j,d}$. Το κόστος αυτό είναι το άθροισμα του κόστους των νεκρών διαδρομών μεταξύ δύο συμβατών δρομολογίων και του κόστους του πρώτου δρομολογίου. Τα κόστη που σχετίζονται με τις νεκρές διαδρομές θεωρούνται για την απαλοιφή των $X_{i,j,d}$. Υπολογίζεται το 20% του κόστους των νεκρών διαδρομών. Οι μεταβλητές $X_{i,j,d}$ που έχουν κόστος νεκρών διαδρομών ίσο ή μικρότερο από αυτό το ποσοστό, εξ

ορισμού κρατούνται. Μετά σαν ύστατη προσπάθεια για την βελτίωση της λύσης χωρίζεται το πρόβλημα σε υποπροβλήματα, με ένα μόνο τερματικό σταθμό το καθένα. Τα υποπροβλήματα δημιουργούνται πριν την μείωση των μεταβλητών και λύνονται με τον παραπάνω ευρετικό αλγόριθμο.

Από τα αποτελέσματα διάφορων προβλημάτων ελέγχου γίνεται αντιληπτό πως η μέθοδος μείωσης των μεταβλητών είναι πολύ καλή σαν τεχνική χωρισμού δρομολογίων μεταξύ των τερματικών σταθμών. Γενικότερα, στην μείωση των μεταβλητών το ποσοστό μπορεί να είναι δική μας επιλογή. Όσο πιο μικρό είναι το ποσοστό τόσο πιο μικρό είναι το πρόβλημα που προκύπτει σε σύγκριση με το αρχικό αυθεντικό πρόβλημα και τόσο πιο μεγάλη είναι η διαφορά στην βέλτιστη λύση μεταξύ των προβλημάτων.

Προκειμένου να υπάρξει μια εφαρμογή του αλγόριθμου σε αληθινές συνθήκες και να λύσει αληθινά προβλήματα γίνεται επίλυση του προβλήματος της πόλης Βαλτιμόρης. Φυσικά είχε προηγηθεί μια 'μίνι' επίλυση αντίστοιχου μεγάλου προβλήματος για να διαπιστωθούν τα προβλήματα. Αυτό κατέληξε σε μια στρατηγική που έχει ως εξής :

1. Επιλογή του ελάχιστου χρόνου πλεονάσματος οχήματος και εφαρμογή της πρώτης μεθόδου για την μείωση των δρομολογίων. Ονομασία του νέου προβλήματος ως Τροποποιημένο1.
2. Επιλογή του σωστού ποσοστού για την μείωση των μεταβλητών και εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου για την απαλοιφή των μεταβλητών. Δημιουργία MDVS προβλήματος με μέγεθος που να μπορεί να επιλύεται βέλτιστα. Ονομασία του νέου προβλήματος ως Τροποποιημένο2.
3. Βέλτιστη επίλυση του MDVS Τροποποιημένο2 προβλήματος.
4. Χωρισμός των σύνολο δρομολογίων του Τροποποιημένο2 σε χωριστά προβλήματα, ένα για κάθε τερματικό σταθμό, βασισμένοι στην λύση του Βήματος 3. Δημιουργία του προβλήματος ενός τερματικού σταθμού με τα δρομολόγια τροποποιημένα σε δρομολόγια που ανήκουν στο σύνολο των αρχικών δρομολογίων. Εφαρμογή ευρετικής προσέγγισης σε αυτά τα υποπροβλήματα.
5. Συνδυασμός των λύσεων που προέκυψαν στο βήμα 4. Αυτή είναι μια βελτιωμένη λύση του αρχικού προβλήματος που εκπροσωπήθηκε από το πρόβλημα Τροποποιημένο1.

Αφού παρατηρήθηκαν σχετικά καλά αποτελέσματα στο μεγάλο πρόβλημα ελέγχου η ίδια στρατηγική εφαρμόστηκε στο αληθινό πρόβλημα της Βαλτιμόρης. Η στρατηγική αλλά και τα αποτελέσματα είχαν ως εξής :

1. Η επιλογή του ελάχιστου χρόνου πλεονάσματος οχήματος ήταν 15 Min και έγινε εφαρμογή του πρώτου βήματος στο αρχικό σύνολο από δρομολόγια του MTA (Mass Transit Administration) προβλήματος. Από 5650 αρχικά δρομολόγια δημιουργήθηκε το νέο πρόβλημα με 2218 δρομολόγια συνολικά. Το Τροποποιημένο1 πρόβλημα είχε 5,168,108 μεταβλητές και 11098 περιορισμούς. Ο χρόνος προετοιμασίας αυτού του Τροποποιημένου1 ήταν περίπου 720 λεπτά (12 ώρες) αλλά η διαδικασία της συνένωσης ήταν πολύ γρήγορη και ολοκληρώθηκε σε 5 λεπτά.
2. Εφαρμογή του Βήματος 2. με ποσοστό 5% για την απαλοιφή των μεταβλητών. Το πρόβλημα τροποποιημένο2 είχε 276,265 μεταβλητές και 11098 περιορισμούς. Αυτό το Βήμα ολοκληρώθηκε μετά από 60 λεπτά περίπου.
3. Η ακέραιη λύση του Τροποποιημένο2 ήταν ίση με 524,446 λεπτά λειτουργίας για 605 λεωφορεία. Ο συνολικός χρόνος για την ολοκλήρωση αυτού του βήματος ήταν 520 λεπτά.
4. Χωρισμός του προβλήματος Τροποποιημένο2 σε τέσσερα υποπροβλήματα (αφού 4 ήταν οι τερματικοί σταθμοί). Ο κάθε σταθμός είχε από 1557 δρομολόγια ο 1^{ος} ,1052 δρομολόγια ο 2^{ος} και 1701 δρομολόγια ο 3^{ος} ενώ ο τέταρτος έλαβε 1340 δρομολόγια. Η ευρετική διαδικασία εφαρμόστηκε για το κάθε MDVSTRC υποπρόβλημα. Η τελική λύση είναι το άθροισμα των τεσσάρων λύσεων και καταλήγει σε 511,609 λεπτά λειτουργίας και απαιτούν 568 λεωφορεία. Η συνολική διάρκεια για την κατάληξη στην λύση ήταν 1500 λεπτά περίπου.

Η αναθεώρηση που είχε γίνει τον Ιανουάριο του 1998 είχε σαν λύση τα 620 συνολικά λεωφορεία, με κάθε ένα από αυτά να έχει Σταθερό Κόστος (κόστος κεφαλαίου) ένα κόστος όπως είχε υποτεθεί, 300 λεπτά λειτουργίας. Παρακάτω αναφέρεται Πίνακας με τις διαφορές στη λύση.

Πίνακας 5-1 Σύνοψη και Σύγκριση των Λύσεων

Λύση	Σταθερό Κόστος Οχήματος (min)	Χρόνος Λειτουργίας (min)	Συνολικό Κόστος (min)	Αριθμός των Οχημάτων	Εξοικονόμηση Έναντι Λύσης MTA (%)		
					Οχήματα	Χρόνος Λειτουργίας	Σύνολο
Λύση της MTA	186000	356243	542243	620			
Αποκτηθείσα Λύση	170400	341209	511609	568	8,39	4,22	5,65

Πηγή Haghani & Banihashemi 'Heuristics Approaches for Solving Large Scale Bus Transit Vehicle Scheduling Problem with Route Time Constrains'

Η παραπάνω διαδικασία χρειάστηκε για να καταλήξει σε λύση συνολικά χρόνο 2805 λεπτά (περίπου 2 ημέρες). Χρησιμοποιήθηκαν για την διαδικασία το λογισμικό CPLEX (Version 4) σε 200MH PENTIUM Pc με 64 MB RAM σε όλη την διαδικασία με εξαίρεση το τελευταίο βήμα που χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CPLEX (Version 6) σε λειτουργικό σύστημα Unix. Ακόμα υπάρχουν περισσότερα από 300 σημεία έναρξης των δρομολογίων και 300 σημεία τέλους των δρομολογίων. Έπρεπε να υπολογιστούν οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων πέρατος και αρχής των δρομολογίων και των τερματικών σταθμών. Αυτό έγινε μέσω των δεδομένων δικτύου της πόλης της Βαλτιμόρης και χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MUNUTP για τον υπολογισμό των αποστάσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

6 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το τελευταίο Επίπεδο σχεδιασμού των λεωφορειακών γραμμών είναι ο καθορισμός των υπηρεσιών, δηλαδή η κατανομή των οδηγών στα οχήματα και ο καθορισμός του ωραρίου (βάρδιες) του προσωπικού, τηρουμένων των περιορισμών σχετικά με τις ώρες εργασίας και της ανάπαυσης καθώς και άλλων παραμέτρων που περιγράφονται στις συμβάσεις.

Παλιότερα όπως έχει ήδη αναφέρει οι εταιρίες πίστευαν πως το βήμα αυτό του σχεδιασμού είχε την μεγαλύτερη σημασία διότι συσχετιζόταν άμεσα με τα ημερομίσθια των οδηγών και επομένως με το κόστος της επιχείρησης. Αυτό οδήγησε σε διεξοδική ανάλυση της διαδικασίας και την κατασκευή προγραμμάτων υπολογιστών που θα βοηθούσαν τους μελετητές προς αυτή την κατεύθυνση.

Αξίζει όμως να τονιστεί πως στην Ελλάδα τουλάχιστο το προσωπικό είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο με τα θέματα που σχετίζονται με τα ωράρια εργασίας και τα δικαιώματα που έχουν. Ακόμα οι λεγόμενες βάρδιες των λεωφορείων εκ των πραγμάτων δεν είναι ισοδύναμες και ίδιας ευκολίας με αποτέλεσμα κάποιοι οδηγοί να δυσχεραστούν αν συνεχώς υπηρετούν σε γραμμές με ιδιαίτερες δυσκολίες και με ωράριο δύσκολο. Επομένως ο μελετητής έχει την ευθύνη να ισορροπήσει την κατανομή ώστε να μην υπάρχουν τριβές και μη ομαλή λειτουργία. Εξ' άλλου όσο περισσότερο προσέχει κάποιος την επιχείρηση του και του εργαζομένους, τόσο καλύτερα αποδίδουν αυτοί και κατά ένα μέρος βελτιώνεται η εικόνα του Οργανισμού προς τα έξω (στους επιβάτες).

Στην Αθήνα υπάρχουν πολλές γραμμές που λειτουργούν ή δείχνουν να λειτουργούν με πολύ καλή συνεννόηση, κατανόηση και υπομονή και η εικόνα αυτή μεταδίδεται και στους χιλιάδες επιβάτες που εξυπηρετούνται καθημερινά από τα δρομολόγια των λεωφορείων. Αυτές οι γραμμές έχουν και τον σωστό σχεδιασμό και το έμπυχο δυναμικό που κάνει στην ουσία λειτούργημα και όχι μια απλή εργασία. Το κόστος του Οργανισμού σε μια τέτοια περίπτωση μειώνεται αντί να αυξάνει λόγω διαπληκτισμών, αδιαφορίας και μηδενικής συνεννόησης.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθεί η ιστορική εξέλιξη των αλγορίθμων και των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν παλιότερα καθώς και σύγχρονη μεθοδολογία μαζί με μια μέθοδο υπολογισμού βέλτιστου προγραμματισμού οχημάτων και υπηρεσιών που προτείνεται από δύο Έλληνες καθηγητές, σε μια πρόσφατη δική τους εργασία.

Στα παρακάτω όταν λέμε δρομολόγιο θα εννοούμε ένα όχημα που εκτελεί μία Αναχώρηση και βάρδια την υπηρεσία του οδηγού του οχήματος που το οδηγεί, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά.

Η κλασσική μεθοδολογία περιγράφει την διαδικασία όπως γινόταν και ίσως σε κάποιους Οργανισμούς ακόμα γίνεται ο προγραμματισμός των υπηρεσιών. Βάση αυτής της εμπειρίας αναπτύχθηκαν διάφορα software και που η εξέλιξη των Η/Υ βοήθησε ιδιαίτερα. Κατά σειρά λοιπόν γίνονται τα εξής :

1. Υπολογίζονται οι ανθρωπο-ημέρες που απαιτούνται σε κάποιο χρονικό διάστημα (5-νήμερο συνήθως) και κατ' επέκταση τα απαιτούμενα άτομα.
2. Υπολογίζεται ο αριθμός του προσωπικού που βρίσκεται σε ανάπαυση (ρεπό) την κάθε ημέρα του χρονικού διαστήματος.
3. Δεδομένου ότι το διάστημα ανάπαυσης πρέπει να γίνει μέγιστο τοποθετούνται τα ρεπό σε ζεύγη ημερών και ελαχιστοποιούνται οι χωριστές ημέρες ανάπαυσης.
4. Τέλος γίνεται η ανάθεση των παραπάνω ρεπό στα συγκεκριμένα άτομα του προσωπικού, με βάση κανόνες σύμβασης, παλαιότητας κλπ.

Από την άλλη οι σύγχρονες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν δύο περιγραφές μοντέλων. Η μια περιγραφή αντιμετωπίζει το πρόβλημα προγραμματισμού των οδηγών σε οχήματα σαν Set Partitioning Problem ενώ μπορεί να θεωρηθεί σαν Set Covering Problem εάν γίνουν κατάλληλες μετατροπές στους περιορισμούς.

Η άλλη μέθοδος που περιγράφει την επίλυση του προβλήματος προγραμματισμού οχημάτων και οδηγών προτείνεται μόνο για συγκεκριμένες εταιρίες που επιθυμούν μια γρήγορη λύση στο σχεδιασμό και μπορεί να εφαρμοστεί περισσότερο σε υπεραστικά λεωφορεία. Κύριο πλεονέκτημα του αλγόριθμου που χρησιμοποιείται είναι η γρήγορη εύρεση λύσεως (γενικά σε λιγότερο από 30min και αριθμό επαναλήψεων που δεν είναι μεγαλύτερος του 5). Η ιδιαιτερότητα του προβλήματος που εξετάζεται είναι ότι ο επιβατικός φόρτος μπορεί να αλλάζει την επόμενη ημέρα και επομένως διαδρομές λεωφορείων να αφαιρούνται ή να προστίθενται στο πρόβλημα. Από τα σημεία που απλοποιούν το πρόβλημα είναι ότι ο οδηγός συνήθως ταξιδεύει με το ίδιο όχημα και δεν υπάρχει εναλλαγή οδηγών, όποτε και η μέθοδος συγκλίνει νωρίς σε λύση.

6.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Ως επί το πλείστον στην διαδικασία βέλτιστου προγραμματισμού υπηρεσιών, από το 1960 εμπλέκονται αναλύσεις που έχουν σαν σκοπό την λύση του Προβλήματος Κάλυψης Συνόλου (Set Covering Problem). Ωστόσο καμία λύση δεν μπορούσε να εξαχθεί από μια τέτοια μαθηματική διατύπωση, μέχρι κάποια χρόνια αργότερα. Κατά την περίοδο 1967 – 1978 ο Wren και άλλοι αξιολόγοι μελετητές έψαξαν για μια ευρετική μέθοδο για την επίλυση του προβλήματος με αποκορύφωμα το σύστημα TRACS (Parker και Smith, 1981). Και άλλοι βέβαια ασχολήθηκαν με το ίδιο θέμα (για παράδειγμα Elias ,1964) και οι αλγόριθμοι που ανακαλύφθηκαν μπορούν να βρεθούν στον Wren (1981).

Το πρόβλημα του προγραμματισμού των υπηρεσιών είναι το πρόβλημα του σχεδιασμού νόμιμων βαρδιών έτσι ώστε όλα τα δρομολογημένα λεωφορεία να έχουν ανατεθεί έναν οδηγό σε όλες της ώρες (εργάσιμες) της ημέρας [Wren A & Rousseau J.M (1995)] . Οι βάρδιες έχουν περιορισμούς ως προς την διάρκεια τους και την ανάπαυση των οδηγών καθώς και άλλους περιορισμούς που περιγράφονται στην σύμβαση. Οι οδηγοί μπορούν να αλλάξουν μόνο όταν το λεωφορείο περνά από τα σημεία ανακούφισης. Συνήθως μια εργάσιμη ημέρα αποτελείται από δύο βάρδιες που ενδιάμεσα έχουν κάποιο χρόνο για ανάπαυση και γεύμα. Η κάθε αυτή βάρδια αποτελείται, ιδανικά, από εργασία σε ένα μόνο λεωφορείο, ενώ είναι απαραίτητο κάποιες φορές για να εργάζονται όλα τα λεωφορεία μαζί να υπάρχουν περισσότερα από δύο αναπαύσεις, σε διαφορετικά λεωφορεία στα οποία βέβαια ο οδηγός πληρώνεται.

Σε μια πρώτη προσέγγιση και λόγω του ότι είχε αναπτυχθεί την ίδια εποχή ευρετικός αλγόριθμος που έλυνε το πρόβλημα σχεδιασμού αυτοκινούμενου οχήματος στον σιδηρόδρομο, η λύση μπορούσε να είναι παρόμοια με μικρές διαφορές. Όμως τα αποτελέσματα δεν ήταν τα αναμενόμενα γιατί υπήρχαν δυσκολίες σχεδιάζοντας μη πρακτικά και βελτίωση αυτής της λύσης έως την πρακτική δυνατή λύση, έδωσε στην ουσία περισσότερες βάρδιες απ' ότι έπρεπε.

Οι προσπάθειες που έγιναν για να παρακάμψουν οι ευρετικοί αλγόριθμοι τα προβλήματα τοπικού ελαχίστου δεν ήταν επιτυχημένες. Παρόλο που η βελτίωση της ρουτίνας των οδηγών μέσω μεταφορά βαρδιών ήταν επιτυχημένες δεν θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τις πρακτικές μεθόδους που εφαρμόζονταν. Ακόμα οι μελετητές δεν μπορούσαν να εξηγήσουν (κατά Wren τουλάχιστον) με ποιο τρόπο δούλευαν πάνω σε αυτό το πρόβλημα. Πάντως ήταν αρκετά ευχαριστημένοι όταν η επίλυση είχε αρχίσει από τον ευρετικό αλγόριθμο και ήταν πρόθυμοι να την συνεχίσουν οι ίδιοι. Με αυτή την λογική κατασκευάστηκε το σύστημα TRACS το οποίο θα μπορούσε σήμερα να θεωρείται σύστημα με γνώση του προβλήματος ενσωματωμένη. Έτσι μετά από πολλές προσπάθειες οι

μελετητές και πάλι δεν συμφωνούσαν με τις μεθόδους που χρησιμοποιούσε το πρόγραμμα αλλά ήταν σχετικά ικανοποιημένοι με την λύση που έδινε.

Στην συνέχεια ενώ αναπτύχθηκαν αρκετές εταιρίες άρχισαν να διαφέρουν ως προς τους περιορισμούς στο μήκος των βαρδιών και την νοοτροπία σχεδιασμού. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να υπάρχει η ανάγκη για μεγαλύτερη ανεξαρτησία και περισσότερη γενικότητα. Σε αυτή την περίοδο άρχισαν να γίνονται αλλαγές στο πρόγραμμα και αρκετές μεγάλες εταιρίες ήθελαν να αποκτήσουν το πρόγραμμα τροποποιημένο, όμως στο τέλος οι συμφωνίες χάλασαν διότι οι ιθύνοντες ήθελαν εγγυήσεις για την βέλτιστη λύση, που φυσικά δεν ήταν εφικτή τότε. Κατά τα άλλα το πρόγραμμα ήταν καλύτερο από τις παραδοσιακές μεθόδους που χρησιμοποιούσαν τότε οι μελετητές και η λύση πολύ καλύτερη από αυτή προέκυπτε από αυτές τις μεθόδους. Οι μεγαλύτερες εταιρίες της τότε εποχής είχαν εξειδικευμένα προβλήματα και κατά την τρίμηνη δοκιμή του προγράμματος, αποφάσισαν πως δεν θα το χρησιμοποιούσαν. Στην Γλασκόβη η ημέρα εργασίας ήταν μεγαλύτερη από όλα τα άλλα μέρη και ένα επιθυμητό ποσοστό 'αρχικών' βαρδιών δεν μπορούσε να είναι εφικτό. Στο Δουβλίνο οι ώρες αιχμής ήταν πολύ αργότερα απ' ότι σε άλλες πόλεις, που εμπόδιζαν τον ευρετικό αλγόριθμο να ασχοληθεί ικανοποιητικά με τις πρωινές αιχμές. Στο Λονδίνο πάντα δινόταν μεγάλη προσοχή στον προγραμματισμό των υπηρεσιών και η χρησιμοποίηση του ευρετικού αλγόριθμου δεν μπόρεσε να βρει την λύση που εκεί θεωρούσαν ως βέλτιστη (1978). Αργότερα βέβαια σημειώνεται ότι στο Λονδίνο και στην Γλασκόβη χρησιμοποίησαν ένα πιο εξελιγμένο ευρετικό αλγόριθμο (τροποποίηση ουσιαστικά αυτού που είχε δοκιμαστεί), ενώ στο Δουβλίνο έλεγαν πως χρησιμοποιούσαν ένα μοντέλο παρόμοιο με αυτό που δεν επιλέξαν.

➤ Προγραμματισμός Οχημάτων (1970-1984)

Το 1970 το σύστημα για τον προγραμματισμό των αυτοκινούμενων οχημάτων του σιδηροδρόμου είχε κατασκευαστεί με μεγάλη επιτυχία. Το ονόμασαν VAMPIRES και το τροποποίησαν ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί στα λεωφορεία. Μετά από αρκετές προσπάθειες η διαδικασία στέφει με επιτυχία όταν δοκιμάστηκε από την εταιρία Yorkshire Traction στο Barnsley εξοικονόμησε 23 λεωφορεία σε σύνολο 107, κατά ένα μέρος μέσω την βελτιωμένη σύνδεση των δρομολογίων και από την άλλη επανασχεδιασμού των χρόνων ή επαναπροσαρμογή των γειτονικών δρομολογίων όταν το σύστημα έδειχνε πως δεν είναι πρακτικά τα αποτελέσματα. Μετά από αυτό το γεγονός η Yorkshire Traction χρηματοδότησε την έρευνα για την λύση σε περίπτωση που υπήρχαν

περισσότεροι τερματικοί σταθμοί από 1, και διαφορετικά είδη λεωφορείων.

Έτσι δόθηκε σημασία στο πρόβλημα όταν υπήρχαν πολλοί τερματικοί σταθμοί. Το πρόβλημα αρχικά λύθηκε χωρίς αναφορά στον τερματικό σταθμό. Τα οχήματα τα τοποθετούσαν στο τερματικό σταθμό που είχαν το μικρότερο χρόνο σε νεκρή διαδρομή έως την αρχή του δρομολογίου και από το τέλος και πίσω. Με αυτή την ιδέα οι ευρετικοί αλγόριθμοι συνεχίστηκαν, μέχρι που η προοπτική της ανταλλαγή λεωφορείων άρχισε να φαίνεται ελκυστική. Η αλλαγή αυτή θα λάμβανε χώρα αν το συνολικό κόστος από και προς τον τερματικό σταθμό δεν αυξανόταν. Το σύστημα αργότερα τροποποιήθηκε ώστε να μειώνεται ο χρόνος επιστροφής στους τερματικούς σταθμούς μέσω της αλλαγής των δρομολογίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν από δέκα χρόνια είχε απορριφθεί μια προσέγγιση προβλήματος ανάθεσης (Assignment Problem) επειδή δεν μπορούσε να χειριστεί από τους τότε υπολογιστές. Ακόμα ο αλγόριθμος Hungarian μπορεί να πραγματοποιείται μόνο με το άμεσο κόστος των συνδέσεων και όχι με τις επιπτώσεις που θα μπορούσε να έχει και στα άλλα λεωφορεία. Ακόμα αν και ο αρχικός αλγόριθμος δεν μπορούσε να εξασφαλίζει την βέλτιστη λύση , τουλάχιστον εκεί που δεν την ήξεραν, οι ιθύνοντες (decision Makers) ήταν ενθουσιασμένοι με τα αποτελέσματα του συστήματος και το χρησιμοποιούσαν.

Από την άλλη εύρεση μεθόδου αντιμετώπισης περισσοτέρων του ενός είδους λεωφορείων ήταν κοπιαστική και δεν θα αναφερθεί εδώ. Αξίζει όμως να αναφέρω μια δοκιμή που έγινε σε πρόβλημα που περιλάμβανε 9 είδη λεωφορείων και δρομολόγια που είχαν μια προτίμηση σε συγκεκριμένα είδη. Μια διαδικασία πολλών επιπέδων επινοήθηκε που έλυνε διαδοχικά το κλασσικό Πρόβλημα Μεταφοράς (Transportation Problem) για να καθοριστούν κόστη που οδηγούσαν τον ευρετικό αλγόριθμο. Ενώ όμως τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής κρίθηκαν ικανοποιητικά, όπου υπήρχαν πραγματικά πολλά είδη λεωφορείων ο υπολογιστικός χρόνος αύξανε δραματικά και η βέλτιστη λύση δεν μπορούσε να βρεθεί. Μετά από αυτό το πείραμα παρατηρείται στο Λονδίνο να υπάρχει η τάση για ένα μόνο είδος λεωφορείου, ενώ η δυνατότητα για πολλά είδη λεωφορείων θίχτηκε ξανά μετά από 20 χρόνια. Σε αυτή την περίοδο (1970-1980) το σύστημα χρησιμοποιήθηκε στο Manchester από την Greater Manchester Transport αν και ο ανταγωνισμός ωθούσε σε σχεδιασμό λεωφορείων μικρότερων ομάδων.

Αν και το VAMPIRES χρησιμοποιήθηκε στην δεκαετία του 70 με σημαντικές εξοικονομήσεις, λόγω της ικανότητας που είχε να ερευνήσει όλες τις δυνατές συνδέσεις (μέσω δρομολογίων) σε μια περιοχή, έδινε υπερβολικά αποτελέσματα όταν οι γραμμές σχεδιάζονταν σε μικρές ομάδες και οι λειτουργίες ήταν κανονικές, έτσι που όταν ένα λεωφορείο που έφτανε στο τέρμα γυρνούσε πίσω στην αρχή, χωρίς πολυπλοκότητες.

Ένα πιο απλό σύστημα λοιπόν εξελίχθηκε τότε το οποίο έκανε εισαγωγή νεκρών διαδρομών όταν το λεωφορείο δεν μπορούσε να αναχωρήσει από το ίδιο σημείο αρχής μέσα σε ένα δεδομένο χρόνο. Το σύστημα ονομάστηκε TASC (Smith και Wren, 1981) και περιλάμβανε μια διαδικασία αντίστροφης πορείας όπου εκεί που προστέθηκαν νεκρές διαδρομές να είναι και το πιο αποτελεσματικό σύνολο που έχει προστεθεί. Σε αυτό το σημείο ήταν πιο εύκολο από το VAMPIRES, πιο αξιόπιστο αλλά και πιο γρήγορο σε υπολογιστικό χρόνο. Ωστόσο μετά την εφαρμογή άρχισαν τα παράπονα από το επιβατικό κοινό που έκανε του μελετητές να θεωρούν πως δεν έδινε την βέλτιστη λύση. Έτσι η διαδικασία αντίστροφης πορείας άρχισε να γίνεται όλο και πιο περίπλοκη για να μειώσει τα παράπονα και όλες οι αλλαγές φυσικά γίνονταν σε βάρος του υπολογιστικού χρόνου. Αυτό διαπιστώθηκε σχετικά νωρίς και δημιουργήθηκε ένας συνδυασμός από πιο ελαφρό VAMPIRES και TASC, το οποίο και λειτουργούσε αρχικά από το TASC που έβρισκε μια αρχική λύση και μετά την διαίρεση σε μπλοκ συνεχών εργασιών (απαλοιφή των νεκρών διαδρομών), αυτά τα μπλοκ εισάγονταν στο VAMPIRES για επανασχεδιασμό σαν να επρόκειτο για ιδιαίτερα δρομολόγια.

Το 1983 πάρθηκε η απόφαση για την μετατροπή του συστήματος για την λειτουργία του στους μικροϋπολογιστές. Η μετατροπές έκαναν το TASC τόσο περίπλοκο που το VAMPIRES ήταν πιο γρήγορο υπολογιστικά. Οι μικροϋπολογιστές ταίριαζαν περισσότερο στο VAMPIRES και ως εκ τούτου οι περισσότεροι αυτό χρησιμοποιούσαν. Αργότερα βέβαια κάποιοι θέλησαν να τροποποιήσουν το TASC για να λύνουν προβλήματα μικρότερη κλίμακας και πιο γρήγορα. Μάλιστα πρόσφατα στο TASC προστέθηκε μια προσέγγιση αντικειμενοστραφής (object-oriented) που σημαίνει ότι θα υπάρχει μεγαλύτερη επικοινωνία μεταξύ προγράμματος και ανθρώπου.

➤ Προγραμματισμός Εργασίας και Ανάπαυσης (1978-1985)

Εδώ σημασία θα δοθεί στην διαδικασία εργασίας και ανάπαυσης (Driver Rostering) όπου οι βάρδιες συγκεντρώνονται σε σειρά εβδομαδιαία ή δεκαπενθήμερη, ανάλογα με τους αντίστοιχους κανόνες λειτουργίας. Έτσι στις περισσότερες χώρες προκειμένου να αποφευχθούν τριβές στην υπηρεσία, περιστρέφουν κυκλικά αυτές τις βάρδιες. Το κόστος εξαρτάται από τον βαθμό που μερικές σειρές βαρδιών ξεπερνούν μια ποσότητα εργασίας που θεωρείται στόχος.

Αυτό το πρόβλημα ο Wren το αντιμετώπισε με ευρετικούς αλγόριθμους ειδικότερα για την αγγλική πραγματικότητα. Η λύση δινόταν από ένα μητρώο που οι γραμμές αντιπροσώπευαν τις δεκατέσσερις εργάσιμες

ημέρες και τα στοιχεία αποτελούσαν τις βάρδιες στις αντίστοιχες ημέρες. Αρχικά κατανέμονταν οι ημέρες ανάπαυσης και εύρεση μια αρχικής λύσης με βάση το παραπάνω δεδομένο. Η βελτίωση της λύσης πριν τον Wren είχε δοθεί από Bennett και Potts (1968) μέσω ευρετικού αλγόριθμου που κρατούσε 13 στήλες σταθερές και έκανε αλλαγές στην μια στήλη χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Hungarian. Εδώ διαφοροποιείται ο Wren που χρησιμοποιεί άλλο ευρετικό αλγόριθμο για την αναδιανομή των βαρδιών στην υπό εξέταση στήλη. Αν και η μέθοδος δεν εφαρμόστηκε ευρέως, κάποιες εταιρίες που χρησιμοποιούσαν ημι-αυτόματα συστήματα μπόρεσαν να εισάγουν αυτήν την αρχή.

Τέλος η πραγματική ώθηση στο θέμα του προγραμματισμού των εργασιών και ανάπαυσης έδωσαν διακεκριμένοι μελετητές Glover και McMillan (1984) με την βραβευθείσα εργασία του, που όπως με τις μεθόδους VRP, ενσωμάτωσαν στρατηγικές ψαξίματος Tabu (Tabu Search Strategies) και τις πρόσφατες επεκτάσεις από τον Mackenzie (1997) και τους Al-Amin, Noble και Forbes (1997).

➤ Προγραμματισμός Υπηρεσιών Μέσω Μαθηματικού Προγραμματισμού (1976-1986)

Η αυξημένη δύναμη των υπολογιστών έκανε τους μελετητές να επανεξετάσουν την πιθανότητα διατύπωσης αυτού του προβλήματος σε μορφή Ακεραίου Γραμμικού Προγραμματισμού. Οι Smith και Wren (1988) περιγράφουν ένα νέο σύστημα που πρώτα εφαρμόστηκε από London Transport Buses το 1984 και σε άλλους οργανισμούς αργότερα. Η βάση είναι η δημιουργία πολλών χιλιάδων δυνατών βαρδιών που ακολουθείται από μια διαδικασία ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού για την επιλογή υποσυνόλου που δημιουργεί ένα καλό προγραμματισμό. Ευρετικές μέθοδοι με πολλές ομοιότητες με τα προαναφερθέντα βελτιώνουν και τροποποιούν την λύση και έχουν την δυνατότητα να εισάγουν βάρδιες που απορρίφθηκαν προηγουμένως.

Οι ευρετικές μέθοδοι περιορίζουν το μέγεθος του σύνολο που δημιουργείται αλλά και το μέρος του ακεραίου προγραμματισμού, μέθοδο κλάδου και φραγής και περιγράφονται αναλυτικά στον Smith (1988). Το αρχικό σύστημα που ονομάζεται IMPACS εφαρμόζεται σε πολλές εταιρίες και οι βασικές αρχές περιγράφονται στον Smith (1986).

Το IMPACS έχει πλέον εφαρμοστεί σε περισσότερο από 30 Οργανισμούς που οργανώνουν τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς (λεωφορεία, τραμ, ελαφρό μετρό). Άλλη έκδοση TRACS II εφαρμόστηκε σε κάποιες εταιρίες το 1997 και επέκτειναν το πρόγραμμα και μετρό. Το πρόγραμμα μπορεί να επιλύσει άμεσα προβλήματα που εμφανίζονται κυρίως στην Αγγλία, λόγω της τάσης που έχουν να σχεδιάζουν μικρές μονάδες

ξεχωριστά. Μέχρι και 150 βάρδιες επιλύονται με ικανοποιητική ταχύτητα και ποιότητα. Ωστόσο μερικές εταιρίες διαθέτουν προβλήματα μεγαλύτερης κλίμακας και ένας αλγόριθμος που θα μπορούσε να βοηθήσει, που υπάρχει στο TRACS II, στην επιμέρους ανάλυση παρουσιάζεται στους Wren & Smith (1988). Η λύση που προκύπτει σε όλες τις περιπτώσεις είναι καλύτερη από τον σχεδιασμό με παραδοσιακές μεθόδους από τους μελετητές.

Άλλα προγράμματα που έχουν δημιουργηθεί και χρησιμοποιούν διαδικασίες μικτές ευρετικών και μαθηματικού προγραμματισμού είναι το Hastus από το University of Montreal (Rousseau και Blais, 1985) και HOT που υλοποιήθηκε από το Hamburger Hochbahn (Daduna και Mojsilovic, 1985). Το πρώτο είναι σε ευρεία εφαρμογή ενώ το δεύτερο ως επί το πλείστον υπάρχει στην Γερμανία και Γαλλία.

➤ Μετα-Ευρετικές Μέθοδοι στον
Προγραμματισμό Υπηρεσιών (1990 μέχρι σήμερα)

Το 1995 οι Wren (πατέρας και γιος) δοκίμαζαν ένα πρακτικό Γενετικό Αλγόριθμο με το οποίο και βρήκαν μια βέλτιστη λύση σε ένα πρόβλημα προγραμματισμού υπηρεσιών με 15 βάρδιες. Αρχικά ο ΓΑ ξεκινά με την επιλογή ενός πληθυσμού από σχεδιασμούς βαρδιών με τυχαία επιλογή από ένα σύνολο που δημιουργείται από το TRACS II και ο σκοπός ήταν εάν πετύχαινε να αντικαταστήσει το μέρος του ακέραιου προγραμματισμού. Ωστόσο σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα υπάρχουν εμπόδια που απαιτούν λύση και που ο τρόπος ακόμα ερευνάτε.

Μια άλλη προσέγγιση έγινε το 1996 από τους Kwan και Wren με ΓΑ για τον καθορισμό των αναπαύσεων που μπορούν να προστεθούν στο TRACS II ή κάποιο άλλο σύστημα. Ο αρχικός πληθυσμός αποτελείται από τυχαία υποσύνολα ευκαιριών ανάπαυσης (relief opportunities). Τα αποτελέσματα της εφαρμογής είναι ενθαρρυντικά και ο αριθμός των αναπαύσεων είναι μικρότερο σε σύνολο από το σύνολο που προκύπτει από το TRACS II.

Τέλος βρίσκονται σε έρευνα συστήματα που θα χρησιμοποιούν ευρετικές μεθόδους και γενετικούς αλγόριθμους για τον καθορισμό των βαρδιών και των αναπαύσεων. Άλλες μέθοδοι από το πεδίο των ευρετικών αλγόριθμων βρίσκονται υπό δοκιμή όπως είναι η μέθοδος Tabu. Παράλληλα υπάρχει μια τάση για την εφαρμογή των όσον γνωρίζουμε σε συστήματα μιμητικά (mimetic) και ant systems.

6.3 ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οι υπηρεσίες προσωπικού δημιουργούνται με βάση τους πίνακες δρομολόγησης των λεωφορείων. Οι βάρδιες μπορεί να είναι συνεχείς (8ωρο) με 20 λεπτά χρόνο ανάπαυσης, ή διακεκομμένες (κατσαρές) με εργασία 3 – 4 ωρών στην αρχή, διακοπή περίπου 4 ωρών και εργασία 3 – 4 ωρών στο τέλος. Υπάρχει ακόμα η περίπτωση η συνολική εργασία του προσωπικού να υπερβεί το 8^ο αν αυτό απαιτείται από τα δρομολόγια των λεωφορείων. Πάντως ο χρόνος υπερωρίας δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει ένα μέγιστο όριο. Οι ακριβείς ώρες εργασίας και ανάπαυσης του προσωπικού, οι υπερωρίες κτλ. καθορίζονται από τις ισχύουσες συμβάσεις εργασίας (που αλλάζουν αρκετά συχνά) και από τους κανονισμούς ωρών εργασίας – ανάπαυσης του προσωπικού κίνησης.

Οι αλλαγές βάρδιας γίνονται σε ειδικά προκαθορισμένα σημεία του δικτύου όπου περιμένει το προσωπικό και γίνεται η αλλαγή, συνήθως στις αφετηρίες ή τα τέρματα γραμμών.

Με βάση τις ώρες εργασίας (και υπερωριών) του προσωπικού καθορίζεται και η συνολική αμοιβή του. Συνήθως υπάρχει ένα ελάχιστο όριο ωρών εργασίας την ημέρα για το οποίο υπάρχει εγγύηση εργασίας δηλαδή πληρώνεται το προσωπικό έστω και αν δεν δούλεψε το ελάχιστο όριο.

Υπάρχουν επίσης μια σειρά περιορισμοί που ισχύουν, ανάλογα πάντα με τις συμβάσεις εργασίας. Π.χ. καθορίζεται ένα ελάχιστο ποσοστό συνεχών βαρδιών στο σύνολο των βαρδιών του κάθε μέλους του προσωπικού στο μήνα. Το ποσοστό αυτό είναι συνήθως 50% αλλά μπορεί να φτάσει μέχρι και 75%. Ένας άλλος περιορισμός είναι ο μέγιστος αριθμός ωρών εργασίας του προσωπικού την ημέρα περιλαμβανομένης της τυχόν υπερωρίας. Αυτό είναι συνήθως 10 ώρες δηλαδή επιτρέπεται μέχρι 2 ώρες υπερωρία. Μάλιστα η πρώτη ώρα συνήθως θεωρείται υπερεργασία και οι υπόλοιπες ως υπερωρία.

Οι περιορισμοί αυτοί δυσκολεύουν την όλη διαδικασία και κάνουν τον καθορισμό των υπηρεσιών αρκετά δύσκολο. Το τελευταίο βήμα στο στάδιο αυτό είναι ο καθορισμός των ημερών ανάπαυσης (ρεπό) μέσα στο μήνα. Αν και ο στόχος είναι κατά πρώτο λόγο η ύπαρξη συνεχόμενων ημερών ανάπαυσης και κατά δεύτερο η σύμπτωση τουλάχιστον μία από αυτές με Σαββατοκύριακο, ενώ το τελευταίο δεν είναι πάντα εφικτό. Ο τρόπος καθορισμού των ημερών αυτών έτσι ώστε να επιτυγχάνεται κατά το δυνατόν οι παραπάνω στόχοι μπορεί να γίνει ως εξής :

- a. Υπολογίζεται ο απαιτούμενος αριθμός προσωπικού για 5νθήμερη εβδομαδιαία εργασία. Αυτό γίνεται με βάση τα στοιχεία των υπηρεσιών προσωπικού που υπολογίστηκαν προηγουμένως.

Αν υποθεθεί για παράδειγμα ότι ο αναγκαίος αριθμός υπηρεσιών προσωπικού δηλαδή ημερών εργασίας για μια βδομάδα θα είναι 15 βάρδιες την ημέρα, 10 βάρδιες το Σάββατο και 5 βάρδιες Κυριακής. Με την 5νθήμερη εργασία ανά εργαζόμενο οι παραπάνω βάρδιες απαιτούν : $(15 \cdot 5) + (10 \cdot 1) + (5 \cdot 1) = 90$ ανθρωπο-ημέρες ή $90/5 = 18$ άτομα.

- b. Υπολογίζεται στη συνέχεια ο αριθμός του προσωπικού που είναι σε ανάπαυση (ρεπό) κατά ημέρα της εβδομάδας.

Στο παραπάνω παράδειγμα θα είναι :

Ρεπό Κυριακής $18 - 5 = 13$
 Ρεπό Σαββάτου $18 - 10 = 8$
 Ρεπό Καθημερινής $18 - 15 = 3$

- c. Το τρίτο βήμα είναι να διατεθούν αυτά τα ρεπό ανά ζεύγη ημερών μεγιστοποιώντας τα ζεύγη Σαββάτου – Κυριακής, και ελαχιστοποιώντας τα χωριστά ρεπό.

Άρα για το παράδειγμα που αναφέρθηκε θα έχουμε :

Πίνακας 6-1 Κατανομή των ρεπό μεγιστοποιώντας τα ζεύγη Σαββάτου - Κυριακής

	Κυριακή	Δευτέρα	Τρίτη	Τετάρτη	Πέμπτη	Παρασκευή	Σάββατο
Αριθμός Ρεπό	8						8
	3	3					
			2	2			
					3	3	
	1		1				
	1			1			
Σύνολο	13	3	3	3	3	3	8

- d. Το τελευταίο βήμα είναι η διάθεση των ρεπό αυτών στα συγκεκριμένα άτομα του προσωπικού. Συνήθως λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος προϋπηρεσίας στην εταιρία, αλλά βεβαίως και οι δεσμεύσεις που υπάρχουν λόγω των υπαρχόντων συμβάσεων εργασίας.

Τα προηγούμενα ισχύουν τόσο για το κανονικό προσωπικό όσο και για το επικουρικό. Δηλαδή ο συνολικός αριθμός των δεκαοκτώ ατόμων που υπολογίστηκαν στο παράδειγμα ότι χρειάζονται, περιλαμβάνει τόσο το κανονικό όσο και το επικουρικό.

6.4 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

Όπως αναφέρθηκε ήδη στην σύντομη ιστορική ανασκόπηση υπάρχουν πολλές εργασίες που ασχολήθηκαν αποκλειστικά με τον βέλτιστο προγραμματισμό των υπηρεσιών σαν τέταρτο και τελευταίο βήμα του σχεδιασμού της λειτουργίας των λεωφορειακών γραμμών.

Βιβλία υπάρχουν από τον Wren (1981), Rousseau (1985), Daduna και Wren (1988), Desrochers και Rousseau (1992), Daduna et al (1995), Wilson (1999) και Voss και Daduna (2001). Σαν συμπληρώματα, ειδικά θέματα που απασχόλησαν τους μελετητές αναπτύχθηκαν παράλληλα, σε ιδιαίτερη έκταση.

Η βασική μαθηματική διατύπωση του προβλήματος προγραμματισμού των οδηγών σε οχήματα [Ceder A. (2002)] είναι μηδέν – ένα ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός, που ονομάζεται και Set Partitioning Problem (SPP). Σε αυτό το SPP ο στόχος είναι να επιλεγεί ένα ελάχιστο σύνολο δυνατών βαρδιών έτσι ώστε κάθε δρομολόγιο να περιλαμβάνεται σε αυτές τις βάρδιες :

$$\min \sum_{q \in Q} c_q x_q$$

με περιορισμούς

$$\sum_{q \in Q(j)} x_q = 1$$

$$x_q = (0,1) \text{ για όλα τα } q \in Q \text{ και } j \in J$$

όπου c_q είναι το κόστος της βάρδιας $q \in Q$

Q είναι το σύνολο όλων των δυνατών βαρδιών

$Q(j) \in Q$ είναι το σύνολο των βαρδιών που καλύπτουν τα δρομολόγια $j \in J$.

Μια μεταβλητή δυαδικής μορφής χρησιμοποιείται x_q για να υποδείξει αν η βάρδια q συμπεριλαμβάνεται στην λύση ή όχι. Ακόμα η δυαδική μορφή (0,1) εξασφαλίζει ότι ένα δρομολόγιο μπορεί να εξυπηρετηθεί από μια μόνο βάρδια (υπηρεσία). Μια πιο εύκολη μέθοδο είναι η ανακούφιση του τελευταίου περιορισμού σε :

$$\sum_{q \in Q(j)} x_q \geq 1$$

για κάθε $j \in J$.

Η τελευταία εξίσωση αποτελεί το νέο πρόβλημα που ονομάζεται πρόβλημα κάλυψης συνόλου (Set Covering Problem) και το οποίο λύνεται πρώτο και η λύση αλλάζει ώστε να αντιμετωπιστεί το SPP πρόβλημα με την διαγραφή των επικαλυπτόμενων δρομολογίων. Αυτή η διαδικασία διαγραφής περιλαμβάνει αλλαγές στις βάρδιες και ένας οδηγός που έχει την βάρδια του σε τέτοιο δρομολόγιο θα είναι στο όχημα αλλά σαν επιβάτης. Ο Freling (1999) εξηγεί ότι μια τέτοια αλλαγή δεν επηρεάζει ούτε την πραγματικότητα ούτε το κόστος των βαρδιών.

Μια μικτή προσέγγιση ευρετικών μεθόδων και απευθείας λύσης για την επίλυση του προγραμματισμού των οδηγών σε οχήματα έγινε από τον Bodin et al (1983). Αυτός έδωσε τα εξής βήματα στην λύση του :

1. Δημιουργία όλων των εργασιών (από τα δυνατά μπλοκ, 3^ο ΒΗΜΑ)
2. Καθορισμός των ενδιάμεσων κοστών (βασισμένος στην εμπειρία)
3. Δημιουργία μη κυκλικού δικτύου από μπλοκ που οι κόμβοι είναι σημεία ανακούφισης και η σύνδεση εκπροσωπεί το κόστος της εργασίας στο μπλοκ.
4. Επίλυση του προβλήματος συντομότερης διαδρομής για το ελάχιστο κόστος εργασιών.
5. Επίλυση ενός προβλήματος συνδυασμού χρησιμοποιώντας δύο οι τρία κομμάτια συνδυασμού, και αν μια λύση δεν είναι πρακτική (εφαρμόσιμη) τότε αλλαγή στα κόστη της διαδικασίας και επαναεπίλυση του προβλήματος συντομότερης διαδρομής για να είναι η λύση δυνατή και ικανοποιητική.

Από την άλλη το πρόβλημα με τα σημεία ανάπαυσης είναι ένα πρόβλημα που τις περισσότερες κατευθύνσεις και περιορισμούς τις θέτει ο Οργανισμός και οι κανόνες λειτουργίας, για αυτό και είναι πιο εξειδικευμένο πρόβλημα.

Παρακάτω αναφέρεται μια προσέγγιση (λύση) του προβλήματος προγραμματισμού οχημάτων και οδηγών από δύο έλληνες καθηγητές Χρίστος Βαλούχης και Ευθύμιος Χούσος.

6.5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΟΔΗΓΩΝ

Σε περίπτωση που μια εταιρία δεν δουλεύει με σταθερό πρόγραμμα οχημάτων και οδηγών, θα πρέπει να επιλύει το πρόβλημα κάθε απόγευμα για την επομένη. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι που μπορεί να συμφέρει αυτό το σύστημα αφού οι φόρτοι μπορεί να μεταβάλλονται ή να προστίθενται νέες διαδρομές στα λεωφορεία. Ακόμα υπάρχει ο παράγοντας επιβάτης που θέλει να έχει την καλύτερη λύση στα παραπάνω προβλήματα.

Εδώ θα παρουσιαστεί μια γρήγορη επίλυση που γίνεται μέσω μιας ευρετικής διαδικασίας που ονομάστηκε QL και σχεδιάστηκε ειδικά για την ελληνική πραγματικότητα. Ακόμα το σύστημα QL έχει εφαρμοστεί σε αρκετές ελληνικές εταιρίες με πολύ καλά αποτελέσματα. Οι κύριοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από το QL είναι επιλογής ελάχιστου κόστους (minimum cost matching), χωρισμός συνόλου (set partitioning) και συντομότερης διαδρομής (shortest path). Ακόμα στην αρχική εργασία [Valouxis C. & Housos E. (2000)] περιγράφεται μια διαδικασία γεννήτριας στήλης (column generation procedure) που ονομάζεται CGQL που χρησιμοποιεί έναν LP-solver και την διαδικασία QL για να βρει μια λύση σε ακέραιη μορφή.

6.5.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα του καθορισμού κάθε φορά του προγραμματισμού των οχημάτων και οδηγών, είναι ένα δύσκολο πρόβλημα και εντάσσονται στα συνδυάσθηκα προβλήματα. Στην Ελλάδα υπάρχουν περίπου 50 λεωφορειακές εταιρίες που εξυπηρετούν διάφορες περιοχές της χώρας με την προϋπόθεση ότι οι οδηγοί δεν πρέπει να αλλάξουν λεωφορείο. Αυτή η προϋπόθεση υπάρχει λόγω του ότι οι περισσότεροι οδηγοί είναι και ιδιοκτήτες των λεωφορείων. Κάθε εταιρία λειτουργεί με 200 μέχρι 400 δρομολόγια την ημέρα και οι βάρδιες θα πρέπει να καθοριστούν την προηγούμενη. Σήμερα ο προγραμματισμός γίνεται από τους μελετητές (manually) ή ακολουθεί ένα πρότυπο δημιουργίας βαρδιών που είναι σταθερό ,δεν έχει ευελιξία και που τις περισσότερες φορές δεν είναι επαρκές.

Το πρόγραμμα το οποίο προτείνεται είναι το πρώτο που κατασκευάζεται με αυτό τον σκοπό και από τους κύριους περιορισμούς είναι ο υπολογιστικός χρόνος μαζί με τις απαιτήσεις που βάζουμε σε υπολογιστικούς πόρους. Ο χρόνος, σαν στόχος, που απαιτείται για να

δοθεί λύση στο πρόβλημα είναι κάτω από 30 λεπτά. Η ταχύτητα χρειάζεται διότι καθημερινά η εργασία την επομένη είναι διαφορετική λόγω εκδρομών, διακοπών και ειδικών περιστάσεων. Ο δυναμικός χαρακτήρας του φόρτου κάνει τον προγραμματισμό να περιμένει έως το τέλος του απογεύματος προκειμένου να παρθούν οι τελευταίες πληροφορίες για τον φόρτο εργασίας. Η λύση πρέπει να βελτιστοποιήσει όλα τα λεωφορεία της υπάρχουσας ημέρας, γιατί οι ημέρες ανάπαυσης έχουν καθοριστεί τόσο για τα λεωφορεία όσο και για τους οδηγούς.

Η εργασία βασίζεται στην εργασία του Ball et al και Ball & Roberts οι οποίοι παρουσίασαν έναν ευρετικό αλγόριθμο που χρησιμοποιεί μια προσέγγιση γραφικού επιμερισμού (graph partitioning approach) και μια σειρά από προβλήματα επιλογής ελάχιστου κόστους για να βρουν μια αρχική λύση και μετά την βελτίωση της αλυσίδας των βαρδιών μέσω άλλων τοπικές τεχνικές αναζήτησης.

6.5.2 Περιγραφή προβλήματος

Το πρόβλημα προγραμματισμού των οδηγών είναι συνηθισμένο πρόβλημα και η λύση του εξαρτάται από το εάν το πλήρωμα και τα μεταφορικά μέσα λειτουργούν χωρίς απόσπαση, μαζί. Στις περισσότερες περιπτώσεις βέβαια οι οδηγοί δεν παραμένουν στα ίδια λεωφορεία αλλά στην περίπτωση που εξετάζεται, οι οδηγοί δεν αλλάζουν λεωφορεία. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι υπάρχουν διαφορετικά είδη λεωφορείων που μπορούν να λειτουργήσουν σε συγκεκριμένα τμήματα δρομολογίων περιπλέκει το πρόβλημα σε μεγάλο βαθμό. Στις περισσότερες καταστάσεις προγραμματισμού των οδηγών η λύσεις δύνεται σε δύο βήματα και για ένα είδος λεωφορείων. Αυτό απλοποιεί την διαδικασία της λύσης αλλά προκύπτουν προβλήματα κυκλικά μεταξύ δημιουργίας βαρδιών και βημάτων ανάθεσης. Αυτό δημιουργείται γιατί η ανάθεση των βαρδιών δεν είναι εγγυημένη είτε λόγω του ότι υπάρχει μικρό σύνολο από επιλογές είτε γιατί κάποιοι κανόνες εφαρμόζονται μόνο στο επίπεδο ανάθεσης. Έτσι πρέπει να βρεθεί τρόπος να ανατεθούν νόμιμες βάρδιες σε οχήματα με τρόπο ικανοποιητικό για να καλυφθεί όλη η εργασία.

6.5.3 Μαθηματικό Μοντέλο Προβλήματος

Η προσέγγιση που γίνεται είναι μηδέν-ένα ακέραιος προγραμματισμός για το συνδυαστικό πρόβλημα οχημάτων και οδηγών. Το ολοκληρωμένο

$$\min \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (6.5.3-1)$$

σύνολο από νόμιμες καθημερινές βάρδιες μπορεί στην θεωρία να δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας μια διαδικασία αναζήτησης δενδρική (search tree procedure). Η αντικειμενική συνάρτηση με τους περιορισμούς :

με περιορισμούς

$$x_j = \{0,1\} \quad , j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n b_{kj} x_j = 1, \quad k \in T \quad (6.5.3-2)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq 0, \quad i \in B \quad (6.5.3-3)$$

όπου c_j είναι το κόστος της βάρδιας j
 n αριθμός των δημιουργημένων βαρδιών
 B το σύνολο των λεωφορείων
 T το σύνολο των τμημάτων δρομολογίων
 $a_{ij} = 1$ εάν το λεωφορείο i έχει βάρδια j
 $= 0$ σε διαφορετική περίπτωση
 $b_{kj} = 1$ εάν το μήκος διαδρομής k καλύπτεται από την βάρδια j
 $= 0$ σε διαφορετική περίπτωση

Το κόστος c_j ορίζεται σαν το άθροισμα όλων των χρόνων αναμονής μεταξύ των τμημάτων δρομολογίων των βαρδιών j και της ποινής που ορίζεται από τον χρήστη για μεγάλες ή σύντομες βάρδιες. Ακόμα υπάρχει ποινή σε περίπτωση που η βάρδια απαιτεί διανυκτέρευση σε άλλη τοποθεσία από την αρχική του οδηγού. Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου επιβάλλει την επιλογή των βαρδιών με το ελάχιστο κόστος. Στον περιορισμό (6.5.3-2) εξασφαλίζεται η χρησιμοποίηση όλων των λεωφορείων. Ο περιορισμός (6.5.3-3) εξασφαλίζει ότι όλα τα τμήματα δρομολογίων καλύπτονται.

6.5.4 Προσέγγιση Γρήγορων Βαρδιών

Η προσέγγιση γρήγορων βαρδιών (Quick Shifts) στο συνδυαστικό πρόβλημα οχημάτων και οδηγών περιγράφεται ως εξής σε μορφή ψευδοκώδικα :

ΠΡΩΤΗ ΦΑΣΗ

- 1.1 Ανάγνωση των εισαγομένων δεδομένων
- 1.2 Κατάτμηση όλων των τμημάτων σε επίπεδα
- 1.3 Σύνδεση των τμημάτων σε σταθμούς

ΔΕΥΤΕΡΗ ΦΑΣΗ

Για κάποιες δεδομένες επαναλήψεις

- 2.1 Δημιουργία των νόμιμων βαρδιών
- Επανάληψη
- Επανάληψη
 - 2.2 Βελτίωση Βαρδιών (2^η προσπάθεια βελτιστοποίηση)
 - 2.3 Βελτίωση Βαρδιών (επιμερισμός επιπέδων)
 - Έως ότου καμία βελτίωση να μην μπορεί να λάβει χώρα
 - 2.4 Βελτίωση Βαρδιών (3^η προσπάθεια βελτιστοποίηση με χωρισμό συνόλου)
 - Έως ότου καμία βελτίωση να μην μπορεί να λάβει χώρα
 - 2.5 Εύρεση των βαρδιών για τα ακάλυπτα τμήματα (k-shortest path)
 - 2.6 Διατήρηση μερικών συνδέσεων μεταξύ των τμημάτων δρομολογίων από την λύση

ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ

Κάθε φάση και κάθε βήμα από τα παραπάνω θα αναλυθεί σε μεγαλύτερη έκταση αργότερα. Τα βασικά βήματα αυτής της προσέγγισης είναι μια διαδικασία επίλυσης της επιλογής ελαχίστου κόστους, μια μικρή βελτιστοποίηση του χωρισμού συνόλου και μια διαδικασία συντομότερης διαδρομής. Η επιλογή του ελάχιστου κόστους και της συντομότερης διαδρομής γίνονται σε πολύ μικρό χρόνο, αφού είναι γρήγορες διαδικασίες. Το πρόβλημα επιλογής λύνεται επαναληπτικά στο εσωτερικό των επιπέδων του QL και αυτό λειτουργεί σαν συνδυαστικό στοιχείο που διατηρεί την ισορροπία και κατευθύνει την διαδοχή των λύσεων των υποπροβλημάτων σε ένα κοινό συνολικό (όχι τοπικό) στόχο. Τα προβλήματα χωρισμού συνόλου που επιλύονται κρατούνται

επίτηδες σε μικρές διστάσεις και χρησιμοποιούνται σπάνια λόγω της υπολογιστικής πολυπλοκότητας αυτής της κατηγορίας των προβλημάτων. Το πρόβλημα επιλογής ελάχιστου κόστους επεξηγεται περισσότερο με σκοπό να διευκολυνθεί η ανάγνωση της διαδικασίας του αλγόριθμου.

Δεδομένου ενός γραφήματος μη προσανατολισμένο $G(V,E)$ όπου V είναι το σύνολο των κορυφών και E το σύνολο των ακμών, μια λύση επιλογής M περιέχει ένα υποσύνολο των ακμών με την ιδιότητα ότι καμία από τις δύο ακμές του M δεν συνδέουν ταυτόχρονα σε μια κορυφή. Σχετίζουμε το κόστος b_i για κάθε κορυφή i , με $i \in V$ και ένα κόστος c_{ij} για κάθε ακμή $(i,j) \in E$. Εάν συμβολίσουμε με $V1$ το σύνολο των κορυφών που επιλέγεται από το σύνολο M μετά το ελάχιστο κόστος επιλογής ορίζεται σαν ελαχιστοποίηση :

$$\sum_{(i,j) \in M} c_{ij} + \sum_{i \in (V-V1)} b_i$$

Όπου M είναι μια λύση επιλογής και $(V-V1)$ είναι το σύνολο των κορυφών που δεν εμπλέκονται με στις ακμές του σύνολο M . Για την λύση του προβλήματος χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος που περιγράφεται στον Gabow (1975).

1. Χωρισμό των όλων των τμημάτων σε επίπεδα (QS 1.2)

Αρχικά γίνεται η επιλογή των ενεργών κανόνων και της ανάγνωσης των δεδομένων (QS 1.1). Στο βήμα QS 1.2 δημιουργείται ένα γράφημα από κόμβους που αντιστοιχούν σε όλα τα τμήματα δρομολογίων το οποίο και χωρίζεται σε περισσότερα επίπεδα. Όλα τα τμήματα δρομολογίων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν σαν πρώτα τμήματα των νέων βαρδιών εισάγονται στην στο πρώτο επίπεδο. Αυτή η επιλογή γίνεται βάση του ότι δεν υπάρχουν δυνατές συνδέσεις προηγούμενες για αυτά τα τμήματα. Τα υπόλοιπα τμήματα αναθέτονται στα υπόλοιπα επίπεδα χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ανάθεσης σε επίπεδα. Με το να εξετάζονται όλα τα τμήματα με σειρά χρόνου αναχώρησης, ο αλγόριθμος ανάθεσης σε αριθμό επιπέδου, αναθέτει σε κάθε τμήμα δρομολόγησης τον αριθμός της μακρύτερης διαδρομής σε αυτό το τμήμα, από το επίπεδο 1. Η σύνδεση μεταξύ δύο τμημάτων δρομολογίων είναι δυνατή εάν ικανοποιεί τους κανόνες του να είναι υποσύνολο μιας νόμιμης βάρδιας για τουλάχιστον ένα από τα διαθέσιμα λεωφορεία. Αυτή η ανάθεση εξασφαλίζει ότι δεν συνδέονται τμήματα που είναι του ίδιου επιπέδου, επομένως όλα τα τμήματα για κάθε δρομολόγιο ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα. Αυτή η ιδέα της οργάνωσης σε επίπεδα χρησιμοποιείται σε πολλές περιστάσεις στην διαδικασία της λύσης και είναι η καρδιά της βασικής δημιουργίας βαρδιών από το QS.

2. Θεώρηση σταθμών μικρής κυκλοφορίας

Για να μειώσουμε το μέγεθος και την υπολογιστική περιπλοκότητα του προβλήματος, εξετάζονται τοπικές συνδέσεις μεταξύ των τμημάτων δρομολογίων που καταφτάνουν και αναχωρούν σε μικρούς σταθμούς. Σε κάποιες περιπτώσεις ξέρουμε ότι κανένα λεωφορείο δεν ξεκινά ή σταματά την βάρδια του σε ένα συγκεκριμένο μέρος και άρα όλα τα τμήματα που εισέρχονται σε ένα σταθμό θα πρέπει να ενωθούν με τα τμήματα που εξέρχονται από τον σταθμό, μέσα στην ίδια βάρδια. Σε περίπτωση που είναι δυνατό να δημιουργήσουμε μια νύχτα ανάπαυση σε συγκεκριμένο σταθμό και άρα επιτρέποντας νέες βάρδιες να αρχίσουν και να τερματίζουν στον σταθμό τότε πρέπει τοπικός σταθμός να υπολογιστεί ξανά. Για να υπολογιστούν αυτές οι τοπικές συνδέσεις, δημιουργείται ένα μητρώο με συντελεστές βαρύτητας με τους χρόνους μεταξύ των συνδέσεων και το πρόβλημα επιλογής ελάχιστου κόστους επιλύεται ξανά για να βρεθούν οι πιο πολλές ‘υποσχόμενες’ συνδέσεις. Αυτές οι συνδέσεις βοηθούν στην διευκόλυνση της δημιουργίας του αρχικού σύνολο των βαρδιών γιατί κάποια γνώση ήδη χρησιμοποιείται όταν το βασικό σύνολο των βαρδιών δημιουργείται.

Τα QS 1.1, QS 1.2, QS 1.3 αποτελούν την πρώτη φάση του γενικού αλγόριθμου. Αυτή η φάση εκτελείται μόνο μια φορά στην αρχή της διαδικασίας επίλυσης και έτσι μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα βήμα οργάνωσης δεδομένων και δημιουργίας επιπέδου.

3. Βασική κατασκευή βαρδιών (QS 2.1)

Βασικές βάρδιες μπορούν να κατασκευαστούν αρχίζοντας από ένα λεωφορείο και αναθέτοντας του ένα διασυνδεδεμένο τμήμα δρομολογίου που εκτείνεται σε πολλά επίπεδα. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει την ανάθεση όλων των τμημάτων δρομολογίων του επιπέδου ένα σε αντίστοιχα λεωφορεία. Ακολουθώντας αυτό το βήμα η διασύνδεση μεταξύ των τμημάτων δύο επιπέδων γίνεται με την επιλογή ελάχιστου κόστους και η επέκταση των βαρδιών. Κατά την διάρκεια αυτών των βημάτων δημιουργούνται επιπλέον βάρδιες που δεν ξεκινούν από το επίπεδο 1. Αυτό γιατί υπάρχει μεταβολή στην φόρτιση καθημερινά και διότι δεν υπάρχει τρόπος να επεκτείνουμε βάρδιες του επιπέδου 1 για πάντα. Αυτά τα βήματα γίνονται σε όλα τα επίπεδα.

Ακόμα κάποιες ‘δικλείδες’ που είχαμε τοποθετήσει νωρίτερα για την κατασκευή των βασικών βαρδιών παύουν να υπάρχουν με στόχο την έρευνα γειτονικών περιοχών (λύσεων) και την απαλλαγή από μια άσχημη τοπική λύση.

4. Βελτίωση των βαρδιών – 2^η αναζήτηση βέλτιστου

Σε αυτό το βήμα γίνεται μια 2^η αναζήτηση βέλτιστου συνδυάζοντας όλες τις βάρδιες με τις άλλες βάρδιες, με εύκολο γρήγορο και απλό τρόπο, όπως η μεταφορά ενός ή περισσότερων τμημάτων δρομολογίου από την μια βάρδια σε μια άλλη. Ένας 2^η μετασχηματισμός βέλτιστου είναι δυνατόν να συμβεί εάν το συνολικό κόστος των νέων βαρδιών είναι μικρότερο από το κόστος των βασικών αρχικών βαρδιών. Σε αυτό το 2^ο βήμα μετασχηματισμού οι βάρδιες αλλά αποθηκεύονται οι καλύτερες μετατροπές που ευρέθησαν από τους αναζητητές έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ακόλουθο μοντέλο επιλογής. Ένα γράφημα δημιουργείται που έχει κόμβους όλες της υπάρχουσες βάρδιες και συνδέσεις που δείχνουν την ύπαρξη ενός πλεονεκτήματος από την αμοιβαία ανταλλαγή τμημάτων δρομολογίου των βαρδιών στο τέλος της σύνδεσης. Με την επίλυση αυτού του προβλήματος επιλογής ελάχιστου κόστους οι συνδέσεις που ανήκουν στο σύνολο που επιλέχθηκαν χρησιμοποιούνται για να αλληλοσυνδέσουν τα ζευγάρια των βαρδιών που έχουν την μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η επιλογή των συνδυασμών με την μεγαλύτερη συνολική βελτίωση και έτσι δίνεται με λύση συνολικού χαρακτήρα που βελτιώνει μια λύση τοπική σημασίας που μπορεί να είχαμε. Η διαδικασία της 2^{ης} βελτιστοποίησης επαναλαμβάνεται έως ότου δεν υπάρχει άλλο περιθώριο βελτίωσης. Η διαδικασία επανάληψης βελτιώνεται σημαντικά από την διατήρηση των βαρδιών που δεν βελτίωσαν την λύση του συστήματος.

5. Βελτίωση βαρδιών - επιμερισμός επιπέδων (QS 2.3)

Σε αυτό το βήμα επιχειρείται να εξεταστούν οι διασυνδέσεις που δεν εξετάστηκαν στην 2^η βελτίωση λόγω των αλλαγών σε τμήματα δρομολογίων μεταξύ μεγάλων συνόλων βαρδιών. Η ευρετική μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον επιμερισμό των επιπέδων κόβει κάθε βάρδια σε μια τοποθεσία, βοηθούμενη από την διαδικασία ανάθεσης των τμημάτων δρομολογίων, και με αυτό τον τρόπο δημιουργεί κομμάτια βαρδιών πριν και μετά από κάποιο επίπεδο k . Αυτό μπορούμε να το φανταστούμε ως ένα γράφημα με δύο κατηγορίες κόμβων, ένα σύνολο αποτελούμενο από όλες τις βάρδιες τμημάτων δρομολογίου μέχρι το επίπεδο k και το δεύτερο σύνολο που περιέχει όλα τα άλλα τμήματα δρομολογίου. Να σημειώσουμε ότι μια βάρδια είτε χωρίζεται σε δύο κομμάτια είτε παραμένει άθικτη εάν το επίπεδο του πρώτου τμήματος δρομολογίου είναι μεγαλύτερο από k . Μετά πρώτα συνδυάζουμε κάθε κομμάτι του πρώτου σύνολο από κόμβους με τα κομμάτια του δεύτερου σύνολο από κόμβους χρησιμοποιώντας μια διαδικασία επιλογής.

Το κύριο πλεονέκτημα της διαδικασίας επιμερισμού επιπέδων είναι ότι εξετάζει νέους συνδυασμούς που δεν είχαν εξεταστεί στην 2^η διαδικασία βελτίωσης και οι βασικές βάρδιες εξετάζονται σε σειρά και με οικονομικό τρόπο.

6. Βελτίωση βαρδιών – 3^η αναζήτησης βελτίωσης με χωρισμού συνόλου (QS 2.4)

Μετά την 2^η βελτίωση και την βελτίωση μέσω επιμερισμό επιπέδων για να βελτιωθεί περισσότερο η ποιότητα της λύσης εξετάζονται άλλες γειτονικές περιοχές με την διαδικασία 3^{ης} αναζήτησης βελτίωσης. Σε αυτή την διαδικασία σε κάθε βήμα επιλέγονται 3 βάρδιες και μια ολοκληρωμένη προσέγγιση αριθμητική χρησιμοποιείται για να δημιουργηθούν όλα τα δυνατά τμήματα δρομολογίων βαρδιών που υπάρχουν στο 3-το σύνολο βελτιστοποίησης. Η διαδικασία 3^{ης} αναζήτησης βελτίωσης λύνει από το μικρό μοντέλο SPP χρησιμοποιώντας μια δυνατή διαδικασία αριθμητικής ανάλυσης που παρουσιάζεται από τον Syslo σε ολόκληρο το σύνολο των δημιουργημένων βαρδιών. Το υποπρόβλημα της επιλογής των τριών βαριών λύνεται με τυχαία επιλογή, με έμφαση στα τμήματα που δεν έχουν ακόμα επιλεγεί, που εξετάζονται σε βάθος ως προς τις δυνατές διασυνδέσεις με τις άλλες βάρδιες.

7. Χειρισμός των μη επιλεχθέντων τμημάτων δρομολογίων (QS 2.5)

Σε κάποια δύσκολα προβλήματα, ακόμα και μετά από όλες τις βελτιώσεις των βαρδιών που περιγράψαμε στους προηγούμενους παραγράφους, είναι δυνατό να έχουμε τμήματα δρομολογίων που δεν έχουν ανατεθεί και άρα να μην συμβάλουν στην λύση.

Η ύπαρξη των μη ανατεθέντων τμημάτων δρομολογίων σημαίνει ότι υπάρχουν κάποια τμήματα που δεν καλύπτονται και απαιτούν ειδικές συνδέσεις που έχουν καταληφθεί από άλλα τμήματα. Αυτή η δυσκολία πρέπει να αντιμετωπιστεί με ειδικές ρυθμίσεις και κάποια βοήθεια πρέπει να δοθεί σε αυτό τα τμήματα. Αυτό μπορεί να γίνει λύνοντας το πρόβλημα συντομότερης διαδρομής-k με επέκταση των κόμβων που αντιστοιχούν στα διαθέσιμα λεωφορεία. Αυτή η επέκταση γίνεται χρησιμοποιώντας νέες συνδέσεις με κόμβους λεωφορείων και κόμβους τμημάτων δρομολογίων, εάν το τμήμα δρομολογίου μπορεί να είναι το πρώτο νόμιμο κομμάτι της βάρδιας για αυτό το λεωφορείο. Το κόστος της σύνδεσης θα είναι ο χρόνος αναμονής μεταξύ των τμημάτων δρομολογίων. Υπάρχει μια σύνδεση μεταξύ τμημάτων δρομολογίων και

ενός ιδεατού κόμβου ‘υποβάθμισης’, εάν αυτό το τμήμα μπορεί να είναι το τελευταίο σε μια νόμιμη βάρδια για κάποιο από τα διαθέσιμα λεωφορεία.

Οι βάρδιες αντιστοιχούν σε διαδρομές σε αυτό το γράφημα αρχίζοντας από κάποιο λεωφορείο και καταλήγοντας στον κόμβο ‘υποβάθμισης’. Όταν χρειαστεί να δημιουργήσουμε μια βάρδια για ένα συγκεκριμένο τμήμα δρομολογίου t τότε το γράφημα τροποποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην περιλαμβάνει διαδρομές που δεν περιέχουν το τμήμα δρομολογίου t . Αυτό σημαίνει ότι αφαιρούμε όλα τα λεωφορεία που δεν μπορούν να εξυπηρετήσουν το τμήμα διαδρομής t και συνδέσεις που ενώνουν λεωφορεία με τμήματα δρομολογίων που ανήκουν σε επίπεδο μεγαλύτερο από αυτό του τμήματος t . Επίσης όλες οι συνδέσεις από και προς το επίπεδο του τμήματος t που δεν συνδέονται με αυτό καθεαυτό του τμήματος t αφαιρούνται. Το ίδιο ισχύει για συνδέσεις που απλό προσπερνούν το τμήμα t . Τέλος αφαιρούμε τις συνδέσεις που καταλήγουν στο κόμβο ‘υποβάθμισης’ και που αρχίζουν σε χαμηλότερα και ίσο με το επίπεδο του τμήματος t , εκτός από τις συνδέσεις που αρχίζουν από το τμήμα δρομολόγησης t .

8. Εξασφάλιση του τοπικού χαρακτήρα της λύσης (QS 2.6)

Μετά την εύρεση μια λύσης και πριν την αρχή μια νέας επανάληψης της δεύτερης φάσης του QS, κλειδώνεται ένα σύνολο από καλές βάρδιες και κάποιες τυχαία επιλεγμένες βάρδιες έτσι ώστε να βοηθήσουμε το αρχικό βήμα κατασκευής βαρδιών (QS 2.1). Η μελλοντική γνώση που έφεραν αυτά τα κλειδώματα επιτρέπει για μια πιο εκτενής αναζήτηση σε μια γειτονιά της λύσης κοντά στην προηγούμενη βέλτιστη λύση. Αυτές οι δικλείδες ασφαλείας αγνοούνται όταν διερευνούνται βελτιώσεις στις λύσεις .

Πειραματικά έχει βρεθεί ότι 5 γενικές επαναλήψεις της δεύτερης φάσης του συστήματος QS είναι αρκετές για τα περισσότερα προβλήματα και η βέλτιστη λύση που έχει βρεθεί σε αυτές τις 5 επαναλήψεις εξάγεται σαν η τελική λύση του προβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

7 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Αυτό το κεφάλαιο αφιερώνεται στις παρατηρήσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή των μεθόδων που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και η ερμηνεία αυτών θα γίνει με βάση την γενικότερη εικόνα που έχει αποκτηθεί έχοντας υπόψη την σχετική βιβλιογραφία. Ύστερα γίνεται μια περιγραφή των προγραμμάτων που υπάρχουν σήμερα στο εμπόριο διεθνώς και αναλυτικότερη παρουσίαση ενός εκ αυτών με σκοπό την άμεση σύγκριση με τα θέματα τα οποία τίθενται στην διπλωματική ως προς την βελτιστοποίηση του κάθε βήματος στην όλη διαδικασία. Στο τέλος δίνονται συμπληρωματικά στοιχεία από μάρκετινγκ που είναι πλέον δεδομένο τμήμα ενσωματωμένο στους Οργανισμούς και συμβάλει στον σχεδιασμό αποδεδειγμένα.

Η διαδικασία σχεδιασμού όπως προτείνεται εδώ μπορεί να ειπωθεί πως αποτελείται από τις κλασσικές μεθόδους που χρησιμοποιούσαν οι μελετητές, οι οποίες και αναπτύχθηκαν παλιότερα και από τις σύγχρονες τάσεις που υπάρχουν σήμερα. Οι παλιότερες μέθοδοι έχουν σαν κύριο χαρακτηριστικό το ότι χρησιμοποιούν τους υπολογιστές αλλά όχι ολοκληρωτικά. Λύνονται δηλαδή με την βοήθεια των Η/Υ επιμέρους προβλήματα στην συνολική διαδικασία. Οι σύγχρονες τάσεις ως επί το πλείστον εμπλέκουν ευρετικούς αλγόριθμους διότι μπορούν να συμπεριλάβουν ειδικές γνώσεις από τις κλασσικές προσεγγίσεις. Άλλοι αλγόριθμοι έχουν πρόβλημα με τον αριθμό των παραμέτρων που εισάγονται στα βήματα της δρομολόγησης οχημάτων και τον προγραμματισμό των υπηρεσιών. Ακόμα οι σύγχρονες προσεγγίσεις έχοντας ήδη μια λύση, έχουν την τάση να ψάχνουν για μια επιπλέον βελτιστοποίηση (ή καλύτερη λύση). Αυτό το πετυχαίνουν θεωρώντας παραμέτρους που είτε στις κλασσικές προσεγγίσεις δεν είχαν ληφθεί υπόψη είτε βελτιώνοντας τους αλγόριθμους και τις μεθόδους ως προς την εύρεση της λύσης με λιγότερους υπολογισμούς και την οικονομία σε υπολογιστικό χρόνο.

Παρακάτω θα αναφερθούν συνολικά όλα τα βήματα σχεδιασμού καθώς και οι παράμετροι που απασχολούν τους μελετητές. Αναφέρεται ότι κάθε προσέγγιση δίνει σημασία σε διαφορετικά προβλήματα ανάλογα με τον μελετητή (κάποιες παράμετροι αλλάζουν από χώρα σε χώρα) .

Ακόμα επαναλαμβάνεται ότι η θεώρηση που γίνεται εδώ και αυτά που προτείνονται ενώ τεκμηριώνεται ότι είναι σωστά και αποδεκτά ως προς τις λύσεις, δεν είναι γνωστό εάν ωφελούν στο μέγιστο την συνολική διαδικασία σχεδιασμού. Δηλαδή δεν μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι επέρχεται συνολική βελτιστοποίηση στο σύστημα χωρίς να υπάρχουν

γενικευμένες εφαρμογές και αντίστοιχα αποτελέσματα που να στηρίζουν αυτή την υπόθεση.

Οι κανόνες και τα πρότυπα που στηρίζουν τις κλασσικές προσεγγίσεις τυγχάνουν γενικότερης αποδοχής και προτείνονται λόγω της εκτεταμένης εφαρμογής και τις τροποποιήσεις που έχουν υποστεί στο εξωτερικό κυρίως αλλά και τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα.

Πρώτο βήμα σχεδιασμού των λεωφορειακών γραμμών είναι ο σχεδιασμός του δικτύου. Αυτή η διαδικασία εμπλέκει παραμέτρους όπως είναι η ζήτηση, η οποία μπορεί να θεωρηθεί σταθερή ή να θεωρηθεί ως μεταβλητή ή ακόμα η μεταβολή της ζήτησης να ληφθεί υπόψη σε διαφορετικές λύσεις (σενάρια) του προβλήματος. Άλλη παράμετρος είναι η αντικειμενική συνάρτηση η οποία λαμβάνει υπόψη την μέγιστη εξυπηρέτηση των επιβατών και τις ελαχιστοποίηση του γενικευμένου κόστους. Το μέγεθος στόλου είναι στενά συνδεδεμένο με το συνολικό κόστος και το δίκτυο δεν μπορεί να σχεδιαστεί εάν δεν υπάρχει ένας γνωστός αριθμός οχημάτων. Αυτό σαν επέκταση είναι συνάρτηση του μέγιστου επιτρεπόμενου αριθμού των επιβατών (σε περιόδους αιχμής). Άλλη παράμετρος είναι η διαδρομή η οποία και καθορίζεται από τον τρόπο που ο επιβάτης ταξιδεύει ή προτιμά να ταξιδέψει. Αυτό με την σειρά του είναι συνάρτηση της δομής του δικτύου (η εμπειρία δείχνει ότι single path assignment γίνεται σε δίκτυα που δεν προσφέρονται εναλλακτικές διαδρομές).

Δεύτερο βήμα σχεδιασμού είναι ο σχεδιασμός των συχνοτήτων των λεωφορειακών γραμμών. Συνήθως γίνεται για μια γραμμή και τροποποιείται αν είναι αναγκαίο για τις άλλες γραμμές του δικτύου. Αυτή είναι η λογική που από τις κλασσικές προσεγγίσεις φτάνουμε στις σύγχρονες εφαρμογές. Έτσι το πρόβλημα ως προς τις επιπλέον παραμέτρους εδώ προτείνεται να λαμβάνει υπόψη το προγραμματισμένο κόστος καθυστέρησης που προκύπτει από το γεγονός ότι οι επιβάτες ταξιδεύουν νωρίτερα ή αργότερα από τον χρόνο αναχώρησης που επιθυμούν. Άλλη παράμετρος αρκετά δελεαστική φαίνεται να είναι η έννοια του συγχρονισμού των αφίξεων κάποιων λεωφορειακών γραμμών σε συγκεκριμένα σημεία με σκοπό την μείωση των οχημάτων που εξυπηρετούν τις γραμμές αυτές και την αντιμετώπιση των περιόδων αιχμής.

Τρίτο βήμα σχεδιασμού είναι ο προγραμματισμός των οχημάτων και εδώ φαίνεται πως η κάθε μέθοδος που εφαρμόζεται θα πρέπει να λάβει υπόψη το μέγεθος των μεταβλητών και το γεγονός ότι με ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό ο υπολογιστικός χρόνος αυξάνει εκθετικά με την αύξηση των μεταβλητών. Το ερώτημα που τίθεται αρχικά είναι εάν υπάρχουν πολλοί τερματικοί σταθμοί ή το δίκτυο να εξυπηρετείται από έναν τερματικό σταθμό. Η απάντηση δεν είναι εύκολη αλλά εξαρτάται

από τις συνθήκες του δικτύου που εξετάζεται. Οι περισσότεροι μελετητές σχεδιάζουν για περισσότερους τερματικούς σταθμούς και μάλιστα εισάγοντας νεκρούς χρόνους για να μην μένουν οχήματα ανεκμετάλλευτα να περιμένουν την αναχώρηση τους για το ίδιο δρομολόγιο. Θεωρείται για περισσότερη ευκολία ότι τα οχήματα επιστρέφουν από τον ίδιο τερματικό σταθμό που ξεκίνησαν την ημέρα. Προφανώς κάθε σταθμός έχει δεδομένη χωρητικότητα οχημάτων. Κάθε όχημα εξυπηρετεί συγκεκριμένο δρομολόγιο. Από τα ποιο ενδιαφέροντα θέματα είναι η μείωση του αριθμού των μεταβλητών του πραγματικού προβλήματος ώστε να εφαρμοστούν λογισμικά ευρετικών μεθόδων.

Τέταρτο βήμα στο σχεδιασμό των λεωφορειακών γραμμών αποτελείται από τον καθορισμό των οδηγών σε οχήματα και ο καθορισμός του ωραρίου (βάρδιες) του προσωπικού. Εδώ υπάρχει μια αλληλεπίδραση με το τρίτο βήμα συνήθως, όπως γίνεται συνήθως στο πρώτο με το δεύτερο βήμα. Αυτό σημαίνει ότι αρχικά χρησιμοποιήθηκαν λογισμικά που είχαν σχεδιαστεί για τους σιδηρόδρομους ή για υπεραστικά λεωφορεία περισσότερο. Αργότερα βέβαια η θεωρία εμπλουτίστηκε με περισσότερες παραμέτρους και άλλα λογισμικά έκαναν την εμφάνιση τους για να βοηθήσουν στον σχεδιασμό τους Οργανισμούς με αυξημένο κόστος όμως. Το στοιχείο που εδώ προκαλεί την αύξηση του υπολογιστικού χρόνου είναι η εύρεση του ελάχιστου κόστους εργασίας. Η δημιουργία των μπλοκ από τους κόμβους (που θεωρούνται σημεία ανακούφισης) είναι μη κυκλική και οι συνδέσεις αποτελούν το παραπάνω κόστος εργασίας στο μπλοκ. Ουσιαστικά λύνεται πρόβλημα συντομότερης διαδρομής μέχρι να βρεθεί το ελάχιστο κόστος. Τα ενδιάμεσα κόστη προφανώς έχουν καθοριστεί από την εμπειρία του μελετητή.

Με την παραπάνω υπενθύμιση των βημάτων του γενικότερου σχεδιασμού αναφέρονται επιμέρους παρατηρήσεις πάνω στις προτεινόμενες μεθόδους.

7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ

Η βασική λειτουργία που τα διάφορα προγράμματα έχουν είναι η γραφική παρουσίαση των δεδομένων και μάλιστα σε μια μορφή που να είναι συνηθισμένος ο μελετητής – σχεδιαστής να τα βλέπει. Τα κορυφαία προγράμματα όπως BERTA και HASTUS χρησιμοποιούν τα δεδομένα των διαφόρων βημάτων σε μια ανάλυση μεταγενέστερη που κάνουν. Άρα λοιπόν το σημαντικό που απομένει και είναι η διαφορά αυτών των προγραμμάτων είναι οι αλγόριθμοι και τα διαφορετικά αποτελέσματα που βγάζουν. Οι αλγόριθμοι είναι που τελικά καθορίζουν το μεγάλο κόστος αγοράς αυτών των προγραμμάτων. Αυτός λοιπόν είναι ο λόγος που πιστεύεται πως δεν έχει ακόμα βρεθεί ο καλύτερος αλγόριθμος (εξέταση παραμέτρων) ο οποίος θα κάνει τον σχεδιασμό του δικτύου των γραμμών και αυτό θα το διοχετεύσει σαν δεδομένο (input) για την διαδικασία υπολογισμού των συχνοτήτων κ.ο.κ.

Αυτός θα είναι ο λόγος που θα επαναληφθούν και θα σημειώσουμε τα σημαντικά συμπεράσματα των μεθόδων όπως αυτές αναφέρθηκαν στα αντίστοιχα κεφάλαια.

7.1.1 Παρατηρήσεις στον σχεδιασμό του δικτύου των λεωφορειακών γραμμών.

Η πρώτη μέθοδο που περιγράφεται από τον Avishai Ceder αποσκοπεί στον σχεδιασμό του δικτύου των λεωφορειακών γραμμών. Ο λόγος που επιλέγει η μέθοδος αυτή είναι το γεγονός ότι η μέθοδος θίγει όλες τις βασικές παραμέτρους που υπεισέρχονται στον σχεδιασμό δικτύου λεωφορειακών γραμμών και είναι αντιπροσωπευτική της εποχής της.

Η μέθοδος είναι αρκετά πιο εύκολη από άλλες μεθόδους ως προς την υιοθέτηση αλλά πιο ευαίσθητη ως προς τις αλλαγές των γραμμών από άλλες διαδικασίες. Από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα που θα ήθελαν ο κάθε Οργανισμός είναι η δυνατότητα εύκολης προσαρμογής στα νέα δεδομένα και στις αλλαγές των γραμμών που συμβαίνουν στο δίκτυο που διαχειρίζονται με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης. Ωστόσο από την άλλη πλευρά οι Οργανισμοί δεν επιθυμούν την συχνή αλλαγή των γραμμών για αυτόν ακριβώς τον λόγο. Με την σωστή όμως θεώρηση και προσέγγιση μπορεί να καταστεί αποτελεσματική, πρακτική και ευέλικτη.

Η προσέγγιση χωρίζεται σε δύο επίπεδα. Η μαθηματική διατύπωση του Επιπέδου I αναγνωρίζει την οπτική γωνία των επιβατών. Έτσι διαμορφώνονται η αντικειμενική συνάρτηση με τους αντίστοιχους περιορισμούς. Η μαθηματική διατύπωση του Επιπέδου II θεωρεί την εξυπηρέτηση των επιβατών αλλά και του Οργανισμού. Τέλος γίνεται η

περιγραφή ενός αλγόριθμου που είναι δυνατό να κατασκευάσει νέες λεωφορειακές γραμμές.

Τα βήματα του σχεδιασμού είναι περισσότερα από αυτά τα οποία περιγράφονται, αλλά στην προσέγγιση αυτή θίγονται μόνο βασικές έννοιες για την επίτευξη των στόχων. Πρέπει να γίνει μεγαλύτερη ανάλυση και βελτίωση στην μαθηματική διατύπωση όπως και στον αλγόριθμο που παρουσιάζεται υπάρχει η δυσκολία εφαρμογής του σε μεγάλα δίκτυα, όπου ο υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται εκθετικά.

7.1.2 Παρατηρήσεις στον σχεδιασμό γραμμών και δικτύου μέσων μαζικής μεταφοράς

Η δεύτερη αυτή μέθοδος που παρουσιάστηκε πολύ αργότερα από την πρώτη, από τον Avishai Ceder είναι μια πιο ολοκληρωμένη πρόταση και αποτελείται ανεπαίσθητα από μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας αφού χρησιμοποιούνται λύσεις προβλήματος κάλυψης, ανάλυση ευαισθησίας, πολύ-στοχικός προγραμματισμός κ.α. θέματα από την επιχειρησιακή έρευνα.

Οι παράμετροι βελτιστοποίησης είναι οι παράμετροι που εξ' αρχής ουσιαστικά επιθυμείται να ελαχιστοποιήσουμε. Είναι ο συνολικός χρόνος ταξιδιού των επιβατών στα οχήματα των MMM, σε ωριαία βάση, μείον τον συνολικό χρόνο των επιβατών εάν διανύουν την συντομότερη διαδρομή. Αυτό που μετρά ουσιαστικά είναι ο επιπλέον χρόνος που δαπανάται από του επιβάτες στα MMM κατά την μετακίνηση τους μεταξύ δύο κόμβων. Άλλη παράμετρος είναι ο συνολικός χρόνος αναμονής στις στάσεις των MMM και στα σημεία μετεπιβίβασης, σε ωριαία βάση, που δαπανά ένας επιβάτης κατά την κίνηση του μεταξύ δύο κόμβων. Τρίτη παράμετρος είναι ο συνολικός αριθμός των κενών θέσεων στα MMM, σε ωριαία βάση. Δηλαδή υπολογίζεται έτσι η μη χρησιμοποιήσιμη χωρητικότητα των MMM, μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου. Τέταρτη παράμετρος είναι ο αριθμός των οχημάτων που απαιτούνται για όλα τα δρομολόγια στις γραμμές. Οι τρεις πρώτες παράμετροι συνδυάζονται στην αντικειμενική συνάρτηση Z_1 και η τελευταία παράμετρος είναι στην Z_2 .

Η λύση της προσέγγιση γίνεται σε δύο στάδια. Στην πρώτη φάση η διάσταση των επιτρεπόμενων δυνατών γραμμών ελαττώνεται για να ικανοποιηθεί ο περιορισμός του μέγιστου χρόνου ταξιδιού. Από αυτό το σημείο και μετά συμβαίνει η βελτιστοποίηση για τον καθορισμό της συντομότερη άμεση ή έμμεση διαδρομής μεταξύ κάθε ζεύγους από κόμβους. Στην δεύτερη φάση χρησιμοποιείται μια διαδικασία η οποία περιλαμβάνει βελτιστοποίηση και υπολογιστική ώστε να προκύψει η ελάχιστη τιμή Z_1 της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτή η διαδικασία ενώ

ψάχνει για την $\min Z_1$ δημιουργεί διάφορες λύσεις Z_2 . Τελικά το πιο επιθυμητό ζεύγος Z_1, Z_2 προκύπτει από μια διαδικασία πολύ-στοχικού προγραμματισμού.

Η παραπάνω μέθοδος μπορεί να έχει τις παρακάτω εφαρμογές :

1. Βέλτιστο σχεδιασμό ενός νέου λεωφορειακού δικτύου
2. Βέλτιστο σχεδιασμό για την επέκταση ή τον περιορισμό ενός δικτύου λεωφορειακών γραμμών.
3. Αποτίμηση της λειτουργίας ενός δικτύου από την πλευρά της αποδοτικότητας του Οργανισμού, την εξυπηρέτηση των επιβατών και την ανάλυση ευαισθησίας της λειτουργίας του δικτύου για μια ομάδα παραμέτρων.

Ο κύριος σκοπός που επιλέχτηκε αυτή η μέθοδος είναι ότι συμπληρώνει την αρχική θεώρηση (μέθοδο) και δείχνει πια είναι η κατάλληλη μετά τον υπολογισμό της συντομότερης διαδρομής. Η λύση δίνεται σε μορφή γραφικής παράστασης και η επιλογή από τον ιθύνοντα είναι πιο εύκολη και πιο άμεση.

7.1.3 Παρατηρήσεις στην στρατηγική βραχείας διαδρομής

Η στρατηγική βραχείας διαδρομής είναι ο σχεδιασμός διαδρομών που αρχίζουν μετά την αρχή των υπόλοιπων διαδρομών και τερματίζουν πριν τον τερματισμό των λοιπών διαδρομών. Στην πράξη η συχνότητα των ΜΜΜ τις περισσότερες φορές καθορίζεται από το πιο φορτισμένο τμήμα της διαδρομής και από την δυσχερέστερη φόρτιση εκεί. Αυτή όμως η πρακτική οδηγεί σε λειτουργία με πολλές άδειες θέσεις στα οχήματα. Αυτός είναι ο λόγος που ο σχεδιαστής εφαρμόζει αυτή την μέθοδο με σκοπό την μείωση του στόλου των οχημάτων για την διεκπεραίωση των δρομολογίων.

Παρόλο που ακούγεται εύκολο μια τέτοια αυτόματη διαδικασία είναι αρκετά περίπλοκη και έχει τους παρακάτω στόχους :

1. Αναγνώριση των δυνατών σημείων αναστροφής.
2. Την επιλογή του μικρότερου αριθμού στόλου για έναν Πίνακα Α-Α
3. Την ρύθμιση του αριθμού των αναχωρήσεων σε κάθε σημείο αναστροφής με τα εκεί στοιχεία φόρτισης, δεδομένου ότι η μέγιστη χρονοαπόσταση που πρέπει να βρεθεί να είναι ελάχιστη.
4. Την ελαχιστοποίηση του αριθμού των δρομολογίων βραχείας διαδρομής ενώ εξασφαλίζουμε ότι το μέγεθος του στόλου παραμένει ως είχε.

5. Την δημιουργία του προγραμματισμού των οχημάτων.

7.1.4 Παρατηρήσεις στην κατασκευή του δικτύου με γενετικούς αλγόριθμους

Το πρόβλημα σχεδιασμού του δικτύου λεωφορειακών γραμμών είναι πλέον γνωστό για την συνδυαστική φύση. Οι γενετικοί αλγόριθμοι που έρχονται εδώ για την επίλυση του προβλήματος, ο αλγόριθμος που περιγράφεται, έχει επτά γενετικούς τελεστές. Οι γενετικοί τελεστές κατασκευάζονται ώστε να οδηγούν την εύρεση της λύσης από ρητές θεωρήσεις του προτύπου ζήτησης και περιορισμούς του δικτύου.

Το μοντέλο σχεδιάζει τις γραμμές του δικτύου σε δύο φάσεις, στην βελτίωση των γραμμών μέσω αλγόριθμου και χρησιμοποιώντας τους γενετικούς τελεστές και ο καλύτερος συντονισμός των χρονοαποστάσεων για να την καλύτερη απόδοση του δικτύου.

Ειδικότερα μπορεί να ειπωθεί πως :

- Διαφορετικοί γενετικοί τελεστές όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα, έχουν διαφορετικό επίπεδο αποτελεσματικότητας και αυτό πρέπει να χρησιμοποιείται από τους μελετητές ανάλογα με τον σκοπό του αλγόριθμου. Μπορεί ακόμα να γίνει ανάλυση ευαισθησίας.
- Ο γενετικός τελεστής πρόσθεσης σύνδεσης γραμμών φαίνεται να επηρεάζει περισσότερο την ποιότητα της λύσης. Έτσι έχοντας την βασική λύση που δημιουργείται αρχικά, είναι πιθανόν ότι μερικές ‘πολύτιμες’ συνδέσεις να συμπεριληφθούν στις αρχικές γραμμές.
- Λιγότεροι αποτελεσματικοί φαίνεται να είναι οι γενετικοί τελεστές που ασχολούνται με την μετεγκατάσταση των αντίστοιχων κόμβων, αν και αρχικά η ιδέα ήταν και όντως έτσι έγινε, οι τελεστές αυτοί βοηθούν την λύση. Αυτοί οι τελεστές εξαρτώνται από άμεσα από το πρότυπο ζήτησης.
- Από τις διάφορες εφαρμογές που έγιναν είναι φανερό πως το συνολικό κόστος της τελικής λύσης μπορεί να μειωθεί έως και 10% με τον συγχρονισμό της χρονοαπόστασης. Με αυτό το σκεπτικό βρέθηκε πως η καλύτερη λύση χωρίς συγχρονισμό είναι στα ίδια επίπεδα με την χειρότερη λύση που βρέθηκε με τον συγχρονισμό των χρονοαποστάσεων.
- Όπως και στους περισσότερους γενετικούς αλγόριθμους, αυτός που περιγράφεται έχει μεταβλητές που προσδιορίζονται από τον

χρήστη. Αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχει επαρκής δικαιολόγηση για την επιλογή των παραμέτρων. Οι εφαρμογές δείχνουν ποιες είναι οι τιμές που ταιριάζουν περισσότερο και αυτό δεν μπορεί να τεκμηριωθεί με βάση κάποιο πλαίσιο.

Ίσως μια πιο εκτενή εφαρμογή της μεθόδου να οδηγήσουν σε καλύτερες τιμές και διαφορετικές από αυτές που προτείνονται για τους γενετικούς τελεστές, τώρα.

7.1.5 Παρατηρήσεις στον βέλτιστο σχεδιασμό του πίνακα A – A

Η ανάπτυξη της μεθόδου αυτής από τους A. de Palma και R. Lindsey δίνει τον βέλτιστο πίνακα A-A σε μια μονή γραμμή δικτύου. Κάθε επιβάτης θεωρείται πως έχει μια ιδανική ώρα στην ημέρα που ταξιδεύει και να υποστεί ένα κόστος από την άφιξη την νωρίτερη ή την αργοπορημένη. Δύο μοντέλα θεωρούνται, ένα γραμμικό και ένα κυκλικό. Στο γραμμικό μοντέλο θεωρείται ότι ο προτιμότερος χρόνος ταξιδιού του επιβάτη κατανέμεται στην διάρκεια της ημέρας και ο ανασχεδιασμός των δρομολογίων να μην είναι δυνατός μεταξύ των ημερών. Στο κυκλικό μοντέλο οι επιθυμητοί χρόνοι ταξιδιού κατανέμονται κατά την διάρκεια της ώρας και ο ανασχεδιασμός μεταξύ των ημερών είναι δυνατός.

Παρόλη την σχετικά εκτενή περιγραφή, υπάρχει ένας αριθμός από στοιχεία που δεν έχουν ληφθεί υπόψη. Θα μπορούσε ο αριθμός των οχημάτων να μην είναι 'εξωτερικό' στοιχείο αλλά να υπολογίζεται. Θα υπολογίζεται μέσω του βέλτιστου Πίνακα A-A, από στοιχεία κόστους του συστήματος και της προγραμματισμένης καθυστέρησης.

Επίσης μπορεί να υπάρχει περιορισμός στον προγραμματισμό των οχημάτων από το ίδιο το δίκτυο ως προς το χρόνο που απαιτείται για τις κινήσεις των οχημάτων (νεκρών χρόνων).

Δεν τίγεται το θέμα της συμφόρησης στις στάσεις των MMM και είναι αρκετά σοβαρό αφού ερευνητές όπως Lam et al (1999a) έχουν καταγράψει τις συνέπειες, πρακτικά του φαινομένου της συμφόρησης.

Δεν υπάρχει όριο στην χωρητικότητα των οχημάτων στην περιγραφή της μεθόδου.

Δεν έχει προσδιοριστεί πως μπορεί να αλλάξει ο πίνακας εάν ο Οργανισμός προτείνει άλλου τύπου οχημάτων για τα συγκεκριμένα δρομολόγια.

Τα λεωφορεία θεωρείται πως τηρούν τους χρόνους αναχώρησης απόλυτα, ενώ στην πραγματικότητα οι χρόνοι ταξιδιού ακολουθούν

τυχαία κατανομή. Τα λεωφορεία μπορεί να αργήσουν ή να ακυρωθεί το δρομολόγιο τους. Ο στοχαστικός τρόπος αλληλοεπιρροής των χρόνων ταξιδιού των επιβατών και της επιλογής αναχώρησης δεν έχει προσαρμοσθεί, αν και έχει μελετηθεί από τον Sumi et al (1990).

Τέλος θεωρείται πως οι επιβάτες ξέρουν ακριβώς πότε καταφθάνει ένα λεωφορείο. Στην πραγματικότητα αυτή η γνώση εξαρτάται από τον προγραμματισμένο χρόνο καθυστέρησης και τον χρόνο αναμονής και το κατά πόσο μπορεί αυτό το σύστημα να μειωθεί. Αυτό σε τελευταία ανάλυση εξαρτάται από την χρονοαπόσταση των λεωφορείων.

7.1.6 Παρατηρήσεις στον μέγιστο συγχρονισμό του πίνακα A-A

Στο υποκεφάλαιο αυτό εξετάζεται το πρόβλημα του μέγιστου συγχρονισμού στην δημιουργία του πίνακα A-A μιας λεωφορειακής γραμμής. Η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί σαν μεγιστοποίηση του αριθμού των αφίξεων των λεωφορείων στους κόμβους μεταφοράς. Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφηκε, με ντετερμινιστικούς χρόνους ταξιδιού, σαν διατύπωση ανήκει στην κατηγορία του μικτού ακέραιου γραμμικού προβλήματος. Για μεγάλα όμως δίκτυα δεν πρακτικό να λύνεται το πρόβλημα με τα εμπορικά πακέτα μικτού ακέραιου προγραμματισμού, και αυτό θεωρήθηκε λόγος για την ανάπτυξη ενός ευρετικού αλγόριθμου. Ο αλγόριθμος που κατασκευάστηκε ήταν σε Turbo Pascal και η λύση η οποία έδινε ήταν, όπως φάνηκε από τις εφαρμογές, πολύ κοντά στην βέλτιστη λύση. Οι μελετητές προκειμένου να πετύχουν τον συγχρονισμό δύο οι περισσότερων γραμμών θυσιάζουν πολλές φορές τα εύκολα χαρακτηριστικά της χρονοαπόστασης (μονές χρονοαποστάσεις π.χ.). Εδώ τονίζεται πως υπάρχουν πιθανότητες να γίνει ο συγχρονισμός και ακόμα πως είναι κατάλληλο να εφαρμόζεται και για συστήματα που χειρίζονται σε πραγματικό χρόνο τα στοιχεία των επιβατών.

Το μοντέλο μπορεί να επεκταθεί με διάφορους τρόπους και μία εκδοχή θα μπορούσε να ήταν η χρησιμοποίηση συντελεστών βαρύτητας στους κόμβους που θέλουμε να επιτύχουμε τον συγχρονισμό. Εάν για παράδειγμα δημιουργηθούν συντελεστές βαρύτητας ώστε να επηρεάζουν γραμμές, χρονικές περιόδους, κατεύθυνση ταξιδιούτότε η αντικειμενική συνάρτηση θα είχε ρόλο την μεγιστοποίηση του αθροίσματος όλων των συντελεστών βαρύτητας. Άλλος τρόπος είναι ο ορισμός της διαδοχικής άφιξης η οποία μπορεί να είναι η άφιξη δύο λεωφορείων με κάποιο χρονικό περιθώριο t .

7.1.7 Παρατηρήσεις στην προσέγγιση συνάρτησης ελλείμματος

Η συνάρτηση ελλείμματος όπως έχει εισαχθεί 20 χρόνια πριν από τον Avishai Ceder έχει σαν σκοπό την απεικόνιση με γραφικό τρόπο του ελάχιστου αριθμού οχημάτων που χρειάζεται για έναν δεδομένο Πίνακα A – A, δηλαδή συγκεκριμένα δρομολόγια. Αυτό που δείχνει η συνάρτηση είναι μια αύξηση κατά μια μονάδα κάθε φορά που έχουμε αναχώρηση λεωφορείου και μείωση κατά μία μονάδα κάθε φορά που έχουμε άφιξη λεωφορείου. Είναι απαραίτητη σαν μέθοδο σε συστήματα που έχουν περισσότερα από έναν τερματικό σταθμό και η παρακολούθηση των αφίξεων και αναχωρήσεων είναι δύσκολη. Περιγράφονται ακόμα τρόποι βελτίωσης της απόδοσης με την εισαγωγή κατώτερου ορίου στο πρόβλημα σταθερού προγραμματισμού του μεγέθους του στόλου. Η χρήση της σταθερών και μεταβλητών παραμέτρων προγραμματισμού επιτρέπουν την εισαγωγή των νεκρών διαδρομών και αλλαγές στον χρόνο αναχώρησης στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης του στόλου των οχημάτων. Αξίζει εδώ να αναφέρουμε τις εφαρμογές της συνάρτησης ελλείμματος στην διαδικασία σχεδιασμού των λεωφορειακών γραμμών συνολικά. Αυτές είναι οι παρακάτω (αν και δεν αναφέρθηκαν στα αντίστοιχα κεφάλαια για χάρη άλλων μεθόδων) :

- Σχεδιασμός του δικτύου γραμμών
- Σχεδιασμός βραχείας διαδρομής για μεμονωμένες γραμμές
- Σχεδιασμός χώρων στάθμευσης των MMM, δηλαδή τερματικών σταθμών
- Προγραμματισμός των οχημάτων για διαφορετικού τύπου οχήματα σε μια γραμμή ή στο δίκτυο.
- Διαδικασία καθορισμού υπηρεσιών

Τέλος ο σκοπός που εφαρμόζεται η συνάρτηση ελλείμματος είναι να μειώσει τον αριθμό των οχημάτων εισάγοντας νεκρές διαδρομές και να κάνει πιο ελαστικό τον χρόνο αναχώρησης και όλα αυτά με σκοπό όχι μόνο την ελάττωση του στόλου αλλά και την εξυπηρέτηση της ζήτησης.

7.1.8 Παρατηρήσεις στο μοντέλο βελτιστοποίησης του προβλήματος προγραμματισμού οχημάτων μεγάλης κλίμακας

Η μέθοδος που περιγράφεται εδώ και αποσκοπεί στην βελτιστοποίηση του προγραμματισμού των οχημάτων είναι έμπνευση των Mohamadreza Banihashemi και Ali Haghani. Η μέθοδος εξετάστηκε αναλυτικά και όχι μόνο σε συνθήκες ιδεατών εφαρμογών. Με κάποιες τροποποιήσεις μπόρεσε να εφαρμοστεί στο συγκεκριμένο πρόβλημα στην πόλη της Βαλτιμόρης και μάλιστα να βελτιώσει τον αριθμό του στόλου και τον χρόνο λειτουργίας κατά 5% τουλάχιστον.

Η μέθοδος της μείωσης των δρομολογίων (που αρχικά εφαρμόστηκε για την μείωση του προβλήματος σε πρόβλημα που είναι δυνατό να λυθεί από τον αλγόριθμο) είναι σαν μια πρώτη κίνηση πολύ καλή και χρήσιμη. Ανάλογα με την διάσταση (έκταση) του προβλήματος μπορούμε να επιλέξουμε διαφορετικές τιμές για τον ελάχιστο χρόνο ενδιάμεσης στάσης.

Η μέθοδος με την οποία μειώνεται ο αριθμός των μεταβλητών φαίνεται να είναι καλή μέθοδος για τον χωρισμό των δρομολογίων σε τερματικούς σταθμούς. Βασισμένη στο μέγεθος του προβλήματος είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό ποσοστό για την διαγραφή των μεταβλητών. Η λύση βελτιώνεται περαιτέρω όταν κάθε πρόβλημα MDVS χωρίζεται σε μικρότερα υποπροβλήματα SDVS και επιλύονται τα προβλήματα αυτά ανεξάρτητα, χωριστά. Αυτή είναι και η μεγαλύτερη βελτίωση που υπεισέρχεται στην λύση από το τελευταίο βήμα της στρατηγική της μεθόδου.

Γενικότερα το να υπάρχουν περισσότερα του ενός τερματικού σταθμού είναι πιο αποτελεσματικά και υπέρ του σχεδιασμού και κατ' επέκταση του Οργανισμού. Υπάρχουν όμως κάποια θέματα κόστους που δεν αφήνουν την εικόνα ξεκάθαρα υπέρ των πολλών τερματικών σταθμών. Αν είναι εξ' αρχής να αποφασισθεί για την επιλογή ενός ή περισσότερων τερματικών σταθμών πρέπει να προσδιοριστούν τα κόστη που δημιουργούνται από την επιλογή πολλών τερματικών σταθμών και να γίνει σύγκριση.

Μέχρι τώρα θεωρήθηκε πως υπάρχει ένας δεδομένος πίνακας A-A που εξυπηρετούμε. Μια άλλη προσέγγιση θα ήταν ο πίνακας αυτός να αλλάζει τροποποιώντας ελαφρά τους χρόνους αναχώρησης και άφιξης. Από την μια πλευρά μια τέτοια θεώρηση αυξάνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος όμως από την άλλη μπορεί να νέα περιθώρια βελτίωσης που μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη λύση από αυτό που διαθέτουμε.

7.1.9 Παρατηρήσεις στον συνδυασμένο προγραμματισμό οχημάτων και οδηγών

Η εργασία αυτή για την επίλυση του προβλήματος προγραμματισμού οδηγών και οχημάτων γίνεται από δύο έλληνες, οι οποίοι θεωρώντας πως κάτι τέτοιο είναι εφικτό παραθέτουν το δικό τους αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος αυτός περιγράφεται και τα αποτελέσματα θεωρούνται πως εξυπηρετούν τις επιχειρήσεις που διαθέτουν όχι αστικά λεωφορεία απαραίτητως. Ακόμα αναγνωρίζεται πως περισσότεροι παράμετροι αν ληφθούν υπόψη θα αυξήσουν εκθετικά τον χρόνο υπολογισμού ο οποίος κατόρθωσε να είναι 20 λεπτά με 30 λεπτά μέγιστο.

Η λύση θεωρείται ικανοποιητική για τα ελληνικά δεδομένα από τους σχεδιαστές και η μεγαλύτερη προσοχή δόθηκε στο γεγονός ότι οι έλληνες οδηγοί δεν θέλουν να αποχωριστούν το λεωφορείο τους και άρα οδηγοί και λεωφορεία σχεδιάζονται σαν να είναι μαζί κατά την διάρκεια της βάρδιας.

Το πακέτο αυτό που δημιουργήθηκε υπάρχει στο εμπόριο και έχει προμηθευτεί από αρκετές επιχειρήσεις οι οποίες είναι αρκετά ευχαριστημένες από την ποιότητα της λύσης.

7.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ Η/Υ

Τα προβλήματα με τα οποία η διπλωματική ασχολήθηκε ήταν από την φύση τους περίπλοκα και η επίλυση τους πλέον γίνεται αποκλειστικά με υπολογιστές και μάλιστα πολλές φορές με υπολογιστές που χρησιμοποιούν λειτουργικά συστήματα που δεν είναι πολύ δημοφιλή αλλά που παρέχουν την απαιτούμενη υπολογιστική δύναμη που χρειάζονται οι σχεδιαστές στην επίλυση των προβλημάτων. Έτσι αντί για Windows χρησιμοποιείται το λειτουργικό σύστημα Unix ή συστήματα που έχουν σαν βάση το λειτουργικό σύστημα Unix. Ακόμα όλα τα εξαρτήματα που διαθέτει ένας τέτοιος server είναι σχεδιασμένα ώστε να αντέχουν πολύωρες εργασίες και να μην 'καταρρέουν' από τους υπολογισμούς και να κάνουν τις αντίστοιχες κατανομές στην μνήμη του υπολογιστή. Τα προγράμματα που έχουν κατασκευαστεί γράφονται σε γλώσσες όπως Visual Basic, C++ και Turbo Pascal κ.α. Προφανώς ο αλγόριθμος κάθε φορά που δημοσιοποιείται μια μέθοδος έχει ήδη 'προστατευθεί' και στον σχεδιαστή έχουν αποδοθεί όλα τα δικαιώματα. Οι αγοραστές στις περισσότερες περιπτώσεις λαμβάνουν προϊόν το οποίο

δεν μπορούν να τροποποιήσουν και φυσικά η εκτελέσιμη πλευρά του αλγόριθμου (μετά τον compiler) σήμερα πια θεωρείται user friendly (δηλαδή φιλική προς τον χρήστη) και ανάλογα με τα βήματα σχεδιασμού που ασχολείται, ζητά στοιχεία (δεδομένα) εισαγωγής και μετά την επεξεργασία δίνει τα αποτελέσματα σε κατάλληλη διαμόρφωση (μέσω πινάκων συνήθως).

Τα πιο γνωστά λοιπόν από τα προγράμματα που υπάρχουν στο εμπόριο είναι :

- ▲ HASTUS
- ▲ BERTA
- ▲ AUSTRICS
- ▲ ILOG
- ▲ ROUTEMATE
- ▲ HOT II
- ▲ DIVA
- ▲ ROUTEMATCH

κ.α.

[Περισσότερα στην Ειδική Βιβλιογραφία στο κεφάλαιο 10]

Παρόλο που τα προγράμματα αυτά έχουν μια μεγάλη γνώση των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν, η λύση θεωρείται ότι μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο αφού μερικά από αυτά έχουν τροποποιηθεί με σκοπό την απλοποίηση του προβλήματος και θεωρούν το πρόβλημα σαν μια σειρά από υποπροβλήματα.

Παρατηρούμε μάλιστα πως κάθε χώρα έχει και δικό της πρόγραμμα που έρχεται να επαληθεύσει όσα έχουν ειπωθεί πως η πραγματικότητα δεν είναι ίδια σε όλες τις χώρες και υπάρχουν ειδικές ανάγκες που τροποποιούν την λύση του προβλήματος σε τέτοιο βαθμό μάλιστα ώστε προγράμματα δισεκατομμυρίων δραχμών να μην μπορούν να εφαρμοστούν με επιτυχία.

Για να έχουμε μια ενδεικτική εικόνα των προγραμμάτων αυτών θα περιγράψουμε παρακάτω ένα από τα προγράμματα όπως αυτό παρουσιάζεται σε demo που υπάρχει για την προώθηση του προϊόντος. Ακόμα μπορούμε να προσθέσουμε ότι σχετικά με το πρόγραμμα HASTUS το οποίο και είναι ίδιας εμβέλειας με το BERTA, HOT II και δημιουργήθηκε στον Καναδά, έχει προμηθευτεί από τον ΟΑΣΑ και χρησιμοποιείται για την ελληνική πραγματικότητα στον σχεδιασμό των συχνοτήτων και τον οδηγών όπως και τον λεωφορείων σε γραμμές και των οδηγών σε οχήματα.

Από τα καλύτερα στοιχεία μπορούμε να αναφέρουμε πως στον υπολογισμό των υπηρεσιών υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποιώντας πρόγραμμα επίτευξης στόχου (goal seeking program) να γίνει βελτιστοποίηση των προγραμματισμένων υπηρεσιών που καταλήγει στην ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου προσωπικού ακόμα και σε περίπλοκα συστήματα. Ακόμα υπάρχουν επιλογές για να καθοριστούν οι απαραίτητες παράμετροι για την διαδικασία και τέλος υπάρχει η δυνατότητα τα εξαγόμενα στοιχεία να είναι στην μορφή που επιθυμεί η επιχείρηση.

Ενδεικτικά λοιπόν ένα πρόγραμμα προσφέρει τα παρακάτω :

- Σχεδιασμό του Πίνακα Αφίξεων – Αναχωρήσεων
- Προγραμματισμό των Υπηρεσιών
- Καθορισμό των οδηγών και ανάθεση λεωφορείων σε γραμμές
- Παρουσιάσεις αποτελεσμάτων και αποθήκευση δεδομένων για τους επιβάτες και στοιχεία για το marketing.
- Λειτουργεί ως server σε σύστημα Unix ενώ οι συνδέσεις μπορούν να γίνουν μέσω συστήματος Windows.

Στο σύστημα που υπολογίζει τον πίνακα αφίξεων – αναχωρήσεων υπάρχουν :

- Στοιχεία για την συντηρησιμότητα των οχημάτων, των αρχείων διοίκησης και των στοιχείων δικτύου.
- Σχεδιασμός του Πίνακα A-A και βελτιστοποίηση των συνδέσεων.
- Σχεδιασμός της διαδρομής των οχημάτων και βελτιστοποίηση.
- Παρακολούθηση των στατιστικών λειτουργίας.

Ο σχεδιασμός στο πρόγραμμα γίνεται με απλούς τρόπους και με τους παραδοσιακούς πίνακες που υπάρχουν για κάθε δρομολόγιο (γραμμή). Αλλαγές και διαγραφές των δρομολογίων μπορεί να γίνουν ανεξάρτητα ή μεταξύ πολλών δρομολογίων με κάποιο χρονικό διάστημα.

Οι συνδέσεις μπορούν να έχουν συγκεκριμένες προτεραιότητες και να γίνει βελτιστοποίηση αυτών των συνδέσεων.

Για τον προγραμματισμό των οχημάτων υπάρχουν δύο διαδικασίες διαφορετικές. Η μια διαδικασία είναι αυτόματη και χρησιμοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο για την βελτιστοποίηση του προγραμματισμού για τον ελάχιστο αριθμό των οχημάτων, που δίνεται, τον απαιτούμενο αριθμό των δρομολογίων και τις παραμέτρους του σχεδιασμού των γραμμών των οχημάτων. Η δεύτερη διαδικασία που απαιτεί την εμπλοκή των

σχεδιαστών επιτρέπει τον σχεδιασμό των δρομολογίων ανάλογα με τις σχετικές απαιτήσεις, αφήνοντας τα δρομολόγια μικρότερης διάρκειας να προγραμματιστούν αυτόματα από το σύστημα. Τα δρομολόγια μπορούν να αποτυπωθούν είτε σε γραφήματα είτε σε πίνακες. Το χρονικό περιθώριο της απεικόνισης μπορεί να προσδιοριστεί από τον χρήστη.

Η εισαγωγή των βασικών δεδομένων (και ημι-στατικών στοιχείων) και η διατήρηση αυτών γίνεται βάση τεχνολογίας σχεδίασης (χαρτογράφησης). Τα στοιχεία αυτά και ειδικά των επιβατών μπορεί να επεξεργαστούν και να εκτυπωθούν με ποιότητα Postscript. Επίσης η εκτύπωση μπορεί να γίνει με τον τρόπο που ορίζει ο χρήστης.

Οι βελτιώσεις που υπόσχεται το σύστημα είναι προς τις εξής κατευθύνσεις :

Βελτίωση της απόδοσης του σχεδιασμού οδηγών και οχημάτων :

- Μείωση του προσωπικού και των οχημάτων που απαιτούνται για την χρήση των οχημάτων στις καλυπτόμενες γραμμές.
- Ελαχιστοποίηση του χρόνου των νεκρών διαδρομών
- Μεγαλύτερη ευελιξία στην κατασκευή του προφίλ των διαδρομών.
- Ευέλικτες αλλαγές στην σχεδίαση της εξυπηρέτησης, ακόμα και στην περίπτωση που αυτό γίνεται για κάποιο προσωρινό χρονικό διάστημα.

Απλοποίηση της ροής των πληροφοριών :

- Έγκυρη πληροφόρηση για τους επιβάτες που εξάγεται σε παραδοσιακή μορφή συγχρόνως και σε υπολογιστική μορφή.
- Δεδομένα εισαγωγής για συστήματα ελέγχου λειτουργίας.
- Στατιστικές απόδοσης λειτουργίας που ανανεώνονται συνεχώς.

Αύξηση της παραγωγικότητας της διαδικασίας :

- Επιλογή της μεθόδου σχεδιασμού.
- Απλοποίηση της συντήρησης των δεδομένων.
- Μικρότερος χρόνος σχεδιασμού.

Βάση αυτής της λογικής αναλύονται και η διαδικασία υπολογισμού των υπηρεσιών και η διαδικασία καθορισμού οδηγών σε οχήματα και οχήματα σε δρομολόγια.

Για την ανάθεση του προσωπικού γίνεται επεξεργασία των στοιχείων της παραπάνω διαδικασίας προγραμματισμού των υπηρεσιών (προηγούμενο βήμα). Τα στοιχεία προέρχονται από την βάση δεδομένων που διαθέτει. Τα στοιχεία που εξάγονται έχουν άμεση σχέση με την μισθοδοσία και τροφοδοτούν το αντίστοιχο σύστημα.

Για την ανάθεση των οχημάτων γίνεται χρήση του προηγούμενου βήματος που υπολογίστηκαν οι συχνότητες. Ανατίθεται όλα τα οχήματα που είναι στην διάθεση μας άμεσα και παρακολουθείται η όλη διαδικασία μέχρι την επιστροφή από τα δρομολόγια. Εάν υπάρχουν καθυστερήσεις, αυτές και οι αιτίες σημειώνονται. Οι θέσεις στάθμευσης μπορούν να απεικονιστούν και να παρακολουθούνται.

Τέλος το πακέτο παρέχει την δυνατότητα διάφορα PC να συνδέονται στο σύστημα (clients) και να χρησιμοποιούν τα δεδομένα και να προσθέτουν και να ενημερώνουν τις βάσεις (δεδομένων). Αυτό σημαίνει παρακολούθηση των επιβατών που υπάρχουν και χρησιμοποιούν το δίκτυο, πληροφόρηση για τους επιβάτες που χρησιμοποίησαν το δίκτυο, πληροφορίες για την μισθοδοσία, για το management και η χαρτογράφηση της περιοχής με τα στοιχεία που μας ενδιαφέρουν.

Η κλασσικές απαιτήσεις ενός συστήματος θα ήταν :

- Λειτουργικό σύστημα UNIX (IBM AIX σε IBM RISC system/6000 series)
- Βάση δεδομένων ORACLE με SQL query
- Γλώσσα προγραμματισμού ANSI-C (IBM xlc)
- OSF/MOTIF user interface (GUI)
- CASE 4/0 micro development tool

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η συνδέσεις στον διακομιστή (server) μπορούν να γίνουν από PC που έχουν λειτουργικό σύστημα WINDOWS ή να υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας προγράμματος για X Windows.

Πέρα από την συμβολή των μελετητών που ασχολούνται με τα αντίστοιχα βήματα του σχεδιασμού και το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται, η επικοινωνία με το επιβατικό κοινό είναι απαραίτητη όχι μόνο για την συλλογή στοιχείων αλλά και για την εικόνα του Οργανισμού (Image).

Λόγω της αυξημένης επιρροής του μάρκετινγκ στους Οργανισμούς που διαχειρίζονται λεωφορεία παρακάτω θα γίνει μια αναφορά στην φύση

του Μάρκετινγκ και πώς αυτό εφαρμόζεται στους μεγαλύτερους και πιο επιτυχημένους Οργανισμού ανά τον κόσμο.

7.3 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΜΑΡΚΕΤΙΝΓΚ

Σε κάθε αναπτυσσόμενη επιχείρηση το μάρκετινγκ εφαρμόζεται με σκοπό την επίτευξη κάποιων συγκεκριμένων εταιρικών στόχων, όπως κάποιο επίπεδο πωλήσεων και κέρδους. Αυτό γίνεται με :

- Την αναγνώριση και του ορισμού των αναγκών επιλεγμένων ομάδων πελατών.
- Την μετάφραση αυτών των απαιτήσεων σε προϊόντα και σε λεπτομερή παρουσίαση των παροχών.
- Την διατύπωση και την εφαρμογή των πολιτικών που βασίζονται στην επιρροή της ζήτησης, παραδίδοντας τα προϊόντα που προκύπτουν στις επιμέρους αγορές.

Άρα ένα πρόγραμμα μάρκετινγκ βασίζεται στην πληροφόρηση για την υπάρχουσα αγορά και των δυνατών αγορών. Τον αριθμό, τον τύπο και την τοποθεσία των πελατών που εμπλέκονται, την οικονομία, τον κοινωνικό ανταγωνισμό, τους νομικούς και τεχνικούς παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά της αγοράς και τα πρότυπα που αναπτύσσονται για την προσφορά.

Μια εταιρία που θεωρείται marketing-oriented ψάχνει συστηματικά τις ανάγκες των πελατών, τις οποίες και πιστεύει ότι μπορεί να καλύψει μέσω της παραγωγής της. Οι οικονομικοί στόχοι είναι μεγιστοποίηση των κερδών με ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής. Ωστόσο οι εταιρίες αυτές αναγνωρίζουν ότι οι πελάτες επηρεάζονται από μια πλειάδα παραγόντων. Η ιδέα όμως πίσω από το μάρκετινγκ είναι η αντίληψη ότι οι επιθυμίες των πελατών αναπτύσσονται από το κοινωνικό περίγυρο και δεν 'δημιουργούνται' από την εταιρία.

Ένας όμιλος που θεωρείται production-oriented παράγει προϊόντα και υπηρεσίες και ύστερα επιχειρεί την πώληση αυτών έχοντας κάποιο κέρδος. Η έμφαση εδώ δίνεται στην επίτευξη του επιθυμητού κέρδους μέσω διαδικασιών που θα ελαχιστοποιούν το κόστος στην παραγωγή. Ακόμα υπάρχει μια τάση πού υπονοεί ότι η τιμή και οι επιθετικές τεχνικές προώθησης θα δημιουργήσουν πελατεία, ενώ τις περισσότερες φορές αυτού του είδους εταιρίες λειτουργούν στην λογική της περίσσειας ζήτησης ως προς την προμήθεια (παροχή).

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω μπορεί να ειπωθεί ότι σχετικά με το μάρκετινγκ ενώ δεν φαίνεται να 'δημιουργεί' ζήτηση, το επόμενο βήμα

είναι η πρόβλεψη της εξέλιξης των αναγκών, και σε τελική ανάλυση η δημιουργία τεχνικών, όπως είναι η έμφαση στον λογότυπο της εταιρίας, που θα καταστήσουν την εταιρία μια αξιόπιστη πηγή ικανοποίησης των αναγκών των πελατών ενώ μπορεί να εξελιχθεί σε αποκλειστική πηγή παροχής (μονοπώλιο).

7.4 Η ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΜΑΡΚΕΤΙΝΓΚ ΣΤΙΣ ΔΗΜΟΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ

Οι σχεδιαστές πολλές φορές έχοντας υπόψη μέτρα βελτιωτικά ως προς τις λεωφόρους και την κυκλοφορία, αντιμετωπίζουν το δίλημμα του εάν θα προταθούν αυτές οι αλλαγές ή θα μείνουν για πάντα στην αφάνεια λόγω των αντιδράσεων ορισμένων ομάδων, που θεωρούν πως τα μέτρα είναι ενάντια των συμφερόντων τους. Ακόμα και αν υπάρχει ικανοποιητική εξυπηρέτηση μέσω των MMM, όσοι νιώθουν ότι εξαρτούνται αποκλειστικά από το ΙΧ, δεν αλλάζουν εύκολα συνήθειες και θα πρέπει να θεωρείται σχεδόν δεδομένη η αντίδραση αυτών καθώς και των lobby που εκπροσωπούν.

Ωστόσο η συμπεριφορά αυτή δεν είναι μόνιμη. Αν και η μεθοδολογία της χρήσης γης και των ερευνών στις μεταφορές δεν επιτρέπει προβλέψεις λόγω της κριτικής διάθεσης και των περιορισμών, οι μοτοσικλετιστές έχουν την διάθεση να χρησιμοποιήσουν Δημόσιες Μεταφορές περισσότερο (που σε αριθμούς στην Αγγλία [Λονδίνο]) μεταφράζεται σε διπλάσιο αριθμό) από τους αυτοκινητιστές (ΙΧ) σε περίπτωση που τα μέτρα είναι τέτοιας κλίμακας ώστε να πρέπει να γίνει μια επιλογή. Ενώ όμως αυτό θα μπορούσε να είναι στοιχείο στο οποίο να βασιστούν οι μελετητές (του London Transport συγκεκριμένα) για να πιέσουν τους πολιτικούς για μια πόλη με λιγότερα ΙΧ και με καλύτερη υποδομή MMM. Όμως οι διάθεση αυτή των μοτοσικλετιστών είναι μια δήλωση και όπως επισημαίνουν και διάφοροι κοινωνικοί ψυχολόγοι οι αναφορές στα πιστεύω μπορεί να είναι ανεπαρκής ένδειξη για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς.

Ακόμα όμως υπάρχουν θέματα στα οποία το κοινό πολλές φορές δεν συμφωνεί όμως αργότερα αποδέχεται τα μέτρα. Οι προτάσεις για πεζοδρόμηση συχνά προκαλούν επιπλέον ανταγωνισμό μεταξύ των ιδιοκτητών καταστημάτων, αφού πιστεύουν πως θα μειωθούν οι πελάτες και η κίνηση ενώ στην πραγματικότητα η μέχρι τώρα εμπειρία έχει δείξει το αντίθετο. Επίσης όμως προκειμένου να υπάρχει μια πιο αρμονική και επιταχυνόμενη αποδοχή των νέων μέτρων που προτείνονται πρέπει :

1. Να δίνονται πειστικές πληροφορίες που να δικαιολογούν την εργασία που θα γίνει.

2. Αν και τα μέτρα θα δυσαρεστήσουν κάποιους, πρέπει να δίνονται αντιληπτές ευεργετικές συνιστώσες για το κοινό.

Αυτές είναι συμπεριφορές και νοοτροπίες που οι μελετητές πρέπει να έχουν υπόψη όταν σχεδιάζουν και θα πρέπει να προετοιμάζονται για την περίοδο που θα διαρκέσουν τα μέτρα, να είναι και μια περίοδος στην οποία θα πείσουν το κοινό ότι τα μέτρα αυτά λαμβάνονται για το καλό του συνόλου. Η πληροφόρηση του κοινού και η ενημέρωση σχετικά με τις βελτιώσεις που θα προκύψουν στο υπάρχον δίκτυο είναι καθοριστικής σημασίας διαδικασία.

7.4.1 Η Εφαρμογή του Μάρκετινγκ στις Δημόσιες Μεταφορές

Από την διεθνή εμπειρία ξέρουμε πως θα πρέπει να έχουμε, εάν αληθινά επιθυμούμε την καλύτερη εφαρμογή των τεχνικών μάρκετινγκ στις δημόσιες μεταφορές, ξεκάθαρη δομή αντίστοιχου τμήματος που θα στελεγχώνεται από ικανά στελέχη που θα έχουν ενεργό ρόλο προώθησης. Ο βασικός λόγος που συνήθως αυτό το τμήμα δεν υπάρχει είναι η δυσκολία στην επικοινωνία και της αντίληψης του πώς οι τεχνικές μάρκετινγκ μπορούν να εφαρμοστούν στα προβλήματα Δημοσίων Μεταφορών. Ακόμα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι άλλα τμήματα δεν δέχονται και δεν αναγνωρίζουν την συνεισφορά του μάρκετινγκ στα προβλήματα που τίθενται.

Γεγονός πάντως είναι ότι εάν υπάρχει σωστή συνεργασία όλων των τμημάτων δεν προκύπτουν προβλήματα και επιπλέον το αποτέλεσμα είναι περισσότερο από ικανοποιητικό. Σε αυτή την περίπτωση μιλάμε για συνεργασία του τμήματος μάρκετινγκ με το τμήμα των μελετητών. Θα πρέπει να βρεθεί η χρυσή τομή κάθε φορά που επιλύεται ένα πρόβλημα έτσι ώστε όλοι να συνεισφέρουν και ενώ οι μελετητές να έχουν τις λύσεις, το οποίες από αυτές θα εφαρμοστούν βάση στρατηγικών θα προκύψουν από τις προβλέψεις και τις εκτιμήσεις του τμήματος μάρκετινγκ.

Ακόμα όπως προκύπτει από την διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν λόγοι που στελέχη του τμήματος μάρκετινγκ θα πρέπει να έχουν ισχυρούς οργανωτικούς ρόλους. Ο κυριότερος αναφέρεται στο ότι οι μελετητές μεταφορών έχουν ορίζοντες χρόνου πολύ μεγάλους σε σχέση με το χρονικό παράθυρο στο μάρκετινγκ που θέλει να είναι μικρότερο και να υπάρχει μια συνεχή εξέλιξη και ανάδραση στις υπηρεσίες που προσφέρονται.

8 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Andre de Palma & Lindsey R.
Optimal Timetables for Public Transportation.
Transportation Research Part B, 35, (2001) 789-813.
- Ceder A.
Methods for Creating Bus Timetables.
Transportation Research A, 21, 59-83, (1986).
- Ceder A.
Urban Transit Scheduling: Framework, Review and Examples.
Journal of Urban Planning and Development, Vol. 128, No 4, 225 – 244, (2002).
- Ceder A. & Wilson N.H.M.
Bus Network Design.
Transportation Research B, 20, (1984), 331-344 .
- Ceder A., Golany B. & Tal O.
Creating Bus Timetables with Maximal Synchronization.
Transportation Research Part A, 35 (2001) 913-928.
- Haghani A. & Banihashemi M.
Heuristics Approaches for Solving Large-Scale Bus Transit Vehicle Scheduling Problem with Route Time Constraints.
Transportation Research Part A, 36 (2002), 309 - 333.
- Lam W.H.K & Bell M.G.H
Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning
Pergamon , An Imprint of Elsevier Science , (2003).
- Lindquist E.
Financing and Implementing Sustainable Development: A Local Planning Approach.
Southwest Region University Transportation Centre, Texas
Transportation Institute, SWUTC/99/472840-00011-1.
- Ngamshai S. & Lovell D.J.
Optimal Time Transfer in Bus Transit Routes. Network Design Using A Genetic Algorithm.
((2003) Δεν έχει δημοσιευτεί σε περιοδικό ακόμα)
- Transit Cooperative Research Program
Bus Route Evaluation Standards. A Synthesis of Transit Practice.
Transportation Research Board, National Research Council, TCRP
Synthesis 10 (1995).
- Transportation Research Board
Bus Route and Schedule Planning Guidelines
National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 69 (1970).

- Valouxis C. & Housos E.
 Combined Bus and Driver Scheduling
 Computer & Operations Research 29, 2002, 243 – 259.
- Wren A. & Rousseau J.M.
 Bus Driver Scheduling – An Overview.
 In Daduna J.R. & Paixao J. (eds.), Computer – Aided Transit
 Scheduling – 3, Springer – Verlag, 173 – 187, (1995).
- Αμπακούμκιν Κ. & Σταθόπουλος Α.
 Συνδυασμένες Μεταφορές – Ειδικά Συστήματα. Ανάπτυξη
 Μεθόδων & Ασκήσεις.
 ΕΜΠ, Τμήμα Πολικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και
 Συγκοινωνιακής Υποδομής, Αθήνα 2000.
- Αμπακούμπιν Κ. & Σταθόπουλος Α.
 Ειδικά Θέματα Μεταφορών
 ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και
 Συγκ/νιακής Υποδομής, Αθήνα 2000.
- Μαζαρίδης Πρ.
 Συνοπτικό Ιστορικό των Ελληνικών Σιδηροδρόμων
 Αθήνα 1984, Σελ. 81.
- Νάθενας Γ.
 Το Τραμ Τότε και Σήμερα : Τρένα και Άνθρωποι
 Τεύχος 12, Σελ 37 (1984).
- Σαρηγιάννη Γ.Μ.
 Αθήνα 1830 – 2000 . Εξέλιξη – Πολεοδομία – Μεταφορές
 Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2000.
- Φραντζεσκάκης Ι.Μ. & Γιαννόπουλος Γ.Α.
 Σχεδιασμός των Μεταφορών και Κυκλοφοριακή Τεχνική
 Βασικές Έννοιες, Κόμβοι, Κυκλοφοριακή Ικανότητα, Σήμανση,
 Σηματοδότηση, Κυκλοφοριακές Μετρήσεις.
 Εκδόσεις Παρατηρητής, Τόμος 1, Γ' Έκδοση. (1986)

9 ΓΕΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

9.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΛΕΩΦΟΡΕΙΑΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ

- Avishai Ceder & Nigel H.M. Wilson (1984)
Bus Network Design.
Transportation Research B, 20, 331-344.
- Dobois D., Bell G & Llibre M (1979)
A set of methods in transportation network synthesis and analysis.
J. Oper. Res. Soc. 30, 209-808.
- Hasselstrom D. (1981)
Public Transportation Planning – Mathematical Programming
Approach.
Department of Business Administration, University of Gothenburg,
Sweden.
- Israeli Y. (1985)
Optimal Routing Allocation to Transfer Demand in Networks.
Doctoral Dissertation, Civil Engineering Department, Technion –
Israel.
- Kocur G. & Hendrickson C. (1982)
Design of Local Bus Service with Demand Equilibrium.
Transportation Science 16.
- Koutsopoulos H.N., Odoni A. & Wilson N.H.M. (1983)
Determination of Headways as a Function of Time Varying
Characteristics on a Transit Network.
Paper Presented at The Workshop on Transit Vehicle and Crew
Scheduling, Montreal , June 1983.
- Lampkin W. & Saalmans P.D. (1967)
The Design of Routes, Service Frequencies and Schedules for a
Municipal Bus Undertaking.
A case study. Oper. Research Quart. 18 375 – 397.
- Mahmood Omar Imam (1997)
Optimal Design of Public Bus Service with Demand Equilibrium.
Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, No 5,
Sept/October.
- Mandl C.E. (1979)
Evaluation and Optimization of Urban Public Transportation
Networks.

Presented at EURO III in Amsterdam, The Netherlands, 9-11 April 1979.

- Newel G. (1979)
Some Issues Relating to the Optimal Design of Bus Routes.
Transportation Science 13, 20-35.
- Partha Chakroborty (2003)
Genetics Algorithms for Optimal Urban Transit Network Design.
Computer – Aided and Infrastructure Engineering 18, (2003) 184-200.
- Rea J.C. (1971)
Designing Urban Transit Systems : An Approach to the Route Technology Selection Problem.
PB. 204 – 881, University of Washington, Seattle, WA.
- Silman L.A., Barzily Z. & Passy U. (1974)
Planning the Route System for Urban Buses.
Comp. Oper. Research 1, 201 – 211.
- Somnuk Ngamshai & David J. Lovell (2002)
Optimal Time Transfer in Bus Transit Routes. Network Design Using A Genetic Algorithm.
(Δεν έχει δημοσιευτεί σε περιοδικό ακόμα)
- Spiess H. & M. Florian (1989)
Optimal strategies: A New Assignment Model for Transit Networks.
Transportation Research 23B(2), 83-102.
- Stern H. & Ceder A. (1983)
An Improved Lower Bound to the Minimum Fleet Size Problem.
Transportation Science 17(4), 471-483.
- Tsao S. & Schonfeld P. (1984)
Branched Transit Services : An Analysis.
Journal of Transportation Engineering 110(1), 112-128.
- Vandebona U. & Richardson A.J. (1985)
Simulation of Transit Route Operations.
Transportation Research Record, 1036, 36 – 40.
- William H.K. Lam & Michael G.H. Bell (2003)
Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning
Pergamon , An Imprint of Elsevier Science.
- Wilson N.H.M., Bauer A., Gonzalez S. & Shriver J. (1984)
Short Range Transit Planning : Current Practice and a Proposed Framework.
U.S. Department of Transportation Report DOT-1-84-44,
Washington D.C.
- Wu J.H., Florian M. & Marcotte P. (1994)

Transit Equilibrium Assignment: A Model and Solution Algorithms.

Transportation Science 28(3), 193-203.

Zeleny M. (1973)

Compromise Programming in : Multiple Criteria Decision Making (Cochrane J.L. & M. Zeleny eds.) Columbia, University of South Carolina Press.

9.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

Andre de Palma & Robin Lindsey (2000)

Optimal Timetables for Public Transportation.

Transportation Research Part B, 35, (2001) 789-813.

Berechman J. (1993)

Public Transit Economics and Deregulation Policy.

North Holland, Amsterdam.

Bianco L. & Ceder A. (1996)

Multi-objective Approach for Designing Transit Routes with Frequencies.

Advanced Methods in Transportation Analysis, Springer Verlag, Berlin , 157-182.

Ceder A. & Stern H.I., (1984)

Optimal Transit Timetables for a Fixed Vehicle Fleet.

Proceedings of the 10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, UNU Science Press, Holland, 331 – 351.

Ceder A. (1984)

Bus Frequency Determination using Passenger Count Data.

Transportation Research 18A, 439 – 453.

Ceder A. (1986)

Methods for Creating Bus Timetables.

Transportation Research A, 21, 59-83.

Ceder A., Golany B. & Tal O. (1999)

Creating Bus Timetables with Maximal Synchronization.

Transportation Research Part A, 35 (2001) 913-928.

Chin C. & Schonfeld P. (1998)

Joint Optimization of a Rail Transit Line and its Feeder Bus System.

Journal of Advanced Transportation 32 (3).

Daganzo C.F. (1990)

On the Coordination of Inbound and Outbound Schedules at Transportation Terminals.

- In Proceeding of 11th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Yokohama, Japan , Elsevier, New York, 1990, 379-390.
- Desilet A. & Rousseau J. (1992)
 Syncro : A Computer Assisted Tool for the Synchronization of Transfer in Public Transit Network.
 Computer- Aided Transit Scheduling Springer, Berling, 153-166.
- Evans A. (1987)
 A Theoretical Comparison of Competition an other Economic Regimes for Bus Services.
 Journal of Transport Economics and Policy 21, 7-36.
- Hotelling H. (1929)
 Stability in Competition.
 Economic Journal 39, 41-57.
- Kraus M. & Yoshida Y. (1999)
 A Model of a Wel-Fare Maximizing Urban Mass Transit Authority.
 Department of Economics, Boston College.
- Labbe M., Peeters D.& Thisse J-F (1995)
 Location on Networks, In Ball M.O & Magnanti T.L. & Momma C.L. & Nemhauser G.L.
 Handbooks in Operations Research and Management Science, Vol. 8, Network routing, Elsevier, Amsterdam. 551- 624.
- Larson R.C. & Odoni R., (1981)
 Urban Operations Research
 Prentice – Hall , Eglewood Cliffs, NJ.
- Lee M. & Schonfeld P. (991)
 Optimal Slack Time for Timed Transferred at Transit Terminal.
 Journal of Advanced Transportation 25 (3).
- Vickley W.S., (1969)
 Congestion Theory and Transport Investment.
 American Economic Review (Papers and Proceedings) 59, 251-260
- Voss S. (1992)
 Network Design Formulation in Schedule Synchronization.
 Computer- Aided Transit Scheduling, Springer, Berlin, 137-152
- William H.K. Lam & Michael G.H. Bell (2003)
 Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning
 Pergamon , An Imprint of Elsevier Science.
- Αμπακούμπιν Κ. Σταθόπουλος Α.
 Ειδικά Θέματα Μεταφορών
 ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκ/νιακής Υποδομής, Αθήνα 2000.

9.3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

- Abkowitz M., Eiger A. & Engelstein I., (1986)
Optimal Control of headway Variation on Transit Routes.
Journal of Advanced Transportation 20, 73 – 88.
- Antoneta X. Horbury, (1999)
Using Non-Real-Time Automatic Vehicle Location Data to Improve Bus Services.
Transportation Research Part B, 33 (1999), 559-579.
- Banihashemi M. (1998)
Multiple Depot Transit Scheduling Problem Considering Time Restriction Constrains.
Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Park, MD.
- Bianco L., Mingozzi A. & Ricciardelli S., (1995)
A Set Partitioning Approaching to the Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem.
Optimization Methods and Software 3, 163-194.
- Bianco L., Mingozzi A. & Ricciardelli S., (1995)
An Exact Algorithm for Combining Vehicle Trips. In Daduna J.R, Branco I., Paixao J. (Eds.)
Computer – Aided Transit Scheduling, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 430, Springer, Berlin, 145-172.
- Carraresi P. & Gallo G. (1984)
Network Models for Vehicle and Crew Scheduling.
European Journal of Operations Research, 16 (1984), 139 – 151.
- Ceder A. & Stern H.I., (1981)
Deficit Function Bus Scheduling with Deadheading Trip Insertion for Fleet Size Reduction.
Transportation Science, 15(4), 338 – 363.
- Ceder A. & Stern H.I., (1984)
Optimal Transit Timetables for a Fixed Vehicle Fleet.
Proceedings of the 10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, UNU Science Press, Holland, 331 – 351.
- Ceder A., (1984)
Bus Frequency Determination using Passenger Count Data.
Transportation Research 18A, 439 – 453.
- Ceder A., (1986)
Methods for Creating Bus Timetables.
Transportation Research 21A, 59 – 83.

- Ceder A., (2002)
A Step Function for Improving Transit Operations Planning using Fixed and Variable Scheduling.
Transportation and Traffic Theory (15th ISTTT), (M.A.P. Taylor, ed) Elsevier Science & Pergamon Pub, 1 – 21.
- Dell' Amico, Fischetti M. & Toth P., (1993)
Heuristic Algorithms for the Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem.
Management Science 39, 115-125.
- Desaulniers G., June Lavigne & Francois Soumis (1997)
Multi-Depot Vehicles Scheduling Problems with Time Windows and Waiting Costs.
European Journal of Operational Research 111, (1998) 479-494.
- Freiling R. & Paixao J., (1993)
Vehicle Scheduling with Time Constrains.
In Proceedings of the Sixth International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport, Lisbon, Portugal.
- Haghani A. & Banihashemi M. (2000)
Heuristics Approaches for Solving Large-Scale Bus Transit Vehicle Scheduling Problem with Route Time Constrains.
Transportation Research Part A, 36 (2002), 309 - 333.
- Haghani A. & Banihashemi M. (2000)
An Optimization Model for Large Scale Bus Transit Scheduling Problems.
Paper Prepared for 79th Annual Conference of the Transportation Research Board.
- Hall R.W., (1985)
Vehicle Scheduling at a Transportation Terminal with Random Delay en Route.
Transportation Science 19, 308 – 320.
- Lobel A. (1997)
Solving Large-Scale Multiple-Depot Scheduling Problems.
In Proceedings of the Seventh International Conference on Computer – Aided Scheduling of Public Transport, Cambridge, MA.
- Maged Dessouky, Randolph Hall, Lei Zhang, Ajay Singh, (2003)
Real-Time Control of Buses for Schedule Coordination at a Terminal.
Transportation Research Part A, 37 (2003), 145 – 164.
- Ribeiro C.C. & Soumis F., (1994)
A Column Generation Approach to the Multiple-Depot Vehicle Scheduling Problem.
Operations Research 42, 41- 52.

9.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

- Adamski A. & Sofia Bryniarska (2002)
Schedule Synchronization in Public Transport by Tabu Search and Genetics Method.
(Δεν έχει δημοσιευτεί ακόμα)
- Ball M. & Roberts A., (1985)
A Graph Partitioning Approach to Airline Crew Scheduling.
Transportation Science 19(2), 107 – 126.
- Ball M., Bodin L. & Dial R., (1983)
A Matching Based Heuristics for Scheduling Mass Transit Crews and Vehicles.
Transportation Science 17, 4 – 31.
- Ceder A. (2002)
Urban Transit Scheduling: Framework, Review and Examples.
Journal of Urban Planning and Development, Vol. 128, No 4, 225 – 244.
- Durkin J. (1994)
Expert Systems Design and Development.
Prentice Hall, NJ, 118 – 120.
- Elias S.E.G. (1964)
The Use of Digital Computers in the Economic Scheduling for both Man and Machine in Public Transportation.
Kansas State University Bulletin, Special Report No 49 (1964).
- Ftulis S.G., Giordano M., Pluss J.J., Vota R.J., (1998)
Rule – Based Constrains Programming : Application to Crew Assignment.
Expert Systems With Applications 15, (1998) 77 – 85.
- Gabow H. (1975)
An Efficient Implementation of Edmonds Algorithm for Maximum Matching on Graphs.
Journal of ACM 1975, 23, 221 – 234.
- Gertsbach J. & Guverich Y., (1977)
Construction an Optimal Fleet for a Transportation Schedule.
Transportation Science , 11, 20 – 36.
- Goldberg D.E. (1989)
Genetics Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning.
Addison – Wesley, Reading, Mass (1989).
- Kwan R.S.K., A. Wren & L. Zhao (1992)

- Driver Scheduling Using Intelligent Estimation Techniques with Heuristic Searches.
In Computer – Aided Transit Scheduling (Edited by M. Desrochers and J.M. Rousseau), Springer, Berlin (1992), 279 – 395.
- Ross J.,(1993)
BERTA-Computer – Aided System for the Scheduling and Evaluation of Public Transport Operations on it's Way of Realization.
Sixth International Workshop on Computer – Aided Scheduling of Public Transportation, Lisbon.
- Rousseau Jean-Mark & Blais Jean-Yves, (1985)
'HASTUS': An Interactive System for Buses an Crew Scheduling.
In Jean-Mark Rousseau (ed.), Computer Scheduling of Transportation –2, Amsterdam, North Holland, 45 – 60.
- Smith Barbara M. & Anthony Wren, (1981)
'VIMPIRES' and 'TASC': Two Successfully Applied Bus Scheduling Programs.
In A.Wren (eds), Computer Scheduling of Public Transportation, Amsterdam, North – Holland, 94 – 124.
- Smith Barbara M. & Anthony Wren, (1988)
A Bus Crew Scheduling System Using a Set Covering Formulation
Transportation Research, 22A, 97 – 108.
- Syslo M., Deo M. & Kowalik J., (1983)
Discrete Optimization Algorithms.
Englewood Cliffs, NJ, Prentice – Hall, 194 – 211.
- Valouxis C. & Housos E. (2000)
Combined Bus and Driver Scheduling
Computer & Operations Research 29, 2002, 243 – 259.
- Wren A. & Rousseau J.M., (1995)
Bus Driver Scheduling – An Overview.
In Daduna J.R. & Paixao J. (eds.), Computer – Aided Transit Scheduling –3, Springer – Verlag, 173 – 187.
- Wren A. and David O. Wren (1994)
Genetic Algorithm for Public Transport Driver Scheduling.
Computers Oper. Research (1995) Vol 22, No 1, 101 – 110.
- Wren A., (1981)
General Review of the Use of Computers in Scheduling Buses and Their Crews.
In A.Wren (eds), Computer Scheduling of Public Transport, Amsterdam, North – Holland, 3 – 17.

10 ΕΙΔΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

Operation Research Journals

(www.informatik.hu-berlin.de/~weinert/orjournals.html)

Graph Theory Journals

(www.math.ohio-state.edu/~dsanders/graph/journals.html)

Discrete Math Journals

(www.informatik.hu-berlin.de/~dm/fachzeitschriften.html)

Computer Science Journals

(www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/journals/)

Advanced Planning and Scheduling Magazine

(www.apsmagazine.com)

Human Recourse Executive

(www.hrexecutive.com)

Workforce Magazine

(www.workforceonline.com)

HR Today

(www.jobfind.com/hrtoday/)

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

- AUSTRICS (www.austrics.com.au)
- HASTUS (www.giro.ca)
- ILOG (www.ilog.co.uk)
- MERAKAS (www2.omnitel.net/merakas)
- PTV (www.ptv.de)
- ROUTEMATCH (www.routematch.com)
- ROUREMATE (www.nemsys.it)
- ROUTELOGIC (www.routelogic.com)
- SCHEDULE MASTERS (www.smilink.com)
- SYSTRA (www.systra.com)
- TRAPEZE (www.trapezesoftware.com)
- BERTA (www.ivu-berlin.de)
- HOT II (www.hansec.com)
- DIVA (www.mentzdv.de/diva.htm)
- CITYPLAN21 (www.ttisysteme.de/produkte.htm)
- IFES, DIES, REDI 2 (www.hpw.ch/deutsch/prodfr4.htm)
- MICROSTER (<http://accolade.qda.com.au/prod01.htm>)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΡΩΤΟ

11 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Βδομάδες μετά, όταν ένας επισκέπτης τον ρώτησε
τι δίδασκε στους μαθητές του, αυτός είπε,
‘Να τοποθετούν τις προτεραιότητες σωστά : Καλύτερα
να έχεις τα χρήματα παρά να τα μετράς ; καλύτερα
να έχεις την εμπειρία παρά να ξοδεύεσαι ορίζοντας την.

Anthony de Mello, One Minute Wisdom

Στο Παράρτημα Ι υπάρχουν στοιχεία για τα όσα αναφέρθηκαν στις διάφορες μεθόδους κατά την περιγραφή της διαδικασίας σχεδιασμού των λεωφορειακών γραμμών. Αυτές οι πιο αναλυτικές παρουσιάσεις των μεθόδων έρχονται να συμπληρώσουν εκεί που χρειάζεται τα όσα αναφέρθηκαν στα αντίστοιχα κεφάλαια.

11.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ

Ιστορικά ο πρώτος όρος που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την κατηγορία είναι γραμμικός προγραμματισμός και προέρχεται από τον George Dantzig το 1940. Ο όρος προγραμματισμός, εδώ δεν παραπέμπει σε προγραμματισμό υπολογιστών (αν και οι υπολογιστές είναι αναπόσπαστο κομμάτι του μαθηματικού προγραμματισμού) αλλά χρησιμοποιήθηκε από την εφαρμογή του προγράμματος από τον στρατό των ΗΠΑ για να δηλώσει προγραμματισμένη εξάσκηση και καθορισμό του ελέγχου των λεπτομερειών επιχειρήσεων. Αυτά ήταν τα επίκαιρα προβλήματα με τα οποία ο Dantzig ασχολούταν. Αργότερα προφανώς ο όρος ‘προγραμματισμός’ παρέμεινε για την απόσπαση χρηματοδότησης από την κυβέρνηση, αφού θα ήταν συσχετισμένη με πεδία υψηλής τεχνολογικής έρευνας που θεωρούνταν με την σειρά τους σημαντικά [Duckworth W.E. “A guide to Operational Research” (1962)].

11.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Στα μαθηματικά η έννοια της βελτιστοποίησης αναφέρεται στα προβλήματα που έχουν την εξής μορφή :

Δεδομένο : μια συνάρτηση $f : A \rightarrow \mathbb{R}$

Ζητείται : ένα στοιχείο χ_0 στο A έτσι ώστε $f(\chi_0) \geq f(\chi)$ για όλα τα χ στο A (μεγιστοποίηση) ή $f(\chi_0) \leq f(\chi)$ για όλα τα χ στο A (ελαχιστοποίηση).

Μια τέτοια διατύπωση καλείται μαθηματικός προγραμματισμός. Πολλά από τα προβλήματα της καθημερινής ζωής και θεωρητικά προβλήματα μπορούν να εκφραστούν με αυτό τον τρόπο και για αυτό οι εφαρμογές

του μαθηματικού προγραμματισμού είναι συνεχής [Nemhauser, Rinnooy Kan & Todds eds. “Optimization” (1989)].

Τυπικά το πεδίο A είναι κάποιο υποσύνολο του Ευκλείδειου χώρου R_n πολλές φορές καθορισμένο από ένα σύνολο περιορισμών, ισοτήτων και ανισοτήτων τα οποία και τα μέλη του A πρέπει να ικανοποιούν. Τα στοιχεία του A λέγονται δυνατές λύσεις και η συνάρτηση f λέγεται αντικειμενική συνάρτηση. Μια δυνατή λύση που μεγιστοποιεί (ή ελαχιστοποιεί) την αντικειμενική συνάρτηση ονομάζεται βέλτιστη λύση. Γενικά θα υπάρχουν αρκετά τοπικά μέγιστα και ελάχιστα, όπου ένα τοπικό ελάχιστο χ^* ορίζεται σαν ένα σημείο έτσι ώστε για κάποιο $\delta > 0$ και για όλα τα χ , ώστε $\| \chi - \chi^* \| \leq \delta$ και να ισχύει $f(\chi) \geq f(\chi^*)$. Αυτό σημαίνει πως σε μια περιοχή γύρω από το χ^* όλες οι τιμές της συνάρτησης είναι μεγαλύτερες από την τιμή της συνάρτησης στο σημείο καθεαυτό. Το τοπικό βέλτιστο ορίζεται με τον ίδιο τρόπο. Συνήθως δεν είναι δύσκολο να βρεθεί ένα τοπικό ελάχιστο όμως προκειμένου να είναι και ολικό ελάχιστο θα πρέπει το πρόβλημα να είναι τέτοιο (ο γεωμετρικός τύπος).

11.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Οι τεχνικές επίλυσης μαθηματικού προγραμματισμού είναι εξαρτημένες από την φύση της αντικειμενικής συνάρτησης και του συνόλου των περιορισμών. Υπάρχουν τα παρακάτω μεγάλα πεδία :

Έρευνες σε γραμμικό προγραμματισμό στον οποίο η αντικειμενική συνάρτηση είναι γραμμική και το σύνολο A ορίζεται μόνο από γραμμικές ισότητες και ανισότητες.

Ο ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός μελετά γραμμικά προβλήματα στα οποία οι μεταβλητές είναι περιορισμένες σε ακέραιες τιμές.

Ο τετραγωνικός προγραμματισμός (quadratic programming) επιτρέπει στην αντικειμενική συνάρτηση να έχει στοιχεία δευτέρου βαθμού ενώ οι περιορισμοί πρέπει να είναι γραμμικού τύπου.

Ο μη γραμμικός προγραμματισμός εξετάζει προβλήματα στα οποία και η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί ΔΕΝ είναι γραμμικής μορφής.

Ο στοχαστικός προγραμματισμός ασχολείται με περιορισμούς που οι μεταβλητές είναι τυχαίες.

Ο δυναμικός προγραμματισμός ασχολείται με την περίπτωση που έχει βέλτιστη υποδομή και υπερθετικά υποπροβλήματα. Ή αλλιώς (κατά την περιγραφή του προβλήματος των πολλαπλών σταδίων)

« Μια βέλτιστη πολιτική χαρακτηρίζεται από την ιδιότητα ότι οποιαδήποτε και να είναι η αρχική κατάσταση ή απόφαση, οι μετέπειτα αποφάσεις

αποτελούν την βέλτιστη λύση σε σχέση με το σημείο εκκίνησης » (ορισμός Κ.Αμπακούμκιν, Α.Σταθόπουλος, Ειδικά Θέματα Μεταφορών).

Για συναρτήσεις που είναι παραγωγίσιμες, και για προβλήματα χωρίς περιορισμούς μπορούν να λυθούν βρίσκονται θέσεις που ο εφαπτομένη είναι μηδέν (στάσιμα σημεία). Μπορεί τότε να χρησιμοποιηθεί η Hessian για την κατηγοριοποίηση του σημείου. Εάν η Hessian είναι μόνιμα θετική, το σημείο είναι τοπικό ελάχιστο, εάν μονίμως αρνητική το σημείο είναι τοπικό μέγιστο και εάν η Hessian είναι αόριστη τότε είναι κάποιο σημείο καμπής.

Εάν μια συνάρτηση είναι κυρτή σε πεδίο που μας ενδιαφέρει (όπως ορίζεται από τους περιορισμούς) τότε κάθε τοπικό ελάχιστο θα είναι και ολικό ελάχιστο. Καλοφτιαγμένες γρήγορες αριθμητικές τεχνικές υπάρχουν για να βελτιστοποιούν αμφίβολες ολοκληρώσιμες κυρτές συναρτήσεις. Έξω από αυτές τις συναρτήσεις χρησιμοποιούνται λιγότερο ιδανικές και πιο περίπλοκες μέθοδοι.

Προβλήματα με περιορισμούς μπορούν συχνά να μετασχηματιστούν σε προβλήματα χωρίς περιορισμούς με την βοήθεια των πολλαπλασιαστών Lagrange.

11.4 ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

11.4.1 Γραμμικός Προγραμματισμός

Η ανάγκη δεν γνωρίζει κανόνες.

Publilius Syrus, Moral Sayings

Ο Γραμμικός Προγραμματισμός είναι ή διαδικασία της επίλυσης ενός συστήματος από γραμμικές εξισώσεις και γραμμικές ανισώσεις με ένα σύνολο από άγνωστες πραγματικές μεταβλητές μαζί με την μεγιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης.

Πολλά πρακτικά προβλήματα από την Επιχειρησιακή Έρευνα μπορούν να εκφραστούν σαν προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού. Για παράδειγμα εάν x_1 είναι ο αριθμός των εκταρίων που έχουν φυτέψει σιτάρι και x_2 είναι ο αριθμός των εκταρίων που έχουν φυτέψει με καλαμπόκι και ο αγρότης έχει περιορισμένο αριθμό εκταρίων καθώς και περιορισμένο ποσό λιπάσματος F και εντομοκτόνων P , το κάθε ένα από

τα παραπάνω απαιτείται σε διαφορετικές ποσότητες ανά εκτάριο (F_1, F_2, P_1, P_2) για σιτάρι και καλαμπόκι αντίστοιχα. Αν γνωρίζει την τιμή πώλησης του σιταριού S_1 και την τιμή πώλησης του καλαμποκιού S_2 , τότε ο βέλτιστος αριθμός των εκταρίων για καλλιέργεια με σιτάρι και καλαμπόκι μπορεί να εκφραστεί σαν γραμμικό πρόβλημα

$\max(S_1x_1 + S_2x_2)$ όπου και έχουμε την βελτιστοποίηση της
 $F_1x_1 + F_2x_2 \leq F$ αντικειμενική συνάρτηση με τους περιορισμούς
 $P_1x_1 + P_2x_2 \leq P$ σχετικά με το λίπασμα και με τους περιορισμούς
 σχετικά με τα εντομοκτόνα.
 $x_1 + x_2 \leq A$ Μετά έρχεται ο περιορισμός στην έκταση της
 $x_1 \geq 0$ καλλιεργούμενης γης και φυσικά ο αριθμός των
 $x_2 \geq 0$ εκταρίων πρέπει να είναι σε κάθε περίπτωση θετικός.

Λόγω της γεωμετρίας αυτών των ειδών των γραμμικών περιορισμών και της γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης τα προβλήματα ΓΠ είναι ‘κυρτά’ που σημαίνει ότι δεν υπάρχει τοπικό βέλτιστο (εκτός από το γενικό βέλτιστο). Ακόμα στα προβλήματα ΓΠ η λύση πρέπει να είναι στην κορυφή ενός γεωμετρικού τόπου που με την σειρά του ορίζεται από τους περιορισμούς.

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις στις οποίες δεν μπορεί να βρεθεί βέλτιστη λύση. Πρώτο σε περίπτωση που ο γεωμετρικός τόπος είναι άδειος λόγω του ότι οι περιορισμοί (σαν ευθείες δεν τέμνονται) δεν μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα. Σε αυτή την περίπτωση η λύση είναι ‘αδύνατη’.

Στην άλλη περίπτωση η περιοχή των λύσεων πάλι δεν προσφέρει γεωμετρικά τον τόπο που θα ορίζεται από τις ακμές των περιορισμών και αντικειμενικής συνάρτησης γιατί απλά οι τιμές στις οποίες τέμνονται οι συναρτήσεις είναι πολύ μεγάλες.

Με τις περιπτώσεις αυτές μπορούμε να πούμε πως η περιοχή που ορίζει τον γεωμετρικό τόπο των λύσεων (κατά μήκος μιας ακμή για παράδειγμα) ή της μοναδικής λύσης (ένα σημείο) εξαρτάται από τους περιορισμούς.

Η μέθοδος Simplex ή ο αλγόριθμος Simplex εφαρμόζονται σε τέτοια προβλήματα. Η διαδικασία είναι αρκετά απλή και περιγράφεται σαν σάρωση όλων των κορυφών του κυρτού πολυγώνου με βέλτιστη λύση την βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (συνήθως μια μόνο κορυφή). Στην πράξη όμως υπάρχουν προβλήματα με το μέγεθος και τον χρόνο υπολογισμού.

Έτσι διαδόθηκε ο αλγόριθμος ‘εσωτερικού σημείου’ που δεν έχει προβλήματα με τον γεωμετρικό τόπο και με τον χρόνο υπολογισμού.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που λύνουν προβλήματα ΓΠ και αυτό γιατί τα προβλήματα αυτά συναντώνται στην βιομηχανία, στα δίκτυα μεταφορά και γενικότερα όπου υπάρχει η έννοια της βελτιστοποίησης. Τα συκοινωνιακά προβλήματα είναι και γραμμικής φύσεως και όσα μπορούν λύνονται με τις πιο σύγχρονες μεθόδους και αλγόριθμους επίλυσης προβλημάτων ΓΠ [Chvatal 'Linear Programming' (1983)].

Εάν οι μεταβλητές που μας είναι άγνωστες περιμένουμε να είναι ακέραιες τιμές τότε το πρόβλημα λέγεται - ακέραιος προγραμματισμός -. Σε αντίθεση με τον γραμμικό προγραμματισμό που στις πιο δύσκολες περιπτώσεις το πρόβλημα πάλι λύνεται, τα προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού στις πιο δύσκολες περιπτώσεις δεν μπορούμε να συμπεράνουμε λύση και σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις (περιορισμένες μεταβλητές) το πρόβλημα ονομάζεται NP-hard (θα αναφερθούμε αργότερα σε αυτά τα προβλήματα).

Εάν ακόμα οι μεταβλητές δεν είναι όλες ακέραιες τιμές τότε το πρόβλημα ονομάζεται – μικτός ακέραιος προγραμματισμός –.

11.4.2 Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός

Ένας ταξιδιώτης στην αναζήτηση των θείων
ρώτησε τον Κύριο πώς να ξεχωρίσει
έναν αληθινό δάσκαλο από κάποιον που ψεύδεται όταν
γυρίσει πίσω στον δικό του τόπο.
Και ο Κύριος είπε, 'Ο καλός δάσκαλος
προσφέρει πρακτική; Ο κακός προσφέρει
θεωρίες.'

Anthony de Mello, One Minute Wisdom

Κάποια πρακτικά προβλήματα οι μεταβλητές απόφασης έχουν νόημα μόνο αν έχουν ακέραιες τιμές. Για παράδειγμα είναι συχνά απαραίτητο να αντιστοιχίσουμε ανθρώπους, μηχανήματα και οχήματα σε δραστηριότητες σε ακέραιες ποσότητες. Αυτός ο περιορισμός είναι δύσκολος να χειριστεί μαθηματικά. Ωστόσο υπάρχει λύση και μάλιστα χρησιμοποιώντας την μέθοδο Simplex μετά την λύση (δηλαδή χωρίς περιορισμούς ακεραίων) με στρογγυλοποίηση των τιμών που δεν είναι ακέραιες. Ενώ συνήθως η διαδικασία πετυχαίνει υπάρχουν και αστοχίες. Πρέπει κατά κάποιο τρόπο να ξέρουμε ότι μετά την στρογγύλευση η λύση παραμένει μια δυνατή λύση. Για παράδειγμα έχουμε τους περιορισμούς

$$-x_1 + x_2 \leq 3/2 \quad \text{και}$$

$$x_1 + x_2 \leq 16/2$$

και με την μέθοδο Simplex έχουμε εντοπίσει την βέλτιστη μη ακέραιη λύση $x_1 = 6,5$ και $x_2 = 10$. Εδώ υπάρχει η δυνατότητα να κάνουμε το x_1 6 ή 7 αλλά αυτό δεν μπορεί να δώσει μια δυνατή λύση. Άρα θα πρέπει να αλλάξει και το x_2 . Τέτοια προβλήματα αλλά σε μεγαλύτερη κλίμακα είναι συνήθη. Το πεδίο αυτό είναι ανοικτό για έρευνα αλγορίθμων που να μπορούν να υπολογίζουν τις απαιτούμενες λύσεις και να μην περιορίζονται ως προς τις χρησιμοποιούμενες μεταβλητές.

Μια από τις πιο υποσχόμενες μεθόδους είναι η Μέθοδος Κλάδου και Φραγής (Branch and Bound Technique). Η διαδικασία της μεθόδου βασίζεται στις συνεχές υποδιαίρεσεις. Για παράδειγμα εάν υπάρχει μια αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση και υποθέτοντας πως υπάρχει δεδομένο ένα *ανώτατο όριο* στην βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, αυτό που γίνεται είναι η διαίρεση των δυνατών λύσεων σε υποσύνολα λύσεων και επιλέγεται ένα *κατώτατο όριο* του υποσυνόλου για την αντικειμενική συνάρτηση. Γίνεται σύγκριση με το ανώτατο όριο που έχουμε δώσει από την αρχή και σε περίπτωση που οι τιμές είναι μεγαλύτερες τότε το σύνολο αυτό αφαιρείται από τα εξεταζόμενα υποσύνολα τα οποία και ελέγχονται με την ίδια διαδικασία. Τότε τα υποσύνολα τα οποία και απομένουν υποδιαιρούνται για να βρεθεί νέο ελάχιστο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου βρεθεί μια δυνατή λύση που σε συνδυασμό με την αντικειμενική συνάρτηση θα δώσει το κατώτερο όριο ανάμεσα στα υποσύνολα. Άρα για παράδειγμα ένα υπάρχουν 10 μεταβλητές στο πρόβλημα με 10 δυνατές τιμές, τότε μπορεί να υπάρχουν μέχρι και 10^{10} δυνατές λύσεις. Παρ' όλες τις υπολογιστικές ικανότητες των υπολογιστών σήμερα (με 10^6 στοιχειώδεις αριθμητικές πράξεις το δευτερόλεπτο) οι αριθμητικές μέθοδοι έχουν το μειονέκτημα του μεγάλου υπολογιστικού χρόνου.

Εάν το πρόβλημα τώρα έχει εκτός από ακέραιες μεταβλητές τότε ονομάζεται μικτός ακέραιος προγραμματισμός ο οποίος και λύνεται με τον εξής τρόπο. Λύνεται κανονικά το πρόβλημα με Simplex και βρίσκονται οι δυνατές λύσεις (απλά γραμμικός προγραμματισμός χωρίς περιορισμούς ακεραίων) . Εάν προκύψουν μόνο ακέραιες τιμές τότε αυτό είναι το σύνολο των λύσεων που ζητείται. Στην αντίθετη περίπτωση βρίσκει ένα x_i ώστε $k < x_i < k+1$ όπου k ακέραιος, και δύο υποσύνολα λύσεων. Την $k < x_i$ και την $x_i < k+1$ και βρίσκει το κατώτερο όριο αυτών λύνοντας πάλι γραμμικό πρόβλημα (χωρίς ακέραιους περιορισμούς) με τους νέους περιορισμούς. Αντί όμως της διαδικασίας αυτής γίνεται μια ανάλυση ευαισθησίας με την δυαδική μέθοδο Simplex αρχίζοντας από την βασική λύση προτού φτάσουμε στους περιορισμούς. Ένα τελευταίο βήμα ελέγχει εάν έχουμε την βέλτιστη λύση. Αυτή η λύση αποθηκεύεται αν βρεθεί καλή και περιμένει την σύγκριση μετά την επίλυση όλων των

υποσυνόλων που είχαν απομείνει [Schrijver ‘Theory of linear and integer programming’ (1986)].

11.4.3 Μη Γραμμικός Προγραμματισμός

Δεν θα ήταν το καλύτερο να σκεφτόμαστε όλοι το ίδιο ;
είναι η διαφορά των απόψεων
που κινεί τα νήματα του ανταγωνισμού.

Mark Twain, Pudd’nhead Wilson

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο είναι δυνατό να έχουμε πρόβλημα με μη γραμμική συνάρτηση και περιορισμούς. Ακόμα έγινε νύξη στην μετατροπή που γίνεται συνήθως στην πράξη ώστε να προβλήματα διαφόρων μορφών να καταλήγουν σε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού. Επίσης η διαδικασία αυτή γίνεται εκτός από το για να βρεθεί μια λύση αλλά και ο υπολογιστικός χρόνος είναι μια σημαντική παράμετρος.

Εάν όμως θέλουμε να αντιμετωπίσουμε μη γραμμικό πρόβλημα χωρίς τα παραπάνω, τότε θα αντιληφθούμε ότι μια ενιαία διαδικασία *ακόμα δεν υπάρχει* . Το πρόβλημα έχει ως εξής :

Χρειαζόμαστε μια λύση $\chi = (\chi_1, \chi_2, \chi_3, \dots, \chi_n)$
που να $\text{Maximize } f(\chi)$
με περιορισμούς $g_i (\chi) \leq b_i$ για $i = 1, 2, \dots, n$
και $\chi \geq 0$

όπου και $f (\chi)$ και $g_i (\chi)$ είναι συναρτήσεις που δίνονται με n μεταβλητές. Όπως αναφέραμε δεν υπάρχει ενιαία διαδικασία (αλγόριθμος) για την επίλυση όμως εάν κάνουμε μερικές παραδοχές για την απλοποίηση του προβλήματος.

Η διαδικασία που χρησιμοποιείται για να αντιληφθούμε την βέλτιστη λύση σε ένα πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού είναι αυτή των Συνθηκών Kuhn – Tucker. Έστω ότι έχουμε μια συνάρτηση με μια μεταβλητή, τότε για $\chi_1 = \chi_1^*$ η συνάρτηση $f (\chi_1)$ μεγιστοποιείται μόνο αν $df / d\chi_1 = 0$ στο $\chi_1 = \chi_1^*$. Εάν η συνάρτηση περιέχει περισσότερες μεταβλητές τότε το $\chi^* = (\chi_1^*, \chi_2^*, \dots, \chi_n^*)$ μεγιστοποιεί την συνάρτηση $f (\chi)$ μόνο αν $\partial f / \partial \chi_j = 0$ στο $\chi_j = \chi_j^*$ για $j = 1, 2, \dots, n$.

Εάν εισάγουμε και του περιορισμούς για μη αρνητικές μεταβλητές θα έχουμε ότι αν $x_j = 0$ τότε ο περιορισμός $\partial f / \partial x_j = 0$ στο $x_j = x_j^*$ γίνεται αντικατάσταση με $\partial f / \partial x_j \leq 0$ στο $x_j = x_j^*$.

Εάν τώρα πρέπει να εισάγουμε και τους περιορισμούς της $g_i(x)$ θα έχουμε περισσότερες δυσκολίες γιατί αυξάνοντας τις μεταβλητές μπορεί να μην ικανοποιούνται οι λοιποί περιορισμοί. Σε αυτή την δύσκολη περίπτωση εφαρμόζονται οι Συνθήκες Kuhn – Tucker :

Θεώρημα : Έστω ότι έχουμε συναρτήσεις $f(x)$, $g_1(x)$, $g_2(x)$, ..., $g_n(x)$ και είναι όλες ολοκληρώσιμες συναρτήσεις που ικανοποιούν κάποιες συνθήκες κανονικότητας. Τότε

$$x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$$

Μπορεί να είναι μια βέλτιστη λύση σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα μόνο αν υπάρχουν m αριθμοί $u_1, u_2, u_3, \dots, u_m$, ώστε όλοι οι παρακάτω περιορισμοί να ισχύουν :

$$\frac{\partial f}{\partial x_j} - \sum_{i=1}^m u_i \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \leq 0$$

$$x_j^* \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} - \sum_{i=1}^m u_i \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right) = 0$$

$$g_i(x^*) - b_i \leq 0$$

$$u_i (g_i(x^*) - b_i) = 0$$

$$x_j^* \geq 0$$

$$u_i \geq 0$$

όπου και όπως φαίνεται $i = 1, 2, \dots, m$ και $j = 1, 2, \dots, n$

Ωστόσο αν και γενικά οι παραπάνω περιορισμοί είναι αρκετοί για μια βέλτιστη λύση, η λύση αυτή δεν είναι βέβαιη (είναι δηλαδή ικανοί περιορισμοί). Αν όμως θεωρήσουμε ότι υπάρχει κυρτότητα τότε είμαστε εξασφαλισμένοι ότι η λύση που θα προκύψει θα είναι βέλτιστη.

Στην περίπτωση που έχουμε δευτεροβάθμια αντικειμενική συνάρτηση που υπόκειται σε γραμμικούς περιορισμούς το πρόβλημα εντοπίζεται στην αντικειμενική συνάρτηση. Το πρόβλημα που προκύπτει λύνεται (χωρίς εκτενή αναφορά στην διαδικασία, η οποία είναι αρκετά πολύπλοκη) με την βασική παραδοχή ότι αν προσθέσουμε στις συνθήκες Kuhn – Tucker την συνθήκη $x_i^* y_i = 0$ όπου x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) και y_i ($i = n+1, \dots, n+m$) ($j = 1, 2, \dots, m$) είναι μεταβλητές περιθωρίων (slack variable). Αυτό απλά σημαίνει πως δεν είναι δυνατό να είναι και οι δύο x_i και y_i βασικές μεταβλητές. Άρα ($x_1, x_2, \dots, x_n$) είναι βέλτιστο αν και

μόνο αν υπάρχουν τιμές των $x_{n+1}, \dots, x_{n+m}, y_1, \dots, y_{n+m}$ ώστε $(x_1, \dots, x_{n+m}, y_1, \dots, y_{n+m})$ να ικανοποιούν τις παραπάνω συνθήκες (συν την νέα που προσθέσαμε).

Μέχρι τώρα έχει γίνει κατανοητό ότι εάν έχουμε συναρτήσεις κυρτές το πρόβλημα για μας είναι πιο εύκολο στην επίλυση. Σε περίπτωση που δεν έχουμε άλλες δυσκολίες ως προς τις αντικειμενικές συναρτήσεις ένας αλγόριθμος που θα λύνει το πρόβλημα κυρτού προγραμματισμού (Convex Programming) θα βασίζεται στο ‘ρόλο’ της εφαπτομένης. Θα πρέπει από ένα αρχικό σημείο να καταλήξουμε μέσω της κατεύθυνσης που δηλώνει η αναλογία της μικρής αλλαγής του x που μεγιστοποιεί την $f(x)$ και της $\nabla f(x)$. Γεωμετρικά αυτή η αναλογία εκφράζεται σαν κατεύθυνση του διανύσματος της εφαπτομένης. Άρα λοιπόν η συνάρτηση μεγιστοποιείται εάν οι απειροελάχιστες αλλαγές του x γίνονται στην κατεύθυνση της εφαπτομένης $\nabla f(x)$. Αφού απαιτείται μεγιστοποίηση είναι λογικό να κινηθούμε όσο γίνεται στην κατεύθυνση της εφαπτομένης. Αυτό γίνεται έχοντας μια σταθερή κατεύθυνση μέχρι την μηδενική αύξηση της $f(x)$ και μετά υπολογίζεται πάλι η εφαπτομένη ώστε να προκύψει η διεύθυνση και πάλι. Εννοείται όλα αυτά συμβαίνουν σε μια συνάρτηση η οποία και είναι παραγωγίσιμη στο διάστημα που εξετάζουμε, ώστε να υπάρχουν οι μερικές παράγωγοι ως προς $x_1, x_2, \dots, x_n$.

Κλείνοντας το κεφάλαιο του γραμμικού και μη γραμμικού προγραμματισμού θα πρέπει να επισημάνουμε ότι μέθοδοι όπως η μέθοδος Simplex με διάφορες μετατροπές μπορούν να επιλύσουν προβλήματα του τομέα των Μεταφορών με μεγαλύτερη ευκολία. Τέτοιες προσπάθειες για εισαγωγή ‘συμπυκνωμένης γνώσης’ στους αλγορίθμους για να λύσουν ειδικά προβλήματα βλέπουμε να γίνονται συνεχώς και όχι μόνο στον Μαθηματικό Προγραμματισμό αλλά και σε άλλου είδους αλγορίθμους όπως οι εξελίξιμοι αλγόριθμοι από τους οποίους επιλέξαμε τους Γενετικούς Αλγόριθμους για την περιγραφή στο Παράρτημα II. Εξάλλου κάθε πρόβλημα έχει ειδικό τρόπο επίλυσης και αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη (και αυτό τονίζεται εδώ !!) από τους μελετητές που εξετάζουν το πρόβλημα [Nash S. & Sofer A. ‘Linear and Nonlinear Programming’, McGraw Hill, (1996)].

Τέλος, θέλοντας να παρουσιάσουμε, ακροθιγώς, θέματα τα οποία δεν εξετάζονται στους μεθόδους σχεδιασμού των λεωφορειακών γραμμών αλλά καταλαμβάνουν σημαντικές θέσεις στις βιβλιογραφικές αναφορές του Μαθηματικού Προγραμματισμού, θα αναφέρουμε τα παρακάτω :

➤ Ανάλυση Δικτύου

Η ανάλυση δικτύου ήταν σημαντική και έχει πολλές εφαρμογές από τους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς. Ωστόσο έχει παρατηρηθεί μια αυξημένη εφαρμογή των εργαλείων της θεωρίας δικτύου και σε άλλες περιοχές (τομείς). Από τις πιο χρησιμοποιούμενες τεχνικές από την Ανάλυση Δικτύων είναι η Θεωρία Ροής στα Δίκτυα.

Για παράδειγμα αρκεί να αναφέρουμε το πρόβλημα εύρεσης της συντομότερης οδού σε δίκτυο στις μεταφορές. Ένα παρόμοιο πρόβλημα είναι η επιλογή συνδέσεων ώστε να εξασφαλίσουμε μια γραμμή μεταξύ δύο κόμβων που να ελαχιστοποιεί το συνολικό μήκος αυτών των συνδέσεων. Άλλο πρόβλημα βασικό, είναι ο καθορισμός ροών σε ένα δίκτυο με σκοπό την μεγιστοποίηση της ροής σε όλο το δίκτυο. Ακόμα το πρόβλημα της διαχείρισης και προγραμματισμού των εργασιών στις κατασκευαστικές εταιρίες λύνεται με τεχνικές δικτύου, ειδικά PERT (Program Evaluation and Review Technique) και CPM (Critical Path Method).

➤ Δυναμικός Προγραμματισμός

Ο Δυναμικός Προγραμματισμός είναι τεχνική που εντάσσύνολοι στον Μαθηματικό Προγραμματισμό και χρησιμοποιείται συνήθως όταν υπάρχουν βήματα στα οποία προκύπτουν συσχετιζόμενες αποφάσεις. Είναι μια συστηματική διαδικασία για τον καθορισμό του συνδυασμού των αποφάσεων για την συνολική μεγιστοποίηση της λειτουργικότητας ή αποδοτικότητας. Σε αντίθεση με τον Γραμμικό Προγραμματισμό δεν υπάρχει μια γνωστή διαδικασία δεδομένη για την επίλυση αυτών των προβλημάτων. Είναι περισσότερο μια ιδέα προσέγγισης και κάθε φορά οι εξισώσεις που διατυπώνουν το πρόβλημα είναι στενά συνδεδεμένες με το πρόβλημα. Για να αποκτηθεί μια εμπειρία πάνω στην επίλυση θα πρέπει ο μελετητής να βασιστεί σε ήδη επιλυμένες περιπτώσεις και να εφαρμόσει την λογική ως προς την μαθηματική διατύπωση στο δικό του πρόβλημα.

Για παράδειγμα αναφέρουμε το πρόβλημα ενός εμπόρου που πρέπει να ξεκινήσει από μια περιοχή και να τελειώσει το ταξίδι του σε μια άλλη δεδομένη περιοχή, πωλώντας ενδιάμεσα την πραμάτεια του σε διάφορες άλλες γνωστές περιοχές. Το ποια θα είναι η βέλτιστη διαδρομή για τον έμπορα είναι μια διαδικασία απόφασης που εξαρτάται από παράγοντες όπως είναι στην πιο απλή περίπτωση η ασφάλεια του έμπορα στο ταξίδι του. Η λύση αυτού του προβλήματος μπορεί να δοθεί από τον αλγόριθμο συντομότερης διαδρομής. Αυτό όμως που αξίζει να σημειωθεί εδώ είναι ότι ο Δυναμικός Προγραμματισμός ξεκινά με ένα κομμάτι του όλου προβλήματος βρίσκοντας εκεί την βέλτιστη λύση. Μετά προχωρά στην αύξηση του προβλήματος και την επίλυση και πάλι με βάση την προηγούμενη βέλτιστη λύση κ.ο.κ. μέχρι που η επίλυση καλύπτει το πρόβλημα στο σύνολο του.

➤ Θεωρία Παχνιών

Η Θεωρία Παχνιών είναι μια θεωρία μαθηματική που ασχολείται με τα γενικά χαρακτηριστικά ανταγωνιστικών καταστάσεων που έχουν σαν βασικό χαρακτηριστικό το ότι το τελικό αποτέλεσμα (μιας σύρραξης ή ενός διαγωνισμού) εξαρτάται κυρίως από τον συνδυασμό των στρατηγικών σχεδίων που χρησιμοποιούνται από τις εμπλεκόμενες πλευρές.

Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας στην Θεωρία Παχνιών αφοσιώνεται στην περίπτωση που έχουμε δύο άτομα (δύο παίκτες) που παίζουν και κερδίζουν αυτό που ο άλλος χάνει έτσι ώστε το άθροισμα των καθαρών κερδών να είναι μηδέν, δηλαδή παιχνίδια δύο ατόμων μηδενικού αθροίσματος (two-person zero-sum games).

Το πιο απλό παράδειγμα που παρουσιάζεται σε αυτή την κατηγορία είναι το δύο δακτύλων παιχνίδι μεταξύ δύο παιχτών. Έτσι ο καθένας έχει την επιλογή εμφάνισης ενός ή δύο δακτύλων που και αποτελεί την στρατηγική του παίχτη και το αποτέλεσμα καθορίζεται από το ποιος κερδίζει. Εάν ο αριθμός των δακτύλων ταιριάζει τότε έστω ότι ο παίχτης I κερδίζει 1 ευρώ από τον παίχτη II. Εάν δεν ταιριάζουν τα δάκτυλα ο παίχτης II κερδίζει. Το παιχνίδι χαρακτηρίζεται από την :

1. Στρατηγική του παίχτη I
2. Στρατηγική του παίχτη II
3. Το μητρώο απόδοσης (πληρωμές)

		//	
		1	2
/	1	1	-1
	2	-1	1

Το μητρώο απόδοσης (πληρωμής)

Η στρατηγική εδώ καθορίζεται από μια μόνο κίνηση. Από την άλλη στρατηγικές πιο βαθυστόχαστες μπορούν να υπάρχουν όπως περιγράφεται το Πρόβλημα του Φυλακισμένου στο Παράρτημα II. Αυτές οι στρατηγικές λαμβάνουν υπόψη όχι μόνο την απόφαση του παίχτη I αλλά και την συσχέτιση και την επίπτωση στις αποφάσεις του παίχτη II. Οι θεωρίες δεν περιορίζονται μόνο σε δύο παίχτες και σε σταθερό αριθμό αποφάσεων ή ακόμα σταθερή απόδοση (πληρωμή). Εδώ ίσως το κορυφαίο πρόβλημα που υπάρχει να είναι το σκακιστικό πρόβλημα. Με λίγα λόγια το σκακιστικό πρόβλημα περιγράφεται ως μια διαδικασία απόφαση βασισμένη σε περιοριστικούς παράγοντες όπως τακτικής, επιθετικότητας, ασφάλειας βασιλιά, σύνδεσης και διάταξη πιονιών, μέθοδο ψαξίματος (ως προς τις βέλτιστες λύσεις και την ανάλυση ευαισθησίας αυτών) κ.α. και που πρέπει αυτή η απόφαση να παρθεί στο μικρότερο δυνατό χρόνο. Ακόμα αυτή η απόφαση είναι περιττό να πούμε πως λαμβάνει υπόψη τις άλλες ερχόμενες αποφάσεις, του άλλου παίχτη αλλά και αυτού που εξετάζει την τωρινή κίνηση.

Αλγόριθμος Minimax

Ο Minimax Αλγόριθμος είναι αλγόριθμος επαναλαμβανόμενος για την επιλογή της επόμενης κίνησης σε ένα παιχνίδι δύο παιχτών. Μια τιμή καθορίζεται ανάλογα με την κάθε θέση ή κατάσταση του παιχνιδιού. Αυτή η τιμή υπολογίζεται μέσω μιας συνάρτησης υπολογισμού θέσης και εκφράζει το πόσο καλό θα ήταν για έναν παίχτη να βρίσκεται σε μια τέτοια θέση. Ο παίχτης τότε παίζει την κίνηση που μεγιστοποιεί την ελάχιστη τιμή που προκύπτει από την ενδεχομένως καλύτερη κίνηση του αντιπάλου. Ένα είναι η σειρά του A να παίζει, ο A δίνει μια τιμή σε όλες τις δυνατές (επιτρεπτές) του κινήσεις. Εάν η κίνηση του A είναι η τελευταία του παιχνιδιού τότε παίρνει μια άπειρη τιμή (πρακτικά βέβαια μια μεγάλη αντίστοιχα τιμή) και το αντίστροφο εάν είναι η τελευταία κίνηση του B. Η τιμή του A για κάθε άλλη κίνηση είναι το ελάχιστο αποτέλεσμα τιμών από τις πιθανές απαντήσεις του B. Αυτό το σκεπτικό μπορεί να επεκταθεί σε συναρτήσεις υπολογισμού τύπου Heuristics που δίνουν τιμές όχι για όλες τις κινήσεις των παιχτών μέχρι το τέλος του

παιχνιδιού. Έτσι ο αλγόριθμος Minimax μπορεί να περιοριστεί να ψάξει μόνο συγκεκριμένο αριθμό μελλοντικών κινήσεων (ply).

Ακόμα ο αλγόριθμος μπορεί να βελτιωθεί δραστικά εάν προσθέσουμε μέθοδο ‘άλφα-βήτα διακλάδωσης’ (alpha-beta pruning). Ακόμα άλλες μέθοδοι διακλάδωσης Heuristics μπορεί να χρησιμοποιηθούν χωρίς να μεταβάλουν την τιμή της συνάρτησης (αλλά τον χρόνο).

Τέτοια προβλήματα είναι φανερό πως δεν μπορούν να λυθούν από μια γενική διαδικασία-μεθοδολογία αλλά από τις κάθε φορά συνθήκες, θα απορρέουν οι περιοριστικοί παράγοντες οι οποίοι και θα εισαχθούν στον αλγόριθμο που θα επιλεγεί.

Για το πώς θα επιλυθούν προβλήματα απλά μπορούμε να υπενθυμίσουμε τον γραμμικό προγραμματισμό που και εδώ βρίσκει εφαρμογή, αλλά ακόμα και μια μέθοδο που θα περιγράψουμε παρακάτω και ονομάζεται Θεωρία Γραφημάτων.

(Φυσικά προβλήματα σκακιστικά δεν αντιμετωπίζονται από μια μόνο μέθοδο αλλά από πολλές αν και οι εταιρίες που προωθούν τέτοια προγράμματα δεν αρνούνται και δεν παραδέχονται τίποτα π.χ.Fritz 8, Chessmaster 9000, Chess Tiger 15. Το ζητούμενο είναι πολλές φορές όχι να βρεθεί η βέλτιστη λύση αλλά μια περιοχή λύσεων που μετά από 10, 11 κινήσεις [ανάλογα με τον χρόνο σκέψης] δεν θα φέρει το πρόγραμμα σε χειρότερη θέση απ’ ότι βρίσκεται. Προσωπικά πιστεύω πως τα Heuristics [και ειδικότερα μέθοδοι Beam Search] σε συνδυασμό με γενετικούς αλγόριθμους θα ήταν η σωστή λύση ως προς τον χρόνο [δεδομένου ότι τα σημερινά δυνατά προγράμματα υπολογίζουν πάνω από 500000 κινήσεις το δευτερόλεπτο] και την ποιότητα της λύσης. Άλλη μεγάλη κατηγορία ψαξίματος και απόκτησης εμπειρίας είναι μέσω Neural Networks ή Mixed AI/OR/DSS Systems.)

12 ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η συνδυαστική βελτιστοποίηση περιγράφεται ως εξής. Έστω $N = \{1, \dots, n\}$ και έστω πεπερασμένο αριθμό υποσυνόλων $(S_1, S_2, S_3, \dots, S_m)$. Για κάθε υποσύνολο υπάρχει μια τιμή αντικειμενική συνάρτηση $f(S_k)$. Τυπικά, τα δυνατά υποσύνολα παρουσιάζονται σαν μέλη που περιλαμβάνονται ή απωθούνται ώστε να ικανοποιούνται συγκεκριμένοι περιορισμοί. Έτσι λοιπόν μπορεί να είναι ένα είδος ακέραιων

προγραμμάτων των οποίων οι μεταβλητές απόφασης είναι σε δυαδική μορφή, $x(i,k) = 1$ εάν το στοιχείο i είναι στο S_k , και σε αντίθετη περίπτωση $x(i,k) = 0$ [Korte & Bernhard, 'Combinatorial Optimization' (2001)].

(Προβλήματα σχετικά σε αγγλική ορολογία)

- Assignment
- Covering, Cutting Stock
- Knapsack
- Matching
- Packing, Partitioning
- Routing
- Sequencing, Scheduling (jobs), Shortest Path, Spanning Tree
- Traveling Salesman

Κλασσικό παράδειγμα είναι το πρόβλημα ανάθεσης εργασίας στο οποίο υπάρχει κάποιος αριθμός εργαζομένων και δεδομένος αριθμός εργασιών. Το ερώτημα είναι χρησιμοποιώντας τους εργαζομένους να γίνουν όλες οι εργασίες στον μικρότερο χρονικό διάστημα.

Τέτοια προβλήματα που έχουν λύση αλλά και προβλήματα που ως σήμερα δεν έχει αποδεικτική ότι υπάρχει λύση θα εξετάσουμε παρακάτω.

12.1 ΘΕΩΡΙΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Τα γραφήματα είναι βασικές συνδυαστικές μορφές δομής που δίνουν λύση σε πολλά προβλήματα. Ένα από τα πιο συνηθισμένα προβλήματα που λύνουν είναι το πρόβλημα του προσανατολισμού αφού για να βρούμε πολλές φορές την οδό που ψάχνουμε κοιτάμε έναν χάρτη διαδρομών. Άλλη εφαρμογή είναι στην χημική δομή των ουσιών δηλώνοντας αριθμό ατόμων και χημικών δεσμών. Λίγο πιο σύνθετη είναι η εφαρμογή ηλεκτρικών κυκλωμάτων που μπορεί να έχουν αντιστάσεις, πυκνωτές, βολτόμετρα κτλ. Στα γραφήματα θα παρουσιάσουμε μόνο το μέρος που μας ενδιαφέρει και που ασχολείται με τον καθορισμό ελάχιστης απόστασης μεταξύ δύο σημείων (κορυφών) αρχής και τέλους καθώς και βασικές έννοιες.

12.1.1 Ορισμοί Γραφημάτων

Ένας αρχικός ορισμός θα μπορούσε να είναι ότι *γράφημα είναι ένα διάγραμμα που αποτελείται από σημεία, ονομαζόμενα κορυφές, που ενώνονται με γραμμές, ονομαζόμενες ακμές και που προφανώς μια ακμή ενώνει δύο κορυφές. Δεν υπάρχει τίποτα κακό με τον προηγούμενο ορισμό μόνο που δεν έχει αναφερθεί ότι προκειμένου να ορίσουμε ένα γράφημα αρκεί να δοθεί μια λίστα (κατάλογος) από κορυφές και ακμές, ενώ ο τρόπος με τον οποίο το γράφημα σχεδιάζεται δεν έχει σχέση.*

Δύο οι περισσότερες ακμές που συνδέουν το ίδιο ζευγάρι από κορυφές ονομάζονται πολλαπλές ακμές και μια ακμή που συνδέει μια μόνο κορυφή ονομάζεται βρόγχος. Γραφήματα χωρίς πολλαπλές ακμές ή βρόγχους ονομάζονται απλά γραφήματα.

Δύο γραφήματα G και H λέγονται ισομορφικά εάν H μπορεί να προκύψει από G μετονομάζοντας τις κορυφές. Αυτό σημαίνει εάν υπάρχει ένα προς ένα αντιστοιχία μεταξύ των κορυφών του G και του H , ώστε ο αριθμός των ακμών που ενώνουν όποιο ζευγάρι κορυφών στο G να είναι ίδιος με τον αριθμό των ακμών που ενώνουν τα αντίστοιχα ζευγάρια κορυφών στο H .

Έστω v και w είναι κορυφές γραφήματος. Εάν v και w ενώνονται από μια ακμή e τότε v και w λέγονται διπλανές. Ακόμα, v και w λέγονται προσκείμενες στην e και η e είναι προσκείμενη με v και w .

Έστω G είναι γράφημα χωρίς βρόγχους, με n κορυφές ονομαζόμενες $1, 2, \dots, n$. Τότε το Μητρώο Γειτνίασης $M(G)$ είναι το μητρώο $n \times n$ στο οποίο κάθε στοιχείο στην γραμμή i και στήλη j είναι ο αριθμός των ακμών που ενώνουν των κορυφές i και j .

Έστω G είναι γράφημα χωρίς βρόγχους, με n κορυφές ονομαζόμενες $(1), (2), \dots, (n)$ και m ακμές ονομαζόμενες $1, 2, \dots, m$. Το Προσκείμενο Μητρώο $I(G)$ είναι μητρώο $n \times m$ στο οποίο το στοιχείο στην γραμμή i και στήλη j είναι 1 εάν η κορυφή i είναι προσκείμενη στην ακμή j , διαφορετικά 0.

Μια πορεία μήκους k σε ένα γράφημα G είναι η διαδοχική εναλλαγή των k ακμών του G σε μια μορφή $uv, vw, wx, \dots, yx$ και σημειώνουμε ότι μιλάμε για μια πορεία από το u στο x ή από το x στο u αφού δεν υπάρχει συγκεκριμένη διεύθυνση.

Εάν όλες οι ακμές (αλλά όχι απαραίτητως όλες οι κορυφές) μιας πορείας είναι διαφορετικές τότε η πορεία ονομάζεται μονοπάτι. Εάν επιπλέον

όλες οι κορυφές είναι διαφορετικές τότε το μονοπάτι ονομάζεται διαδρομή.

Μια κλειστή πορεία σε ένα γράφημα G είναι η διαδοχική εναλλαγή των ακμών του G στην μορφή $uv, vw, wx, \dots, yx, zu$. Εάν όλες οι ακμές είναι διαφορετικές τότε έχουμε ένα κλειστό μονοπάτι. Εάν επιπλέον όλες οι κορυφές u, v, w, x, y, z είναι διαφορετικές τότε έχουμε μια κλειστή διαδρομή (κύκλος). Για παράδειγμα ένα τρίγωνο είναι κύκλος με μήκος 3.

Ένα γράφημα G είναι συνεκτικό εάν υπάρχει διαδρομή στο G μεταξύ ζευγαριών κορυφών και μη συνεκτικό σε διαφορετική περίπτωση. Κάθε μη συνεκτικό γράφημα μπορεί να χωριστεί σε κάποιο αριθμό συνεκτικών υπογραφημάτων, που λέγονται συστατικά (που το συνθέτουν).

12.1.2 Παραδείγματα Γραφημάτων

Παρακάτω θα περιγράψουμε διάφορα γραφήματα (χωρίς να κάνουμε σχήματα) τα οποία και θεωρούνται σημαντικά.

1. Ολοκληρωμένο γράφημα είναι το γράφημα που κάθε δύο ξεχωριστές κορυφές είναι ενωμένες με μια μόνο ακμή. Το ολοκληρωμένο γράφημα με n κορυφές συμβολίζεται με K_n . Επισημαίνεται εδώ εκτός από το K_4 μπορούμε να σχεδιάσουμε όλες τις κορυφές K_n στην μορφή κανονικού πολύγωνου.
2. Μηδενικό γράφημα είναι το γράφημα που δεν περιέχει ακμές παρά μόνο κορυφές. Το μηδενικό γράφημα n κορυφών συμβολίζεται με N_n .
3. Κυκλικό γράφημα είναι το γράφημα που αποτελείται από ένα και μόνο κύκλο (κυκλική διαδρομή δηλαδή). Το κυκλικό γράφημα n κορυφών συμβολίζεται με C_n .
4. Γράφημα διαδρομής είναι το γράφημα που αποτελείται από μια μόνο διαδρομή. Το γράφημα διαδρομής με n κορυφές συμβολίζεται με P_n . αξίζει να σημειωθεί ότι το γράφημα διαδρομής μπορεί να προκύψει από το κυκλικό γράφημα εάν αφαιρέσουμε μια οποιαδήποτε ακμή.

Διμερές γράφημα είναι το γράφημα που αποτελείται από κορυφές δύο ειδών. Έτσι συνήθως ένα διμερές γράφημα περιέχει λευκές και μαύρες κορυφές.

Ολοκληρωμένο διμερές γράφημα είναι το διμερές γράφημα εκείνο που κάθε μαύρη κορυφή ενώνεται με μια λευκή κορυφή με μια μόνο ακμή. Το ολοκληρωμένο διμερές γράφημα με r μαύρες κορυφές και s λευκές κορυφές συμβολίζεται με $K_{r,s}$.

Κυβικό γράφημα είναι ένα διμερές γράφημα που έχει σημαντικές εφαρμογές στην θεωρία κωδικοποίησης και μπορεί να κατασκευαστεί παίρνοντας σαν κορυφές όλες τις δυαδικές λέξεις ενός δεδομένου μήκους και ενώνοντας δύο από αυτές τις κορυφές εάν η αντίστοιχη δυαδική λέξη διαφέρει σε ένα μόνο μέρος. Το γράφημα που προέρχεται με αυτό τον τρόπο από δυαδικές λέξεις μήκους k ονομάζονται k -cube (k -dimensional cube) και συμβολίζονται με Q_k .

Πλατωνικό γράφημα είναι τα πέντε αντίστοιχα γραφήματα που προκύπτουν από τα 5 κανονικά στερεά που ονομάζονται και Πλατωνικά Στερεά. Αυτά είναι το τετράεδρο, ο κύβος, το οκτάεδρο, το δωδεκάεδρο και το εικοσάεδρο.

Το γράφημα Petersen είναι ένα διάσημο γράφημα το οποίο και μπορεί να σχεδιαστεί με διάφορους τρόπους. Το γράφημα ονομάστηκε έτσι από τον Julius Petersen (1839-1910) που ήταν Δανός μαθηματικός και εξέτασε τα σχήματα αυτά διεξοδικά το 1898.

Δέντρα είναι τα γραφήματα που δεν περιέχουν κύκλους. Εάν G ένα συνεκτικό γράφημα τότε ένα ζευγνύον δέντρο στο G είναι υπογράφημα του G που περιλαμβάνει κάθε κορυφή στο G και είναι επίσης δέντρο. Για παράδειγμα ο αριθμός των ζευγνύων δέντρων του γραφήματος Petersen είναι περίπου 2000 [Wilson & Robin , ‘Introduction to graph theory’ (1972)] .

12.1.3 Αλγόριθμος Συντομότερης Διαδρομής

Ξέροντας τώρα πως συμβολίζονται διαδρομές και σημεία θα παρουσιάσουμε έναν αλγόριθμο που δίνει την συντομότερη διαδρομή από μια κορυφή αρχής S σε μια κορυφή T τέλους. Για να γίνει αυτό προχωράμε από τα αριστερά στα δεξιά υπολογίζοντας την μικρότερη απόσταση από το S σε όλες τις ενδιάμεσες κορυφές τις οποίες καταλήγουμε. Σε κάθε φάση του αλγόριθμου, κοιτάμε όλες τις κορυφές που φτάνουμε μέσω μια σύνδεσης (καμπύλης) από την κορυφή που βρισκόμαστε και ονομάζουμε την κάθε κορυφή με έναν αριθμό ή λέξη

που εκφράζει την συντομότερη διαδρομή από την αρχική κορυφή S σε αυτήν την κορυφή, διανύοντας όλες τις ως τότε γνωστές κορυφές. Τελικά κάθε κορυφή παίρνει μια τελική ονομασία (που λέγεται *δυνατή* και συμβολίζεται από έναν κύκλο με την ονομασία) που εκφράζει και την συντομότερη απόσταση από το S σε αυτήν την κορυφή. Όταν η κορυφή T έχει ονομαστεί δυνατή τότε έχουμε και την μικρότερη απόσταση από το S στο T .

Μια λιγότερο περιγραφική μέθοδος του αλγόριθμου είναι :

- Βήμα 1. Ανάθεση στην κορυφή S το δυνατό 0;
Ονομάζουμε κάθε κορυφή V που φτάνουμε απευθείας από το S με την απόσταση από το S στο V;
Επιλογή του μικρότερου μήκους και ονομασία αυτού ως δυνατό ως προς τις αντίστοιχες κορυφές.
- Γενικό Βήμα Θεώρηση των κορυφών στις οποίες ανατέθηκε δυνατό μήκος ; για κάθε κορυφή V κοιτάμε κάθε κορυφή W που μπορεί να φτάσουμε απευθείας από τη V και ανάθεση στη W ονομασίας :
(δυνατό της V) + (απόσταση από τη V στην W)
εκτός και αν η W διαθέτει ήδη μικρότερη ονομασία;
Όταν όλες οι κορυφές W έχουν ονομαστεί, επιλέγουμε την μικρότερη ονομασία στο δίκτυο που δεν είναι δυνατή ήδη και την κάνουμε δυνατή για κάθε κορυφή που έχει βρεθεί στην διαδρομή;
Επαναλαμβάνουμε το Γενικό Βήμα με όποιες νέες δυνατές ονομασίες.
- Τερματισμός όταν κάθε κορυφή T έχει ανατεθεί μια δυνατή ονομασία;
Αυτή είναι η μικρότερη απόσταση από το S στο T.
- Συντομότερη Διαδρομή (ές) Εργαζόμαστε ανάποδα από το T και συμπεριλαμβάνουμε ένα τόξο VW όποτε :

$$(\text{δυνατό της } W) - (\text{δυνατό της } V) = (\text{απόσταση από } V \text{ στην } W)$$

12.1.4 Μέθοδος που Χρησιμοποιεί Πίνακες

Κατά την εφαρμογή του παραπάνω αλγόριθμου, μπορεί να χαθούν εύκολα ονομασίες διάφορων κορυφών. Η πινακοειδής μέθοδος έρχεται να καλύψει αυτή την αδυναμία γράφοντας τους παραπάνω υπολογισμούς σε μια μορφή Πίνακα.

Έτσι ονομάζουμε κάθε στήλη με την ονομασία μια κορυφής του δικτύου και αντίστοιχα κάθε γραμμή με την ονομασία της κορυφής που μόλις θεωρήθηκε δυνατή. Για να ολοκληρωθεί κάθε στήλη, θεωρούμε τις κορυφές που έχουν απευθείας σύνδεση με τις γνωστές κορυφές που είναι δυνατές και αναθέτουμε την ονομασία όπως και πριν, χαμηλώνοντας άλλες ονομασίες κορυφών που δεν έχουν ακόμα γίνει δυνατές. Μετά συνεχίζουμε με την επόμενη στήλη, με αποτέλεσμα να βρίσκουμε την ελάχιστη απόσταση όπως και πριν.

12.1.5 Ο Αλγόριθμος του Dijkstra

Ο πασίγνωστος αλγόριθμος του Dijkstra λύνει το πρόβλημα συντομότερης διαδρομής ενός γραφήματος $G(V,E)$ που είναι προσανατολισμένο και συνδεδεμένο και δεν έχει αρνητικές αποστάσεις ακμών. Ο αλγόριθμος πείρε το όνομα ενός Ολλανδού εφευρέτη και επιστήμονα υπολογιστών του Edsger Dijkstra [1959].

Το σύνολο V είναι όλες οι κορυφές στο γράφημα G , ενώ το σύνολο E είναι όλες οι ακμές του γραφήματος G .

Έστω ότι η συνάρτηση $w : V \times V \rightarrow [0, \infty)$ που περιγράφει το κόστος $w(x,y)$ της μεταφοράς από την κορυφή x στην κορυφή y (μη αρνητικό κόστος). (Μπορούμε δηλαδή να ορίσουμε ότι για ζευγάρια κορυφών που δεν ενώνονται με μια ακμή το κόστος είναι άπειρο.) Το κόστος μια διαδρομής μεταξύ δύο κορυφών είναι το άθροισμα των κοστών των ακμών σε αυτή την διαδρομή. Το κόστος σε μια ακμή μπορεί να βρεθεί σαν (στην γενικότερη μορφή) η απόσταση μεταξύ δύο κορυφών. Για ένα δεδομένο ζευγάρι κορυφών s, t στο V ο αλγόριθμος βρίσκει την διαδρομή από το s στο t με το ελάχιστο κόστος.

Ο αλγόριθμος εργάζεται ως εξής. Κατασκευάζει ένα υπογράφημα S τέτοιο ώστε η απόσταση κάθε κορυφής v^* (στο S) από το s να είναι το ελάχιστο στο G . Αρχικά το S είναι απλά μόνο το s και η απόσταση του s από τον εαυτό του είναι μηδέν. Ακμές προστίθενται στο S σε κάθε φάση :

- i) Αναγνωρίζοντας όλες τις ακμές $e_i = (v_{i1}, v_{i2})$ στο $G-S$ έτσι ώστε v_{i1} να ανήκει στο S και v_{i2} να ανήκει στο G .
- ii) Επιλέγοντας την ακμή $e_j = (v_{j1}, v_{j2})$ στο $G-S$ έτσι ώστε να δίνει την ελάχιστη απόσταση των κορυφών v_{j2} , που ανήκουν στο G , από το s από το e_i .

Ο αλγόριθμος τερματίζεται είτε όταν το S γίνει ζευγνύον δέντρο του G είτε όταν όλες οι κορυφές που μας ενδιαφέρουν βρίσκονται στο S .

Η διαδικασία της πρόσθεσης μιας ακμής e_j στο S έχει την ιδιότητα ότι όλες οι αποστάσεις των κορυφών από το s στο S είναι η ελάχιστες.

Εάν ένα γράφημα έχει m ακμές και n κορυφές τότε ο χρόνος που χρειάζεται ο αλγόριθμος, δεδομένου ότι ο υπολογισμός της διαφοράς των αποστάσεων είναι σταθερός χρόνος, είναι $(m + n \log n)$.

Εάν ενδιαφερόμαστε μόνο για την συντομότερη διαδρομή μεταξύ αρχής και τέλους τότε το πρόβλημα απλοποιείται και λύνεται πάλι από τον αλγόριθμο του Dijkstra. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές αυτού του προβλήματος στον τομέα του internet routing.

Ένα πρόβλημα το οποίο και συσχετίζεται με το πρόβλημα που επιλύθηκε προηγουμένως είναι το πρόβλημα του πλανόδιου έμπορα, το οποίο και ονομάζεται NP -hard διότι δεν μπορεί να επιλυθεί από τον αλγόριθμο του Dijkstra ή από άλλο γνωστό πολυωνυμικού-χρόνου αλγόριθμο.

Αντίστοιχα με τον αλγόριθμο συντομότερης διαδρομής υπάρχει και ο αλγόριθμος μεγαλύτερης διαδρομής για αυτούς που ενδιαφέρονται για αυτού του είδους προβλήματα. Παρόλο που ίσως να μην φαίνεται ο αλγόριθμος μακράς διαδρομής βρίσκει εφαρμογές σε διαχείριση και προγραμματισμό εργασιών στις κατασκευές έργων. Μια κατασκευή ενός έργου αποτελείται από μικρότερες εργασίες που μπορούν να γίνουν ταυτόχρονα, όπου και κάποιες μπορούν να ολοκληρωθούν πριν από την έναρξη άλλων εργασιών. Θα ήταν λοιπόν χρήσιμο εάν μπορούσαμε να καθορίσουμε εκ των προτέρων ποιες εργασίες πρέπει να εκτελεστούν σε ποιο χρόνο έτσι ώστε η κατασκευή να έχει ολοκληρωθεί στον ελάχιστο χρόνο (Κλασσική Εφαρμογή σε Έργα Πολιτικού Μηχανικού).

12.2 ΘΕΩΡΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑΣ

Η Θεωρία Πολυπλοκότητας (Complexity Theory) είναι μέρος της Υπολογιστικής Θεωρίας (Computation Theory) .Η τελευταία ασχολείται με τους ‘πόρους’ που απαιτούνται κατά τον υπολογισμό για την εύρεση της λύσης ενός προβλήματος. Οι πιο συνηθισμένες έννοιες πόρων είναι ο χρόνος (πόσα βήματα χρειάζονται για να λυθεί το πρόβλημα) και ο χώρος (πόση μνήμη χρειάζεται για να λυθεί το πρόβλημα). Άλλοι πόροι

θα μπορούσαν να είναι πόσοι άλλοι επεξεργαστές χρειάζονται για την παράλληλη εργασία και την επίλυση. Η θεωρία πολυπλοκότητας διαφέρει από την υπολογιστική θεωρία, αφού ασχολείται με το εάν υπάρχει δυνατή λύση προβλήματος ή όχι, ανεξάρτητα από τους πόρους που χρειάζονται.

Κάθε πρόβλημα είναι ένα σύνολο από ερωτήσεις, που κάθε ερώτηση είναι μια πεπερασμένη μήκους αλληλουχία. Για παράδειγμα το πρόβλημα παραγοντοποίησης (Factorize) είναι, δεδομένου ενός ακεραίου που δίνεται σε δυαδική μορφή, να δοθούν όλοι οι πρώτοι παράγοντες αυτού του αριθμού.

Ο υπολογιστικός χρόνος ενός προβλήματος είναι ο αριθμός των βημάτων που χρειάζονται για να επιλυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, σαν συνάρτηση του μεγέθους των δεδομένων που εισάγονται, (που συνήθως μετρείται σε bits) χρησιμοποιώντας τον πιο αποδοτικό αλγόριθμο [Sipser M. 'Introduction to Theory of Computation' (1997)].

12.2.1 Προβλήματα Απόφασης

Τα προβλήματα απόφασης είναι συνηθισμένο στοιχείο στην θεωρία πολυπλοκότητας. Ένα πρόβλημα απόφασης είναι ένα πρόβλημα με απάντηση τύπου ΝΑΙ/ΟΧΙ. Ένα πρόβλημα απόφασης είναι ισοδύναμο με μια γλώσσα, η οποία είναι αλληλουχίες πεπερασμένου μήκους. Για ένα πρόβλημα απόφασης, η ισοδύναμη γλώσσα είναι το σύνολο άλλων των αλληλουχιών για τις οποίες η απάντηση είναι ΝΑΙ.

Η θεωρία πολυπλοκότητας συχνά κάνει την διαφοροποίηση μεταξύ ΝΑΙ απαντήσεων και ΟΧΙ απαντήσεων. Για παράδειγμα το σύνολο N_p ορίζεται ως το σύνολο των προβλημάτων που η απάντηση ΝΑΙ μπορεί να ελεγχθεί εύκολα. Το σύνολο $co-N_p$ είναι το σύνολο των προβλημάτων που οι ΟΧΙ περιπτώσεις μπορούν να ελεγχθούν γρήγορα (όπου $co = complement =$ συμπλήρωμα).

12.2.2 Το ερώτημα $P = N_p$

Το σύνολο P των προβλημάτων απόφασης είναι τα προβλήματα που επιλύονται από ντετερμινιστικές μηχανές σε πολυωνυμικό χρόνο (σχετικά με τον ορισμό αυτό βλέπε και παρακάτω). Το σύνολο N_p είναι

τα προβλήματα απόφασης που επιλύονται από μη ντετερμινιστικές μηχανές σε πολυωνυμικό χρόνο. Το ερώτημα του εάν το σύνολο P είναι ίδιο με το σύνολο Np είναι το πιο σημαντικό ανοιχτό ερώτημα στην θεωρητική επιστήμη των υπολογιστών. Υπάρχει ακόμα βραβείο \$ 1,000,000 από το Clay Mathematics Institute (<http://www.claymath.org/sizeproblems/index.htm>) για όποιον καταφέρει να δώσει απάντηση στο παραπάνω ερώτημα. Αν και υπάρχει μεγάλη συζήτηση και διάφορες θεωρίες και αξιώματα που οι διάφοροι θεωρητικοί βασίζουν τις απόψεις τους, αρκεί εδώ να πούμε ότι οι περισσότεροι λένε ΟΧΙ στο παραπάνω ερώτημα, αλλά όπως τονίστηκε αυτό είναι προς το παρόν απλώς ένα πιστεύω αφού κανείς δεν μπορεί να το αποδείξει.

Στην θεωρία αυτή τα προβλήματα τα οποία ορίζονται ως Np-Hard (Non deterministic Polynomial-time hard) είναι είδος προβλημάτων απόφασης που περιλαμβάνουν όλα τα προβλήματα H έτσι ώστε για όλα τα προβλήματα απόφασης L να υπάρχει υποβάθμιση αυτών στο H. Ανεπίσημα αυτή η κατηγορία μπορεί να περιλαμβάνει προβλήματα απόφασης που είναι λιγότερα δύσκολα από τα προβλήματα NP. Αυτό βασίζεται στην σκέψη ότι εάν μπορούμε να βρούμε έναν αλγόριθμο A που μπορεί να λύσει ένα από τα προβλήματα H σε πολυωνυμικό χρόνο, τότε μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα αλγόριθμο πολυωνυμικού χρόνου για κάθε Np πρόβλημα, πρώτα κάνοντας την υποβάθμιση σε πρόβλημα H και μετά εφαρμογή του αλγόριθμου A.

(Για παράδειγμα εάν ένας αλγόριθμος γραφήματος λέμε ότι έχει $O(m)$ πράξεις [λειτουργίες] τότε ο αριθμός των πράξεων που θα χρειαστεί ο υπολογιστής να κάνει σύμφωνα με τον αλγόριθμο θα είναι το πολύ Cm , όπου C είναι μια σταθερά [που αλλάζει από αλγόριθμο σε αλγόριθμο] και m είναι ο αριθμός των ακμών. Ακόμα ο αλγόριθμος που υπακούει σε αυτήν την αρχή ονομάζεται αποδοτικός αλγόριθμος ή Πολυωνυμικός Αλγόριθμος.)

Η έννοια των προβλημάτων Np-hard παίζει σημαντικό ρόλο στην συζήτηση για την σχέση μεταξύ κατηγοριών πολυπλοκότητας P και Np. Ακόμα χρησιμοποιείται συνήθως για να ορίσει την κατηγορία πολυπλοκότητας Np-complete που είναι η τομή των χώρων Np και Np-hard. Άρα τα προβλήματα Np-hard μπορούν να θεωρηθούν σαν κατηγορία προβλημάτων Np-complete ή και δυσκολότερα.

(Μιας και αναφερθήκαμε σε Np-complete προβλήματα ένας ‘ταπεινός’ ορισμός θα μπορούσε να είναι ότι αποτελούν μια μεγάλη γάμα προβλημάτων που κανένας πολυωνυμικός αλγόριθμος δεν έχει εφευρεθεί και δεν έχει αποδειχτεί αν υπάρχει ένας τέτοιος αλγόριθμος. Έχουν την ιδιότητα ότι αν ποτέ βρεθεί κάποιος πολυωνυμικός αλγόριθμος που να

λύνει ένα από τα προβλήματα τότε αυτό θα σημαίνει πως για όλα τα προβλήματα θα υπάρχουν αντίστοιχοι αλγόριθμοι.)

Ένα παράδειγμα Np-hard προβλήματος είναι το πρόβλημα απόφασης Subset-Sum, Που έχει ως εξής. Δίνεται ένα σύνολο από ακεραίους και το ερώτημα είναι εάν υπάρχει ένα μικρότερο σύνολο που να περιλαμβάνεται στο αρχικό και το άθροισμα των ακεραίων του να είναι μηδέν. Αυτή είναι μια ερώτηση τύπου ΝΑΙ/ΟΧΙ και συμβαίνει να είναι Np-complete.

12.3 ΕΥΡΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

Οι ευρετικοί αλγόριθμοι (Heuristics Algorithms) είναι οι περίφημοι αλγόριθμοι που λύνουν διάφορα μεγάλης κλίμακας προβλήματα και που στηρίζονται σε μεθόδους ψαξίματος, οι οποίες ταιριάζουν κάθε φορά στο συγκεκριμένο πρόβλημα που τίθεται. Στον Μαθηματικό Προγραμματισμό συνήθως, Heuristic σημαίνει μια διαδικασία που ψάχνει για μια λύση που όμως τίποτα δεν μας διαβεβαιώνει ότι θα την βρει. Στην πραγματικότητα η λέξη δανείστηκε από το ελληνικό ‘εύρικα’. Στην Τεχνική Νοημοσύνη (TN) ο ευρετικός αλγόριθμος (με κάποια βεβαιότητα) χρησιμοποιεί μια ευρετική συνάρτηση (Heuristic Function) για να υπολογίσει το ‘κοστος’ μετακίνησης από το ένα άκρο σε άλλο κλάδο του δέντρου ψαξίματος.

Ευρετική Συνάρτηση είναι οδηγός στο ψάξιμο, όπως θα γινόταν από τον άνθρωπο. Επίσης , στην TN, μια ευρετική συνάρτηση ορίζεται ώστε να εξυπηρετείται η διαδικασία δημιουργίας δέντρου ψαξίματος (search tree) και χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των κόμβων για επέκταση που και συχνά ονομάζεται στρατηγική καλύτερου – πρώτου προσανατολισμένου ψαξίματος δέντρου (best – first directed tree search strategy).

Η μέθοδος ψαξίματος μέσω ευρετικών διαδικασιών (Heuristic Search) στον Μαθηματικό Προγραμματισμό είναι σκόπιμη για την εύρεση λύσης συνολικού βέλτιστου, όπως χρειάζεται σε προβλήματα που προκύπτουν στην συνδυαστική βελτιστοποίηση. Σε αντίθεση με το ‘τυφλό ψάξιμο’ (blind search), στην TN, είναι πληροφορημένη διαδικασία εύρεσης (informed search) λόγω της ευρετικής συνάρτησης.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που παρουσιάζουν έναντι των άλλων μεθόδων βελτιστοποίησης αναφέρεται ότι είναι (συχνά) πιο εύκολοι στην σύλληψη και πιο φτηνοί ως προς τον υπολογιστικό χρόνο.

12.3.1 Γενικές Προσεγγίσεις

Λέγοντας γενικές προσεγγίσεις εννοούμε την γενική μεθοδολογία, δομή, προσέγγιση από την οποία σκοπιά θα δομηθεί ένας αλγόριθμος. Πρέπει να τονίσουμε εδώ πως υπάρχουν και γενικές προσεγγίσεις πάνω σε συγκεκριμένο πρόβλημα και δεν αναφέρονται παρακάτω. Τα πιο σημαντικά πάντως είναι [Ignizio & Cavalier 'Linear Programming' (1994)].

- Greedy
- Interchange
- Bound Based Heuristics (για παράδειγμα Lagrangean Heuristics)
- Tabu Search
- Simulated Annealing
- Population Heuristics (για παράδειγμα Γενετικοί Αλγόριθμοι)
- Beam Search

Αλγόριθμος Greedy εφαρμόζεται σε προβλήματα βελτιστοποίησης για την απόφαση να συμπεριληφθούν κάποια στοιχεία από ένα σύνολο. Ο αλγόριθμος αυτός ξεκινά χωρίς κανένα στοιχείο και μετά επιλέγει ένα στοιχείο από το δυνατό σύνολο από στοιχεία μέσω Μυωπικής Βελτιστοποίησης (Myopic Optimization).

Σχετικά με Beam Search που είναι και πολύ διαδεδομένη μέθοδος Τεχνητής Νοημοσύνης η διαδικασία αναζήτησης αναπτύσσονται σε δέντρα απόφασης. Οι διαδικασίες αυτές εμπεριέχουν προσεκτικά κατασκευασμένα μίγματα στρατηγικής επίτασης και διαφοροποίησης. Βασικά στις διαδικασίες αυτές χρησιμοποιούνται μεθόδους κλάδου και φραγής που όμως αντί να πετάγονται κλαδιά δέντρων που αξιολογήθηκαν ως άχρηστα μπορούμε να πετάξουμε ένα μέρος αυτών που πιθανότατα να είναι άχρηστα. Σε αυτό το γεγονός στηρίζονται και τα διάφορα 'αξεπέραστα' σκακιστικά προγράμματα που αναφέραμε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Αντί όμως να επεκταθούμε περισσότερο σε διάφορες μεθόδους θα χρησιμοποιήσουμε ένα παράδειγμα Ακέραιου Προγραμματισμού που μπορεί να επιλυθεί από ευρετικούς αλγόριθμους. Όπως είπαμε εδώ θα προσπαθήσουμε να έχουμε μια λύση αν όχι βέλτιστη κοντά στην βέλτιστη.

12.3.2 Παράδειγμα

Έστω ότι έχουμε 3 εργαζόμενους Α,Β,Γ και 3 εργασίες 1,2,3. Για την ανάθεση του κάθε εργαζόμενου σε κάποια εργασία υπάρχει ένα κόστος το οποίο και δίνεται από ένα μητρώο κόστους.

Μόνο ένας εργαζόμενος μπορεί να πάρει μια εργασία και όλοι οι εργαζόμενοι πρέπει να απασχοληθούν. Ποιος πρέπει να είναι ο Ευρετικός Αλγόριθμος για το συγκεκριμένο αυτό πρόβλημα ; Το πρόβλημα βέβαια είναι ευρέως γνωστό ως Πρόβλημα Ανάθεσης (Assignment Problem)

Ε Ρ Γ Α Ζ Ο Μ Ε Ν Ο Ι	ΕΡΓΑΣΙΕΣ			
	1	2	3	
	Α	1	3	4
	Β	3	7	4
	Γ	3	4	2

Σε αυτό το σημείο τονίζεται ότι ο αλγόριθμος πρέπει να είναι σε θέση να εφαρμοστεί ακόμα και σε περίπτωση που το μητρώο κόστους αλλάζει, αφού ο αλγόριθμος είναι γενικός.

Μια απλή προσέγγιση στο πρόβλημα ανάθεσης θα μπορούσε να είναι η επιλογή κάποιου εργαζόμενου και η επιλογή κάποιας εργασίας τυχαία. Αφού γίνει η ανάθεση, η εργασία και ο εργαζόμενος διαγράφονται και επανάληψη της διαδικασίας γίνεται στο επιμέρους μικρότερο πρόβλημα που απέμεινε . Αυτή η διαδικασία όμως δεν χρησιμοποιεί καθόλου το μητρώο κόστους και άρα δεν θα δίνει καλά αποτελέσματα. Ωστόσο είναι σωστή η διαδικασία της επανάληψης που είναι συνήθης λογική στους αλγόριθμους. Για να γίνει ο αλγόριθμος μας πιο αποτελεσματικός θεωρούμε το μικρότερο στοιχείο κόστους στο μητρώο το οποίο και συνδέει εργαζόμενο και εργασία. Αφού αφαιρέσουμε αυτό το ζευγάρι λύνεται και πάλι με την ίδια λογική το μικρότερο πρόβλημα που προκύπτει. Το αποτέλεσμα του αλγόριθμου θα ήταν :

Κόστος 1. Ανάθεση Α στην εργασία 1

Κόστος 2. Ανάθεση Γ στην εργασία 3

Κόστος 7. Ανάθεση Β στην εργασία 2

Συνολικό Κόστος 10.

Εδώ είναι ολοφάνερο και το πρόβλημα που προκύπτει πολλές φορές στους ευρετικούς αλγόριθμους. Η τρίτη ανάθεση του εργαζόμενου Β στην ‘αναγκαστική’ εργασία 2 δίνει πολύ μεγάλο κόστος. Έτσι λοιπόν και δημιουργήθηκε η ιδέα της ανταλλαγής (interchange). Η ανταλλαγή θα ήταν για παράδειγμα ο εργαζόμενος Β στην εργασία 3 και ο εργαζόμενος Γ στην εργασία 1. Αν και εδώ δεν αποδίδει αυτή η ιδέα σε πολλές περιπτώσεις εξυπηρετεί και εφαρμόζεται.

Ακόμα ένα αξιοσημείωτο στοιχείο για το παραπάνω παράδειγμα είναι ότι δεν δώσαμε κάποιο μαθηματικό προσδιορισμό η μαθηματική διατύπωση.

Πάντως οι ευρετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις επίλυσης προβλημάτων Ακέραιου Προγραμματισμού αλλά όχι σε μεγάλη έκταση για προβλήματα Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού.

12.4 ΠΟΛΥ-ΣΤΟΧΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Υπάρχουν δύο γενικές θεωρήσεις που εισήγαγαν τον πολύ-στοχικό προγραμματισμό (Multiple-objective Programming). Η μια άποψη λέει ότι η βελτιστοποίηση ενός μόνο αντικειμενικού σκοπού υπεραπλουστεύει την σχετική αντικειμενική συνάρτηση σε καταστάσεις και εφαρμογές του Μαθηματικού Προγραμματισμού. Η άλλη άποψη σύμφωνα με τον Simon είναι ότι η βελτιστοποίηση μιας μόνο παραμέτρου δεν είναι ούτε κατάλληλη ούτε συγκεντρωτική του προβλήματος που αντιμετωπίζουμε στην πραγματικότητα. Από την άλλη ο πολύ-στοχικός προγραμματισμός επίσημα επιτρέπει μαθηματικές διατυπώσεις που :

1. Οι λύσεις που προκύπτουν είναι όσο γίνεται πιο συνεπείς με τα επίπεδα στόχων του αντικειμενικού σκοπού.
2. Οι λύσεις αναγνωρίζονται ότι εκφράζουν την μέγιστη χρησιμότητα ανάμεσα σε πολλαπλούς στόχους.
3. Ένα σύνολο από λύσεις δημιουργείται, το οποίο και περιέχει όλες τις μη κυρίαρχες (nondominated) λύσεις.

Οι πολλαπλοί στόχοι θα μπορούσαν να είναι ο ελεύθερος χρόνος, το ελάχιστο οριακό εισόδημα, η αποφυγή ρίσκων, η πρόθεση για νοικιαζόμενη εργασία και ικανοποίηση των επιθυμητών αλλά όχι αναγκαστικών περιορισμών. Ακόμα η διαδικασία του ιθύνοντα (decision maker) που επιλέγει ανάμεσα σε λύσεις είναι χαρακτηριστική περίπτωση πολιστοχικού προγραμματισμού.

Ένας στόχος είναι ένα κριτήριο που απασχολεί κάποιον όταν κάνει μια επιλογή μεταξύ μεταβλητών απόφασης (κάτι το οποίο μεγιστοποιείται, ελαχιστοποιείται ή ικανοποιείται). Σκοπός σημαίνει ότι στοχεύουμε σε μια τιμή που είναι για μας σκοπός του συγκεκριμένου στόχου.

Θα χρησιμοποιήσουμε τον όρο πολύ-στοχικός προγραμματισμός για να αναφερθούμε σε μαθηματικά προβλήματα που υπάρχουν πολλαπλοί στόχοι χωρίς απαραίτητως να σκοπεύουμε σε κάποια τιμή στόχου.

Γενικά οι στόχοι συγκρούονται και οπότε δεν μπορούν όλοι οι στόχοι να βελτιστοποιούνται στον ίδιο βαθμό. Χρησιμοποιείται μια συνάρτηση σκοπιμότητας (utility function) για να επιλέξει τις κατάλληλες λύσεις. Αρκετές διαφορετικού τύπου συναρτήσεις σκοπιμότητας έχουν εφαρμοστεί σε προβλήματα πολύ-στοχικού προγραμματισμού. Αυτές μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις κατηγορίες [Ignizio & Cavalier 'Linear Programming' (1994)]:

- Λεξικογραφική συνάρτηση σκοπιμότητας (lexicographic utility function)
- Συνάρτηση σκοπιμότητας πολλών αποδόσεων (multi- attribute utility function)
- Άγνωστη συνάρτηση σκοπιμότητας (unknown utility function)

Η λεξικογραφική συνάρτηση σκοπιμότητας υποθέτει ότι ο ιθύνοντας έχει ένα αυστηρά προκαθορισμένο προτιμητέο σύστημα μεταξύ των στόχων με σταθερά επίπεδα στόχων. Για παράδειγμα ένα λεξικογραφικό σύστημα θα μπορούσε να έχει ένα πρωταρχικό σκοπό, ένα εισόδημα όχι λιγότερο από \$10.000 και σαν δεύτερο στόχο ο ελεύθερος χρόνος να μην είναι λιγότερος από 20 ώρες την βδομάδα. Ένας τρίτος στόχος θα μπορούσε να είναι το εισόδημα του να μην είναι μικρότερο από \$12.000. Αυτή η διατύπωση των στόχων είναι συνηθισμένη στα μοντέλα προγραμματισμού στόχων (goal programming models). Ο κάθε σκοπός τίθεται με συγκεκριμένη σειρά προτεραιότητας και με αυτή την σειρά αρχίζει η ικανοποίηση της όλης συνάρτησης. Δηλαδή αρχίζει με τον στόχο πρώτης προτεραιότητας και αφού ικανοποιήσει ή όχι το επίπεδο στόχου (target level) η τιμή παραμένει σταθερή και η διαδικασία συνεχίζεται με τον δεύτερο στόχο κ.ο.κ . Η θεώρηση στόχων μικρότερης προτεραιότητας δεν αλλάζει τις τιμές ικανοποίησης των μεγαλύτερης προτεραιότητας στόχων.

Η συνάρτηση σκοπιμότητας πολλών αποδόσεων δεν έχει την έννοια της προτεραιότητας αλλά επιτρέπει την αυξομείωση των τιμών των στόχων με σκοπό την επίτευξη της βέλτιστης σκοπιμότητας. Η πιο συνηθισμένη μορφή είναι η μεγιστοποίηση του αθροίσματος στόχων γραμμικών συντελεστών (sum of linearly weighted objectives).

Η τρίτη και η τελευταία είναι η άγνωστη συνάρτηση σκοπιμότητας και η προσέγγιση που θεωρείται εδώ ακολουθεί την εξής λογική. Η περιοχή λύσεων που δημιουργείται από αυτή την συνάρτηση λαμβάνει υπόψη όλους τους στόχους και η αύξηση της σκοπιμότητας γίνεται έτσι ώστε να μην μειώνεται η τιμή των άλλων δυνατών λύσεων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟ

13 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

Αυτό το παράρτημα αναφέρεται στους Γενετικούς Αλγόριθμους (ΓΑ) και έρχεται σαν συμπλήρωμα και επεξήγηση περαιτέρω τον όσων αναφέρθηκαν στην κατασκευή δικτύου και του θέματος γενικότερα των αλγόριθμων αυτών.

Άλλος λόγος που παρουσιάζονται οι ΓΑ είναι ότι βρίσκουν άμεση εφαρμογή στα προβλήματα μεγάλης κλίμακας και πολλοί οραματίζονται οι αλγόριθμοι αυτοί να αντικαταστήσουν άλλες μεθόδους και αλγόριθμους (π.χ. ευρετικούς).

Λόγω λοιπόν της νεότητας των αλγορίθμων αυτών, πιστεύω πως στο μέλλον θα λύσουν ακόμα πιο δύσκολα προβλήματα από τα προβλήματα γραμμικού και ακέραιου προγραμματισμού (μη γραμμικού προγραμματισμού κ.ο.κ).

13.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Υπάρχει μια κατηγορία αλγορίθμων που έχουν σαν κοινό στοιχείο την εξέλιξη και την μετάλλαξη και εφαρμόζουν τεχνικές τις οποίες και εφαρμόζει η Φύση κατά την διαιώνιση των ειδών. Αυτοί οι Αλγόριθμοι ονομάζονται και Αλγόριθμοι Μετεξέλιξης και είναι γενίκευση των ΓΑ.

Η αρχή των ΓΑ μπορεί να εντοπισθεί στις αρχές του 1950 όταν αρκετοί βιολόγοι χρησιμοποιούσαν κομπιούτερ για την προσομοίωση των βιολογικών συστημάτων. Ωστόσο, η δουλειά που έγινε στα τέλει του 1960 και αρχές του 1970 στο πανεπιστήμιο του Michigan υπό τις οδηγίες του John Holland οδήγησαν στους ΓΑ όπως τους γνωρίζουμε σήμερα.

Το ενδιαφέρον όμως για τους ΓΑ στην πραγματικότητα άρχισε να αυξάνει με γρήγορους ρυθμούς μετά το Τέταρτο Διεθνές Συνέδριο πάνω στους ΓΑ που έγινε στο San Diego, 13-16 Ιουλίου το 1991, όπου και πήραν μέρος περίπου 300 συμμετέχοντες [Mitchell Melanie, 'An Introduction to Genetic Algorithms', MIT Press, Massachusetts – London. (1999)].

13.2 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΩΝ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Όσο παράξενο και να φαινόταν, ο Δάσκαλος
πάντα επέμενε ότι ο καλός μεταρρυθμιστής
ήταν κάποιος ο οποίος ήταν σε θέση να δει ότι όλα
είναι τέλεια στην κατάσταση που βρίσκονται –και ικανός
να τα αφήσει ως είναι .

Anthony de Mello, One Minute Wisdom

Υπάρχουν πολλά ενδιαφέροντα προβλήματα για τα οποία δεν έχουν αναπτυχθεί αρκετά γρήγοροι αλγόριθμοι. Τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα είναι προβλήματα βελτιστοποίησης που εμφανίζονται συχνά και στις εφαρμογές των Συγκοινωνιολόγων Πολιτικών Μηχανικών. Έτσι μπορεί να υπάρχουν αλγόριθμοι οι οποίοι και μας δίνουν μια λύση που είναι ‘περίπου’ βέλτιστη. Για κάποια δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούμε να χρησιμοποιούμε πιθανοτικούς αλγόριθμους που και αυτοί δεν υπόσχονται μια βέλτιστη τιμή αλλά εμείς μπορούμε να καθορίσουμε το διάστημα εμπιστοσύνης της λύσης.

Για τα περισσότερα προβλήματα με διάστημα μικρό μπορούν να χρησιμοποιηθούν κλασσικές μέθοδοι και αλγόριθμοι. Όταν το διάστημα αυξάνει και ο χρόνος της βέλτιστης λύσης από τους άλλους αλγόριθμους αυξάνει υπερβολικά, τότε γίνεται χρήση των τεχνικών Τεχνητής Νοημοσύνης. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ) είναι μεταξύ αυτών των αλγόριθμων και η έμπνευση τους έγινε από γενετική κληρονομικότητα και την Δαρβίνεια μάχη για επιβίωση.

Η ιδέα πίσω από τους ΓΑ είναι να γίνεται ότι γίνεται και στην φύση. Για παράδειγμα έστω ότι έχουμε ένα πληθυσμό από κουνέλια. Μερικά από αυτά είναι γρήγορα και μερικά άλλα πιο έξυπνα. Τα γρήγορα και έξυπνα κουνέλια είναι λιγότερο πιθανό να φαγωθούν από αλεπούδες, άρα να επιβιώσουν και να κάνουν ότι τα κουνέλια κάνουν καλύτερα, να γεννούν περισσότερα κουνέλια. Βέβαια, κάποια από τα λιγότερα γρήγορα και έξυπνα κουνέλια θα επιβιώσουν μόνο και μόνο επειδή είναι τυχερά. Αυτά τα κουνέλια που επιβιώνουν αρχίζουν την αναπαραγωγή με αποτέλεσμα την ύπαρξη καλού κουνελήσιου γενετικού υλικού. Κάποια γρήγορα κουνέλια θα ζευγαρώσουν με άλλα γρήγορα κουνέλια, κάποια έξυπνα με λιγότερα έξυπνα κ.ο.κ. .Σε αυτή την λογική προστίθεται η φύση που σε κάποιο σημείο μεταλλάσσει το γενετικό υλικό τους. Αυτή η διεργασία συμβαίνει, εννοείται και στις αλεπούδες με αποτέλεσμα ο πληθυσμός μετά την αναπαραγωγή να είναι κατά μέσο όρο πιο γρήγορος και έξυπνος. Άρα λοιπόν θα συμφωνήσουμε στην γενική ιδέα όπως ειπώθηκε από τον Δαρβίνο.

Όπως η φυσική επιλογή εργάζεται μοναχικά
μαζί και για το καλό του κάθε πλάσματος
όλες οι σωματικές και πνευματικές ικανότητες
θα τείνουν προς την τελειοποίηση.

Charles Darwin, Origin of Species

Κατά τα άλλα η ορολογία που χρησιμοποιείται στους γενετικούς αλγόριθμους προέρχεται από την γενετική (την φυσική). Έτσι θα μιλάμε για πληθυσμό και η ονομασία για τα άτομα θα είναι χρωμοσώματα και τα οποία με την σειρά τους αποτελούνται από γόνους σε συγκεκριμένες θέσεις.

Οι ΓΑ έρχονται να λύσουν προβλήματα μεγάλης κλίμακας συνδυασμένης βελτιστοποίησης. Ανήκουν στους πιθανοτικούς αλγόριθμους, όμως είναι πολλή πιο διαφορετικοί από τους τυχαίους αλγόριθμους αφού συνδυάζουν στοιχεία από προσανατολισμένης και στοχαστικής έρευνας (αναζήτησης). Ακριβώς για αυτόν τον λόγο οι ΓΑ είναι πιο δυνατοί από της μεθόδους προσανατολισμένης έρευνας. Άλλο σημαντικό στοιχείο των γενετικά βασισμένων μεθόδων προσανατολισμένης έρευνας είναι ότι κρατάνε έναν πληθυσμό από δυνατές λύσεις, ενώ όλες οι άλλες μέθοδοι επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος έρευνας.

13.3 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΓΑ

Η δομή ενός απλού ΓΑ είναι ίδια με την δομή οποιοδήποτε προγράμματος εξέλιξης (evolution program).

Διαδικασία Προγράμματος Εξέλιξης

start

$t \leftarrow 0$

αρχικές τιμές στο $P(t)$

υπολογισμός του $P(t)$

while (όχι περιορισμός τερματισμού) do

start

$t \leftarrow t + 1$

επιλογή $P(t)$ από το $P(t-1)$

μεταβολή του $P(t)$

υπολογισμός του $P(t)$

end

end

Κατά την διάρκεια της επανάληψης t , ένας ΓΑ διατηρεί ένα πληθυσμό από πιθανές λύσεις (χρωμοσώματα, διανύσματα), $P(t) = \{x_1^t, \dots, x_n^t\}$. Κάθε λύση x_i^t υπολογίζεται για να δώσει κάποια στοιχεία της φόρμας (ταιριάσματος). Τότε ένας νέος πληθυσμός (επανάληψη $t + 1$) δημιουργείται επιλέγοντας τα πιο ταιριαστά άτομα. Κάποια μέλη του νέου πληθυσμού υφίστανται αλλαγές μέσω διασταύρωση και μετάλλαξη για να δημιουργήσουν νέες λύσεις.

Η διασταύρωση συνδυάζει δύο χαρακτηριστικά των δύο γονέων χρωματοσωμάτων για να δημιουργηθούν δύο παρόμοιοι απόγονοι μέσω της ανταλλαγής αντίστοιχων τμημάτων από τους γονείς. Για παράδειγμα εάν οι γονείς εκφράζονται από διανύσματα σε 5 διαστάσεις $(a_1, b_1, c_1, d_1, e_1)$ και $(a_2, b_2, c_2, d_2, e_2)$ τότε διασταύρωση χρωματοσωμάτων μετά τον δεύτερο γόνο θα δημιουργούσε τον απόγονο $(a_1, b_1, c_2, d_2, e_2)$ και $(a_2, b_2, c_1, d_1, e_1)$.

Η μετάλλαξη αυθαίρετα αλλάζει έναν ή περισσότερους γόνους ενός επιλεγμένου χρωματοσώματος, μέσω τυχαίας αλλαγής με πιθανότητα ίση με την τιμή μετάλλαξης.

Ένας ΓΑ για κάποιο συγκεκριμένο πρόβλημα θα πρέπει να έχει τουλάχιστον τα 5 παρακάτω στοιχεία (βήματα) :

- Μια γενετική αντιπροσώπευση για δυνατές λύσεις στο πρόβλημα
- Ένα τρόπο να δημιουργήσει έναν αρχικό πληθυσμό από δυνατές λύσεις
- Μια συνάρτηση υπολογισμού που παίζει τον ρόλο του περιβάλλοντος, κατατάσσοντας λύσεις ανάλογα με το ταίριασμα
- Γενετικούς τελεστές που αλλάζουν την σύνθεση των απογόνων
- Τιμές παραμέτρων που ο ΓΑ χρησιμοποιεί όπως μέγεθος πληθυσμού και πιθανότητα να εφαρμοστεί ένας γενετικός τελεστής

13.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Κλασικά παραδείγματα των γενετικών αλγορίθμων (σκοπίμως δεν θα ασχοληθούμε με τον κώδικα και με παραδείγματα επαλήθευσης αλλά με την στρατηγική της τεχνικής) είναι το ‘Δίλημμα του Φυλακισμένου’ και το ‘Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή’.

13.4.1 Δίλημμα του Φυλακισμένου

Σχετικά με το Δίλημμα του Φυλακισμένου το πρόβλημα έχει ως εξής. Δύο φυλακισμένοι κρατούνται σε δύο διαφορετικά κελιά και δεν υπάρχει τρόπος επικοινωνίας μεταξύ τους. Κάθε κρατούμενος ερωτάται, ανεξάρτητα, να αυτομολήσει και να προδώσει τον άλλον. Εάν μόνο ένας κρατούμενος αυτομολήσει, τότε αυτός ανταμείβεται και ο άλλος τιμωρείται. Εάν και οι δύο αυτομολήσουν και προδώσουν ο ένας τον άλλον, τότε και οι δύο κρατούνται και βασανίζονται. Εάν κανένας από τους κρατούμενους δεν μιλήσει τότε και οι δύο λαμβάνουν κάποια μέτρια ανταμοιβή. Επομένως η εγωιστική επιλογή της αυτομόλησης πάντα αποφέρει μεγαλύτερη ποινή από την συνεργασία, χωρίς να έχει σημασία τι κάνει ο άλλος κρατούμενος και αν και οι δύο αυτομολήσουν τότε το αποτέλεσμα θα είναι χειρότερο από το εάν είχαν συνεργαστεί. Το δίλημμα το οποίο λοιπόν τίθεται είναι εάν θα αυτομολήσει κάποιος ή θα συνεργαστεί με τον άλλον. (Εδώ συνεργασία νοείται η μη προδοσία του άλλου κρατούμενου.)

Η στρατηγική επίλυσης του παραπάνω προβλήματος με ΓΑ οφείλεται στον Axelrod. Η διαδικασία χρειάζεται αρχικά μια στρατηγική την οποία και φανταζόμαστε ότι την τοποθετούμε σε ένα τμήμα από 64 bits. Τα 64 bits προέκυψαν σαν 4 επιλογές των δύο κρατουμένων επί το αποτέλεσμα το οποίο και είναι 4 περιπτώσεις ($4*4*4 = 64$). Όμως προκειμένου να ξεκινήσουμε την διαδικασία εισάγουμε 3 υποθετικές κινήσεις οι οποίες και θα έχουν συνολικά 6 γόνους. Άρα συνολικά το χρωματόσωμα που εκφράζει την στρατηγική θα έχει 70 θέσεις (bits). Ο αλγόριθμος τώρα εκφράζεται σε τέσσερα βήματα:

1. Επιλογή του αρχικού πληθυσμού. Κάθε παίχτης επιλέγει ένα χρωματόσωμα 70 θέσεων.
2. Δοκιμασία κάθε παίχτη για την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής του ενάντια στους άλλους παίχτες. Το σκορ του κάθε παίχτη είναι ο μέσος όρος σε όλα τα παιχνίδια που έχει παίζει.
3. Επιλογή παιχτών για αναπαραγωγή. Ένας παίχτης με σκορ ίσο με το μέσο όρο ζευγαρώνει μια φορά. Παίχτης με σκορ πάνω από το μέσο όρο ζευγαρώνει δύο φορές ενώ παίχτης με σκορ κάτω από το μέσο όρο δεν ζευγαρώνει.
4. Οι πετυχημένοι παίχτες τυχαία συνδυάζονται (ζευγαρώνουν) για την παραγωγή δύο απογόνων κάθε φορά. Η στρατηγική του κάθε απογόνου καθορίζεται από τον κάθε γονέα και την τεχνική ζευγαρώματος η οποία μπορεί να είναι μέσω διασταύρωσης και μετάλλαξης.

Μετά τα 4 αυτά βήματα διαθέτουμε έναν νέο πληθυσμό ο οποίος και θα έχει κληρονομήσει μέρη στρατηγικής ή την πιο σωστή στρατηγική από τους πετυχημένους προηγούμενους γονείς.

13.4.2 Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή

Το πρόβλημα που εξετάζεται είναι αρκετά απλό (Traveling Salesman Problem). Ένας πωλητής ξεκινά από ένα δεδομένο μέρος, ταξιδεύει σε όλες τις τριγύρω περιοχές περνώντας μόνο μια φορά από το κάθε μέρος και καταλήγει στο μέρος από το οποίο και ξεκίνησε. Η ερώτηση είναι πως θα γίνει η περιπλάνηση του πωλητή με σκοπό το ελάχιστο κόστος του ταξιδιού.

Το TSP είναι πρόβλημα συνδυασμένης βελτιστοποίησης και συναντάται σε πολλές εφαρμογές. Οι προσεγγίσεις που έχουν γίνει για την επίλυση σχετίζονται με μεθόδους Κλάδου και Φραγής, Προσεγγιστικούς Αλγορίθμους και Ευρετικούς Αλγόριθμους .

Καταρχάς πρέπει να φτιάξουμε ένα χρωματόσωμα το οποίο και θα διαθέτει μια ακολουθία από πόλεις δηλαδή μια στρατηγική. Η διαφορά εδώ βρίσκεται στο ότι στο προηγούμενο παράδειγμα μπορούσαμε να έχουμε ένα διάνυσμα χρωματοσώματος σε δυαδική μορφή. Ενώ εδώ δεν μπορεί να εφαρμοστεί τέτοιο διάνυσμα λόγω του ότι απλά μετά την μετάλλαξη ή τον συνδυασμό δεν θα καταλαβαίνουμε για πια πόλη μιλάμε ή μπορεί να εμφανισθεί μια πόλη δύο φορές. Αυτό το πρόβλημα λοιπόν λύνεται θεωρώντας το διάνυσμα ότι αποτελείται από ακεραίους, οι οποίοι και αντιπροσωπεύουν μια ακολουθία πόλεων.

Για την αρχή της όλης διαδικασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας Πλεονέκτης Αλγόριθμος (Greedy Algorithm) αρχίζοντας από διάφορες πόλεις. Αλλιώς πάλι μπορούμε να αρχίσουμε έναν πληθυσμό από ένα τυχαίο δείγμα μετάθεσης (συνδυασμού).

Ο υπολογισμός του χρωματοσώματος είναι άμεσος. Δεδομένου του κόστους ταξιδιού μεταξύ των πόλεων, εύκολα υπολογίζεται το συνολικό κόστος της περιπλάνησης.

Όμως στο TSP αυτό που ζητείται ακόμα είναι και η σωστή διάταξη των πόλεων στην λύση μικρότερου κόστους. Την λύση αυτή την προσφέρουν τελεστές μοναδιαίοι (unary operators) , όπως λέγονται και που έχουν την ιδιότητα να ψάχνουν για καλύτερη αναδιάταξη των πόλεων (στο παράδειγμα μας). Όμως από την πείρα ξέρουμε ότι δεν υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να βρούμε την σωστή διάταξη. Ακόμα η δύναμη των ΓΑ βασίζεται στην διασταύρωση των μονάδων που ταιριάζουν με την συνάρτηση κόστους μας. Άρα αυτό που χρειάζεται είναι να βρούμε τελεστές που να κάνουν την διασταύρωση και να ελέγχουν για τις

ομοιότητες στην διάταξη των χρωματοσωμάτων. Για αυτό χρησιμοποιείται μια παραλλαγή των ΟΧ Τελεστών, οι οποίοι δεδομένου 2 γονέων, δημιουργούν απόγονο επιλέγοντας ένα μέρος μια διαδρομής από τον έναν γονέα και διατηρούν την σχετική σειρά των πόλεων από τον άλλο γονέα.

Για παράδειγμα έστω ότι ο ένας γονέας είναι

<1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12> και ο άλλος

<7 3 1 11 4 12 5 2 10 9 6 8>, αφού το επιλεγμένο κομμάτι είναι το

(4 5 6 7), ο τελικός απόγονος θα είναι ο <1 11 12 4 5 6 7 2 10 9 8 3>.

Φυσικά τα χαρακτηριστικά των γονέων μεταβιβάζονται όπως θέλουμε και μπορούμε να διατηρήσουμε τους γονείς για την δημιουργία δεύτερου απόγονου.

Απλά και μόνο για την σημασία των ΓΑ αρκεί να πούμε πως για 100 πόλεις και μετά από 20000 πληθυσμούς (κατά μέσο όρο 20 επαναλήψεις) η λύση που προκύπτει είναι κατά 9,4% καλύτερη από την βέλτιστη λύση [Michalewicz Z, 'Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs', Springer Verlag,(1992)].

13.5 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΓΑ

Τα είδη δεν εξελίσσονται προς την τελειοποίηση, αλλά ακριβώς το αντίθετο. Τα αδύναμα, στην πραγματικότητα, πάντα υπερισχύουν έναντι των δυνατών, όχι μόνο επειδή είναι η πλειοψηφία, αλλά επίσης γιατί είναι πιο τεχνίτες.

Friedrich Nietzsche, The Twilight of the Idols.

Ενώ όπως ειπώθηκε οι ΓΑ είναι από τις καλύτερες μεθόδους βελτιστοποίησης με μια εκπληκτική δύναμη που οφείλεται στους συνδυασμούς των πληθυσμών και την μετάλλαξη, στην πράξη υπάρχουν πολλά προβλήματα τα οποία όπως προκύπτουν ΔΕΝ ακολουθούν την γενικότερη θεωρία των ΓΑ. Οι λόγοι που τις περισσότερες φορές αυτό συμβαίνει είναι :

- Ο κώδικας του προβλήματος μεταφέρει την λειτουργία του ΓΑ σε διαφορετικό διάστημα από αυτό του ιδίου του προβλήματος.
- Υπάρχει όριο στον υποτιθέμενο απεριόριστο αριθμό επαναλήψεων.

- Υπάρχει όριο στον υποτιθέμενο απεριόριστο μέγεθος πληθυσμού.

Στις παρατηρήσεις που έχουν γίνει, έχει βρεθεί πως κάτω από συγκυρίες μπορεί να μην βρεθεί η Βέλτιστη Λύση. Με τον όρο συγκυρίες εννοείται η περίπτωση κατά την οποία έχουμε σύγκληση πρόωρη σε ένα τοπικό βέλτιστο. Μάλιστα αυτό δεν είναι πρόβλημα μόνο των Γενετικών Αλγορίθμων αλλά και άλλων αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Εάν η σύγκληση συμβεί τάχιστα, τότε οι χρήσιμες πληροφορίες που αναπτύσσονται σε μέρος του πληθυσμού τις περισσότερες φορές χάνονται. Οι εφαρμογές των ΓΑ είναι επιρρεπής στην πρόωρη σύγκληση, πριν την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Για την εξάλειψη αυτής της αδυναμίας γίνεται έρευνα προς δύο κατευθύνσεις.

1. Το μέγεθος και το είδος των λαθών που εισάγονται από τον μηχανισμό δειγματοληψίας.
2. Τα χαρακτηριστικά της ίδιας της συνάρτησης

13.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

Από ότι φαίνεται υπάρχουν δύο σημαντικά ζητήματα στην διαδικασία της εξέλιξης του γενετικού ψαξίματος. Η Ποικιλία του Πληθυσμού και η Επιλεκτική Πίεση. Μάλιστα αυτοί οι παράγοντες είναι στενά συνδεδεμένοι. Η αύξηση της ΕΠ μειώνει την ΠΠ και το αντίστροφο. Με άλλα λόγια, μεγάλη Επιλεκτική Πίεση υποστηρίζει την πρόωρη σύγκληση της αναζήτησης των ΓΑ, ενώ μια μειωμένη ΕΠ μπορεί να κάνει την αναζήτηση μη αποδοτική. Επομένως ζητείται μια ισορροπία μεταξύ αυτών των παραγόντων και ο μηχανισμός δειγματοληψίας υπόσχεται αυτή την ισορροπία.

Ανάμεσα στις καλύτερες μεθόδους είναι εκείνη που βασίζεται σε συντελεστές βαρύτητας. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην πεποίθηση ότι η κοινή αιτία της πρόωρης σύγκλησης είναι η παρουσία Υπέρ-ατόμων (Super Individuals), που είναι πολύ πιο καλοί από τον μέσον όρο εφαρμογής (ταιριάσματος) του πληθυσμού. Τέτοια Υπέρ-άτομα έχουν μεγάλο αριθμό από απογόνους και (λόγω του σταθερού αριθμού του πληθυσμού) εμποδίζουν άλλα άτομα από την συνεισφορά απογόνων στον επόμενο πληθυσμό. Σε λίγους πληθυσμούς ένα Υπερ-άτομο μπορεί να αποβάλει επιθυμητό υλικό από χρωματοσώματα και έτσι να δημιουργήσει μια γρήγορη σύγκληση σε πιθανότατα τοπικό βέλτιστο.

Άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται πολύ είναι μέσω της παραμέτρου q και του ορισμού μιας γραμμικής συνάρτησης, για παράδειγμα :

$$P(\text{θέση}) = q - (\text{θέση} - 1) \cdot r,$$

ή μέσω μη γραμμικής συνάρτησης :

$$P(\text{θέση}) = q \cdot (1 - q)^{\text{θέση} - 1}$$

Και οι δύο συναρτήσεις δίνουν την πιθανότητα ενός ατόμου που κατατάσσονται στην συγκεκριμένη θέση να επιλεγεί σε μια επιλογή. (θέση = 1 σημαίνει το καλύτερο άτομο, ενώ θέση = μεγ_πληθ το χειρότερο), όπου r = αριθμός χρωματοσωμάτων

Και τα δύο ιδέες επιτρέπουν την επιρροή της Επιλεκτικής Πίεσης του αλγόριθμου. Η απαίτηση ότι :

$$\sum_{i=0}^{\text{μεγ_πληθ}} P(i) = 1$$

υπονοεί ότι :

$$q = r \frac{(\text{μεγ_πληθ} - 1)}{2} + \frac{1}{\text{μεγ_πληθ}}$$

άρα και

$r = 0$ (και επομένως $q = 1/\text{μεγ_πληθ}$) δεν υπάρχει ΕΠ καθόλου και τα άτομα έχουν την ίδια πιθανότητα να επιλεγούν.

Αν $q - (\text{μεγ_πληθ} - 1)r = 0$ δίνει τις επόμενες λύσεις

$$r = 2/(n(n-1)) \text{ και } q = 2/n \text{ και προσφέρει}$$

την μέγιστη επιρροή Επιλεκτική Πίεσης.

Έτσι συμπεραίνουμε πως αν επιλεγεί μια γραμμική συνάρτηση για την επιλογή ταξινομημένων ατόμων, τότε μια μόνο παράμετρος q μπορεί να ελέγχει την επιρροή της ΕΠ του αλγόριθμου και παίρνει τιμές από $1/\text{μεγ_πληθ}$ μέχρι $2/\text{μεγ_πληθ}$.

Από την άλλη για την συνάρτηση την μη γραμμική η παράμετρος $q \in (0 \dots 1)$ δεν εξαρτάται από το μέγεθος του πληθυσμού. Μεγάλες τιμές του q σημαίνει μεγάλη επιρροή ΕΠ στον αλγόριθμο.

Αυτές οι προσεγγίσεις όμως ενώ βελτιώνουν την αποδοτικότητα του αλγόριθμου σε κάποιες περιπτώσεις, έχουν μερικά μειονεκτήματα. Πρώτα, δίνουν την ευθύνη στον χρήστη για το πότε θα χρησιμοποιηθούν αυτοί οι μηχανισμοί.

Δεύτερον, αγνοούν τις πληροφορίες για την σχετική εξέλιξη των χρωματοσωμάτων.

Τρίτον, χειρίζονται όλες τις περιπτώσεις ομοιόμορφα, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη το μέγεθος του προβλήματος.

Τέλος υπάρχουν και άλλες μέθοδοι οι οποίες είναι αρκετά αξιόλογες όμως ξεφεύγουν από τα πλαίσια της αρχικής γνωριμίας με του ΓΑ.

13.7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ

Τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης βελτιστοποίησης είναι κατά κάποιο τρόπο σημαντικά ως προς τα προβλήματα που προκύπτουν. Σε όλα αυτά τα χρόνια υπάρχουν τρεις βασικές προσεγγίσεις.

Μία δανείζεται την τεχνική της εικονικής ισχυροποίησης για να διαφοροποιήσουν την εντροπία του συστήματος. Βασικά ο έλεγχος της σύγκλησης του πληθυσμού γίνεται από θερμοδυναμικούς τελεστές, με την χρήση μια παραμέτρου καθολικής θερμοκρασίας.

Η άλλη προσέγγιση βασίζεται στον καθορισμό αναπαραγωγικών πειραμάτων βασισμένες στην κατάταξη (θέση) παρά στις υπολογισμένες τιμές, αφού η ταξινόμηση αυτόματα εισάγει μια ομοιόμορφη αύξηση (σκαλωτή) στον πληθυσμό.

Η τελευταία προσέγγιση συγκεντρώνεται στην επιδιόρθωση της ίδιας της συνάρτησης εισάγοντας έναν μηχανισμό βαθμιαίας αύξησης (scaling mechanism). Υπάρχουν τρεις κατηγορίες :

1. Γραμμική Βαθμιαία Αύξηση (Linear Scaling)

$$f'_i = a * f_i + b$$

όπου τα a και b επιλέγονται έτσι ώστε η μέση εφαρμογή (fitness) σχετικά με την καλύτερη εφαρμογή να αυξάνεται πολλαπλασιασμένη με μια επιθυμητή τιμή.

2. Σμίκρυνση Σίγμα (Sigma Truncation)

$$f'_i = f_i + \left(\bar{f} - c * \sigma \right)$$

όπου c είναι ένας μικρός ακέραιος που επιλέγεται (συνήθως από 1 έως 5) και σ είναι ο σταθερός αριθμός απόκλισης του πληθυσμού. Πιθανές τιμές αρνητικές στον υπολογισμό γίνονται 0.

3. Νόμος της Δύναμης Βαθμιαία Αύξηση (Power Law Scaling)

$$f'_i = f_i^k$$

Όπου k είναι κοντά στο ένα. Η παράμετρος k δημιουργεί το 'σκάλωμα' της συνάρτησης f και σύμφωνα με κάποιες μελέτες το k δεν είναι ανεξάρτητο του προβλήματος.

Ακόμα μεγάλη σημασία πρέπει να δίνεται στον τερματισμό του αλγορίθμου. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες των συνθηκών τερματισμού, που χρησιμοποιούν τα χαρακτηριστικά αναζήτησης για να κάνουν αποφάσεις τερματισμού.

Η μια κατηγορία στηρίζεται στην δομή του χρωματοσώματος. Η συνθήκη τερματισμού μετρά την απόκλιση του πληθυσμού ελέγχοντας την απόκλιση των χαρακτηριστικών των γόνων (allele), όπου αυτό εννοεί εάν κάποιο προαποφασισμένο ποσοστό του πληθυσμού έχει την ίδια (ή παρόμοια, σε περίπτωση που δεν έχουμε δυαδική παρουσίαση) τιμή με αυτή των χαρακτηριστικών των γόνων. Εάν ο αριθμός των αποκλίσεων των χαρακτηριστικών ξεπερνά κάποιο ποσοστό των ολικών χαρακτηριστικών των γόνων η διαδικασία τερματίζεται.

Η άλλη κατηγορία μετρά την πρόοδο που έχει γίνει από τον αλγόριθμο σε έναν προκαθορισμένο αριθμό γενεών. Δίδεται λοιπόν ένας αριθμός έψιλον που εάν η πρόοδος είναι μικρότερη, η αναζήτηση τερματίζεται [Reeves C.R. 'Modern Heuristic Technique for Combinatorial Problems', Halsted Press (Wiley).].

13.8 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή οι ΓΑ έχουν εφαρμοσθεί σε διάφορες κατηγορίες προβλημάτων και για τις λύσεις αυτών έγιναν πακέτα (συστήματα) λογισμικών. Επιγραμματικά θα αναφέρουμε το σύστημα GAMS το οποίο και σύμφωνα με διάφορες συγκρίσεις που έγιναν στο παρελθόν δίνει λύσεις σε προβλήματα με εξισώσεις δευτέρου βαθμού (linear –quadratic problem), με απόλυτη σχεδόν ακρίβεια. Το GAMS αποτελείται από το Student Version of General Algebraic Modeling System με πρόσθετο το MINOS για βελτιστοποιήσεις. Σχετικά με το Πρόβλημα Συγκομιδής (The harvest Problem) το GAMS δεν δίνει αξιόπιστες λύσεις και δυστυχώς δεν δίνει λύση εάν $N > 4$ (όπου N

ορίζοντας βελτιστοποίησης). Σχετικά με το Πρόβλημα Ωθησης Κάρου (Push cart Problem) το GAMS δίνει πολύ καλές λύσεις.

Προκειμένου να λυθούν όμως προβλήματα με παραμέτρους που θα λαμβάνονται υπόψη στα χρωματοσώματα δημιουργήθηκε το πακέτο GENOCOP (Genetic algorithm for Numerical Optimization for Constrained Problems) το οποίο και βελτιστοποιούσε Προβλήματα Ελέγχου με περιορισμούς. Από την άλλη για να λύνονται και προβλήματα με μη γραμμικούς περιορισμούς δημιουργήθηκε το GENOCOP II το οποίο και ήταν πιο δύσκολο και πιο χρονοβόρα διαδικασία. Φυσικά ως έχουν τα πακέτα αυτά από την άποψη του υπολογιστικού χρόνου δεν μπορούν να αντικαταστήσουν κλασικές τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού για παράδειγμα.

Εάν τώρα υπάρχουν προβλήματα βελτιστοποίησης πολλών στόχων χρησιμοποιούνται πακέτα όπως το VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm) το οποίο και αποτελεί προέκταση του προγράμματος GENESIS. Η ιδέα πίσω από το VEGA είναι η διαίρεση του πληθυσμού σε υποπληθυσμούς και ο κάθε υποπληθυσμός είναι υπεύθυνος για έναν μόνο στόχο. Η διαδικασία επιλογής είναι ανεξάρτητη για κάθε στόχο αλλά η διασταύρωση λαμβάνει χώρα πέρα από τα σύνορα των υποπληθυσμών. Ακόμα το πρόβλημα της πρόωρης σύγκλησης λύθηκε με ευρετικούς μεθόδους.

Το πρόβλημα των μεταφορών δεν θα μπορούσε να μην λυθεί από το GENOCOP ειδικά μετά την προσθήκη βελτιστοποίησης της συνάρτησης με γραμμικούς περιορισμούς. Ακόμα θα αναφερθούμε στα αποτελέσματα των πακέτων GAMS και GENETICS-2, όπου και θα γίνει μια σύντομη περιγραφή και σχολιασμός της αποτελεσματικότητας των προγραμμάτων. Ειδικότερα σαν εισαγωγή αρκεί να πούμε πως το GENETICS-2 είναι πακέτο ειδικά σχεδιασμένο για Προβλήματα Μεταφοράς. Οι συγκεκριμένοι περιορισμοί που δίνονται, ενσωματώνονται σαν data σε δομές μητρώων και ειδικών 'γενετικών' τελεστών.

13.8.1 Γραμμικό Πρόβλημα Μεταφοράς

Το πρόβλημα μεταφοράς είναι ένα από τα απλούστερα συνδυαστικά προβλήματα που περιλαμβάνουν περιορισμούς. Αυτό που ζητείται είναι ο καθορισμός του ελάχιστου κόστους ενός μεταφορικού σχεδίου για ένα αγαθό (προϊόν) από ένα αριθμό πηγών σε κάποιους προορισμούς. Απαιτείται, ο προσδιορισμός των επιπέδων αποθεμάτων στις πηγές και η

ποσότητα ζήτησης σε κάθε προορισμό, ακόμα το μεταφορικό κόστος από κάθε πηγή σε κάθε προορισμό.

Αφού υπάρχει μόνο ένα προϊόν, ένας προορισμός μπορεί να προμηθευτεί από μία ή περισσότερες πηγές. Ο σκοπός είναι να βρεθεί η ποσότητα η οποία θα μεταφερθεί από κάθε πηγή στον κάθε προορισμό, έτσι ώστε το συνολικό κόστος μεταφοράς να ελαχιστοποιείται.

Το πρόβλημα ονομάζεται γραμμικό εάν το κόστος της διαδρομής είναι ανάλογο με το ποσό που μεταφέρεται, αλλιώς είναι μη γραμμικό. Ενώ τα γραμμικά προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με μεθόδους OR, η μη γραμμική περίπτωση δεν έχει μια γενική μεθοδολογία για λύση.

Θεωρούμε πως υπάρχουν n πηγές και k προορισμούς. Η ποσότητα προμήθειας στην πηγή i είναι $sour(i)$ και η ζήτηση στον προορισμό j είναι $dest(j)$. Η μονάδα μεταφορικού κόστους μεταξύ πηγής i και προορισμού j είναι $cost(i, j)$. Ένα x_{ij} είναι η ποσότητα που μεταφέρεται από την πηγή i στον προορισμό j τότε το πρόβλημα γράφεται ως :

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k f_{ij}(x_{ij})$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^k x_{ij} \leq sour(i), i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq dest(j), j = 1, 2, \dots, k$$

$$x_{ij} \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \text{ ενώ } j = 1, 2, \dots, k$$

Για παράδειγμα υποθέτουμε 3 πηγές και 4 προορισμούς και η προμήθεια είναι : $sour(1) = 15$, $sour(2) = 25$, $sour(3) = 5$,

Ενώ η ζήτηση είναι : $dest(1) = 5$, $dest(2) = 15$, $dest(3) = 15$, $dest(4) = 10$. Συνολική ζήτηση είναι 45.

Το κόστος δίνεται παρακάτω με την μορφή μητρώου.

10	0	20	11
12	7	9	20
0	14	16	18

Η βέλτιστη λύση δείχνεται παρακάτω, ενώ το συνολικό κόστος είναι 315.

Η λύση περιλαμβάνει ακέραιες τιμές x_{ij}

	5	15	15	10
15	0	5	0	10
25	0	10	15	0
5	5	0	0	0

13.8.1.1 Κλασικός Γενετικός Αλγόριθμος

Με τον όρο κλασικός εννοούμε πως θα το χρωμόσωμα θα περιλαμβάνει τμήματα από τιμές 0 και 1. Μια ευθεία προσέγγιση θα ήταν ο ορισμός ενός διανύσματος $\langle v_0, v_2, \dots, v_p \rangle$ με $p = n \cdot k$, έτσι ώστε κάθε τμήμα του διανύσματος v_i ($i = 1, 2, \dots, p$), να είναι διάνυσμα από ψηφία $\langle w_0^i, \dots, w_s^i \rangle$ και εκπροσωπεί έναν ακέραιο που σχετίζεται με την γραμμή j και με την στήλη m στην τοποθεσία στο μητρώο. Το $j = [(i-1)/k + 1]$ και το $m = (i-1) \bmod k + 1$ (όπου $\bmod(3; 2)$ ίσον 1, $\bmod(-3; -2)$ ίσον -1). Το μήκος του διανύσματος w εξαρτάται από το s και μάλιστα καθορίζεται ότι ο μέγιστος αριθμός ακεραίων είναι $2^{s+1} - 1$ που μπορεί να εισαχθεί.

Θα εξετάσουμε κάθε στοιχείο του αλγορίθμου με την σειρά.

Ικανοποίηση Περιορισμών

Είναι ξεκάθαρο ότι κάθε λύση διάνυσμα πρέπει να ικανοποιεί :

$$v_q \geq 0 \text{ για } q = 1, 2, \dots, k \cdot n$$

$$\sum_{i=c \cdot k + 1}^{c \cdot k + k} v_i = \text{sour}(c + 1), \text{ για } c = 0, 1, \dots, n - 1$$

$$\sum_{j=m, \text{ βήμα } k}^{k \cdot n} v_j = \text{dest}(m), \text{ για } m = 1, 2, \dots, k$$

Ο πρώτος περιορισμός ικανοποιείται από μόνο του αφού εμείς επιλέγουμε να βάζουμε τιμές 0,1. Για τους άλλους δύο περιορισμούς αυτό που βλέπουμε είναι ότι δεν είναι συμμετρικές οι τιμές.

13.8.1.2 Συνάρτηση Υπολογισμού

Η φυσική συνάρτηση υπολογισμού εκφράζει το συνολικό κόστος των μεταφερόμενων αγαθών από τις πηγές στους προορισμούς και δίνεται μαθηματικά :

$$eval(\langle v_1, v_2, \dots, v_p \rangle) = \sum_{i=1}^p v_i * cost([j], [m])$$

Όπου $j = [(i-1)/k + 1]$ και $m = (i-1) \bmod k + 1$.

13.8.1.3 Γενετικοί Τελεστές

Δεν υπάρχει φυσικός ορισμός των τελεστών για το πρόβλημα μεταφοράς με την παραπάνω έκφραση. Η μετάλλαξη συνήθως ορίζεται σαν μια αλλαγή στο τμήμα με το ψηφίο στο διάνυσμα λύση. Η αλλαγή αυτή επιφέρει τις άλλες αλλαγές τουλάχιστον για να ισχύουν οι εξισώσεις των περιορισμών. Ακόμα η παρουσίαση σε διάνυσμα, δεν σημαίνει πως δεν πρέπει να θυμόμαστε που έγινε η αλλαγή (γραμμή-στήλη). Αυτός είναι ο λόγος που η μαθηματοποίηση είναι αρκετά περίπλοκη. Το πρόβλημα αυτό σε συνδυασμό με το πρόβλημα ορισμού του γενετικού αλγορίθμου που θα 'επισκευάσει' την λύση όπως αυτή θα δοθεί από την όλη διαδικασία, λόγω του ότι οι αλλαγές δεν εκφράζουν αληθινές πηγές οι προορισμούς στο τέλος, έχουν αποθαρρύνει τους μελετητές αυτών των αλγορίθμων.

Έτσι η μέθοδος της παρουσίας ψηφίων 0,1 στο χρωματόσωμα δεν είναι κατάλληλη και δεν χρησιμοποιείται.

Χρησιμοποιείται όμως η παρακάτω μέθοδος.

13.8.1.4 Παρουσίαση σε Μορφή Μητρώου

Αυτή η παρουσίαση είναι και η πιο φυσική για το πρόβλημα μεταφοράς που έχουμε. Έχουμε λοιπόν μητρώο $V = (v_{ij})$ με $i = 1, \dots, k$ και $j = 1, \dots, n$ το οποίο και μπορεί να αναπαριστά μια λύση του προβλήματος μας. Εξετάσουμε πάλι τις 3 παραμέτρους του ΓΑ που πρέπει να φτιάξουμε.

Ικανοποίηση Περιορισμών

Είναι φανερό ότι κάθε λύση μητρώο $V = (v_{ij})$ πρέπει να ικανοποιεί :

$$v_{ij} \geq 0 \text{ για } i = 1, 2, \dots, k \text{ για } j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^k v_{ij} = dest[j], \text{ για } j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n v_{ij} = sour[i], \text{ για } i = 1, 2, \dots, k$$

Αρκετά παρόμοια με την προηγούμενη παρουσίαση, με την διαφορά ότι οι δείκτες παρακολουθούνται πιο εύκολα και πιο φυσικά.

Συνάρτηση Υπολογισμού

Η συνάρτηση υπολογισμού γίνεται :

$$eval(v_{ij}) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n v_{ij} * cost([j],[m])$$

Και πάλι βλέπουμε ότι η μαθηματική διατύπωση της συνάρτησης είναι αρκετά απλή και διαφέρει από την προηγούμενη παρουσίαση.

Γενετικοί Τελεστές

Εδώ ορίζουμε δύο γενετικούς τελεστές οι οποίοι και ονομάζονται (έχει αναφερθεί πολλές φορές) διασταύρωση και μετάλλαξη.

Μετάλλαξη

Υποθέτουμε ότι $\{i_1, i_2, \dots, i_p\}$ είναι ένα σύνολο από το $\{1, 2, \dots, k\}$ και $\{j_1, j_2, \dots, j_q\}$ είναι σύνολο από το $\{1, 2, \dots, n\}$ έτσι ώστε το p να ορίζεται σε διάστημα από 2 έως k και q να ορίζεται από 2 έως n .

Αν ορίσουμε έναν γονέα για την μετάλλαξη μητρώο $(k \times n)$ $V = (v_{ij})$. Τότε μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα υπομητρώο $(p \times q)$ $W = (w_{ij})$ με στοιχεία από το μητρώο V με τον εξής τρόπο :

Ένα στοιχείο $v_{ij} \in V$ είναι στο W εάν και μόνο αν $i \in \{i_1, i_2, \dots, i_p\}$ και $j \in \{j_1, j_2, \dots, j_q\}$.

Έτσι μπορούμε να δώσουμε νέες τιμές για το μητρώο W :

$$sour_w[i] = \sum_{j \in \{j_1, j_2, \dots, j_q\}} v_{ij}, 1 \leq i \leq p$$

$$dest_w[j] = \sum_{i \in \{i_1, i_2, \dots, i_p\}} v_{ij}, 1 \leq j \leq q$$

Μετά από αυτή την διαδικασία ελέγχονται και πάλι οι περιορισμοί.

Διασταύρωση

Υποθέτουμε ότι 2 μητρώα $V_1=(v^1_{ij})$ και $V_2=(v^2_{ij})$ επιλέγονται για την διαδικασία της διασταύρωσης. Παρακάτω περιγράφεται ο αλγόριθμος που δημιουργεί το ζεύγος των απογόνων V_3 και V_4 .

Ορίζουμε δύο προσωρινά μητρώα $DIV=(div_{ij})$ και $REM=(rem_{ij})$:

$$div_{ij} = [(v^1_{ij} + v^2_{ij})/2]$$

$$rem_{ij} = (v^1_{ij} + v^2_{ij}) \bmod 2$$

Στο μητρώο DIV κρατούνται οι μέσο όροι ενώ στο REM κρατούνται οι απαραίτητες τιμές στρογγυλοποιημένες. Το REM έχει μια ιδιότητα η οποία και εκφράζεται σαν τιμή που είναι μονός αέρας που σημαίνει ότι μπορούμε να φτιάξουμε REM_1 και REM_2 ώστε $REM = REM_2 + REM_1$. Έτσι λοιπόν έχουμε την δημιουργία των απογόνων V_3 και V_4 .

$$V_3 = DIV + REM_1$$

$$V_4 = DIV + REM_2$$

Οι μελετητές των ΓΑ με βάση τα παραπάνω έφτιαξαν το GENETIC-2 (μητρική απεικόνιση) άρχισαν να συγκρίνουν τα αποτελέσματα με το GENETIC-1 το οποίο και φτιάχτηκε με βάση την μέθοδο της διανυσματικής απεικόνισης που προαναφέρθηκε.

Τα αποτελέσματα δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα διότι υπάρχει το πρόβλημα του κριτηρίου σύγκρισης το οποίο θα μπορούσε να είναι ο αριθμός των γενεών που χρειάζονται για να βρεθεί η βέλτιστη λύση (η οποία και γνωρίζεται από πριν μέσω της εφαρμογής άλλων γνωστών αλγορίθμων). Λόγω όμως του ότι η λύση μπορεί να βρεθεί μετά από πολλές γενεές (επαναλήψεις) ή να μην βρεθεί καθόλου, θεωρήθηκε άλλο κριτήριο. Το τελευταίο κριτήριο βασίζεται στην κοντινότητα της βέλτιστης τιμής σε κάποιο σταθερό αριθμό γενεών. Αυτό σε σχέση με τον αριθμό των διασταυρώσεων μπορούν να μας οδηγήσουν στο συμπέρασμα ότι το GENETIC-2 είναι καλύτερο από το GENETIC-1. Ακόμα θεωρήθηκαν 100 γενεές σαν άνω όριο.

Πιο συγκεκριμένα για 0 διασταυρώσεις η λύση του GENETIC-2 είναι γύρο στο 0,8% πάνω από την βέλτιστη λύση και το GENETIC-1 είναι κοντά στο 0,9% πάνω από την βέλτιστη λύση. Μεταξύ 0-8 διασταυρώσεις το GENETIC-2 δίνει ακόμα καλύτερη προσέγγιση της λύσης, ενώ το GENETIC-1 αυξάνει το ποσοστό πάνω από την βέλτιστη λύση κοντά στο 1%. Μετά τις 8 διασταυρώσεις το GENETIC-2 δίνει λύσεις κοντά 8% πάνω από την βέλτιστη λύση ενώ αντιθέτως το GENETIC-1 δίνει λύσεις κοντά στο 2% πάνω από την θεωρούμενη βέλτιστη.

Σε σχέση με το μέγεθος του μοντέλου (δηλαδή το πληθυσμό) τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για δύο διασταυρώσεις ζευγών το GENETIC-2 έδωσε καλύτερα αποτελέσματα από το GENETIC-1 το οποίο και

φαίνεται να μην είναι αρκετά αξιόπιστο. Έτσι για πληθυσμό μέχρι 25 έχουμε λύσεις οι οποίες είναι πολύ κοντά στις βέλτιστες και στις δύο περιπτώσεις. Ενώ το ποσοστό πάνω από την βέλτιστη λύση αυξάνει μέχρι 20% για πληθυσμό 100 για το GENETIC-2, το GENETIC-1 έχει μια απόκλιση αυξανόμενη από πληθυσμό 35 μέχρι 45 (μετά μειώνεται) μέχρι και 110% πάνω από την βέλτιστη τιμή. Μετά με τον ίδιο τρόπο μειώνεται για να υπάρχει και πάλι μια σύγκληση στην λύση για πληθυσμό 100.

Δεδομένου της προσπάθειας που χρειάζεται το GENETIC-1 για να αρχίσει την διαδικασία και την μαθηματικοποίηση του προβλήματος συμπεραίνουμε πως το GENETIC-2 είναι πιο εύχρηστο, με απλές μαθηματικές σχέσεις και πιο αξιόπιστο.

Αξίζει να τονισθεί ότι εδώ δεν γίνεται σύγκριση με άλλες μη γενετικές μεθόδους διότι η φύση του προβλήματος είναι τέτοια ώστε να μην ευνοεί τους ΓΑ και εξάλλου μόνο και μόνο ο χρόνος που χρειάζονται οι ΓΑ για να συγκλίνουν σε μια λύση είναι υπερβολικά μεγαλύτερος από τις άλλες μεθόδους.

Το ίδιο δεν ισχύει όπως έχουμε αναφέρει για μεγάλης κλίμακας προβλήματα ή προβλήματα μη γραμμικά , όπως θα δούμε παρακάτω.

13.8.2 Μη Γραμμικό Πρόβλημα Μεταφοράς

Η παρουσίαση του μη γραμμικού προβλήματος μεταφοράς είναι και αυτή μητρική. Ένα μητρώο $V = (x_{ij})$ ($1 \leq i \leq k$, $1 \leq j \leq n$) παρουσιάζει μια λύση (χρωματόσωμα). Αυτή την φορά x_{ij} είναι κάποιος πραγματικός αριθμός.

Έναρξη

Η έναρξη της διαδικασίας είναι παρόμοια με αυτή του γραμμικού προβλήματος. Όπως και στην γραμμική περίπτωση δημιουργείται μητρώο με $k + n - 1$ μη μηδενικά στοιχεία έτσι ώστε όλοι οι παράμετροι να ικανοποιούνται. Ενώ άλλες διαδικασίες έναρξης είναι εξίσου δυνατές, αυτή η μέθοδος θα δημιουργήσει μια λύση που είναι στην κορυφή της μονής κατεύθυνσης διαδικασίας που περιγράφει το κυρτό όριο (μέγιστο ή ελάχιστο δηλαδή) του χώρου των υπό περιορισμούς λύσεων.

Υπολογισμός

Εδώ έχουμε την ελαχιστοποίηση του κόστους μιας μη γραμμικής συνάρτησης για τα στοιχεία του μητρώου.

-Συνάρτηση A

Χωριστές συναρτήσεις τόξων εφαπτομένης χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση σε 5 βήματα. Η παράμετρος P_A χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της απόκλισης από το ταίριασμα. Το κόστος σε κάθε τόξο $[i,j]$ είναι :

$$c_{ij} * \left(\begin{array}{l} \arctan(P_A(x_{ij} - S))/\pi + 1/2 + \\ \arctan(P_A(x_{ij} - 2S))/\pi + 1/2 + \\ \arctan(P_A(x_{ij} - 3S))/\pi + 1/2 + \\ \arctan(P_A(x_{ij} - 4S))/\pi + 1/2 + \\ \arctan(P_A(x_{ij} - 5S))/\pi + 1/2 \end{array} \right)$$

-Συνάρτηση B

Η συνάρτηση τόξων εφαπτομένης χρησιμοποιήθηκε ξανά, και αυτή την φορά για να προσεγγίσει κάθε μια από τις τρεις κλίσεις. Η παράμετρος P_B χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της απόκλισης από το ταίριασμα. Το κόστος σε κάθε τόξο $[i,j]$ είναι :

$$c_{ij} * \left(\begin{array}{l} \left(\frac{x_{ij}}{S} \right) \left(\arctan(P_B x_{ij})/\pi + 1/2 \right) + \\ \left(1 - \frac{x_{ij}}{S} \right) \left(\arctan(P_B(x_{ij} - S))/\pi + 1/2 \right) + \\ \left(\frac{x_{ij}}{S} - 2 \right) \left(\arctan(P_B(x_{ij} - 2S))/\pi + 1/2 \right) \end{array} \right)$$

Τελεστές

Οι γενετικοί τελεστές είναι δύο. Μετάλλαξη και αριθμητική διασταύρωση.

Μετάλλαξη

Ορίζονται δύο είδη από τελεστές μετάλλαξης. Η μετάλλαξη-1, ο οποίος είναι ίδιος με την μετάλλαξη που χρησιμοποιείται στο γραμμικό πρόβλημα μεταφοράς και εισάγει όσα περισσότερα μηδενικά στο μητρώο είναι δυνατόν. Το δεύτερο είδος είναι η μετάλλαξη-2 είναι τροποποιημένη για να μην επιλέγει μηδενικά στοιχεία κατά την επιλογή τιμών από ένα διάστημα. Ακόμα η μετάλλαξη-2 μπορεί να διαθέτει την εξής τροποποίηση στην λογική της διαδικασίας :

Στο γραμμικό πρόβλημα (κλασική διαδικασία) είχαμε την έναρξη, την δήλωση ότι οι αριθμοί 1, $k \cdot n$ δεν έχουν ακόμα επισκεφτεί. Την δημιουργία των δεικτών i και j που θα σαρώνουν το μητρώο και την τοποθέτηση σε μια προσωρινή μεταβλητή το ελάχιστο που προκύπτει μέσω σάρωσης του μητρώου με τους παραπάνω i και j . Μετά αφαιρείται από τις πηγές και του προορισμούς αυτό το ελάχιστο, ενώ η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τους άλλους αριθμούς. Στην περίπτωση μη γραμμικού προβλήματος η μετάλλαξη-2 φέρει την εξής αλλαγή στην όλη ροή :

Κατά την τοποθέτηση της ελάχιστης τιμής στην προσωρινή μεταβλητή γίνεται ένας έλεγχος. Εάν ένα από τα i ή j είναι το τέλος της γραμμής ή στήλης τότε τα πράγματα συνεχίσουν κανονικά, όπως και παραπάνω. Στην αντίθετη όμως περίπτωση στην προσωρινή μεταβλητή τοποθετείται μια τυχαία τιμή από μηδέν έως την ελάχιστη τιμή που είχαμε βρει από την κανονική διαδικασία και έτσι συνεχίζεται η διαδικασία μέχρι τέλους. Βέβαια αυτές οι μεταλλάξεις προσφέρουν πραγματικούς αριθμούς αντί για ακεραίους. Το πρόβλημα που εμφανίζεται σχεδόν αμέσως είναι ότι μπορεί τα στοιχεία του μητρώου να μην ικανοποιούν τους περιορισμούς. Έτσι τελικά προβλέπουμε στο τέλος του μητρώου να ελέγχουμε τα στοιχεία και αν υπάρχει πρόβλημα να προσθέτουμε μια τιμή έως ότου ικανοποιούνται οι περιορισμοί.

Διασταύρωση

Αρχίζοντας με του δύο γονείς (μητρώα U και V) η διαδικασία διασταύρωσης θα δημιουργήσει δύο απογόνους X και Y , όπου :

$$X = c_1 \cdot U + c_2 \cdot V \text{ και}$$

$$Y = c_1 \cdot V + c_2 \cdot U$$

με $c_1, c_2 \geq 0$ και $c_1 + c_2 = 1$

Αφού είναι οι περιορισμοί θέλουν να υπάρχει ‘κορυφή’ και εάν οι γονείς είναι τότε είμαστε σίγουροι ότι και οι απόγονοι θα είναι ‘κορυφή’.

Παράμετροι

Όπως υπήρχαν διάφοροι παράμετροι στο γραμμικό πρόβλημα όπως το μέγεθος του πληθυσμού, μετάλλαξη και βαθμός διασταύρωσης έτσι υπάρχουν και εδώ αυτοί οι παράμετροι με την διαφορά ότι προστίθενται

τα c_1 , c_2 που είναι αναλογίες διασταύρωσης και m_1 που είναι η παράμετρος που καθορίζει την επενέργεια της μετάλλαξης-1, στις μεταλλάξεις.

Μετά το 'στήσιμο' των πακέτων GENETIC-2 και GAMS (πράγμα καθόλου εύκολο για το GAMS) έγιναν μερικές δοκιμές ως προς τις λύσεις που θα μπορούσαν να προσφέρουν.

Λόγω του ότι σε προβλήματα μη γραμμικά δεν είμαστε εντελώς σίγουροι για την βέλτιστη λύση αφού ακόμα και άλλους αλγόριθμους αν χρησιμοποιήσουμε κανείς δεν μας διαβεβαιώνει ότι ο αλγόριθμος δεν έχει 'κολλήσει' σε ένα βέλτιστο τοπικό, καταφεύγουμε λοιπόν και πάλι σε σύγκριση ανάμεσα σε προγράμματα όπως το GAMS και το GENOCOP.

Όπως προέκυψε από διάφορα παραδείγματα μεταξύ GAMS και GENETIC-2 υπάρχουν διαφορές στις λύσεις και μεγάλη σημασία έχει η συνάρτηση που χρησιμοποιείται. Η παρουσίαση περιορίστηκε σε δύο ειδών συναρτήσεων την A και B ενώ υπάρχουν ακόμα άλλες 4. Για αυτές πάντως μπορούμε να πούμε πως οι λύσεις που έδωσε το GENETIC-2 είναι καλύτερες κατά 24,5% και 11,5% από τις λύσεις που έδωσε το GAMS (σε σχέση πάντα με 'γνωστές' λύσεις).

Αν τώρα επιχειρήσουμε να κάνουμε μια ποιοτική σύγκριση μεταξύ και του GENOCOP θα παρατηρήσουμε ότι πρακτικά για την συνάρτηση A και B ,δεν υπάρχει διαφορά από την λύση του GENETIC-2 και μια μικρή απόκλιση κοντά στο 0,90%, αντίστοιχα . Όμως αυτό που πραγματικά αξίζει να σημειωθεί είναι ότι περιμένουμε λόγω του ότι και το GENOCOP είναι ΓΑ να υπάρχει συμφωνία στις λύσεις. Αυτό εν μέρει ισχύει όμως πρέπει να επισημανθεί ότι όπως και το GAMS και το GENOCOP είναι συστήματα που συνδέονται με την φύση του προβλήματος και οι παράμετροι θα πρέπει να αλλάζουν κάθε φορά για να αντιμετωπιστεί έτσι η φιλοσοφία του προβλήματος.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή το GENETIC-2 αποτελεί πακέτο για την επίλυση των προβλημάτων μεταφοράς και ως εκ τούτου έχει προβάδισμα στην αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, που σημαίνει ότι δεν μπορεί να γενικευθεί και προφανώς σε άλλα προβλήματα να μην μπορεί να βρει την βέλτιστη ή έστω και κάποια λύση, σε αντίθεση με τα GAMS και GENOCOP.

Η έρευνα συνεχίζεται όμως με τεχνικές γενικότερες για την επίλυση μητρώων που η βελτιστοποίηση του προβλήματος βασίζεται στους περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση [Michalewicz Z, 'Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs', Springer Verlag,(1992)].