



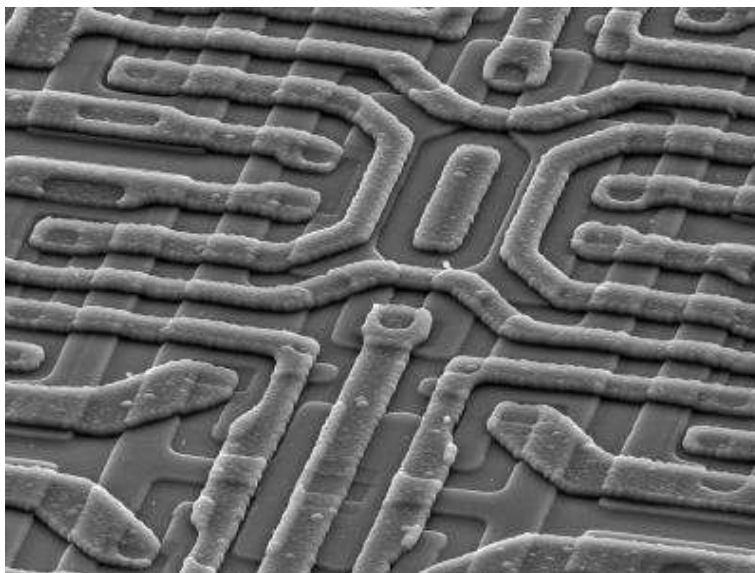
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ

ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

**Εκτίμηση της Δυναμικής Στοχαστικής
Ισορροπίας των Χρηστών σε Δίκτυα Αστικών
Μετακινήσεων**



Διπλωματική Εργασία

Μαλλιούρη Δήμητρα

Επιβλέπων Καθηγητής

Αθανάσιος Μπαλλής
Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

Στους γονείς μου

Ευχαριστίες

Καταρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συμφοιτήτριά μου Ορνέλα Τσοαντάρι για τη συνεργασία της, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της κωδικοποίησης του προτύπου το εκτελέσαμε μαζί. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κο. Αθανάσιο Μπαλλή, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ, για τη δυνατότητα και την υποστήριξη που μας προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας και την τριμελή εξεταστική επιτροπή, για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις που μου προσέφεραν. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Λουκά Δημητρίου, Επιστημονικό Συνεργάτη του ΕΜΠ, για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε, την υποστήριξη και κατανόησή του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ηθική υποστήριξη και συμπαράσταση κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι τα μεταφορικά συστήματα είναι πολύ σημαντικά για την ανάπτυξη της οικονομίας και τον πολιτισμό συνολικά. Δεδομένων του μεγέθους και της σημασίας της βιομηχανίας των μεταφορών, η ανάγκη για κατάλληλα και αναλυτικά πρότυπα του φαινομένου της εκδήλωσης της ζήτησης στα συστήματα μεταφορών και συνεπώς της κυκλοφορίας σε αυτά είναι ξεκάθαρη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τέτοια πρότυπα, ιδίως όταν είναι σε ικανοποιητικό βαθμό ρεαλιστικά, μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη βελτίωση της αξιοπιστίας των μεταφορικών συστημάτων (αξιοπιστία συνδεσιμότητας και αξιοπιστία απόδοσης).

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο σκοπό να παρουσιάσει έναν προσεγγιστικό μηχανισμό της λειτουργίας ενός διατροπικού αστικού μεταφορικού συστήματος μέσω ενός ημιδυναμικού στοχαστικού προτύπου καταμερισμού της κυκλοφορίας. Το μοτίβο του κυκλοφοριακού φόρτου σε ένα αστικό μεταφορικό δίκτυο εξετάζεται σαν ένα παραθετικό αποτέλεσμα δύο μηχανισμών, των αποφάσεων, όσον αφορά στη μετακίνηση, των χρηστών και της συμφόρησης.

Η αναλυτική προσέγγιση που περιγράφεται εδώ κάνει έναν παραλληλισμό μεταξύ των δύο αυτών μηχανισμών και της αλληλεπίδρασης της προσφοράς και της ζήτησης σε ένα κοινωνικό πεδίο. Έτσι, αντί για την ανάλυση της τιμής ενός προϊόντος και της ποσότητας που καταναλώνεται, η ανάλυση, εδώ, αφορά στο επίπεδο υπηρεσιών που παρέχει ένα μεταφορικό σύστημα (ή αντίστροφα του γενικευμένου κόστους μετακίνησης) και στους κυκλοφοριακούς φόρτους που εκδηλώνονται και αντιστοιχούν στις διάφορες διαδρομές του μεταφορικού δικτύου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης, το σύνολο, δηλαδή, των φόρτων και του κόστους μετακίνησης, βρίσκονται σε ισορροπία μεταξύ τους. Με άλλα λόγια, το κοινό πλαίσιο σε όλη την ανάλυση είναι η ισορροπία στις διάφορες μορφές και περιπτώσεις αυτής, βασισμένο στη σημασία και την εφαρμοσιμότητα των μεθόδων προσέγγισής της.

Επιπρόσθετα, το παρόν πρότυπο εξετάζει δύο κατηγορίες επιλογών των μετακινούμενων, την επιλογή της ώρας αναχώρησης και την επιλογή διαδρομής που συνδέει τα σημεία προέλευσης με τα σημεία προορισμού εντός του δικτύου. Οι δύο αυτές επιλογές γίνονται ταυτόχρονα, αμέσως πριν την αναχώρηση, και δεν αναθεωρούνται κατά τη διάρκεια της μετακίνησης. Αυτό καταλήγει να περιορίζει σε ένα βαθμό τη δυναμικότητα του προτύπου. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους του χαρακτηρισμού του προτύπου ως ημιδυναμικό ή ψευδοδυναμικό.

Συνεχίζοντας, το συγκεκριμένο πρότυπο αναζητά ένα καταμερισμό της κυκλοφορίας (ως απόρροια του φαινομένου της εκδήλωσης της ζήτησης για μετακίνηση) στις διάφορες ώρες αναχώρησης και δυνατές διαδρομές, υπό συνθήκες δυναμικής στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών. Πριν, όμως, από την περιγραφή του προτύπου, παρουσιάζεται ανασκοπικά η εξέλιξη της προτυποποίησης των μεταφορικών συστημάτων και οι βασικές ιδιότητές τους.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφονται πρώτα τα στατικά πρότυπα, τα οποία διαχωρίζονται σε ντετερμινιστικά και στοχαστικά, και έπειτα τα δυναμικά πρότυπα, τα οποία διαχωρίζονται και αυτά σε ντετερμινιστικά και στοχαστικά, και στους αντίστοιχους αλγόριθμους υλοποίησης. Η παρουσίαση του προτεινόμενου ημιδυναμικού στοχαστικού προτύπου ακολουθεί. Μέσα από αυτήν την αναφορά, διαφαίνεται και η ανάγκη για την ανάπτυξη όσο το δυνατόν πιο δυναμικών και ρεαλιστικών προτύπων. Αυτό δικαιολογείται ως εξής:

- Τυπικά, τα στατικά πρότυπα αγνοούν τη διάσταση του χρόνου και επικεντρώνουν τις περισσότερες αντιπροσωπευτικές συνθήκες.
- Η θεώρηση των μεταφορικών συστημάτων υπό συμφόρηση απαιτεί τη θεώρηση της εξάρτησης ως προς τον χρόνο

Επομένως, για την πιο ρεαλιστική και αναλυτική αναπαράσταση των δύο μηχανισμών, των επιλογών των χρηστών και της συμφόρησης, επιδιώκεται η ανάπτυξη και χρήση των δυναμικών στοχαστικών προτύπων καταμερισμού της κυκλοφορίας. Ωστόσο, αυτό δε σημαίνει ότι τα στατικά πρότυπα στερούνται πρακτικής αξίας. Τα τελευταία είναι αποδοτικά σε διαφορετικές περιοχές ενδιαφέροντος (π.χ. στο στρατηγικό σχεδιασμό, στην συγκριτική ανάλυση-comparative analysis, κ.α.).

ABSTRACT

It can be stated that transportation networks are very important for the welfare and finally the civil organization. Given the size and the importance of transport industry, the need for appropriate, analytical and realistic traffic forecasting models is clear. This is due to the fact that these models can have a significant contribution to the improvement of transportation systems' operation ability (e.g. connectivity and performance reliability).

This thesis presents a semi-dynamic stochastic traffic assignment model. The flow pattern throughout an urban network can be looked upon as a result of two competing mechanisms, users' travel decisions and congestion (network performance).

The analytical approach described in this thesis draws a parallel between the two mechanisms, mentioned before, and the interaction of supply and demand, extending the typical economic scheme of equilibrium among the price of a product and the quantity consumed. The analysis here looks at the transportation level of service (or inversely, generalized travel cost) and traffic flows. The results of the analysis include a set of traffic flows and a set of travel costs, which equilibrate with each other.

This thesis looks at two dimensions of travel decisions, the choice of departure time and the choice of route between an origin and a destination. These two choices are made simultaneously and just before the departure, by all users, and without re-consideration. The model, which is presented in this thesis, seeks a traffic assignment among the available routes and departures times, under the dynamic stochastic user optimum (DSUO) hypothesis.

Before the description of the model, this thesis seeks to summarize the recent progress in modeling of multi-modal transport systems. Firstly, static models are presented, which are separated into deterministic and stochastic static models. Secondly, dynamic models are presented, which are, also, separated into deterministic and stochastic dynamic models. Furthermore, this thesis concentrates on the corresponding solution algorithms of the aforementioned models, but not in detail. After the above, this thesis is concentrated on the description of the semi-dynamic stochastic traffic assignment model, which was mentioned earlier.

From the reference of all these models, the need for the deployment of dynamic stochastic models is obvious. This is mainly due to the fact that:

- Typically, static models do not include the time dimension

- The consideration of congested networks requires the consideration of time dependences

Dynamic stochastic traffic assignment models are, conclusively, more suitable for more realistic and analytical representation of the two mechanisms, users' travel decisions and congestion. However, it should be noted, that this does not mean that static models lack practical value. They preserve their usefulness in different fields of interest (e.g. strategic planning, comparative analysis etc).

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Ανασκόπηση της λειτουργίας μεταφορικών συστημάτων μητροπολιτικών περιοχών	11
1.1.1 Τα μέρη του συστήματος	11
1.1.2 Εξέλιξη των συστημάτων μεταφορών	16
1.1.3 Λειτουργία μεταφορικών συστημάτων και ανάπτυξη.....	17
1.2 Ανάπτυξη και διαχείριση: Στόχοι των πολιτικών διαχείρισης μητροπολιτικών συστημάτων	21
1.2.1 Παράδειγμα του φαύλου κύκλου της ανάπτυξης της υποδομής.....	22
1.2.2 Πολιτικές και στόχοι διαχείρισης μητροπολιτικών συστημάτων μετακινήσεων	24
1.3 Σκοπός και Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	29
2.1 Λειτουργία των δικτύων	29
2.1.1 Τα μέρη του συστήματος	29
2.1.2 Συναρτήσεις κόστους	30
2.1.3 Υποθέσεις για την λειτουργία των δικτύων. Η εισαγωγή των αβεβαιοτήτων.....	35
2.2 Πρότυπα δικτύων	39
2.2.1 Στατικά πρότυπα δικτύων	39
2.2.1.1 Στατικά Ντετερμινιστικά πρότυπα	40
2.2.1.2 Στατικά Στοχαστικά πρότυπα	54
2.2.2 Δυναμικά πρότυπα δικτύων	70
2.2.2.1 Δυναμικά Ντετερμινιστικά πρότυπα.....	71
2.2.2.2 Δυναμικά Στοχαστικά πρότυπα	87

2.3 Παρουσίαση της λειτουργίας των μεταφορικών δικτύων με βάση την θεωρία του βέλτιστου ελέγχου.....	97
2.3.1 Συνεχής και διακριτός βέλτιστος έλεγχος.....	98
2.4 Κριτική και επιλογή προτύπου στην παρούσα διπλωματική εργασία.....	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΗΜΙΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	103
3.1 Παραδοχές-υποθέσεις.....	103
3.1.1 Αναγνώριση των κρίσιμων παραμέτρων	107
3.1.2 Περιγραφή των απαραίτητων διαθέσιμων στοιχείων	108
3.1.2.1 Δεδομένα Ζήτησης.....	109
3.1.2.2 Δεδομένα δικτύου	110
3.2 Μαθηματικό υπόβαθρο	110
3.2.1 Διατύπωση του προτύπου	116
3.2.1.1 Το υποσύστημα των δυναμικών επιλογών των χρηστών	119
3.2.1.2 Το υποσύστημα της δυναμικής της κυκλοφορίας.....	121
3.2.2 Συσχέτιση παραμέτρων.....	122
3.3 Προσέγγιση στη δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών-υποθέσεις	126
3.4 Σχολιασμός προτύπου με βάση τη θεωρία του βέλτιστου ελέγχου.....	128
3.5 Βαθμονόμηση του προτύπου.....	134
3.6 Επανεκτίμηση της ζήτησης	135
3.7 Αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος βαθμονόμησης και επανεκτίμησης της ζήτησης.....	136
3.8 Περιορισμοί για την χρήση του προτύπου.....	136
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	140
4.1 Περιοχή μελέτης	140
4.2 Κωδικοποίηση του δικτύου.....	140
4.3 Δίκτυο Ανάλυσης	145
4.4 Προσαρμογή προτύπου στο δειγματικό χώρο	146
 <i>Η χρησιμότητα αφίξεως υπολογίστηκε με βάση τη ζήτηση αφίξεως στον προορισμό. Η ζήτηση αφίξεως είναι σταθερή από μέρα σε μέρα και προκύπτει</i>	

από τη συνολική ζήτηση αναχώρησης (και από τα τρία ζεύγη Π-Π) μετατοπισμένη προς τα δεξιά κατά μία αναμενόμενη διάρκεια μετακίνησης, περίπου ίση με 15 min.	149
4.5 Προσαρμογή παραμέτρων-αξιοπιστία	150
4.6 Η διαδικασία της βαθμονόμησης του προτύπου.....	167
4.6.1 Περιγραφή των μετρήσεων της κυκλοφορίας.....	169
4.6.2 Τα αποτελέσματα των βημάτων της βαθμονόμησης	170
4.7 Τα αποτελέσματα της επανεκτίμησης της ζήτησης.....	172
4.8 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	173
4.8 Στοιχεία Προγραμματισμού	180
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	181
5.1 Σύνοψη	181
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	185
5.3.1 Προτάσεις για πιο δυναμικά πρότυπα.....	186
5.3.2 Συστήματα πληροφόρησης και εκπαίδευση των μετακινούμενων	189
5.3.3 Έξυπνα/Ευφυή συστήματα οχημάτων-οδών	190
5.3.4 Το παρόν πρότυπο ως βάση για την εφαρμογή νέων στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας	191
5.3.5 Στροφή προς τον αλτρουιστικό ορθολογισμό-βέλτιστη λύση του συστήματος.....	192
5.3.6 Εσωτερική του εξωτερικού κόστους.....	193
5.3.7 Χρήση προτύπου για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μεταφορικών συστημάτων.....	193
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	194
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	198
I. Δεδομένα προσαρμογής προτύπου.....	198
II. Κωδικοποίηση στην υπολογιστική πλατφόρμα MATLAB	198

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανασκόπηση της λειτουργίας μεταφορικών συστημάτων μητροπολιτικών περιοχών

1.1.1 Τα μέρη του συστήματος

Η έμφυτη κινητικότητα του ανθρώπου και η ανάγκη για μετακινήσεις προσώπων και αγαθών οδήγησε στην ανάπτυξη και το σχεδιασμό μεταφορικών συστημάτων. Τα συστήματα μεταφορών διαφέρουν ως προς την έκταση των περιοχών που εξυπηρετούν. Με βάση το κριτήριο αυτό, οι μεταφορές διακρίνονται σε αστικές, υπεραστικές και διεθνείς. Εξετάζοντας τις μεταφορές, είναι χρήσιμο να γίνει και ο διαχωρισμός μεταξύ των συστημάτων που επικεντρώνονται στις μετακινήσεις επιβατών (επιβατικές μεταφορές) και των συστημάτων που επικεντρώνονται στα διακινούμενα φορτία (εμπορευματικές μεταφορές). Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αναφορά στις αστικές επιβατικές μεταφορές και ειδικότερα σε αυτές των μητροπολιτικών περιοχών.

Η μελέτη των μεταφορικών συστημάτων συνιστά μια σημαντικά απαιτητική επιστήμη. Αυτό οφείλεται στην εκτενή αλληλεπίδραση μεταφορών και ευρύτερων κοινωνικών ζητημάτων, καθώς οι μεταφορές χαρακτηρίζονται από έντονες οικονομικές, περιβαλλοντικές και πολιτικές συνέπειες, που θα αναλυθούν παρακάτω, καθώς και στα αναλυτικά ‘εργαλεία’ που απαιτεί μία προσπάθεια σχεδιασμού/διαχείρισής τους. Είναι κρίσιμο να επισημανθούν οι θεμελιώδεις έννοιες των μεταφορικών συστημάτων. Υπό το πνεύμα αυτό θα γίνει αναφορά στα μέρη, και τα στοιχεία γενικότερα, του μεταφορικού συστήματος από μια εσωτερική αλλά και μια εξωτερική προσέγγιση.

I. Τα μέρη του συστήματος: Μια εσωτερική προσέγγιση

Ξεκινώντας με μια εσωτερική προσέγγιση, τα μεταφορικά συστήματα αποτελούνται από την υποδομή, τα οχήματα αλλά και τα καύσιμα καθώς και τον έλεγχο, τις επικοινωνίες και τα συστήματα εντοπισμού. Παρακάτω θα αναλυθούν κάπως συνοπτικά αυτά τα επιμέρους στοιχεία.

Υποδομή

Το σταθερό στοιχείο του συστήματος μεταφορών συνιστά η υποδομή, που αποτελείται από τις οδούς, τους τερματικούς σταθμούς (αλλά και γενικά τους σταθμούς). Η ανάλυση γίνεται

μέσω της προσομοίωσης, μία τακτική η οποία χρησιμοποιεί τη θεωρία δικτύων. Δίκτυα μεταφορών αποτελούν το οδικό, σιδηροδρομικό, ποδηλατοδρόμιο, πεζοδρόμια κλπ.

Οι αυτοκινητόδρομοι είναι γενικής χρήσης οδοί· οποιοδήποτε όχημα με ελαστικά στους τροχούς μπορεί να περάσει από αυτούς. Οι σιδηρόδρομοι, αντιθέτως, είναι ειδικής χρήσης, με την έννοια ότι μόνο σιδηροδρομικά οχήματα με την κατάλληλη απόσταση μεταξύ των τροχών (μετατρόχιο) μπορούν να χρησιμοποιήσουν την υποδομή τους (Sussman, 2003).

Συνεχίζοντας, οι τερματικοί σταθμοί (στάσεις λεωφορείων, χώροι στάθμευσης, κλπ.) συμβάλουν σημαντικά στην οργάνωση των αστικών μεταφορών, καθορίζοντας βασικά τα σημεία αλλαγής μέσου, τα σημεία προέλευσης και προορισμού και τις στάσεις των μέσων μεταφοράς. Επιπλέον οι τερματικοί σταθμοί συχνά παρέχουν και λειτουργία αποθήκευσης, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποθηκεύσουν αυτοκίνητα, ή οχήματα γενικότερα, κατά τη διάρκεια της νύχτας, σχολικά οχήματα κατά τη διάρκεια του θέρους, βαγόνια κ.λπ. Όσον αφορά στους σταθμούς σε ένα υπόγειο σύστημα, οι επιβάτες μπορούν να εισέλθουν και να εξέλθουν.

Οχήματα

Τα οχήματα συνιστούν επιμέρους κινητά στοιχεία. Τα διάφορα μέσα μεταφορών (λεωφορεία, επιβατικά οχήματα, φορτηγά, σιδηροδρομικά οχήματα) εξυπηρετούν αστικές μετακινήσεις με τη χρήση ενός ή περισσότερων μέσων. Ανάλογα με τη χωρητικότητα, τα μέσα μεταφορών διακρίνονται σε μαζικά μέσα μεταφορών (MMM) και σε μικρά επιβατικά οχήματα. Οι δυο αυτές κατηγορίες έχουν θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά. Τα MMM έχουν το πλεονέκτημα της μεγάλης χωρητικότητας και της μικρότερης κατανάλωσης ενέργειας ανά μεταφερόμενο επιβάτη ή μονάδα φορτίου. Από την άλλη, τα επιβατικά οχήματα παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της ευελιξίας στις διαδρομές τους και δίνουν τη δυνατότητα εξυπηρέτησης από πόρτα σε πόρτα. (Φραντζεσκάκης κ.α., 1997)

Καύσιμα

Τα καύσιμα μπορεί να είναι βενζίνη, φυσικό αέριο, καύσιμο ντίζελ, αιθανόλη, μεθανόλη, άνθρακας, υδρογόνο κ.λπ. Το κόστος και η απόδοση των καυσίμων έχουν ιδιαίτερη σημασία. Επίσης, οι περιβαλλοντολογικές συνέπειες των συστημάτων μεταφορών είναι στενά συνυφασμένες με τον τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιείται (Sussman, 2003).

Ο ηλεκτρισμός είναι καύσιμο. Το σύστημα υπόγειου σιδηροδρόμου (π.χ. το μετρό της Αθήνας) λειτουργεί με ηλεκτρική ενέργεια, όπως τα υπεραστικά τρένα στην Ιαπωνία, τη Γαλλία και σε περιορισμένη έκταση στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Ο ηλεκτρισμός

παράγεται κεντρικά –για παράδειγμα από άνθρακα- και μεταφέρεται μέσω γραμμών υψηλής τάσης για να επιτρέψει την κίνηση των οχημάτων με ηλεκτρικό κινητήρα. Αντίστοιχα, τα ηλεκτρικά οχήματα λειτουργούν με ηλεκτρικό ρεύμα που αποθηκεύεται σε μπαταρίες που κινούν την ηλεκτρική μηχανή.

Η ηλιακή ενέργεια είναι ένα δυνατό καύσιμο για τη λειτουργία αυτοκινήτων με ηλεκτρικές μηχανές, που είναι εφοδιασμένα με ηλιακά κύτταρα και μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρισμό. Η ιδέα των αυτοκινήτων, που κινούνται με μπαταρία και λειτουργούν σε συνδυασμό με ηλιακούς συλλέκτες για επαναφόρτιση της μπαταρίας, αποτελεί ενδεχομένως μια σημαντική επινόηση (Sussman, 2003).

Η μηχανή εσωτερικής καύσης είναι το κέντρο της παγκόσμιας βιομηχανίας αυτοκινήτων (Sussman, 2003). Στη συντριπτική πλειοψηφία των αυτοκινήτων χρησιμοποιούνται μηχανές εσωτερικής καύσης(ελλ. MEK, αγγλ.ICE-Internal Combustion Engines), που λειτουργούν με βενζίνη. Ωστόσο, η έλλειψη σε πετρέλαιο, σε συνδυασμό με τις έντονες περιβαλλοντολογικές ανησυχίες, συνιστά κίνητρο έρευνας για εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Αποτέλεσμα τέτοιας έρευνας αποτελούν τα υβριδικά οχήματα. Τα συγκεκριμένα οχήματα διαθέτουν MEK όσο και μπαταρίες που παρέχουν ενέργεια σε ηλεκτρικούς κινητήρες. Χάρη στις μπαταρίες αυτές βελτιώνεται σημαντικά η απόδοση των οχημάτων στην καύση βενζίνης.

Έλεγχος, Επικοινωνίες και Συστήματα Εντοπισμού

Όσον αφορά στα ανθρώπινα στοιχεία ελέγχου των οχημάτων, της υποδομής και του συνολικού δικτύου των μεταφορών, ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο ρυθμιστής κυκλοφορίας ταξί, που κατανέμει τους επιβάτες σε συγκεκριμένα οχήματα. Εκτός από τα ανθρώπινα στοιχεία ελέγχου, υπάρχουν και τα τεχνολογικά, όπως η σηματοδότηση και η σήμανση των δρόμων (στατική ή μεταβλητή).

Η κύρια λειτουργία μιας σηματοδότησης είναι να αλλάζει διαδοχικά την προτεραιότητα στην κίνηση των διαφόρων ρευμάτων οχημάτων ή πεζών στην περιοχή ενός κόμβου ή σε άλλες θέσεις του οδικού δικτύου (π.χ., διαβάσεις πεζών, γέφυρα μιας λωρίδας κυκλοφορίας με εναλλασσόμενη κατεύθυνση κίνησης) (Φραντζεσκάκης κ.α., 2009). Μια κατάλληλα μελετημένη και εγκατεστημένη σηματοδότηση είναι ικανή να περιορίσει την κυκλοφορία σε ορισμένες κατευθύνσεις και να αποφευχθεί η συμφόρηση στα κατάντη, να περιορίσει τον αριθμό των ατυχημάτων και να ευνοήσει τους πεζούς και τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς με την εξασφάλιση προτεραιότητας.

Μια σχετικά νέα τεχνολογία, που βρίσκει όλο και μεγαλύτερη απήχηση στη βιομηχανία των μεταφορών, είναι οι δορυφορικές επικοινωνίες και το Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης (GPS-Global Positioning System), ως ένα σύστημα εντοπισμού και καθοδήγησης για τις επιχειρήσεις των μεταφορών. Με το GPS παρέχεται η δυνατότητα

εντοπισμού συγκεκριμένων οχημάτων και βοηθάει οδηγούς στην εκτέλεση της διαδρομής τους. Για παράδειγμα, οι οδηγοί έχοντας ένα αισθητήρα GPS, θα επέτρεπε σε ένα κεντρικό σύστημα να εντοπίσει τα οχήματα και να κάνει εκτιμήσεις σχετικά με την καταλληλότερη διαδρομή από την προέλευση έως τον προορισμό.

II. Τα μέρη του συστήματος: Μια εξωτερική προσέγγιση

Εκτός από τα εσωτερικά στοιχεία υπάρχουν και εξωτερικοί παράγοντες στο μεταφορικό σύστημα -οργανισμοί και άλλες οντότητες- που πρέπει να ληφθούν υπόψη, όταν γίνεται αναφορά στη συνολική επιχείρηση των μεταφορών. Στους εξωτερικούς παράγοντες συγκαταλέγονται το κράτος, ο ανταγωνισμός, η χρηματοοικονομική αγορά, οι εμπλεκόμενοι/άμεσα ενδιαφερόμενοι, το ευρύ κοινό και το σημαντικότερο στοιχείο, ο χρήστης.

Κράτος

Το πρώτο εξωτερικό στοιχείο είναι το κράτος. Κάθε ιδιωτική εταιρία μεταφορών είναι υποχρεωμένη να πληρώνει στο κράτος φόρους. Από την άλλη μεριά το κράτος ενδιαφέρεται για την ασφαλή λειτουργία της επιχείρησης. Υπάρχει λοιπόν μια σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ ιδιωτικών κερδοσκοπικών οργανισμών, όπως οι εταιρίες εκμετάλλευσης της σιδηροδρομικής υποδομής και οι αεροπορικές εταιρίες, με τους κρατικούς οργανισμούς που, εκτός της ασφάλειας που προαναφέρθηκε, ενδιαφέρονται και για την οικονομική προστασία του χρήστη/καταναλωτή. Επιπλέον, το κράτος αποθαρρύνει κάποια ιδιωτική εταιρία μεταφορών να αποκτά μονοπωλιακή ισχύ και τότε προσπαθεί να ασκήσει ρυθμιστικό έλεγχο. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο κρατικός φορέας παρέχει κάποιες υποδομές (π.χ. δημόσιους αυτοκινητόδρομους) σε διάφορες ιδιωτικές μεταφορικές επιχειρήσεις, έναντι αντιτίμου ή παρέχει ο ίδιος υπηρεσίες.

Ανταγωνισμός

Ένα δεύτερο στοιχείο στα μεταφορικά συστήματα συνιστά ο ανταγωνισμός. Παρατηρείται ανάμεσα σε ομοειδείς εταιρείες/επιχειρήσεις μεταφορών, που παρέχουν δηλαδή παρόμοιες υπηρεσίες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ανταγωνιστές των επιχειρήσεων των μεταφορών μπορούν να θεωρηθούν και οι σύγχρονοι τρόποι επικοινωνίας. Τα μηχανήματα τηλεομοιοτυπίας (fax), οι ταχείες ταχυδρομικές υπηρεσίες και η ηλεκτρονική αλληλογραφία (e-mail) μπορούν να δώσουν αξιόπιστη αλλά και φθηνή πληροφόρηση. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η εξέλιξη των μέσων επικοινωνίας γίνεται όλο και πιο ανταγωνιστική και ενδέχεται να μειώνει όλο και πιο πολύ τη ζήτηση για μεταφορά (π.χ. τηλεργασία). Επιπλέον

οι μετακινήσεις είναι πιθανόν να είναι ανταγωνιστικές με άλλες χρήσεις του εισοδήματος, όπως τα χρήματα για εκπαίδευση, φαγητό και ψυχαγωγία.

Χρηματοοικονομική Αγορά

Ιδιωτικές εταιρίες μεταφορών έχουν εισαχθεί σε διάφορες χρηματιστηριακές αγορές, επηρεάζονται από την πορεία των εσόδων βραχυπρόθεσμα (στο επόμενο οικονομικό τρίμηνο) και τις επιπτώσεις της στη χρηματιστηριακή τιμή της μετοχής τους (Sussman, 2003).

Εμπλεκόμενοι/Άμεσα Ενδιαφερόμενοι

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ενδιαφερόμενων για τις επιχειρήσεις μεταφορών και τις λειτουργικές και επενδυτικές τους πρακτικές ή επιλογές. Ένας τέτοιος οργανισμός είναι η περιβαλλοντική κοινότητα. Τμήμα της συγκεκριμένης κοινότητας αποτελούν οι Μη-Κυβερνητικές Οργανώσεις (π.χ. Greenpeace κ.α.), που ασκούν πολιτική πίεση με σκοπό την ελαχιστοποίηση των αρνητικών περιβαλλοντικών απορροιών των μεταφορών.

Οι άνθρωποι που ζουν κοντά στη μεταφορική υποδομή ανησυχούν για την ποιότητα της ζωής τους, καθώς αυτή επηρεάζεται από την ηχητική και ατμοσφαιρική ρύπανση.

Ευρύ Κοινό

Το ευρύτερο κοινό ενδιαφέρεται επίσης για τις λειτουργίες των μεταφορικών συστημάτων. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι οι μεταφορές είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την οικονομία, την ποιότητα ζωής και την εθνική ασφάλεια.

Χρήστης

Ο χρήστης αποτελεί το σημαντικότερο εξωτερικό στοιχείο των μεταφορικών συστημάτων. Αρχικά δίνεται ο ορισμός του χρήστη ως το πρόσωπο ή ο οργανισμός που αγοράζει υπηρεσίες μεταφορών. Ο χρήστης και οι ανάγκες του είναι θεμελιώδεις για την ύπαρξη των οργανισμών μεταφορών.

1.1.2 Εξέλιξη των συστημάτων μεταφορών

Στη παρούσα παράγραφο θα γίνει ιστορική αναφορά της εξέλιξης των μεταφορών. Από την αρχαιότητα η περιέργεια και η ανάγκη του ανθρώπου για να επικοινωνήσει με τον κόσμο τον οδήγησαν στην εφεύρεση των μέσων μεταφορών. Τα πλοία -τα οποία στην αρχαιότητα αποτελούσαν το κύριο μέσο στο εμπόριο και στον πόλεμο- και οι πρωτοπόρες άμαξες υπήρξαν τα πρώτα μέσα μεταφοράς. Μέχρι τα τέλη του 19^{ου} αιώνα η μεταφορά φορτίων, εμπορευμάτων και προσώπων διεξάγονταν με πλοία, άμαξες ή άλογα σε χωματόδρομους ή λιθόστρωτους δρόμους που χαρακτήριζαν την υποδομή της εποχής. Οι περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις στις αστικές περιοχές των υπηλατών σχετίζονταν με τα περιττώματα που άφηναν πίσω τους τα άλογα, αλλά και τη θνησιμότητα που αυτά παρουσίαζαν. Η απομάκρυνση και η ταφή των κουφαριών των νεκρών αλόγων αποτελούσε μείζον περιβαλλοντολογικό και δημόσιας υγείας ζήτημα. Είναι προφανές ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μέσων μεταφοράς ήταν εξ αρχής ένα σημαντικό ζήτημα.

Κοιτάζοντας το άλογο ως μέσο μεταφοράς μπορούν να σημειωθούν τα παρακάτω. Η ενέργεια που παρέχεται στο άλογο είναι η τροφή του. Η ισχύς είναι βιολογικής φύσης. Υπάρχουν επίσης τα περιττώματα που βαραίνουν το περιβάλλον. Με αναφορά στο κόστος της μετακίνησης με ιππλάτο, οι μεταφορές ήταν πολύ πιο ακριβές από ότι είναι στη σημερινή εποχή. Η τάση, που αξίζει επίσης να σημειωθεί μετά από μια μεγάλη χρονική περίοδο από την εποχή του αλόγου, είναι η σημαντική αύξηση της ασφάλειας.

Η εξέλιξη των μεταφορών στον βιομηχανικό κλάδο οδήγησε στην κατασκευή της συγκοινωνιακής υποδομής με αποτέλεσμα να εξοπλίσει τις μητροπολιτικές περιοχές της εποχής με τα πρώτα μέσα μαζικής μεταφοράς. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα τα μεγαλύτερα μητροπολιτικά κέντρα είχαν ήδη αρχίσει την κατασκευή των συγκοινωνιακών δικτύων σταθερής τροχιάς. Έπειτα, η ανάπτυξη της αυτοκινητοβιομηχανίας έφερε τη μεγαλύτερη αλλαγή στην ιστορία των μεταφορών. Με την ιδιωτικοποίηση του αυτοκινήτου και τη δυνατότητα απόκτησής του, η ζήτηση για μετακινήσεις αυξήθηκε σημαντικά με αποτέλεσμα την ανάγκη ενός νέου σχεδιασμού μεταφορικού συστήματος. Η εξέλιξη στο χώρο της βιομηχανίας είχε σαν συνέπεια την άνθηση του διεθνούς εμπορίου και τη διεύρυνση των μετακινήσεων μεταξύ των χωρών. Ειδικά, τις τελευταίες δεκαετίες, όπου τα περισσότερα κράτη βρίσκονται σε ειρηνικές σχέσεις μεταξύ τους, η ανταλλαγή εμπορίου και παραγωγής αποτελεί την κύρια αιτία στην αύξηση της οικονομικής ευχέρειας των κρατών, την οποία ακολουθούν η αύξηση της ζήτησης μεταφορών και η ανάπτυξη του μεταφορικού συστήματος.

Στο τελευταίο τμήμα του δεκάτου ενάτου αιώνα εφευρέθηκαν κι αναπτύχθηκαν τα ποδήλατα. Αυτά αποτελούν ένα σημαντικό μέσο σε κάποιες πόλεις του κόσμου. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι οι μετακινήσεις με ανθρώπινη ενέργεια (ποδήλατο, πεζή) γνωστές και ως

πράσινες μεταφορές ή ήπιες μεταφορές (green transport, soft transport), αποτελούν αναμφισβήτητα τον πιο φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο μετακίνησης για μικρές αποστάσεις. (Φραντζεσκάκης κ.α., 1997)

Με αναφορά στην εξέλιξη και την ανάπτυξη κάποιων μητροπολιτικών περιοχών διαφόρων χωρών, οι ενδοαστικές μετακινήσεις μέχρι την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης ήταν μικρές αποστάσεις λόγω της τότε συγκρότησης της πόλης. Πέρα από τις μικρές αποστάσεις μέσα στην πόλη, δεν υπήρχε γενικά έντονο πρόβλημα μετακινήσεων μια και οι χώροι εργασίας ήταν συνήθως συνδεδεμένοι με τον τόπο κατοικίας. Διάφορες πολιτικές και κοινωνικές εξελίξεις που κατά καιρούς επακολούθησαν την ανθρώπινη κοινωνία ήταν αιτίες για το φαινόμενο της εσωτερικής μετανάστευσης από τις αγροτικές περιοχές στις πόλεις (1) και από την καρδιά των πόλεων σε προάστια στην περιφέρεια των μητροπολιτικών περιοχών (2). Συνέπεια των δύο αυτών τάσεων του πληθυσμού συνιστά η ανάπτυξη των «μητροπόλεων», καθώς οι κοινωνίες γίνονται λιγότερο αγροτικές και περισσότερο προσανατολισμένες στη βιομηχανική παραγωγή και στην ένταση του κεφαλαίου. Η επέκταση του αστικού κέντρου οδήγησε στη μεγέθυνση των αποστάσεων με αποτέλεσμα την ανάγκη της μελέτης και τον σχεδιασμό του ευρύτερου μεταφορικού συστήματος.

1.1.3 Λειτουργία μεταφορικών συστημάτων και ανάπτυξη

Οι μεταφορές είναι πολυδιάστατες. Η ανάπτυξη και λειτουργία των μεταφορικών συστημάτων πραγματοποιείται από οργανισμούς/φορείς που δουλεύουν εντός ενός σύνθετου κοινωνικού, πολιτικού και οικονομικού περιβάλλοντος. Επιπρόσθετα, τα παραπάνω αποτελούν πεδίο εφαρμογής των αρχών της επιστήμης και της τεχνικής, με σκοπό την εξασφάλιση ασφαλούς, άνετης, ταχείας και οικονομικής μεταφοράς προσώπων και αγαθών, με τις λιγότερες δυνατές δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον (ατμοσφαιρική ρύπανση, θόρυβος, αισθητική ρύπανση).

I. Μεταφορές και κοινωνικό-πολιτικό-οικονομικό πλαίσιο

Όπως προαναφέρθηκε, δημόσιοι (κράτος, δημόσιες υπηρεσίες) αλλά και ιδιωτικοί οργανισμοί (ιδιωτικές επιχειρήσεις μεταφορών) αποτελούν κύριους παράγοντες του μεταφορικού συστήματος. Υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ ιδιωτικών κερδοσκοπικών εταιρειών με τους κρατικούς οργανισμούς. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο δημόσιος τομέας παρέχει κάποιες από τις υποδομές που χρησιμοποιεί ο ιδιωτικός τομέας έναντι κάποιας αμοιβής. Για παράδειγμα μια εταιρεία οδικών μεταφορών κινείται σε δημόσιους

αυτοκινητόδρομους και μια αεροπορική εταιρεία συνήθως λειτουργεί χρησιμοποιώντας δημόσια αεροδρόμια και δημόσιο σύστημα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας. Φυσικά ο δημόσιος τομέας μπορεί να παρέχει και την υπηρεσία ο ίδιος, γεγονός το οποίο συμβαίνει στην περίπτωση συστημάτων επιβατικών μεταφορών (λεωφορεία, Μετρό κ.α.).

Επίκαιρο παράδειγμα συνιστά το έργο της Αττικής Οδού. Η κατασκευή του συγκεκριμένου έργου διεκπεραιώθηκε από την αλληλεπίδραση της κεντρικής εξουσίας και των τοπικών αρχών, της περιφέρειας Αττικής και του Δήμου Αθηνών. Το έργο ανέλαβε ιδιωτική κατασκευαστική εταιρεία εντός ενός πλαισίου ΣΔΠ (Σύμπραξη-Δημοσίου-Ιδιωτικού-Τομέα). Τέλος δεν πρέπει να παραληφθεί το ενδιαφέρον των Αθηναίων εργαζομένων και «γειτνιαζόντων» στην υποδομή που ανησυχούσαν για τις απόρροιες που θα είχε η κατασκευή και η λειτουργία του έργου στις συνθήκες εργασίας και τη ποιότητα ζωής της γύρω περιοχής.

Με αφορμή το τελευταίο και συνεχίζοντας την αναφορά στα κοινωνικά ζητήματα των μεταφορών, δεν μπορούν να παραληφθούν οι έντονες οικονομικές, περιβαλλοντολογικές και πολιτικές συνέπειές τους. Οι χρήστες των μεταφορικών μέσων, οι άνθρωποι που εργάζονται και που ζουν δίπλα σε κάποια μεταφορική υποδομή και γενικότερα ο αστικός πληθυσμός ανήκουν στους άμεσα ενδιαφερόμενους.

II. Χρήσεις γης και μεταφορές

Η χρήση γης και η ανάπτυξη των μεταφορικών συστημάτων είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με σχέση αμφίδρομη. Ο παραπάνω ισχυρισμός αναλύεται παρακάτω.

Οι διάφορες χρήσεις γης ευνοούν την ανάπτυξη μεταφορικών συστημάτων. Οι χρήσεις γης που αναπτύσσονται στα διάφορα μέρη δημιουργούν τις ανάγκες και κατ' επέκταση τους σκοπούς των μετακινήσεων. Έτσι παρατηρούνται μετακινήσεις προς και από την κατοικία, προς και από την εργασία αλλά και για άλλους οικογενειακούς, προσωπικούς, πολιτικούς, εκπαιδευτικούς, θρησκευτικούς και κοινωνικούς λόγους, όπως και για αναψυχή. Ειδικά όσον αφορά στην εργασία, έχουν παρατηρηθεί σημαντικές πιέσεις στα μεταφορικά συστήματα από ανθρώπους που μετακινούνται προς και από τον τόπο εργασίας. Σημειώνεται ότι, τις τελευταίες δεκαετίες, ο αριθμός των ατόμων που μεταβαίνουν στην εργασία έχει αυξηθεί σημαντικά. Σε αυτό συνέβαλλε και η αύξηση των εργαζόμενων γυναικών, οι οποίες αποτελούν όλο και περισσότερο μια μεγάλη δημογραφική δύναμη.

Επίσης η ανάπτυξη της *υποδομής μεταφορών* επηρεάζει την *ανάπτυξη των χρήσεων γης/δραστηριοτήτων*. Όσον αφορά στις επιλογές κατοικίας και εργασίας, ο πολεοδομικός «κανόνας των 45 λεπτών» συνιστά μια «σταθερά» καθ' όλη τη διάρκεια της ιστορίας του ανθρώπινου γένους. Με άλλα λόγια, οι άνθρωποι είχαν και έχουν την τάση να εγκαθίστανται εκεί όπου θα χρειαζόταν μετακίνηση διάρκειας περίπου 45 λεπτών για να μεταβούν από τον τόπο διαμονής στον τόπο εργασίας (Manheim, 1979). Ο συγκεκριμένος κανόνας έχει σχετικά

διατηρηθεί σταθερός. Εξαιτίας, ωστόσο, της εξέλιξης των μεταφορικών μέσων και της υποδομής, το μέγεθος των πόλεων έχει μεγαλώσει σημαντικά. Έτσι, η αστική εξάπλωση και η εξάπλωση συνεπώς και των δραστηριοτήτων επιτεύχθηκε λόγω της ανάπτυξης των μεταφορικών συστημάτων.

Συνεχίζοντας, εξετάζοντας τη σχέση μεταξύ *χρήση γης, μεταφορών* και οικονομικής ανάπτυξης, η θεμελιώδης οικονομική θεωρία υποστηρίζει ότι οι αποτελεσματικές και οικονομικές υπηρεσίες μεταφορών επιτρέπουν να συμβεί μια συγκέντρωση παραγωγής σε περιοχές όπου η παραγωγή μπορεί να επιτευχθεί πιο αποτελεσματικά. Για παράδειγμα, ας υποθεθεί ότι μια πόλη Α μπορεί να παράγει πιο αποτελεσματικά αγροτικά προϊόντα σε σύγκριση με μια άλλη πόλη Β. Αν οι μεταφορές που συνδέουν τις δύο αυτές πόλεις είναι φθηνές, τότε μπορούν τα αγροτικά προϊόντα της Α να στέλνονται στη Β, με αποτέλεσμα την συγκέντρωση της παραγωγής στην πόλη Α η οποία προορίζεται τόσο για την τοπική κατανάλωση όσο και για την κατανάλωση στην πόλη Β. Τέλος με αύξηση του όγκου της παραγωγής που μεταφέρεται μπορεί να καταστήσει την παροχή μεταφορικών υπηρεσιών μια σημαντική οικονομική δύναμη.

Διαφαίνεται, συνεπώς, η αμφίδρομη σύνδεση μεταφορών και χρήσης γης ή αλλιώς δραστηριοτήτων.

III. Παράγοντες που διευκόλυναν την ανάπτυξη των μεταφορών

Στους παράγοντες που έδωσαν ώθηση στις μεταφορές ανήκει η τεχνολογική ανάπτυξη, η κυριαρχία των αυτοκινήτων, ο φόρος της βενζίνης, ο κατασκευαστικός τομέας, η βιομηχανία των μεταφορών και οι περιβαλλοντολογικές ανησυχίες.

Η τεχνολογική ανάπτυξη

Μετά το άλογο, η ανάπτυξη του ηλεκτρισμού, η παροχή ρεύματος σε τρόλεϊ και άλλα σιδηροδρομικά οχήματα αποτελούν σημαντικά βήματα στην ανάπτυξη των μεταφορικών συστημάτων. Αυτά τα τεχνολογικά επιτεύγματα συνέβαλαν σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση των ταχυτήτων, της αξιοπιστίας, της ασφάλειας και στη μείωση του κόστους (εσωτερικού και εξωτερικού).

Η κυριαρχία των αυτοκινήτων

Έχει προαναφερθεί ότι η εξάπλωση και η κυριαρχία του αυτοκινήτου είχε σημαντικό ρόλο στην αστική εξάπλωση και την ανάπτυξη των διαφόρων μορφών χρήσης γης.

Η ανάπτυξη τριών τεχνολογιών κατέστησαν το αυτοκίνητο ως το κυρίαρχο μέσο επιβατικών μεταφορών. Αυτές είναι:

- Οι ελαστικοί τροχοί
- Η μηχανή εσωτερικής καύσης (επίτευγμα της βιομηχανικής επανάστασης),
- Η εξαγωγή πετρελαίου σε φυσική κατάσταση από το υπέδαφος.

(Sussman, 2003)

Ο φόρος της βενζίνης

Η σχετική ευκολία είσπραξης των φόρων από το αυτοκίνητο, οι οποίοι υποστηρίζουν την μεταφορική υποδομή, συμβάλλει στην ανάπτυξη της υποδομής αυτής. Οι χρήστες/πολίτες φορολογούνται μέσω της βενζίνης στο βενζινάδικο, φορολογούνται για την αγορά και χρήση των αυτοκινήτων τους (φόροι πολυτελείας, τέλη ταξινόμησης, τέλη κυκλοφορίας). Η είσπραξη ειδικά του φόρου της βενζίνης είναι εύκολη σχετικά και γίνεται με μικρές καταβολές που εξαρτώνται από την κατανάλωσή της.

Ο κατασκευαστικός τομέας

Μια μεγάλη πολιτική δύναμη κρύβεται πίσω από την ανάπτυξη των μεταφορικών συστημάτων. Η κατασκευή της υποδομής τους είναι μια τεράστια πηγή ευκαιριών απασχόλησης τόσο στις κατασκευαστικές όσο και σε άλλες αλληλένδετες βιομηχανίες.

Η Βιομηχανία των μεταφορών

Μια άλλη μεγάλη δύναμη άσκησης πολιτικής επιρροής συνιστά η βιομηχανία των μεταφορών. Με τον όρο αυτό εννοούνται οι κατασκευαστές αυτοκινήτων, άλλων μεταφορικών μέσων, και ενέργειας. Ο Max Lay επισημαίνει ότι εδώ και πολλά χρόνια στις Ηνωμένες Πολιτείες όλες οι μεγάλες εταιρείες ήταν άμεσα ή έμμεσα συνδεδεμένες με την επιχείρηση του αυτοκινήτου (Lay, 1992). Ωστόσο, η κατάσταση έχει διαφοροποιηθεί τον τελευταίο καιρό με την υποκατάσταση των μεταφορών από τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας και τις έντονες περιβαλλοντικές ανησυχίες που αφορούν το σύνολο των μεταφορών.

Οι περιβαλλοντολογικές ανησυχίες

Εξαιτίας των έντονων και αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που έχει η κατασκευή και λειτουργία των μεταφορικών συστημάτων (ατμοσφαιρική και ηχητική ρύπανση, παρεμβατισμός στο τοπίο κ.α.), η περιβαλλοντολογική κοινότητα, οι γειτνιάζοντες στην υποδομή αλλά και το ευρύ κοινό ενδιαφέρονται άμεσα για τις επιχειρήσεις μεταφορών και τις επιλογές τους. Η κοινή ομολογία που επικρατεί στη σημερινή πλέον εποχή είναι ότι τα προβλήματα συμφόρησης δεν μπορούν να λυθούν με την κατασκευή καινούργιας υποδομής και ότι αυτό δεν αποτελεί μια βιώσιμη επιλογή (Πιτσιάβα – Λατινοπούλου κ.α.).

Αξίζει να σημειωθεί ότι με τον όρο περιβαλλοντικά δημόσιες μεταφορές εννοούνται εκείνες που δε θέτουν σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία και τα οικοσυστήματα και παρέχουν δυνατότητες πρόσβασης σύμφωνα με την εκλογικευμένη χρήση των ανανεώσιμων πόρων κάτω από ή στα όρια του ρυθμού ανανέωσης τους, και η χρήση των μη ανανεώσιμων κάτω από ή στα όρια του ρυθμού ανάπτυξης υποκατάστατων. Είναι σαφές λοιπόν πως βιώσιμες μεταφορές, επιστημονική έρευνα και τεχνολογική ανάπτυξη συμπορεύονται (Πιτσιάβα – Λατινοπούλου κ.α.).

1.2 Ανάπτυξη και διαχείριση: Στόχοι των πολιτικών διαχείρισης μητροπολιτικών συστημάτων

Στη σημερινή εποχή παρατηρείται μια συνεχής αύξηση της ζήτησης μετακινήσεων προσώπων και αγαθών και της κυκλοφορίας των οχημάτων που οφείλεται κυρίως σε δυο ομάδες αιτιών:

α) Την αύξηση του πληθυσμού και της κινητικότητας – περισσότερες και μεγαλύτερου μήκους μετακινήσεις – καθώς και της κατανάλωσης αγαθών.

β) Τη μεγαλύτερη χρήση του επιβατικού αυτοκινήτου, το οποίο απαιτεί μεγαλύτερο χώρο ανά μεταφερόμενο επιβάτη από ότι τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς, τόσο για κίνηση όσο και για στάθμευση (Φραντζεσκάκης κ.α.1997).

Δυστυχώς όμως η απόκτηση ιδιωτικού οχήματος αυξάνεται με γρηγορότερους ρυθμούς από την αύξηση του πληθυσμού. Αυτό μαζί με τους προαναφερόμενους λόγους της αύξησης μετακινήσεων έχουν οδηγήσει στη δραστική αύξηση της ζήτησης για μετακίνηση. Όταν ο ρυθμός ροής ξεπερνά την κυκλοφοριακή ικανότητα των δικτύων, αυτό έχει σαν συνέπεια την ανάπτυξη φαινομένων συμφόρησης των δικτύων με σύμφυτα προβλήματα όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, η ηχορύπανση, η αύξηση του χρόνου μετακίνησης και της

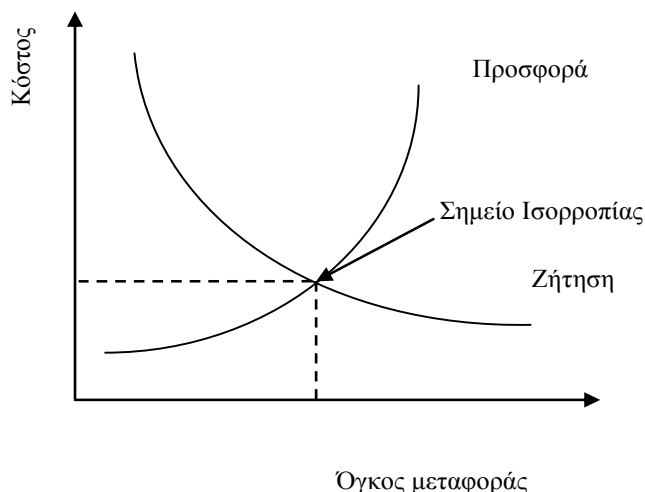
κατανάλωσης καυσίμων καθώς και η μείωση της οδικής ασφάλειας. Επί πλέον, στην προσπάθειά τους να αποφύγουν τα κορεσμένα τμήματα του δικτύου, οι χρήστες καταφεύγουν σε δευτερεύουσες οδούς, δημιουργώντας διαμπερείς κινήσεις σε περιοχές κατοικίας ή γενικά ευαίσθητες περιοχές επιδεινώνοντας την ασφάλεια και την ποιότητα ζωής. Αν επιτραπεί το πρόβλημα της κυκλοφορίας να αυξηθεί ανεξέλεγκτα, τότε στα επόμενα χρόνια η συμφόρηση θα αποτελεί μεγαλύτερο πρόβλημα, το οποίο θα επιβάλλει ένα πολύ υψηλό κοινωνικό, οικονομικό και περιβαλλοντολογικό κόστος.

Η πολιτική της αντιμετώπισης της αύξησης της ζήτησης και των παραπάνω προβλημάτων με την κατασκευή νέας υποδομής οδηγεί σε ένα φαύλο κύκλο. Το παρακάτω παράδειγμα σχετίζεται με τη μηχανική της ισορροπίας προσφοράς/ζήτησης και αναφέρεται στην προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος της συμφόρησης με την αύξηση της προσφοράς των υπηρεσιών μεταφοράς.

1.2.1 Παράδειγμα του φαύλου κύκλου της ανάπτυξης της υποδομής

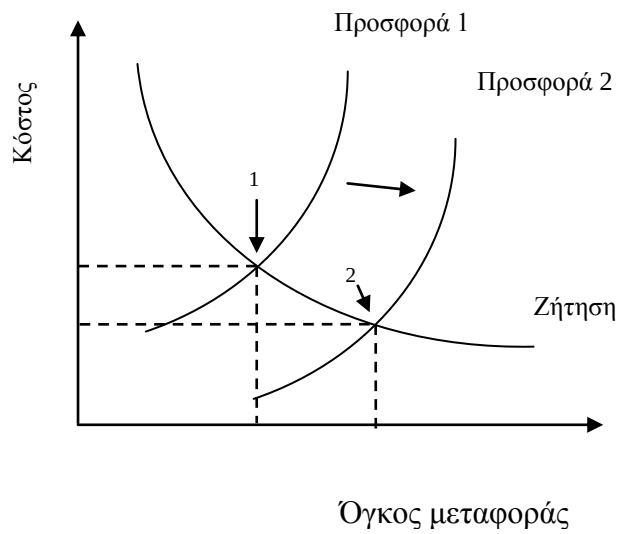
Για να εξεταστεί το συγκεκριμένο παράδειγμα κρίνεται σκόπιμη η αναφορά στον ορισμό του κόστους. Το κόστος στις μεταφορές είναι μια σύνθετη έννοια. Αναφέρεται ως *γενικευμένο αντιληπτό κόστος* και ορίζεται ως το κόστος της μετακίνησης που αντιλαμβάνεται ο χρήστης. Η έννοια αυτή είναι ένα συνδυαστικό μέτρο όλων των παραγόντων που λαμβάνονται υπόψη κατά την λήψη αποφάσεων από τους μετακινούμενους. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες συνιστούν ο χρόνος μετακίνησης και τα άμεσα κόστη, όπως τα κόμιστρα, το κόστος της βενζίνης που καταναλώνεται και η χρέωση της στάθμευσης. (Bell and Iida, 1997) Όλοι αυτοί οι παράγοντες ενοποιούνται στον όρο του γενικευμένου αντιληπτού κόστους. Για παράδειγμα, για να εκφραστεί ο χρόνος μετακίνησης σε μονάδες κόστους χρησιμοποιείται η αξία του χρόνου (Value of Travel Time).

Τώρα θα εξεταστεί η έννοια της ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης. Οι δυο τελευταίες έννοιες είναι εκφρασμένες σε μετακινήσεις ή γενικότερα σε όγκο μεταφοράς. Η ζήτηση αυξάνεται/μειώνεται καθώς το κόστος μεταφοράς μειώνεται/αυξάνεται αντίστοιχα, ενώ η καμπύλη προσφοράς συμπεριφέρεται αντίστροφα. Το γεγονός αυτό αιτιολογεί την ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας, όπου η προσφορά και η ζήτηση είναι ίσες (βλ. Σχήμα 1.1).

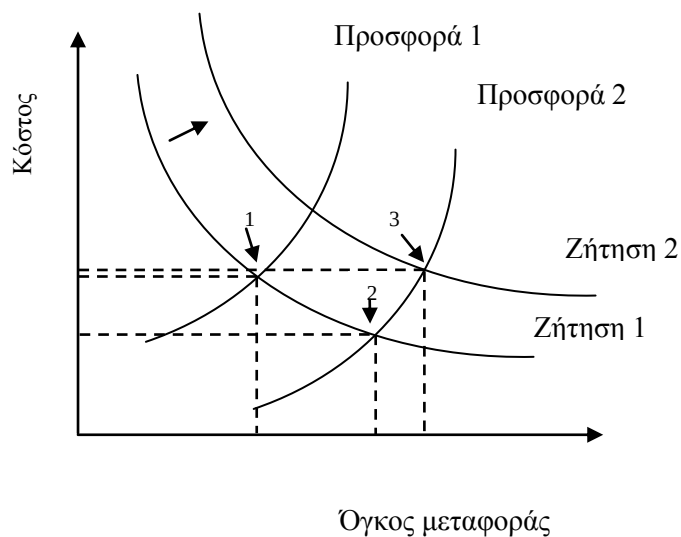


ΣΧΗΜΑ 1.1: Αρχική Ισορροπία

Ας υποθεθεί ότι στο μεταφορικό σύστημα, που είναι ένας αυτοκινητόδρομος, πρόκειται να προστεθούν λωρίδες κυκλοφορίας, ώστε να βελτιωθεί η προσφορά των μεταφορικών υπηρεσιών ή να μειωθεί το κόστος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μετατόπιση της καμπύλης της προσφοράς προς τα δεξιά καθώς και του σημείου ισορροπίας προς τα δεξιά (Σημείο 2). Η αύξηση της υποδομής/προσφοράς έχει ως συνέπεια την προσέλκυση νέας οικονομικής δραστηριότητας, ίσως μακροπρόθεσμα, (προσαρμογή της δραστηριότητας στα νέα δεδομένα –μειωμένοι χρόνοι πρόσβασης στην περιοχή) και κατ' επέκταση αύξηση της ζήτησης για μετακινήσεις και μια νέα ισορροπία (Σημείο 3). Από τη σύγκριση των δύο σχημάτων παρατηρείται ότι (για την υποθετική περίπτωση του περίπτωση του ανώτερου παραδείγματος) το κόστος μετακίνησης πριν τη βελτιωμένη υποδομή είναι περίπου ίσο με αυτό που αντιστοιχούσε στην αρχή (βλ. Σχήμα 1.2 και Σχήμα 1.3). Έτσι η συμφόρηση υπήρχε και εξακολουθεί να υπάρχει.



ΣΧΗΜΑ 1.2: Μεταβολή της προσφοράς-Νέα Ισορροπία



ΣΧΗΜΑ 1.3: Μεταβολή και της ζήτησης-Νέα ισορροπία

1.2.2 Πολιτικές και στόχοι διαχείρισης μητροπολιτικών συστημάτων μετακινήσεων

Γενικός στόχος διαχείρισης μητροπολιτικών μεταφορικών συστημάτων αποτελεί η εξασφάλιση ασφαλούς, άνετης, ταχείας και οικονομικής μεταφοράς προσώπων και αγαθών, με τις λιγότερες δυνατές δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον (ατμοσφαιρική ρύπανση, θόρυβος, αισθητική).

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μέτρων διαχείρισης της κυκλοφορίας που εφαρμόζονται σήμερα διεθνώς και στην Ελλάδα. Τα μέτρα αυτά, τα οποία διέπονται από τους παραπάνω στόχους, μπορεί να διακριθούν, ανάλογα με το είδος της ενέργειας που απαιτείται και το σκοπό που εξυπηρετούν, στις παρακάτω οκτώ κύριες κατηγορίες. Ορισμένα από τα μέτρα αυτά αναφέρονται στη Διαχείριση Συστήματος Μεταφορών (ΔΣΜ) και άλλα στη Διαχείριση Ζήτησης Μετακινήσεων (ΔΖΜ) και αφορούν περιληπτικά:

α) Βελτίωση Ροής Οχημάτων, με σκοπό την αύξηση της κυκλοφοριακής ικανότητας και ταχύτητας και τη μείωση των ατυχημάτων, της ρύπανσης και της κατανάλωσης ενέργειας. Κύρια μέτρα της κατηγορίας αυτής είναι η βελτίωση της σηματοδότησης και η απαγόρευση κινήσεων.

β) Προνομιακή Μεταχείριση και Βελτίωση Μαζικών Μεταφορών, με σκοπό να εξυπηρετηθούν καλύτερα οι επιβάτες τους και να μειωθεί η χρήση των επιβατικών αυτοκινήτων.

γ) Ενθάρρυνση Μετακινήσεων με Ανθρώπινη Ενέργεια, δηλαδή των μετακινήσεων με ποδήλατο και πεζή με σκοπό τη μείωση των μετακινήσεων με μηχανοκίνητα μέσα αλλά και τη φυσική άσκηση.

δ) Διαχείριση Στάθμευσης, με στόχο να επηρεασθεί ευνοϊκά η κυκλοφορία και να ενισχυθούν τα ΜΜΜ.

ε) Προνομιακή Μεταχείριση Επιβατικών Αυτοκινήτων με Υψηλή Πλήρωση, δηλαδή των επιβατικών αυτοκινήτων με μεγάλο αριθμό επιβατών, με σκοπό την εξυπηρέτηση ενός μεγαλύτερου αριθμού μετακινούμενων για τον ίδιο αριθμό οχημάτων.

στ) Περιορισμοί Κυκλοφορίας Οχημάτων. Αφορά την απαγόρευση της κυκλοφορίας όλων ή ορισμένων κατηγοριών οχημάτων από ορισμένες περιοχές της πόλης ώστε να αποφευχθεί η συμφόρηση (π.χ. κέντρο) και να προστατευθούν οι περιοχές κατοικίας και άλλες ευαίσθητες περιοχές (π.χ. αρχαιολογικοί χώροι). Τα πιο σημαντικά μέτρα αυτής της κατηγορίας είναι τα εξής:

- Παρεμπόδιση διαμπερούς κυκλοφορίας μέσα από γειτονιές
- Απαγόρευση της κυκλοφορίας σε ορισμένες περιοχές
- Περιορισμοί κυκλοφορίας φορτηγών αυτοκινήτων
- Οικονομικοί περιορισμοί της κυκλοφορίας σε μια περιοχή (Road Pricing)

ζ) Μείωση των μετακινήσεων σε Περιόδους Αιχμής, με σκοπό τη βελτίωση των συνθηκών κυκλοφορίας κατά τις κρίσιμες περιοχές αυξημένης κίνησης και επομένως την αποφυγή κατασκευής έργων απαραίτητων για τις περιόδους αυτές. Τα κυριότερα μέτρα αυτής της κατηγορίας είναι:

- Αλλαγή των ωραρίων εργασίας (σταθερά μετατοπισμένα ή ελεύθερα ωράρια)
- Χρέωση κατά τις περιόδους αιχμής (Congestion Pricing) ή αύξηση υφιστάμενων διοδίων.

η) Εφαρμογή νέων τεχνολογιών. Στη σημερινή εποχή οι διαρκώς εξελίξιμες μέθοδοι πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στη Διαχείριση των μητροπολιτικών μεταφορικών συστημάτων (Φραντζεσκάκης κ.α.1997).

Παρακάτω θα αναλυθούν συνοπτικά δύο από τα κυριότερες τακτικές διαχείρισης.

Ρύθμιση της σηματοδότησης

Η κύρια λειτουργία της σηματοδότησης είναι να αλλάζει διαδοχικά την προτεραιότητα στην κίνηση των διαφόρων ρευμάτων οχημάτων ή πεζών στην περιοχή ενός κόμβου ή σε άλλες θέσεις του οδικού δικτύου (π.χ., διαβάσεις πεζών, γέφυρα μιας λωρίδας κυκλοφορίας με εναλλασσόμενη κατεύθυνση κίνησης) οργανώνοντας την εξέλιξη της τροχιάς κίνησης (Φραντζεσκάκης κ.α., 2009).

Μια κατάλληλα μελετημένη και εγκατεστημένη σηματοδότηση είναι ικανή να περιορίσει την κυκλοφορία σε ορισμένες κατευθύνσεις και να αποφευχθεί η συμφόρηση στα κατάντη, να περιορίσει τον αριθμό των ατυχημάτων και να ευνοήσει τους πεζούς και τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς με την εξασφάλιση προτεραιότητας. Όσον αφορά στη σηματοδότηση σε μεμονωμένο κόμβο, αυτή διακρίνεται στη *σηματοδότηση σταθερού χρόνου* και στη *σηματοδότηση επενεργούμενη από την κυκλοφορία* με αποτέλεσμα μια συνεχή ροή της κυκλοφορίας με καθορισμένη ταχύτητα και χωρίς σημαντικές καθυστερήσεις, εφόσον η σηματοδότηση εξαρτάται και προσαρμόζεται ανάλογα με τις εκάστοτε κυκλοφοριακές συνθήκες.

Τιμολόγηση της συμφόρησης ή αλλιώς οδική διατίμηση

Η συγκεκριμένη πολιτική διαχείρισης σχετίζεται με την χρέωση των χρηστών του μεταφορικού δικτύου ανάλογα με τη χρονική και χωρική χρήση αυτού. Για να κατανοηθεί η έννοια της οδικής χρέωσης είναι χρήσιμη η αναφορά στην έννοια του *γενικευμένου* και του *εξωτερικού κόστους*.

Το *γενικευμένο αντιληπτό* κόστος (εθίγη προηγουμένως) αντιστοιχεί στο κόστος που αντιλαμβάνεται ο χρήστης με τη μετακίνησή του και μπορεί να θεωρηθεί ως ένα *μέσο* κόστος. Το γενικευμένο κόστος δε συμπεριλαμβάνει το πραγματικό κόστος κάθε μετακίνησης στο περιβάλλον και το κοινωνικό σύνολο. Το πρόσθετο αυτό κόστος ονομάζεται *εξωτερικό κόστος*.

Η «εσωτερίκευση» του εξωτερικού κόστους μετακίνησης συνιστά τη φιλοσοφία της οδικής διατίμησης. Προσβλέπει στην καθιέρωση δίκαιων συνθηκών ανταγωνισμού ανάμεσα στα μέσα μεταφοράς και στην αποδοτικότερη λειτουργία του μεταφορικού συστήματος, προς όφελος βέβαια των βιώσιμων τρόπων μετακίνησης. Υπάρχουν διάφορες στρατηγικές

τιμολόγησης. Οι τελευταίες μπορούν να διακριθούν σε (α) τιμολόγηση της συμφόρησης, (α1) επίπεδο κόστος τιμολόγησης, (α2) μεταβλητό κόστος τιμολόγησης, (α3) τιμολόγηση με ζώνες, (β) τιμολόγηση στάθμευσης, (γ) τιμολόγηση με βάση την ρύπανση κ.α.

1.3 Σκοπός και Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Τα μεταφορικά συστήματα είναι πολύ σημαντικά για την οικονομία και τον πολιτισμό γενικότερα. Δεδομένων του μεγέθους και της σημασίας της βιομηχανίας των μεταφορών, ανακύπτει η ανάγκη για κατάλληλα και αναλυτικά πρότυπα καταμερισμού της ζήτησης, με στόχο την πρόβλεψη της λειτουργίας του συστήματος υπό εναλλακτικές στρατηγικές διαχείρισης. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανασκόπηση τέτοιων προτύπων και η ανάπτυξη ενός αντιπροσωπευτικού για διαχειριστικούς σκοπούς μοντέλου. Στην εργασία θα προταθεί η χρήση ενός στοχαστικού, ημιδυναμικού, μικτού προτύπου επιλογής ώρας αναχώρησης και διαδρομής ικανό να προσδιορίζει την αλληλεπίδραση της προσφοράς και της ζήτησης σε διατροπικά δίκτυα μητροπολιτικών περιοχών. Ακολουθεί μία αναφορά στη δομή αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μία εισαγωγή στα μεταφορικά συστήματα και τη λειτουργία τους. Μέσα από την εισαγωγή αυτή διαφαίνεται και η ανάγκη για την προτυποποίηση της λειτουργίας των μεταφορικών συστημάτων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται ανασκόπηση των βασικότερων προτύπων επιλογής διαδρομής χωρίς εκτενή αναφορά σε συναρτησιακές σχέσεις, οι οποίες μπορούν να αναζητηθούν σε εξειδικευμένη βιβλιογραφία που παρατίθεται. Γίνεται διάκριση των προτύπων σε στατικά (ντετερμινιστικά και στοχαστικά) και δυναμικά (ντετερμινιστικά και στοχαστικά) πρότυπα. Επίσης, γίνεται αναφορά στη θεωρία του βέλτιστου ελέγχου με σκοπό την εφαρμογή της στην παρουσίαση της λειτουργίας των διατροπικών μεταφορικών δικτύων μητροπολιτικών περιοχών.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την ανάπτυξη και παρουσίαση ενός ημιδυναμικού στοχαστικού προτύπου Logit, επιλογής ώρας αναχώρησης και διαδρομής. Το συγκεκριμένο πρότυπο προτυποποιεί την αλληλεπίδραση των χρηστών και των κυκλοφοριακών συνθηκών ενός μεταφορικού δικτύου.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει υπολογιστικό υπόδειγμα εφαρμογής του προτύπου σε δειγματικό χώρο. Παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης και στη συνέχεια το ρεαλιστικό δίκτυο, η λειτουργία του οποίου θα προτυποποιηθεί. Έπειτα, το προτεινόμενο πρότυπο βαθμονομείται, ώστε να αποδίδει πιο ρεαλιστικά και αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, επανεκτιμάται/επικαιροποιείται η μεταφορική ζήτηση με μία διαδικασία παρόμοια με αυτή

της βαθμονόμησης. Ακολουθεί ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων του βαθμονομημένου προτύπου.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει το σχολιασμό των συμπερασμάτων από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας και κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη βιβλιογραφία και τα παραρτήματα. Τα παραρτήματα περιέχουν τα δεδομένα προσαρμογής του προτύπου και την κωδικοποίηση αυτού στην υπολογιστική πλατφόρμα MATLAB.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

2.1 Λειτουργία των δικτύων

2.1.1 Τα μέρη του συστήματος

Η κωδικοποίηση των μεταφορικών συστημάτων γίνεται συχνά μέσω της θεωρίας των μεταφορικών δικτύων. Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα αναλυθεί η έννοια του δικτύου.

Ο όρος “δίκτυο” χρησιμοποιείται συνήθως για την περιγραφή μιας δομής, η οποία μπορεί να είναι είτε φυσική (για παράδειγμα δρόμοι και διασταυρώσεις ή τηλεφωνικές γραμμές και τηλεφωνικά κέντρα) είτε ιδεατή (για παράδειγμα γραμμές πληροφόρησης και ανθρώπινη επικοινωνία). Κάθε ένα από αυτά τα δίκτυα περιλαμβάνουν δύο είδη στοιχείων: ένα πλήθος από σημεία, τους ονομαζόμενους κόμβους, και ένα πλήθος από τμήματα ή τομείς που συνδέουν τα σημεία, τους συνδέσμους (ή δέσμες). Αυτή η υπόθεση οδηγεί στο μαθηματικό ορισμό του δικτύου ως μια ομάδα από κόμβους (σημεία) και προσανατολισμένους συνδέσμους.

Κάθε σύνδεσμος του δικτύου χαρακτηρίζεται από μία κατεύθυνση της ροής και μια αντίσταση που επηρεάζει τη ροή του συνδέσμου. Οι μονάδες μέτρησης αυτής της αντίστασης εξαρτώνται από τη φύση του δικτύου και τη ροή του συνδέσμου. Η αντίσταση μπορεί να παριστάνει χρόνο, κόστος, χρησιμότητα, ηλεκτρική αντίσταση ή οποιοδήποτε άλλο σχετικό μέγεθος. Στα μεταφορικά δίκτυα η αντίσταση εκφράζει τη δυσκολία μετακίνησης ή προσπέλασης μιας περιοχής από μια άλλη, π.χ. ο χρόνος μετακίνησης από μια περιοχή σε μια άλλη περιοχή. Όταν η ροή αφορά μετακινούμενους, ο όρος “στάθμη εξυπηρέτησης” χρησιμοποιείται συνήθως αντί του συγκεκριμένου όρου. Οι δύο αυτές έννοιες έχουν αντίθετη σημασία. Η υψηλή στάθμη εξυπηρέτησης σημαίνει χαμηλή αντίσταση. Συνεχίζοντας, μόνο οι σύνδεσμοι συσχετίζονται με αντίσταση σε αντίθεση με τους κόμβους που τυπικά αντιστοιχούν στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης ή μέσου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι χρήστες του οδικού δικτύου μετακινούνται από έναν κόμβο σε έναν άλλο ακολουθώντας μια διαδρομή. Η διαδρομή είναι μια σειρά από προσανατολισμένους συνδέσμους που οδηγούν από κόμβο σε κόμβο. Η αντίσταση σε μια διαδρομή είναι το άθροισμα των αντιστάσεων στους συνδέσμους που αποτελούν τη διαδρομή. Δεν πρέπει να παραληφθεί ότι δύο κόμβοι συνήθως συνδέονται με περισσότερες από μία διαδρομές. Επίσης, στα μεγάλα δίκτυα ο αριθμός των διαδρομών που συνδέουν ένα ζεύγος κόμβων μπορεί να είναι πολύ μεγάλος (Sheffi, 1985).

Επίσης, ένα άλλο χαρακτηριστικό της διαδικασίας σχεδιασμού μεταφορικών συστημάτων στις αστικές περιοχές είναι η υποδιαίρεση της περιοχής μελέτης σε μη επικαλυπτόμενες *υπο-περιοχές*, καθώς και σε μικρότερα τμήματα αυτών, που ονομάζονται *ζώνες*. Κάθε ζώνη παριστάνεται με ένα κόμβο, που ονομάζεται *κεντροειδές* της ζώνης. Το όνομα αυτό του κεντροειδούς προέρχεται από την αρχή της τοποθέτησης αυτού στο γεωμετρικό κέντρο βάρους της ζώνης. Η αναπαράσταση του μεταφορικού δικτύου μιας αστικής περιοχής περιλαμβάνει εκτός των κεντροειδών και άλλους κόμβους, που παριστάνουν διασταυρώσεις, στάσεις λεωφορείων και σημεία αλλαγής των χαρακτηριστικών του μεταφορικού δικτύου.

Επίσης, αξίζει να αναφερθεί η υπόθεση που γίνεται για τα κεντροειδή, ότι συγκεντρώνονται σε αυτά όλες οι δραστηριότητες ή αλλιώς, είναι τα σημεία από όπου εκκινούν και αντίστοιχα κατευθύνονται όλες οι μετακινήσεις από και προς τις ζώνες (Σταθόπουλος και Καρλαύτης, 2008).

Ο βαθμός της λεπτομέρειας με την οποία απεικονίζεται ένα αστικό μεταφορικό δίκτυο καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το πλήθος των ζωνών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάλυση του καταμερισμού της κυκλοφοριακής ροής εντός των ζωνών δεν αποτελεί συνήθως αντικείμενο ενδιαφέροντος. Αν συμβαίνει το αντίθετο, τότε οι ζώνες χωρίζονται σε μικρότερες ζώνες και έτσι η ανάλυση αποκτά μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Με αυτόν τον τρόπο οι αναλύσεις γίνονται σίγουρα πιο ακριβείς. Ωστόσο, καθώς ο αριθμός των ζωνών και το μέγεθος του δικτύου αυξάνονται, το κόστος της μελέτης (κόστος ανάλυσης και συλλογής δεδομένων) αυξάνεται δραστικά (Sheffi, 1985). Συνεπώς, το μέγεθος και η λεπτομέρεια του εξεταζόμενου δικτύου καθορίζεται τόσο από την απαιτούμενη ακρίβεια όσο και από τον ισχύοντα προϋπολογισμό.

2.1.2 Συναρτήσεις κόστους

Με τον όρο συνάρτηση κόστους εννοείται η μορφή της σχέσης ανάμεσα στη κυκλοφοριακή ροή και το κόστος. Υπάρχει ένας διαχωρισμός του κόστους ανάμεσα στο κόστος των συνδέσμων και στο κόστος των κόμβων.

Υπάρχει ένας αριθμός παραγόντων που επηρεάζουν τον τρόπο λήψης αποφάσεων από τους χρήστες του μεταφορικού δικτύου. Οι πιο σημαντικοί είναι ο χρόνος μετακίνησης, η απόσταση, το άμεσο κόστος (φόροι, διόδια, κατανάλωση καυσίμων, χρέωση στάθμευσης, κ.α.), η αξιοπιστία, η ασφάλεια και η άνεση. Κάποιοι από τους παράγοντες αυτούς, όπως ο χρόνος μετακίνησης, η αξιοπιστία και η άνεση, εξαρτώνται από την κυκλοφοριακή ροή, ενώ άλλοι όχι. Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, οι σχεδιαστές/ διαχειριστές των μεταφορικών συστημάτων συνήθως συνδυάζουν αυτούς τους παράγοντες σε μια έννοια, το γενικευμένο κόστος. Το τελευταίο έχει συνήθως την παρακάτω γραμμική μορφή:

$$g_j = \alpha_{0j} + \alpha_{1j}(\text{χρόνος μετακ.})_j + \alpha_{2j}\text{φόρος}_j + \dots$$

όπου α_{0j} , α_{1j} , α_{2j} ,... είναι παράμετροι που αντιστοιχούν σε κάθε εναλλακτική επιλογή. Γενικά το κύριο στοιχείο του γενικευμένου κόστους, που εξαρτάται περισσότερο από την κυκλοφοριακή ροή, συνιστά ο χρόνος μετακίνησης (Bell and Iida, 1997). Για το λόγο αυτό, οι συναρτήσεις κόστους εξετάζονται και σαν σχέσεις χρόνου μετακίνησης-ροής ή ακόμα και σαν σχέσεις ταχύτητας-ροής που θα αναλυθούν παρακάτω.

I. Τρόποι ανάλυσης και παρουσίασης της κυκλοφορίας

Οι χρόνοι μετακίνησης στους συνδέσμους εξαρτώνται από τις διαστάσεις της οδού (κυρίως από τον αριθμό των λωρίδων ανά κατά κατεύθυνση), τη ζήτηση, τον τρόπο αλληλεπίδρασης των οχημάτων στο σύνδεσμο και τις εκάστοτε συνθήκες (όπως τα όρια ταχύτητας, τα σταθμευμένα οχήματα, τη σύνθεση των οχημάτων, τους πεζούς παρά την οδό και τα διάφορα κυκλοφοριακά μέτρα), που μπορούν να επηρεάσουν την ταχύτητα με την οποία επιθυμούν να μετακινηθούν οι χρήστες, γνωστή ως ταχύτητα ελεύθερης ροής (Bell and Iida, 1997).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται δύο τρόποι ανάλυσης της κυκλοφορίας: η μικροσκοπική και η μακροσκοπική ανάλυση. Επίσης το κόστος διακρίνεται σε κόστος συνδέσμων και σε κόστος στην περιοχή των κόμβων.

II. Κόστος συνδέσμων

Μικροσκοπική Ανάλυση

Στην μικροσκοπική ανάλυση το ενδιαφέρον εστιάζεται σε μεμονωμένα οχήματα τα οποία ακολουθούν κάποιους κανόνες κίνησης, για παράδειγμα μετακινούνται με σταθερή ταχύτητα, σχηματίζουν μια ουρά, ακολουθούν τα μπροστινά οχήματα ή φθάνουν τυχαία σε ένα συγκεκριμένο προορισμό. Η συγκεκριμένη ανάλυση προσαρμόζεται καλύτερα στην περιγραφή της κυκλοφορίας στην περιοχή των κόμβων από την περιγραφή της κυκλοφορίας στους συνδέσμους. Παρά το γεγονός ότι η μικροσκοπική προσομοίωση μπορεί να δώσει αναλυτικές σχέσεις ανάμεσα στο κόστος συνδέσμου και την κυκλοφοριακή ροή του συνδέσμου (πιο συγκεκριμένα τη ροή εισόδου και το κόστος κατά την έξοδο του συνδέσμου), η προσέγγιση αυτή είναι πολύ απαιτητική υπολογιστικά κατά τον προγραμματισμό της στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Μακροσκοπική ανάλυση

Στη μακροσκοπική προσέγγιση η κυκλοφορία παριστάνεται σαν ένα συμπιεστό υγρό οδηγώντας στην εφαρμογή της υδροδυναμικής θεωρίας. Οι ιδιότητες της κυκλοφορίας περιγράφονται με τους όρους της ταχύτητας, της ροής και της πυκνότητας.

Η βάση της θεωρίας αυτής είναι η σχέση ανάμεσα στην *κυκλοφοριακή ροή και την πυκνότητα*. Η ροή είναι μηδενική, όταν η πυκνότητα είναι μηδενική ή όταν η πυκνότητα είναι μέγιστη (πυκνότητα ουράς). Επίσης, σημειώνεται ότι σε κάθε ροή, εκτός της μέγιστης, αντιστοιχούν δύο τιμές πυκνοτήτων. Από αυτές τις δύο, η χαμηλότερη πυκνότητα αναφέρεται σε μη κορεσμένες συνθήκες, ενώ η υψηλότερη πυκνότητα αναφέρεται σε κορεσμένες συνθήκες κυκλοφορίας (με συμφόρηση). Στις μη κορεσμένες συνθήκες η κυκλοφοριακή ροή γενικά είναι σταθερή, ενώ στις κορεσμένες εμφανίζεται αστάθεια (Bell and Iida, 1997).

Παρακάτω αναλύεται η σχέση ανάμεσα στην *κυκλοφοριακή ροή και την ταχύτητα*. Η ταχύτητα κυμαίνεται ανάμεσα στη μηδενική και την ταχύτητα ελεύθερης ροής. Επίσης, σημειώνεται ότι σε κάθε επίπεδο ροής, εκτός της μέγιστης, αντιστοιχούν δύο τιμές ταχυτήτων. Από αυτές τις δύο, η χαμηλότερη ταχύτητα αναφέρεται σε κορεσμένες συνθήκες, ενώ η υψηλότερη ταχύτητα αναφέρεται σε μη κορεσμένες συνθήκες κυκλοφορίας. Η ταχύτητα για την ροή υπό συμφόρηση είναι ‘ασταθής’.

Έπειτα αναλύεται η σχέση ανάμεσα στην *ταχύτητα και την πυκνότητα*, η οποία έχει βρεθεί ότι είναι περίπου γραμμική (βλ. πιν2.1). Η σχέση αυτή μπορεί να αναχθεί σε μια σχέση ανάμεσα στον χρόνο μετακίνησης και τη κυκλοφοριακή ροή, καθώς ο χρόνος μετακίνησης προκύπτει από τη διαίρεση της απόστασης με την ταχύτητα μετακίνησης. Κατ’ επέκταση, καθώς ο χρόνος είναι κύριο συστατικό του κόστους μετακίνησης, η παραπάνω σχέση αποτελεί βάση για μια συνάρτηση κόστους συνδέσμου.

Πίνακας 2.1 Παραδείγματα συναρτήσεων ταχύτητας – πυκνότητας (Bell and Iida, 1997)

Author	Function (speed in km/h, density in veh/km/lane)
Cremer & Papageorgiou (1981)	$speed = 123(1 - (density/200)^{1.4})^4$
Papageorgiou et al (1989)	$speed = 90 \exp(-0.5(density/120)^2)$
Payne (1979)	$speed = \min[88.5, 88.5(1.94 - 6(\frac{density}{143}) + 8(\frac{density}{143})^2 - 3.93(density/143))]$

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της υδροδυναμικής θεωρίας για την κυκλοφορία, που ερευνήθηκε από τους Lighthill, Whitham (1955) and Richards (1956), είναι η πρόβλεψη των οπίσθιων κυμάτων (shock waves). Ένα τέτοιο κύμα αντιστοιχεί στο όριο της κυκλοφορίας δύο διαφορετικών πυκνοτήτων, όπως το τέλος και η αρχή μιας ουράς. Η θεωρία αυτή υποθέτει ότι η κυκλοφορία δεν έχει ορμή, που σημαίνει ότι οι οδηγοί αντιδρούν αμέσως σε κάθε αλλαγή στις συνθήκες κυκλοφορίας (π.χ. σε αλλαγή στην πυκνότητα), υπόθεση η οποία δεν είναι αρκετά ρεαλιστική.

III. Κόστος κόμβων

Η πρόβλεψη του μήκους της ουράς και της καθυστέρησης των οχημάτων αποτελούν σημαντικά θέματα για τους συγκοινωνιολόγους. Όσον αφορά στον καταμερισμό της κυκλοφορίας εντός του αστικού οδικού δικτύου (που αποτελεί το βασικό θέμα στην παρούσα διπλωματική εργασία), η καθυστέρηση στους κόμβους είναι ένας σημαντικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την επιλογή της διαδρομής από τους μετακινούμενους. Συνεπώς, το κόστος στους κόμβους ταυτίζεται με τις καθυστερήσεις στους κόμβους αλλά και στην αλληλεπίδραση της κυκλοφορίας. Παρακάτω παρουσιάζονται αδρώς δύο θεωρίες που αναφέρονται στις ουρές.

Θεωρία σταθεροποιημένης κατάστασης αναμονής

Η θεωρία αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη, αλλά προβλέπει απέραντες ουρές και καθυστερήσεις, όταν η ζήτηση φθάνει τη διαθέσιμη ικανότητα. Στην πραγματικότητα, όταν η ζήτηση πλησιάζει ή υπερβαίνει για μικρές χρονικές περιόδους την κυκλοφοριακή ικανότητα, ο σχηματισμός της ουράς καθυστερεί σε σχέση με αυτόν της συγκεκριμένης θεωρίας. Επίσης, δεν μπορούν να αγνοηθούν οι διακυμάνσεις με το χρόνο της ζήτησης και της ικανότητας, κάτι το οποίο συμβαίνει στη θεωρία αυτή.

Ντετερμινιστική θεωρία αναμονής

Στη συγκεκριμένη θεωρία η καθυστέρηση ισούται με τον ακέραιο της ζήτησης μείον την ικανότητα. Η θεωρία αυτή χρησιμοποιείται όταν η ζήτηση και η ικανότητα μεταβάλλονται με τον χρόνο. Ωστόσο, αυτή η προσπάθεια αγνοεί τη στατιστική φύση των αφίξεων και των αναχωρήσεων και οδηγεί σε σοβαρές υποεκτιμήσεις της καθυστέρησης, εκτός και αν η ζήτηση είναι πολύ μεγαλύτερη της ικανότητας. Όταν η ζήτηση είναι περίπου ίση με την ικανότητα, η θεωρία προβλέπει μηδενική καθυστέρηση. Στις χρόνο-εξαρτώμενες μεθόδους ανήκει και η μέθοδος της συντονισμένης μετακίνησης των Kimber and Hollis (1979), η οποία όμως δε θα αναλυθεί περισσότερο.

IV. Συναρτήσεις κόστους στην παρούσα διπλωματική εργασία

Το γενικευμένο κόστος g_{ijr} συνήθως λαμβάνει την παρακάτω έκφραση:

$$g_{ijr} = c_{ijr} + t_{ijr}\tau, \forall i, j, r \quad (2.1)$$

όπου c_{ijr} το κόστος του χρήστη σε χρηματική έκφραση, t_{ijr} ο συνολικός χρόνος μετακίνησης, τ ένας συντελεστής μετατροπής του χρόνου σε χρηματικές μονάδες (που ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού του, μπορεί να έχει και την έννοια της αξίας του χρόνου του χρήστη) και r η επιλεγείσα διαδρομή. Ισχύει:

$$t_{ijr} = \sum_a t_a \delta_{ijr}^a, \forall i, j, r \quad (2.2)$$

$$c_{ijr} = \sum_a c_a \delta_{ijr}^a, \forall i, j, r \quad (2.3)$$

όπου t_a και c_a οι χρόνοι διάνυσης και το κόστος του χρήστη του συνδέσμου a του συκοινωνιακού δικτύου αντίστοιχα και δ_{ijr}^a δίτιμος (1-0) μεταβλητή, ανάλογα με το αν ο σύνδεσμος a αποτελεί μέρος της διαδρομής r (σε αυτή την περίπτωση $\delta_{ijr}^a = 1$), ή όχι ($\delta_{ijr}^a = 0$) (Σταθόπουλος και Καρλαύτης 2008).

Σημειώνεται ότι η συνάρτηση κόστους των χρηστών που ορίζεται με βάση τα χαρακτηριστικά του δικτύου είναι προκαθορισμένη εξαρχής, και παραμένει αμετάβλητη, ανεξάρτητα της ζήτησης. Παρόλο που αυτή η υπόθεση ευσταθεί βραχυπρόθεσμα (στο χρονικό ορίζοντα ενός έργου), στην πραγματικότητα, λόγω της σταδιακής εμφάνισης του φαινομένου της συμφόρησης, παύει να ισχύει. Τα παραπάνω εξηγούνται από το γεγονός ότι η αυξανόμενη ζήτηση μιας διαδρομής οδηγεί σε μείωση της ταχύτητας λόγω της περιορισμένης (πεπερασμένης) ικανότητας των συνδέσμων με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου μετακίνησης και κατ' επέκταση την αύξηση του κόστους (Σταθόπουλος και Καρλαύτης, 2008).

Η μεταβλητή του γενικευμένου κόστους g_a ενός συνδέσμου a έχει στην τελευταία αυτή περίπτωση τη μορφή

$$g_a(q_a) = t_a(q_a)\tau + c_a(q_a), \forall a \quad (2.4)$$

όπου q_a ο φόρτος που διέρχεται από το σύνδεσμο a .

Για πρακτικούς λόγους, το κόστος c_a εκλαμβάνεται ως σταθερό, υπόθεση που μπορεί να αληθεύει ακόμη και στην περίπτωση των κορεσμένων δικτύων. Για τη μορφή της

συνάρτησης του χρόνου, χρησιμοποιείται η συνάρτηση που είναι γνωστή με τα αρχικά BPR (U.S Bureau of Public Roads):

$$t_a(q_a) = t_a^0 \left[1 + 0,15 \left(q_a / q_{a,cap} \right)^4 \right], \forall a \quad (2.5)$$

όπου t_a^0 ο χρόνος ελεύθερης ροής (η οριακή συνθήκη, όπου $q_a = 0$) και $q_{a,cap}$ ο φόρτος χωρητικότητας (ικανότητα) του συνδέσμου a . Η γενική μορφή του παραπάνω τύπου είναι η $t_a(q_a) = t_a^0 \left[1 + a \left(q_a / q_{a,cap} \right)^b \right], \forall a$, όπου a, b σταθερές που μεταβάλλονται με το είδος και την ιεράρχηση του οδικού συνδέσμου.

Σημειώνεται ότι η συνάρτηση BPR χρησιμοποιήθηκε κατά το παρελθόν κυρίως για την κατανομή της ημερήσιας ζήτησης και ως εκ τούτου δεν ενδείκνυται για την επίλυση της φόρτισης των δικτύων ιδίως σε συνθήκες αιχμής. Προκειμένου να αποκτήσουν οι συναρτήσεις γενικευμένου κόστους (που αντικατοπτρίζουν τις σχέσεις φόρτου-καθυστερήσεων) μεγαλύτερο ρεαλισμό, το μέγεθος της μεταβλητής $q_{a,cap}$ εκφράζει τη θεωρητική ικανότητα του συνδέσμου a . Η τελευταία μειώνεται, κυρίως στα αστικά δίκτυα, λόγω της πυκνής σηματοδότησης, της παράνομης στάσης και στάθμευσης καθώς και άλλων παραγόντων, όπως είναι η παρουσία πεζών στο κατάστρωμα της οδού, είτε λόγω παραβίασης του ερυθρού σήματος ή της μη διέλευσης από τις διαβάσεις πεζών. Στην περίπτωση αυτή, η πρακτική ικανότητα λαμβάνεται συνήθως ίση με $0,75 * q_{a,cap}$.

2.1.3 Υποθέσεις για την λειτουργία των δικτύων. Η εισαγωγή των αβεβαιοτήτων.

Η αναπαράσταση της λειτουργίας των μεταφορικών δικτύων βασίζεται σε δύο (τυπικά) υποθέσεις. Αυτές είναι (Wardrop 1952, Dafermos and Sparrow, 1969)

:

- η ισορροπία ή η βέλτιστη λύση των χρηστών (user equilibrium)
- η βέλτιστη λύση του συστήματος (system optimum)

Ορισμός της ισορροπίας των χρηστών: Για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού, στην κατάσταση ισορροπίας, ο χρόνος μετακίνησης που αντιστοιχεί σε όλες τις χρησιμοποιημένες διαδρομές είναι ίδιος και, επίσης, ίσος ή μικρότερος από τον χρόνο μετακίνησης που αντιστοιχεί σε κάθε μη χρησιμοποιημένη διαδρομή.

Αυτός ο ορισμός σημαίνει ότι στην ισορροπία, οι εναλλακτικές διαδρομές που συνδέουν κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού χωρίζονται σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τις διαδρομές που έχουν ροή. Ο χρόνος μετακίνησης σε όλες αυτές τις

διαδρομές είναι ίδιος. Η άλλη ομάδα περιλαμβάνει διαδρομές που δεν έχουν ροή. Ο χρόνος μετακίνησης σε κάθε μία από αυτές θα είναι ίσος ή μεγαλύτερος με το χρόνο μετακίνησης στις διαδρομές της πρώτης ομάδας (Sheffi, 1985).

Είναι λογικό να υποθεθεί ότι κάθε μετακινούμενος προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το δικό του χρόνο μετακίνησης. Αυτό δε σημαίνει ότι οι μετακινούμενοι μεταξύ ενός σημείου προέλευσης και ενός σημείου προορισμού μεταβιβάζονται σε μία μόνο διαδρομή. Ο χρόνος μετακίνησης σε κάθε σύνδεσμο μεταβάλλεται με τη ροή και συνεπώς, μεταβάλλεται και στις διάφορες διαδρομές του δικτύου, καθώς η ροή των συνδέσμων αλλάζει. Μια σταθερή κατάσταση πετυχαίνεται, όταν κανένας χρήστης δεν μπορεί να βελτιώσει μονομερώς το χρόνο μετακίνησής του με το να αλλάζει εναλλακτικές διαδρομές. Αυτός είναι ο χαρακτηρισμός της συνθήκης ισορροπίας των χρηστών. Η ισορροπία είναι σταθερή, με την έννοια ότι οποιαδήποτε απόκλιση από την ισορροπία δημιουργεί κίνητρα, τα οποία οδηγούν στην επαναφορά της ισορροπίας.

Υπάρχουν δύο είδη ισορροπίας των χρηστών:

- η ντετερμινιστική ισορροπία (deterministic user equilibrium)
- η στοχαστική ισορροπία (stochastic user equilibrium)

Ντετερμινιστική ισορροπία των χρηστών – Υποθέσεις

Η υπόθεση ότι κάθε χρήστης διαλέγει τη διαδρομή με το μικρότερο χρόνο μετακίνησης μπορεί να είναι λογική, αλλά περιλαμβάνει διάφορες προϋποθέσεις, οι οποίες δεν αντιπροσωπεύουν συνήθως την πραγματικότητα. Για παράδειγμα, κύρια προϋπόθεση της ντετερμινιστικής ισορροπίας αποτελεί το γεγονός ότι όλοι οι μετακινούμενοι έχουν πλήρη και τέλεια ενημέρωση (δηλ. είναι ενήμεροι περί των διαθέσιμων εναλλακτικών διαδρομών και των αντίστοιχων χρόνων μετακίνησης) και κάνουν σωστές επιλογές, όσον αφορά στην επιλογή διαδρομής. Επίσης, υποθέτει ότι όλοι οι χρήστες έχουν όμοια συμπεριφορά.

Στοχαστική ισορροπία των χρηστών-Υποθέσεις

Για να δοθεί ο ορισμός της στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών, γίνεται μια διαφοροποίηση ανάμεσα στο χρόνο μετακίνησης που αντιλαμβάνονται οι χρήστες και τον πραγματικό χρόνο μετακίνησης. Ο αντιληπτός χρόνος μετακίνησης μπορεί να θεωρηθεί ως μια τυχαία μεταβλητή κατανομημένη στον πληθυσμό των χρηστών. Με άλλα λόγια, κάθε μετακινούμενος, είναι πιθανόν να αντιλαμβάνεται ένα διαφορετικό χρόνο μετακίνησης για την ίδια διαδρομή. Η στοχαστική ισορροπία επιτυγχάνεται όταν κανένας μετακινούμενος δεν ‘πιστεύει’ ότι ο χρόνος μετακίνησής του μπορεί να βελτιωθεί με το να αλλάζει διαδρομή (Daganzo and Sheffi, 1977).

Αν υποτεθεί ότι ο χρόνος μετακίνησης είναι εντελώς ακριβής, όλοι οι μετακινούμενοι θα αντιλαμβάνονται τον ίδιο χρόνο μετακίνησης και η στοχαστική ισορροπία των χρηστών θα είναι όμοια με τη ντετερμινιστική ισορροπία.

Η διαφορά μεταξύ των δύο ειδών ισορροπίας, που αναφέρονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι ότι στη ντετερμινιστική ισορροπία γίνεται η υπόθεση ότι οι χρήστες γνωρίζουν τους χρόνους μετακίνησης όλων των συνδέσμων με βεβαιότητα. Στη στοχαστική ισορροπία γίνεται η υπόθεση ότι κάθε χρήστης μπορεί να αντιληφθεί ένα διαφορετικό χρόνο μετακίνησης και να συμπεριληφθεί ανάλογα.

Σταθερότητα της ισορροπίας

Η σταθερότητα της ντετερμινιστικής ή στοχαστικής ισορροπίας εξαρτάται από τη δυναμική ανταπόκριση του συστήματος στη διατάραξη αυτής. Όπως προαναφέρθηκε, ένα σύστημα παρουσιάζει ισορροπία με σταθερότητα, όταν τα κίνητρα που παράγονται από την ανισορροπία τείνουν να επαναφέρουν την ισορροπία. Μια άλλη περίπτωση σταθερότητας είναι όταν το σύστημα μεταβαίνει συνεχώς προς μια νέα κατάσταση με ομαλό τρόπο, όπου για παράδειγμα τα αντιληπτά κόστη των μετακινούμενων είναι μειωμένα.

Στην πραγματικότητα, με μικροσκοπική προσέγγιση της λειτουργίας του μεταφορικού συστήματος, παρατηρείται ότι οι χρήστες παρουσιάζουν μια πολύπλοκη συμπεριφορά που επηρεάζεται από την εμπειρία, τη συνήθεια και άλλους παράγοντες, με αποτέλεσμα η σταθερότητα να μην ισχύει πάντα. Ωστόσο, με μακροσκοπική ανάλυση (του συστήματος) μπορεί να υποτεθεί ότι τα μεταφορικά συστήματα ταλαντεύονται γύρω από μια κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή μια ισορροπία που χαρακτηρίζεται από σταθερότητα.

Ο Heydecker (1986) δίνει τον ορισμό ότι οι ροές γίνονται βέλτιστες, όσον αφορά στους χρήστες, όταν κάθε μετακινούμενος που αλλάζει μια εναλλακτική επιλογή (για παράδειγμα διαδρομή) θα επωμιστεί ένα κόστος το οποίο θα είναι μικρότερο ή ίσο με το παλιό κόστος της παλιάς επιλογής (διαδρομής) (user optimum). Αυτή η βελτιστοποίηση δεν αποτελεί κατ' ανάγκη ισορροπία. Ωστόσο, ο Heydecker (1986) δίνει ένα διαφορετικό ορισμό της ισορροπίας ο οποίος αποτελεί και βέλτιστη λύση των χρηστών. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο ορισμό, κάθε μετακινούμενος που αλλάζει μια εναλλακτική διαδρομή θα επωμιστεί ένα κόστος το οποίο θα είναι μικρότερο ή ίσο με το καινούργιο κόστος της παλιάς διαδρομής και έτσι δε θα έχει κανένα κίνητρο να επιστρέψει στην παλιά του διαδρομή.

Η διαδικασία με την οποία η ζήτηση, με τη μορφή ενός πίνακα μετακινήσεων, κατανέμεται στο δίκτυο ονομάζεται καταμερισμός της κυκλοφορίας. Ο πίνακας μετακινήσεων Προέλευσης-Προορισμού είναι ένας πίνακας, τα στοιχεία του οποίου παριστάνουν τον αριθμό των μετακινήσεων από ένα σημείο προέλευσης σε ένα σημείο προορισμού. Η διαδικασία της φόρτωσης του δικτύου θα πρέπει να αντανακλά μια

εκλογικευμένη συμπεριφορά όσον αφορά στη λήψη αποφάσεων από τους χρήστες του μεταφορικού δικτύου. Η διαδικασία αυτή εξαρτάται από τα συμφέροντα τα οποία επιδιώκονται. Ο *αλτρουιστικός ορθολογισμός* απαιτεί οι μετακινούμενοι να συμπεριφέρονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιούν το συμφέρον του συνόλου, καταλήγοντας σε ένα *βέλτιστο του συστήματος* (βέλτιστη λύση όσον αφορά στο σύστημα). Από την άλλη μεριά, ο *ατομικιστικός ορθολογισμός* απαιτεί οι μετακινούμενοι να επιδιώκουν την ικανοποίηση του ατομικού τους συμφέροντος, αγνοώντας τον συμφέρον των άλλων, καταλήγοντας σε μία *ισορροπία των χρηστών* (Bell and Iida, 1997).

Η υπόθεση του ατομικιστικού ορθολογισμού στον καταμερισμό της κυκλοφορίας αποδίδεται συνήθως στον Wardrop (1952) και είναι γνωστή ως πρώτη αρχή του Wardrop. Όπως έχει προαναφερθεί, στην κατάσταση ισορροπίας των χρηστών, οι διαδρομές επιλέγονται ώστε κανένας μετακινούμενος να μην μπορεί να βελτιώσει την ωφέλεια/χρησιμότητά του αλλάζοντας διαδρομή. Η έννοια αυτή της ισορροπίας βρίσκεται ευρεία εφαρμογή στα στατικά πρότυπα, στα οποία γίνεται η υπόθεση του ατομικιστικού ορθολογισμού.

Βέλτιστη κατάσταση του συστήματος (system optimum)

Αυτός ο καταμερισμός πρέπει να διακριθεί από τον καταμερισμό της ισορροπίας των χρηστών, που αναφέρθηκε προηγουμένως. Σύμφωνα με αυτόν, είναι πιθανόν, κάποιοι χρήστες να πειστούν να λάβουν αποφάσεις που αρχικά να είναι ενάντια στο ατομικό τους συμφέρον, αλλά εν τέλει να 'κερδίζει' το σύνολο των χρηστών. Σε ορισμένα πρότυπα, ο όρος της ισορροπίας των χρηστών αντικαθίσταται από τον όρο «βέλτιστη λύση ή ισορροπία του συστήματος» και γίνεται η υπόθεση του αλτρουιστικού ορθολογισμού. Τα πρότυπα αυτά στηρίζονται στη δεύτερη αρχή του Wardrop. Σύμφωνα με αυτή, οι επιλογές των χρηστών γίνονται με τέτοιο τρόπο ώστε το μεταφορικό σύστημα σαν σύνολο να πετυχαίνει τον ελάχιστο χρόνο μετακίνησης. Με άλλα λόγια, όταν οι επιλογές των χρηστών αριστοποιούν την απόδοση του συστήματος, τότε κανένας μετακινούμενος δεν μπορεί να αλλάξει διαδρομή χωρίς να αυξήσει το συνολικό χρόνο μετακίνησης. Ο ορισμός αυτός υποθέτει τέλεια *καθοδήγηση* και όμοια εκτίμηση των χαρακτηριστικών των επιλογών διαδρομής από τους χρήστες, που στην προκειμένη περίπτωση αποτελούν οι οριακοί και όχι οι μέσοι χρόνοι μετακίνησης (Ran and Boyce, 1996). Αξίζει να σημειωθεί ότι οριακός χρόνος μετακίνησης συνιστά ο επιπρόσθετος χρόνος που προκύπτει από την πρόσθεση ενός παραπάνω οχήματος ή διαδρομής στην κυκλοφοριακή ροή, ενώ ο μέσος χρόνος είναι αυτός που αντιλαμβάνεται ο χρήστης κατά την είσοδό του σε ένα δίκτυο.

Συμπερασματικά, έγινε διάκριση μεταξύ των προσεγγίσεων της βέλτιστης λύσης των χρηστών και της βέλτιστης λύσης του συστήματος. Στην πρώτη περίπτωση, κάθε

μετακινούμενος προσπαθεί να βελτιστοποιήσει τη μετακίνησή του χωρίς να τον απασχολούν οι άλλοι μετακινούμενοι. Στην δεύτερη περίπτωση, ωστόσο, κάθε μετακινούμενος λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος μετακίνησης στο δίκτυο.

2.2 Πρότυπα δικτύων

Συχνά, το τελικό αποτέλεσμα της προτυποποίησης ενός συστήματος μετακινήσεων είναι ένα μαθηματικό πρότυπο, το οποίο αποτελεί μια συνοπτική περιγραφή της πραγματικότητας, μια απεικόνισή της μέσα από –ενίοτε πολύπλοκες– διαδικασίες και συναρτησιακές σχέσεις. Τα κύρια χαρακτηριστικά των προτύπων συνιστούν οι τύποι (σχέσεις) και το περιεχόμενο (μεταβλητές). Τα πρότυπα που περιγράφουν μεταφορικά συστήματα κατηγοριοποιούνται ως εξής:

1. Μαθηματικά ή αλγοριθμικά
2. Συγκεντρωτικά ή εξατομικευμένα
3. Πιθανοτικά ή προσδιοριστικά (ντετερμινιστικά)
4. Διακριτών ή συνεχών εξαρτημένων μεταβλητών
5. Στατικά ή δυναμικά.

Όσον αφορά στην πέμπτη κατηγορία, τα στατικά πρότυπα αναφέρονται σε μια συγκεκριμένη αντιπροσωπευτική χρονική στιγμή, ενώ τα δυναμικά λαμβάνουν υπόψη τη μεταβολή κατά την εξέλιξη του χρόνου. Ένα από τα προβλήματα σχετικά με τη δημιουργία δυναμικών προτύπων αποτελεί η δυσκολία εξεύρεσης δεδομένων για την ανάπτυξή τους.

2.2.1 Στατικά πρότυπα δικτύων

Η ζήτηση για αστικές μετακινήσεις προέρχεται από το σύστημα δραστηριοτήτων στην αστική περιοχή. Ο χρόνος και οι περιοχές που συμβαίνουν οι δραστηριότητες δείχνουν ότι η μεταφορική ζήτηση δεν είναι ομοιόμορφη κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τα στατικά πρότυπα, ωστόσο, είναι εφαρμόσιμα μόνο όταν η κυκλοφοριακή ροή μπορεί να θεωρηθεί σταθερή κατά την περίοδο ανάλυσης. Συνεπώς, οι αναλύσεις των μεταφορικών δικτύων γίνονται για συγκεκριμένες αντιπροσωπευτικές χρονικές περιόδους, όπως η πρωινή αιχμή, η βραδινή αιχμή, το μεσημέρι, ανάλογα με το σκοπό της ανάλυσης. Η κυκλοφοριακή ροή ανάμεσα σε δύο σημεία προέλευσης-προορισμού κατά τη διάρκεια των παραπάνω συγκεκριμένων περιόδων, με σκοπό την εφαρμογή στατικών προτύπων, λαμβάνεται ως σταθερή. Πρέπει να επισημανθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος ανάλυσης, τόσο λιγότερο ακριβής είναι η παραπάνω υπόθεση. Παρόλο αυτά, η περίοδος ανάλυσης δεν μπορεί να είναι πολύ μικρή,

καθώς πρέπει να είναι αισθητά μεγαλύτερη από την τυπική διάρκεια των ταξιδιών αυτής της περιόδου (Sheffi, 1985).

Τα αστικά μεταφορικά πρότυπα διακριτών επιλογών συνήθως συσχετίζονται με έννοιες ισορροπίας δικτύου. Τα πρότυπα με μακροπρόθεσμους στρατηγικούς στόχους είναι συνήθως στατικά. Τα περισσότερα από τα στατικά πρότυπα ισορροπίας των χρηστών είναι σύμφωνα με την πρώτη αρχή του Wardrop, η οποία έχει περιγραφεί προηγουμένως. Η αρχή αυτή αναφέρεται σε χρησιμοποιημένες διαδρομές ανάμεσα σε ένα ζεύγος προέλευσης-προορισμού και ισχυρίζεται ότι το κόστος μετακίνησης, σε συνθήκες ισορροπίας, είναι ίσο με το ελάχιστο και ότι καμία μη χρησιμοποιημένη διαδρομή δεν έχει μικρότερο κόστος (Ran and Boyce, 1996).

Ένας δεύτερος τύπος στατικών προτύπων στηρίζεται στη δεύτερη αρχή του Wardrop. Η ανάλυση αυτή επιχειρεί την προτυποποίηση της ελεύθερης βούλησης των χρηστών. Τα συγκεκριμένα πρότυπα προσδιορίζονται ορίζοντας τις προτιμητέες διαδρομές ως εκείνες που επιτρέπουν το μεταφορικό σύστημα σαν σύνολο να 'αποκτήσει' τον ελάχιστο χρόνο μετακίνησης.

Σε αυτούς τους τύπους προτύπων (στατικών) μπορεί να γίνει ο διαχωρισμός σε προσδιοριστικά ή πιθανοτικά πρότυπα (deterministic/stochastic) με κριτήριο την πιθανοθεωρητική συμπεριφορά αυτών. Οι δύο αυτές κατηγορίες των στατικών προτύπων θα αναλυθούν παρακάτω.

2.2.1.1 Στατικά Ντετερμινιστικά πρότυπα

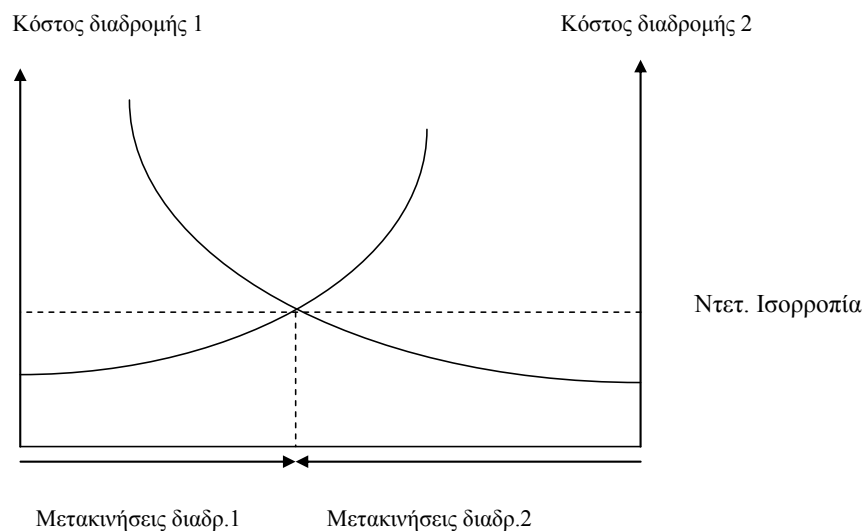
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, αναλύονται δύο μορφές καταμερισμού της κυκλοφορίας. Και οι δύο υποθέτουν ότι οι χρήστες διέπονται από ατομικιστικό ορθολογισμό όσον αφορά στη λήψη αποφάσεων. Την πρώτη μορφή αποτελεί ο καταμερισμός ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών (κατά αντιστοιχία, ντετερμινιστικά πρότυπα), ο οποίος προϋποθέτει ότι οι χρήστες αντιλαμβάνονται το κόστος με όμοιο τρόπο, αποκλείοντας τα λάθη στην αντίληψη (τέλειες προβλέψεις). Τη δεύτερη μορφή αποτελεί ο καταμερισμός στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών (κατά αντιστοιχία, στοχαστικά πρότυπα), ο οποίος αναιρεί την προϋπόθεση της όμοιας αντίληψης του κόστους και επιτρέπει λάθη στην αντίληψη (περιορισμένη ορθολογικότητα). Τα στατικά ντετερμινιστικά πρότυπα θα αναλυθούν πρώτα.

I. Συναρτήσεις κόστους συνδέσμων

Εξετάζονται δύο μορφές συναρτήσεων κόστους που αφορούν τους συνδέσμους. Η πρώτη είναι μια αύξουσα συνάρτηση κόστους συναρτήσει του φόρτου των συνδέσμων. Ο

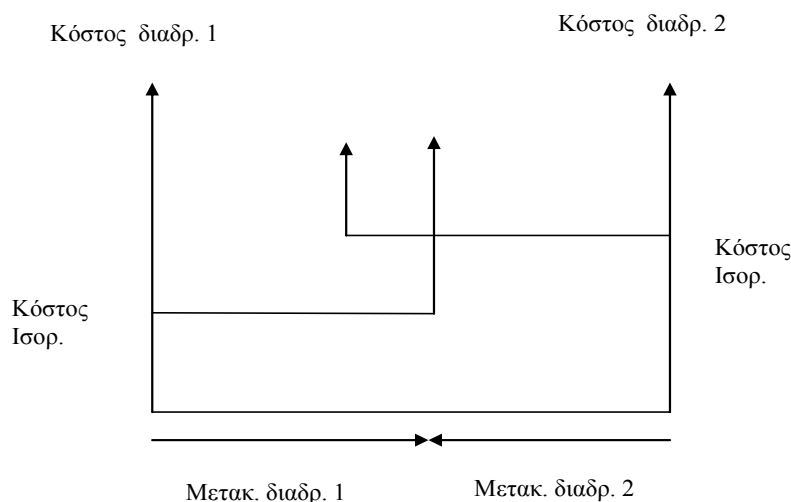
κυκλοφοριακός φόρτος δεν παρουσιάζει μέγιστο, παρόλο που μπορεί να υπάρχει ένα επίπεδο φόρτου, πάνω από το οποίο τα κόστη είναι υπερβολικά υψηλά για να πληρώσουν οι χρήστες. Η πρώτη αυτή μορφή συνάρτησης κόστους αναφέρεται ως *αύξουσα συνάρτηση κόστους*. Η δεύτερη μορφή έχει ένα σταθερό κόστος και μια σταθερή ικανότητα. Στην ικανότητα, στο σύνδεσμο λαμβάνει χώρα αναμονή και το κόστος προσδιορίζεται έτσι ώστε η ζήτηση να μην υπερβαίνει την ικανότητα. Η δεύτερη αυτή μορφή συνάρτησης κόστους αναφέρεται ως *συνάρτηση κόστους δεξιάς κύρτωσης* (Bell and Iida, 1997).

Θεωρείται ένα δίκτυο δύο συνδέσμων που ενώνουν ένα ζεύγος σημείων προέλευσης – προορισμού και συνεπώς δύο διαδρομών. Η αρχή ενός καταμερισμού ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών παριστάνεται στο σχήμα 2.1 για αύξουσες συναρτήσεις κόστους και στο σχήμα 2.2 για συναρτήσεις κόστους δεξιάς κύρτωσης. Ο διαχωρισμός της κυκλοφορίας στις δύο διαδρομές στην κατάσταση ισορροπίας προσδιορίζεται από την τομή των δύο καμπυλών κόστους. Όπως φαίνεται και από τα δύο σχήματα, η ισορροπία είναι σταθερή, με την έννοια ότι κάθε απόκλιση από αυτή δημιουργεί κίνητρα τα οποία δρουν ώστε να επαναφερθεί η ισορροπία.



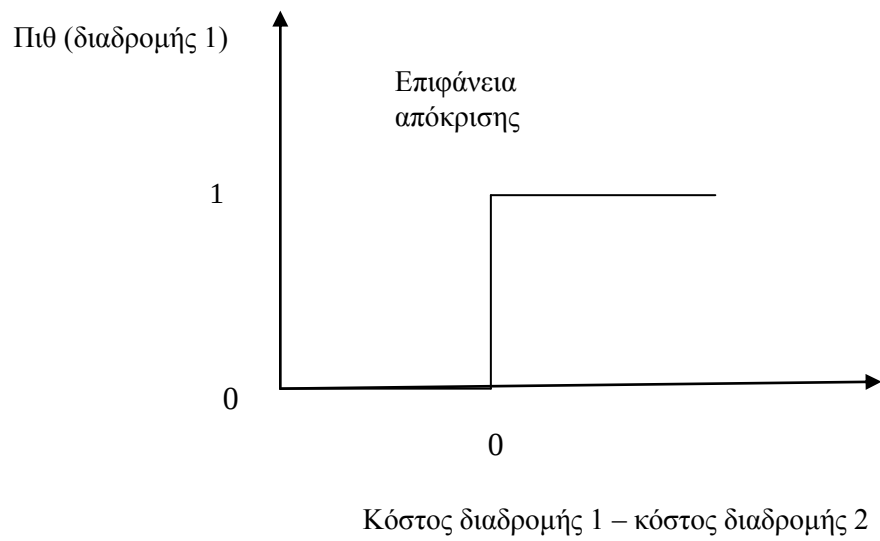
Σ

χήμα 2.1: Ντετερμινιστική ισορροπία των χρηστών για αύξουσες συναρτήσεις κόστους (Bell and Iida, 1997)



Σχήμα 2.2: Ντετερμινιστική ισορροπία των χρηστών για συναρτήσεις κόστους δεξιάς κύρτωσης (Bell and Iida, 1997)

Η επιφάνεια ανταπόκρισης παριστάνεται στο σχήμα 2.3. Στο σημείο όπου τα κόστη των δύο διαδρομών είναι ίσα, η επιφάνεια ανταπόκρισης παρουσιάζει «σκαλοπάτι». Στο σημείο αυτό η πιθανότητα επιλογής διαδρομής είναι αόριστη. Αυτό αποτελεί και μία από τις δυσκολίες που χαρακτηρίζουν τον καταμερισμό σε συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών. Με άλλα λόγια, στην ισορροπία, όλες οι χρησιμοποιούμενες διαδρομές μεταξύ ενός σημείου προέλευσης και ενός σημείου προορισμού έχουν το ίδιο κόστος και στην περίπτωση αυτή, η επιφάνεια ανταπόκρισης δείχνει ότι το μοίρασμα της κυκλοφορίας στις διάφορες διαδρομές δεν μπορεί να οριστεί. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι σε συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών ο κυκλοφοριακός φόρτος στις διάφορες διαδρομές δεν προσδιορίζεται με μοναδικό τρόπο.



Σχήμα 2.3: Επιφάνεια ανταπόκρισης για ντετερμινιστική ισορροπία χρηστών

II. Συμβολισμοί-ορισμοί

Πίνακες επιπτώσεων (incidence matrices)

Εξετάζονται δύο ειδών πίνακες επιπτώσεων:

- Ο πίνακας επιπτώσεων συνδέσμου-διαδρομής, που έχει στοιχεία $a_{kpij} = 1$, αν η διαδρομή p από το σημείο προέλευσης i στο σημείο προορισμού j χρησιμοποιεί το σύνδεσμο k , και 0 αλλιώς.

Απλοποιώντας τη μορφή των στοιχείων, αυτά γράφονται

$a_{kp} = 1$, αν η διαδρομή p χρησιμοποιεί το σύνδεσμο k , και 0 αλλιώς.

Ο πίνακας αυτός έχει τη μορφή

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1P} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{2P} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{K1} & a_{K2} & \dots & a_{KP} \end{bmatrix}$$

- Ο πίνακας επιπτώσεων προέλευσης-προορισμού-διαδρομής, που έχει στοιχεία $b_{ijp} = 1$, αν η διαδρομή p συνδέει το σημείο προέλευσης i με το σημείο προορισμού j , και 0 αλλιώς.

Ο πίνακας αυτός έχει τη μορφή

$$B = \begin{bmatrix} b_{111} & b_{112} & \dots & b_{11P} \\ b_{121} & b_{122} & \dots & b_{12P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{IJ1} & b_{IJ2} & \dots & b_{IJP} \end{bmatrix}$$

III. Ύπαρξη και μοναδικότητα της ντετερμινιστικής ισορροπίας-Ισοδύναμο πρόβλημα βελτιστοποίησης

Ας θεωρηθεί η περίπτωση όπου τα κόστη των συνδέσμων είναι συνάρτηση των φόρτων των συνδέσμων, έτσι ώστε σε κάθε δυνατό *διάνυσμα φόρτων συνδέσμων* $\mathbf{v}$ να αντιστοιχίζεται ένα μοναδικό διάνυσμα κόστους συνδέσμων. Η υπόθεση αυτή εξαιρεί την περίπτωση των συναρτήσεων κόστους δεξιάς κύρτωσης. Έτσι

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}(\mathbf{v}) \quad (2.6).$$

όπου $\mathbf{c}$ το κόστος συνδέσμων και $\mathbf{v}$ το *διάνυσμα φόρτων συνδέσμων*.

Οι φόρτοι των συνδέσμων συσχετίζονται με τους φόρτους των διαδρομών μέσω του πίνακα επιπτώσεων συνδέσμου-διαδρομής όπως ακολουθεί:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{h} \quad (2.7)$$

όπου $\mathbf{A}$ ο πίνακας επιπτώσεων συνδέσμου-διαδρομής, που αναφέρθηκε λίγο παραπάνω, και $\mathbf{h}$ ένα διάνυσμα φόρτων των διαδρομών.

Για τη μελέτη της ύπαρξης και μοναδικότητας ενός καταμερισμού ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών κρίνεται σκόπιμη η θεώρηση του ακόλουθου προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } \mathbf{h}^T(\mathbf{A}^T\mathbf{c}) \text{ υπό των περιορισμών } \mathbf{t} = \mathbf{B}\mathbf{h}, \mathbf{h} \geq \mathbf{0}.$$

Όπου $\mathbf{B}$ ο πίνακας επιπτώσεων προέλευσης-προορισμού-διαδρομής, που αναφέρθηκε λίγο παραπάνω και $\mathbf{t}$ ο πίνακας μετακινήσεων σε διανυσματική μορφή.

Το πρόβλημα αυτό έχει λύση με την προϋπόθεση ότι το σύνολο των εφικτών φόρτων των διαδρομών δεν είναι άδειο. Καθώς τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού είναι και κυρτά προβλήματα, οι βέλτιστες ροές των διαδρομών προσδιορίζονται επακριβώς με την ακόλουθη ανισότητα:

$$(\mathbf{h} - \mathbf{h}^*)^T \mathbf{A}^T \mathbf{c} = (\mathbf{v} - \mathbf{v}^*)^T \mathbf{c} \geq \mathbf{0}, \text{ για όλα τα εφικτά } \mathbf{v} \quad (2.8)$$

Με δεδομένη, λοιπόν, την ύπαρξη ενός καταμερισμού των μετακινήσεων σε συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας (λύση του παραπάνω προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού), ο θετικός ορισμός του Ιακωβιανού μητρώου των κοστών των συνδέσμων $\nabla \mathbf{c}(\mathbf{v})$ είναι ικανή και αναγκαία συνθήκη για τη μοναδικότητα αυτού του καταμερισμού. Συνεπώς, όταν ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη σε συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας

των χρηστών, οι φόρτοι των συνδέσμων είναι μοναδικοί, σε αντίθεση με τους φόρτους των διαδρομών οι οποίοι γενικά δεν είναι μοναδικοί.

Ένα ισοδύναμο πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την εύρεση ενός καταμερισμού της κυκλοφορίας σε συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών για μεγάλα μεταφορικά δίκτυα. Το ισοδύναμο πρόβλημα έχει την παρακάτω μορφή:

Ελαχιστοποίηση της $f(v)$ υπό τους περιορισμούς $v = Ah, t = Bh$ και $h \geq 0$

όπου A ο πίνακας επιπτώσεων συνδέσμου-διαδρομής, B ο πίνακας επιπτώσεων προέλευσης-προορισμού-διαδρομής, που αναφέρθηκε λίγο παραπάνω, t ο πίνακας μετακινήσεων σε διανυσματική μορφή και h ένα διάνυσμα φόρτων στις διαδρομές.

Η μορφή της $f(v)$ για τις διάφορες περιπτώσεις συναρτήσεων κόστους δίνεται στις επόμενες παραγράφους. Η ύπαρξη ενός καταμερισμού ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών εξασφαλίζεται με την προϋπόθεση ότι οι περιορισμοί είναι κυρτοί. Η μοναδικότητα της λύσης εξασφαλίζεται με την προϋπόθεση ότι το Ιακωβιανό μητρώο των συναρτήσεων κόστους των συνδέσμων συναρτήσει των φόρτων των συνδέσμων, $\nabla c(v)$, είναι θετικά ορισμένη. Η σημασία της συνθήκης μοναδικότητας είναι ότι την κυρίαρχη επιρροή στο κόστος κάθε συνδέσμου έχει ο κυκλοφοριακός φόρτος του ίδιου συνδέσμου και η επιρροή αυτή πρέπει να αυξάνεται μονοτονικά με τον κυκλοφοριακό φόρτο. Αυτό, βέβαια, δεν αποκλείει τη δυνατότητα της επιρροής του φόρτου και άλλων συνδέσμων (εκτός του ίδιου συνδέσμου) στο κόστος του ενός συνδέσμου, αλλά η επιρροή αυτή θα πρέπει να είναι δευτερεύουσας σημασίας. Η συγκεκριμένη περίπτωση είναι συνηθισμένη στα αστικά οδικά δίκτυα. Στην περίπτωση των συναρτήσεων κόστους δεξιάς κύρτωσης, το Ιακωβιανό μητρώο των συναρτήσεων κόστους των συνδέσμων συναρτήσει των φόρτων των συνδέσμων, $\nabla c(v)$, είναι μηδενικό, υποδηλώνοντας την ύπαρξη αλλά πιθανώς τη μη μοναδικότητα των φόρτων των συνδέσμων της ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών.

Για να δημιουργηθεί ένα ισοδύναμο πρόβλημα βελτιστοποίησης, το Ιακωβιανό μητρώο των συναρτήσεων κόστους των συνδέσμων συναρτήσει των φόρτων των συνδέσμων πρέπει να είναι συμμετρικό. Η έννοια της συμμετρίας υποδηλώνει ότι μια μικρή αλλαγή στον κυκλοφοριακό φόρτο του συνδέσμου i επηρεάζει το κόστος του συνδέσμου j με τον ίδιο τρόπο όπως μια μικρή αλλαγή στον κυκλοφοριακό φόρτο του συνδέσμου j επηρεάζει το κόστος του συνδέσμου i . Στην πραγματικότητα, η συμμετρία στις συναρτήσεις κόστους των συνδέσμων είναι σπάνια. Η παρουσία, ωστόσο, της ασυμμετρίας δε φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των αλγορίθμων που στηρίζονται στα ισοδύναμα προβλήματα βελτιστοποίησης (Bell and Iida, 1997).

IV. Αλγόριθμοι επίλυσης

A) Αύξουσες συναρτήσεις κόστους

Όταν οι συναρτήσεις κόστους είναι ανεξάρτητες (όταν το κόστος στο σύνδεσμο i εξαρτάται μόνο από τον κυκλοφοριακό φόρτο στο σύνδεσμο i), τότε η αντικειμενική συνάρτηση του ισοδύναμου προβλήματος βελτιστοποίησης (που αντιστοιχεί στη ντετερμινιστική ισορροπία των χρηστών) μπορεί να γραφεί

$$f(v) = \sum_{i=1}^N \int_{x=0}^{x=v_i} c_i(x) dx \quad (2.9)$$

όπου N είναι ο αριθμός των συνδέσμων, εφόσον το διάνυσμα $\nabla f(v)$ έχει στοιχεία $c_i(v_i)$ για $i = 1$ έως N . Εάν η συνάρτηση $c_i(v_i)$ είναι γνησίως αύξουσα για κάθε i , τότε ο όρος $\nabla^2 f(v)$ είναι θετικός και η αντικειμενική συνάρτηση $f(v)$ είναι κυρτή. Η παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση προτάθηκε για πρώτη φορά στις μεταφορές από τον Beckmann *et al.*, (1956).

Μια επίλυση του ισοδύναμου προβλήματος βελτιστοποίησης:

Ελαχιστοποίηση της $f(v)$ υπό τους περιορισμούς $v = Ah, t = Bh$ και $h \geq 0$

δίνεται από τον αλγόριθμο των Frank-Wolfe, που προτάθηκε από τον Bruynooghe *et al.*, (1968). Ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω:

Frank–Wolfe αλγόριθμος για καταμερισμό της κυκλοφορίας σε ντετερμινιστική ισορροπία χρηστών.

Βήμα 1: (Αρχή)

$v' \leftarrow$ Ελαχιστοποίηση της $LP(v) = v^T \nabla f(0)$ υπό των περιορισμών $v = Ah, t = Bh$ και $h \geq 0$

Βήμα 2: (βοηθητικοί φόρτοι συνδέσμων)

$v^* \leftarrow$ Ελαχιστοποίηση της $LP(v) = v^T \nabla f(v')$ υπό των περιορισμών $v = Ah, t = Bh$ και $h \geq 0$

Βήμα 3: (Αναζήτηση γραμμής)

$v' \leftarrow$ Ελαχιστοποίηση της $f(v = v'\lambda + v^*(1 - \lambda))$ υπό του περιορισμού $1 \geq \lambda \geq 0$

Εάν η σύγκλιση δεν είναι ικανοποιητική, επιστροφή στο βήμα2, αλλιώς τέλος.

Περιγραφή αλγορίθμου

Μετά τον καθορισμό των αρχικών δυνατών φόρτων των συνδέσμων (βήμα 1), ο αλγόριθμος επιλύει επανειλημμένα ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού ώστε να δώσει βοηθητικούς φόρτους συνδέσμων (βήμα 2) και εκτελεί μία αναζήτηση γραμμής για το βέλτιστο συνδυασμό των βοηθητικών και των τρεχόντων φόρτων των συνδέσμων (βήμα 3), καταλήγοντας σε μία ενημέρωση των τρεχόντων φόρτων των συνδέσμων. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού των βημάτων 1 και 2 είναι ισοδύναμα με τη μέθοδο καταμερισμού Όλα ή Τίποτα, με την οποία η κυκλοφορία κατανέμεται στις διαδρομές με το χαμηλότερο κόστος. Στον βήμα 3 ένας κυρτός συνδυασμός των βοηθητικών και των τρεχόντων φόρτων χρησιμοποιείται με σκοπό την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με μία μεταβλητή, λ. Το αποτέλεσμα αυτής της βελτιστοποίησης αποτελεί ένα καινούργιο διάνυσμα από τρέχοντες φόρτους συνδέσμων. Εάν η σύγκλιση δεν είναι επαρκής, τότε ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 2 και αναζητά ένα καινούργιο διάνυσμα βοηθητικών φόρτων συνδέσμων με βάσει τα τρέχοντα κόστη συνδέσμων, κ.λπ.

Παρατηρήσεις για τον αλγόριθμο F-W

Ο αλγόριθμος των Frank-Wolfe χαρακτηρίζεται από σχετική απλότητα, καθώς χρησιμοποιεί απλά και κατανοητά βήματα. Επίσης, η μέθοδος καταμερισμού Όλα ή Τίποτα είναι ευρέως γνωστή. Επιπρόσθετα, η μέθοδος είναι οικονομική όσον αφορά την αποθήκευση πληροφοριών. Παρόλο που οι διαδρομές δημιουργούνται στο βήμα 2, δεν είναι απαραίτητη η αποθήκευση αυτών με τη μορφή ενός πίνακα επιπτώσεων συνδέσμου-διαδρομής, καθώς δεν απαιτείται κάτι τέτοιο στο βήμα 3.

Στο τρίτο βήμα, η αναζήτηση γραμμής μπορεί να αντικατασταθεί από τη μέθοδο των διαδοχικών μέσων όρων, όπου

$$v' \leftarrow v'(1 - 1/n) + v^*(1/n)$$

όπου n ο αριθμός των επαναλήψεων. Στην πρώτη επανάληψη ($n = 1$), $v' \leftarrow v^*$, στη δεύτερη επανάληψη ($n = 2$), $v' \leftarrow v'(1/2) + v^*(1/n)$ κ.λπ.

Σύγκλιση αλγορίθμου

Καταρχήν, υπάρχουν διάφοροι τρόποι εκτίμησης του βαθμού της σύγκλισης. Ένας τρόπος είναι η παρατήρηση των σχετικών αλλαγών στο διάνυσμα των τρεχόντων φόρτων των συνδέσμων μεταξύ των επαναλήψεων. Ένας άλλος τρόπος, κάνοντας χρήση της συνθήκης βελτιστοποίησης, αποτελεί η σύγκριση του όρου $v^{*T}c(v')$ με τον όρο $v'^Tc(v')$. Η σύγκλιση

επιτυγχάνεται όταν το $\mathbf{v}'$ αλλάζει ελάχιστα με τις επαναλήψεις και όταν ο όρος $\mathbf{v}^{*T} \mathbf{c}(\mathbf{v}')$ πλησιάζει τον όρο $\mathbf{v}'^T \mathbf{c}(\mathbf{v}')$ (Bell and Iida, 1997). Ο αλγόριθμος των Frank-Wolfe, είτε με τη μέθοδο της αναζήτησης γραμμής είτε με τη μέθοδο των διαδοχικών μέσων όρων, συγκλίνει με την προϋπόθεση της ύπαρξης μοναδικής λύσης για το διάνυσμα των φόρτων των συνδέσμων. Στην περίπτωση της αναζήτησης γραμμής, η σύγκλιση εξασφαλίζεται, όταν όλες οι κατευθύνσεις αναζήτησης είναι κατευθύνσεις καθόδου και όταν όλα τα βήματα είναι βήματα καθόδου. Στην περίπτωση της μεθόδου με τους διαδοχικούς μέσους όρους, η σύγκλιση έχει αποδειχθεί από τους Powell and Sheffi (1982). Η ταχύτητα της σύγκλισης, ωστόσο, μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα για κάθε μία από τις δύο μεθόδους.

Διάφορες προτάσεις έχουν γίνει για την επιτάχυνση του αλγόριθμου των Frank-Wolfe, οι οποίοι εστιάζουν κυρίως στο τρίτο βήμα. Η πιο σημαντική, ίσως, από αυτές είναι η *simplicial decomposition* προσέγγιση (Patriksson, 1994). Με την προσέγγιση αυτή, διατηρούνται τα βοηθητικά διανύσματα φόρτων που παράγονται στο δεύτερο βήμα και το τρίτο βήμα παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\mathbf{v}' \leftarrow \text{Ελαχιστοποίηση της } f(\mathbf{v} = \sum_{i=1}^n \mathbf{v}_i^* \lambda_i) \text{ υπό του περιορισμού } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

όπου n , όπως πριν, ο αριθμός των επαναλήψεων. Μια πληθώρα αριθμητικών μεθόδων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτό το σημείο, όπως η μέθοδος Newton ή η μέθοδος quasi-Newton.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.1.1.3 οι συναρτήσεις κόστους των συνδέσμων δεν είναι πιθανό να είναι ανεξάρτητες, ιδιαίτερα στα αστικά οδικά δίκτυα. Μια αξιοσημείωτη προσέγγιση για την περίπτωση των μη ανεξάρτητων συναρτήσεων κόστους αποτελεί ο αλγόριθμος των Frank-Wolfe με *διαγωνιοποίηση* (*diagonalisation*). Με τον αλγόριθμο αυτό, χρησιμοποιείται ο όρος $\mathbf{c}(\mathbf{v}')$ αντί του όρου $\nabla f(\mathbf{v}')$ στο βήμα 2 και γίνεται χρήση του όρου $\mathbf{c}_i(\mathbf{v}_i)$ μόνο στο βήμα 3, όπως απαιτείται από την αντικειμενική συνάρτηση του Beckmann. Στην πράξη, η διαγωνιοποίηση δείχνει να αποδίδει ικανοποιητικά (Meneguzzer, 1995).

B) Συναρτήσεις κόστους δεξιάς κύρτωσης

Μια ειδική περίπτωση προκύπτει όταν κάθε σύνδεσμος χαρακτηρίζεται από ένα σταθερό κόστος και μια σταθερή κυκλοφοριακή ικανότητα (προσφορά). Όταν η ζήτηση, για ένα σύνδεσμο, υπερβαίνει την ικανότητα, προκύπτει ένα πρόσθετο κόστος (γνωστό ως καθυστέρηση) ώστε να εξισορροπεί την προσφορά και τη ζήτηση. Στην περίπτωση του σταθερού (με το κυκλοφοριακό φόρτο) κόστους, η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$f(v) = \sum_{i=1}^N \int_{x=0}^{x=v_i} c_i(x) dx = \sum_{i=1}^N c_i v_i = c^T v \quad (2.10)$$

(Bell and Iida, 1997).

Ο καταμερισμός της ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών μπορεί να θεωρηθεί, συνεπώς, ως μια λύση στο ακόλουθο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } c^T v \text{ υπό των περιορισμών } v = Ah, t = Bh, h \geq 0, s \geq v$$

όπου c είναι ένα διάνυσμα με τα σταθερά κόστη συνδέσμων και s ένα διάνυσμα με τις ικανότητές τους. Το πρόβλημα μπορεί να επαναδιατυπωθεί με όρους φόρτων διαδρομών ως εξής:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } h^T (A^T c), \text{ υπό των περιορισμών } t = Bh, h \geq 0, s \geq Ah.$$

όπου A ο πίνακας επιπτώσεων συνδέσμου-διαδρομής, B ο πίνακας επιπτώσεων προέλευσης-προορισμού-διαδρομής, που αναφέρθηκε λίγο παραπάνω, t ο πίνακας μετακινήσεων σε διανυσματική μορφή και h ένα διάνυσμα φόρτων στις διαδρομές.

Οι διαδρομές με το χαμηλότερο κόστος προτιμώνται αρχικά, ακολουθούν οι διαδρομές με το αμέσως μεγαλύτερο κόστος μετακίνησης, κ.λπ., μέχρι να συμπληρωθεί όλος ο πίνακας μετακινήσεων. Κανένας μετακινούμενος δε θα μπορεί να μειώσει το κόστος μετακίνησής του με την αλλαγή διαδρομής, καθώς οι συντομότερες (ως προς το γενικευμένο κόστος) διαδρομές έχουν γεμίσει ήδη με φόρτο. Συνεπώς, το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η εύρεση ενός καταμερισμού της κυκλοφορίας σε συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών.

Δυστυχώς, ο αλγόριθμος των Frank-Wolfe δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή την περίπτωση, καθώς τα κόστη των συνδέσμων δεν ορίζονται όταν ο φόρτος είναι ίσος με την κυκλοφοριακή ικανότητα των συνδέσμων. Όταν οι διαδρομές έχουν προσδιοριστεί εκ των προτέρων, το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού βασισμένο στις διαδρομές μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας τυποποιημένες διαδικασίες. Όσον αφορά στο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού βασισμένο στους συνδέσμους, πρέπει να εφαρμοστεί ένα σύστημα παραγωγής στήλης.

Γ) Οι πιο πιθανοί φόρτοι διαδρομών-το πρόβλημα μεγιστοποίησης της εντροπίας.

Εκτός από την περίπτωση που οι διαδρομές περιορίζονται σε ένα ελάχιστο σύνολο (ένα σύνολο όπου ένας μέγιστος αριθμός φόρτων των διαδρομών είναι μηδέν), οι φόρτοι των

διαδρομών σε συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας δεν είναι ορισμένοι με μοναδικό τρόπο. Προκύπτει, τότε, το πρόβλημα της εκτίμησης των πιο πιθανών φόρτων των διαδρομών.

Υπό συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών, τα κόστη όλων των χρησιμοποιούμενων διαδρομών ανάμεσα σε ένα ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού είναι ίσα και όλες οι διαδρομές με κόστη μεγαλύτερα από τα προηγούμενα δεν χρησιμοποιούνται. Επίσης, οι μετακινούμενοι είναι όμοιοι σχετικά με το ποιο σύνολο χρησιμοποιούμενων διαδρομών θα επιλέξουν πραγματικά. Ο αριθμός των παραλλαγών σε ένα δεδομένο σύνολο φόρτων διαδρομών για ένα δεδομένο ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού δίδεται από τον τύπο:

$$E_k = t_k! / \prod_{j \in U(k)} h_j! \quad (2.11)$$

όπου $U(k)$ είναι το σύνολο των χρησιμοποιούμενων διαδρομών που συνδέουν ένα ζεύγος προέλευσης-προορισμού k . Εφόσον οι μετακινούμενοι είναι όμοιοι σχετικά με το ποια διαδρομή από το σύνολο $U(k)$ θα χρησιμοποιήσουν, κάθε παραλλαγή έχει κατά κανόνα ίδια πιθανότητα. Σε όλα τα ζεύγη προέλευσης-προορισμού, ο αριθμός των παραλλαγών των φόρτων των χρησιμοποιούμενων διαδρομών δίδεται από τον παρακάτω τύπο:

$$E(h) = \prod_k (t_k! / \prod_{j \in U(k)} h_j!) \quad (2.12)$$

Ο αριθμός των παραλλαγών αυτών αναφέρεται συνήθως ως *εντροπία* του συστήματος.

Το πιο πιθανό σύνολο φόρτων των διαδρομών, εκτός βέβαια από την περίπτωση που οι διαδρομές περιορίζονται σε ένα ελάχιστο σύνολο, υπολογίζεται από το παρακάτω πρόβλημα μεγιστοποίησης της εντροπίας:

$$\text{Μεγιστοποίηση της } E(h) \text{ υπό των περιορισμών } v^* = Ah, h \geq 0$$

όπου v^* είναι το διάνυσμα των φόρτων των συνδέσμων σε ντετερμινιστική ισορροπία των χρηστών και h το διάνυσμα των φόρτων στις χρησιμοποιούμενες διαδρομές.

Σημειώνεται ότι

$$\ln(E(h)) = \sum_k \ln(t_k!) - \sum_k \sum_{j \in U(k)} \ln(h_j!) \quad (2.13)$$

(Bell and Iida, 1997)

Επειδή η $E(h)$ σχετίζεται μονοτονικά με τη $\ln(E(h))$, το οποίο σημαίνει ότι όταν η $E(h)$ αυξάνεται τότε και η $\ln(E(h))$ αυξάνεται και αντίστροφα, και επειδή ο πρώτος όρος είναι

σταθερός (ο πίνακας μετακινήσεων Προέλευσης-Προορισμού είναι δεδομένος), το πρόβλημα μεγιστοποίησης της εντροπίας μπορεί να επαναδιατυπωθεί και ως εξής:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } \sum_k \sum_{j \in U(k)} \ln(h_j!) \text{ υπό των περιορισμών } v^* = Ah, h \geq 0.$$

(Bell and Iida, 1997)

Δ) Ελαστική Ζήτηση

Τα πρότυπα καταμερισμού ντετερμινιστικής ισορροπίας που έχουν παρουσιαστεί μέχρι τώρα έχουν ως δεδομένο ένα σταθερό πίνακα μετακινήσεων Προέλευσης-Προορισμού. Ωστόσο, η χρήση σταθερού πίνακα μετακινήσεων, με σκοπό την εκτίμηση των επιπτώσεων στην κυκλοφορία της κατασκευής μεγάλων έργων μεταφορικής υποδομής, έχει προκαλέσει πρόσφατα ανησυχία, εξαιτίας της επίδρασης που έχουν τέτοια έργα στην παραγωγή μετακινήσεων και τον καταμερισμό της κυκλοφορίας. Όπως έχει αναφερθεί στο πρώτο κεφάλαιο, η κατασκευή νέας υποδομής έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή νέων μετακινήσεων με αποτέλεσμα τον πιθανό σταδιακό κορεσμό και των καινούργιων έργων. Η νέα αυτή ζήτηση, γνωστή και ως *παρακινήμενη κυκλοφορία (induced demand)*, επιβάλει τη θεώρηση της ζήτησης μεταξύ ενός ζεύγους σημείων προέλευσης-προορισμού ως μία συνάρτηση του κόστους μετακίνησης ανάμεσα σε αυτά τα δύο σημεία (Gartner, 1980). Έτσι η συνάρτηση της ζήτησης γράφεται ως εξής:

$$t = t(z) \quad (2.14)$$

όπου t ο πίνακας μετακινήσεων Προέλευσης-Προορισμού σε διανυσματική μορφή και z είναι ένα διάνυσμα των αναμενόμενων κοστών μεταξύ ενός ζεύγους σημείων προέλευσης-προορισμού. Το αναμενόμενο κόστος είναι αυτό που ο μετακινούμενος θα βίωνε έχοντας ήδη πάρει αποφάσεις σχετικά με την επιλογή διαδρομής.

Όταν οι συναρτήσεις κόστους και ζήτησης είναι ανεξάρτητες (όταν το κόστος ενός συνδέσμου εξαρτάται μόνο από τον κυκλοφοριακό φόρτο αυτού του συνδέσμου και όταν η ζήτηση μεταξύ ενός ζεύγους σημείων προέλευσης-προορισμού εξαρτάται μόνο από το κόστος μετακίνησης μεταξύ αυτών των σημείων), υπάρχει ένα ισοδύναμο πρόβλημα βελτιστοποίησης η επίλυση του οποίου οδηγεί σε έναν καταμερισμό της κυκλοφορίας υπό συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας.

Ας θεωρηθεί η ακόλουθη αντικειμενική συνάρτηση:

$$f(v, t) = \sum_{i \in I} \int_{x=0}^{x=v_i} c_i(x) dx - \sum_{w \in W} \int_{y=0}^{y=t_w} t_w^{-1}(y) dy \quad (2.15)$$

όπου I το σύνολο των συνδέσμων, W το σύνολο των στοιχείων σε ένα πίνακα μετακινήσεων και $t_w^{-1}(y)$ η αντίστροφη συνάρτηση της ζήτησης, το αναμενόμενο κόστος μετακίνησης μεταξύ ενός ζεύγους σημείων προέλευσης-προορισμού w . Πρέπει να σημειωθεί ότι η συνάρτηση της ζήτησης είναι αντιστρέψιμη, επειδή είναι γνησίως αύξουσα. Ας θεωρηθεί το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης:

Ελαχιστοποίηση της $f(v, t)$ υπό των περιορισμών $v = Ah, t = Bh, h \geq 0, v \geq 0, t \geq 0$

όπου A και B είναι οι πίνακες επιπτώσεων συνδέσμου-διαδρομής και προέλευσης-προορισμού-διαδρομής αντίστοιχα και t ο πίνακας μετακινήσεων Προέλευσης-Προορισμού σε διανυσματική μορφή. Η λύση του προβλήματος συνιστά, όπως προαναφέρθηκε, έναν καταμερισμό της κυκλοφορίας σε συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας χρηστών, με ελαστική ζήτηση.

Όταν οι συναρτήσεις κόστους των συνδέσμων είναι γνησίως αύξουσες, η αντικειμενική συνάρτηση έχει ένα θετικά ορισμένο Εσσιανό μητρώο (Hessian) με αναφορά στις πρωταρχικές μεταβλητές v (φόρτοι των συνδέσμων) και t (κόστος μετακίνησης ανάμεσα σε ένα ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού) και έτσι είναι κυρτή. Οι περιορισμοί είναι, επίσης, κυρτοί. Συνεπώς, το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει μοναδική λύση. Συμπερασματικά, σε συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας, οι φόρτοι των συνδέσμων είναι μοναδικές, όπως και το κόστος μετακίνησης ανάμεσα σε ένα ζεύγος σημείων προέλευσης – προορισμού, παρόλο που οι φόρτοι των διαδρομών δεν είναι γενικά μοναδικές.

Συνεχίζοντας, η μέθοδος των διαδοχικών μέσων όρων μπορεί να εφαρμοστεί για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης ως εξής:

Μέθοδος των διαδοχικών μέσων όρων με σκοπό τον καταμερισμό της κυκλοφορίας υπό συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας (Bell and Iida, 1997)

Βήμα 1: (Αρχή)

$v \leftarrow 0$

$c \leftarrow c(v)$

$n \leftarrow 1$

Βήμα 2: (Μέθοδος των διαδοχικών μέσων όρων)

Επανάληψη

Για τα κόστη των συνδέσμων c , εύρεση των διαδρομών με το μικρότερο κόστος και τα κόστη τους z , φόρτωση με $t(z)$ στις διαδρομές με το μικρότερο κόστος ώστε να προκύψουν οι βοηθητικές ροές των συνδέσμων v^* (ροές σε συνθήκες ισορροπίας)

$$v \leftarrow (1/n)v^* + (1 - 1/n)v$$

$$c \leftarrow c(v)$$

$$n \leftarrow n + 1$$

μέχρι τη σύγκλιση.

Μια ειδική περίπτωση ελαστικής ζήτησης που έχει προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον στο παρελθόν αποτελεί η περίπτωση του συνδυασμένου προτύπου κατανομής και καταμερισμού της κυκλοφορίας. Τα αθροίσματα των γραμμών και των στηλών του πίνακα μετακινήσεων θεωρούνται σταθερά, αλλά το ταίριασμα των προορισμών και των προελεύσεων των μετακινήσεων επηρεάζονται από τις συνθήκες του δικτύου. Οι μετακινούμενοι υποτίθεται ότι λαμβάνουν διαδρομές σύμφωνα με την αρχή της ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών. Ο Evans (1976) ασχολήθηκε με το συγκεκριμένο πρότυπο και πρότεινε ένα ισοδύναμο πρόβλημα βελτιστοποίησης βασισμένο στην παραγωγή εντροπίας από το πρότυπο βαρύτητας.

Ακολουθεί ο αλγόριθμος του Evans για το συνδυασμένο πρόβλημα κατανομής και καταμερισμού των μετακινήσεων:

Evans algorithm for the combined distribution and assignment problem

Βήμα 1: (Αρχή)

$$v \leftarrow 0$$

$$n \leftarrow 0$$

Βήμα 2: (Κατεύθυνση αναζήτησης)

$$n \leftarrow n + 1$$

$$z \leftarrow \text{Εύρεση των διαδρομών με το μικρότερο κόστος με βάση τα κόστη συνδέσμων } c(v)$$

$$t^* \leftarrow \text{Εφαρμογή του προτύπου βαρύτητας } t_k^* = R_m S_n \exp(-az_k) \text{ βασισμένο στα } O_m \text{ και } d_n$$

$$v^* \leftarrow \text{Μεταβίβαση του } t^* \text{ στις διαδρομές με το μικρότερο κόστος}$$

Βήμα 3: (Μέθοδος των διαδοχικών μέσων όρων)

$$v \leftarrow (1/n)v^* + (1 - 1/n)v$$

Εάν η σύγκλιση δεν είναι ικανοποιητική, επιστροφή στο βήμα2.

Συμβολισμοί

Στον παραπάνω αλγόριθμο συναντούνται οι ακόλουθοι όροι:

v : φόρτοι συνδέσμων,

n : αριθμός επαναλήψεων,

z : κόστη μετακίνησης ανάμεσα σε δύο σημεία προέλευσης – προορισμού,

Οι όροι με το σύμβολο * αναφέρονται στις βέλτιστες συνθήκες (ντετερμινιστική ισορροπία),

O_m : ο συνολικός αριθμός των μετακινήσεων που προέρχονται από το σημείο προέλευσης m ,
 d_n : ο συνολικός αριθμός των μετακινήσεων που προσελκύονται από το σημείο προορισμού n
 $R_m = \exp(-\gamma_m)$ όπου γ_m μια δυική μεταβλητή για το σημείο προέλευσης m ,
 $S_n = \exp(-\Phi_n)$ όπου Φ_n μια δυική μεταβλητή για το σημείο προορισμού n ,
 α : μια παράμετρος του προτύπου βαρύτητας,
 z_k : το αναμενόμενο κόστος μετακίνησης μεταξύ ενός ζεύγους σημείων k

Περιγραφή αλγορίθμου

Στην πράξη δεν είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι δυνατές διαδρομές. Αρχικά, το πρότυπο βαρύτητας, μαζί με ένα αρχικό σύνολο ελάχιστου κόστους μετακίνησης μη-φορτισμένου δικτύου, εφαρμόζεται για να αποδώσει ένα βοηθητικό πίνακα μετακινήσεων t^* . Η μέθοδος του Όλα ή Τίποτα εφαρμόζεται στη συνέχεια για να αποδώσει τους βοηθητικούς φόρτους συνδέσμων v^* , οι οποίοι συγκεντρώνονται με τους τρέχοντες φόρτους συνδέσμων και υπολογίζεται ο μέσος όρος. Τα κόστη των συνδέσμων υπολογίζονται ξανά και τα ελάχιστα κόστη μετακίνησης z ζητούνται ξανά, κ.λπ. (Bell and Iida, 1997).

2.2.1.2 Στατικά Στοχαστικά πρότυπα

Τα στοχαστικά (πιθανοτικά) πρότυπα εισάγουν την αβεβαιότητα στη σχέση ενός μεγέθους με τα χαρακτηριστικά που ενδεχομένως το επηρεάζουν. Για παράδειγμα, ένα πιθανοτικό πρότυπο μπορεί να αποδίδει την πιθανότητα ένας μετακινούμενος να χρησιμοποιήσει κάποιο μέσο, αν το μέσο αυτό έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (Σταθόπουλος και Καρλαύτης, 2008).

Η στοχαστική προσέγγιση στον καταμερισμό της κυκλοφορίας στο δίκτυο αποτελεί μια γενίκευση της ντετερμινιστικής. Σε αντίθεση με την τελευταία, οι μετακινούμενοι δεν αντιλαμβάνονται τη διάρκεια μετακίνησης που αντιστοιχεί σε κάθε διαδρομή με την ίδια ακρίβεια, γι' αυτό και η αντιληπτή διάρκεια μετακίνησης αποδίδεται σε τυχαία μεταβλητή. Στα συγκεκριμένα πρότυπα, η πιθανότητα να επιλεγεί κάποια διαδρομή που συνδέει δύο σημεία προέλευσης-προορισμού ταυτίζεται με την πιθανότητα ο αντιληπτός χρόνος μετακίνησης να είναι ο μικρότερος από αυτούς που αντιστοιχούν στις εναλλακτικές διαδρομές (υπόθεση περιορισμένης ορθολογικότητας). Όπως έχει προαναφερθεί ο ελάχιστος χρόνος μετακίνησης αντιστοιχεί στη μέγιστη χρησιμότητα που αποδίδεται σε μία διαδρομή.

Η τυχαιότητα του αντιληπτού χρόνου μετακίνησης αποδίδεται στις διαφορές στην αντίληψη που έχουν οι χρήστες του οδικού δικτύου (που οφείλεται για παράδειγμα στην διαφορετική εμπειρία ανάμεσα σε αυτούς) και σε εξωγενείς παράγοντες (όπως οι καιρικές

συνθήκες, ο φωτισμός κ.α.). Τα στοχαστικά πρότυπα χρησιμοποιούνται ώστε να προσδιορίσουν, με βάσει τη θεωρία της τυχαίας χρησιμότητας, πόσοι μετακινούμενοι θα χρησιμοποιήσουν κάθε διαδρομή. Στα πιο γνωστά στατικά στοχαστικά πρότυπα επιλογής διαδρομής συγκαταλέγονται το πρότυπο Logit και το πρότυπο Probit.

Συγκρίνοντας τα δύο πρότυπα, μπορεί να ειπωθεί ότι το πρότυπο Logit είναι πιο εύχρηστο. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι το πρότυπο αυτό προσφέρει ένα ισοδύναμο πρόβλημα βελτιστοποίησης, τουλάχιστον όταν το Ιακωβιανό μητρώο των συναρτήσεων κόστους των συνδέσμων είναι θετικά ορισμένο. Ωστόσο, το συγκεκριμένο πρότυπο αντιμετωπίζει όλες τις εναλλακτικές επιλογές όπως αν ήταν στατιστικά ανεξάρτητες. Το πρότυπο Probit λαμβάνει υπόψη τη συσχέτιση μεταξύ των εναλλακτικών διαδρομών, αλλά δεν έχει κάποιο ισοδύναμο πρόβλημα βελτιστοποίησης (Bell and Iida, 1997). Επίσης, στο πρότυπο Probit εμπεριέχεται και μία διαδικασία τυχαίας δειγματοληψίας.

I. Ύπαρξη και μοναδικότητα της στοχαστικής ισορροπίας-Ισοδύναμο πρόβλημα βελτιστοποίησης

Θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω όροι-συμβολισμοί για την περιγραφή της ύπαρξης και μοναδικότητας του καταμερισμού της κυκλοφορίας σε συνθήκες στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών.

h : οι φόρτοι των διαδρομών,

h^* : οι φόρτοι των διαδρομών σε συνθήκες στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών,

d : το διάνυσμα των διαφορών μεταξύ των κοστών των διαδρομών, που οι μετακινούμενοι θα ήταν πρόθυμοι να πληρώσουν, και των κοστών των διαδρομών.

t : ο πίνακας μετακινήσεων Προέλευσης-Προορισμού σε διανυσματική μορφή

Στο σημείο αυτό θα γίνει ο διαχωρισμός των συναρτήσεων κόστους σε αύξουσες και συναρτήσεις κόστους δεξιάς κύρτωσης.

Εξετάζεται η περίπτωση των αυξουσών συναρτήσεων κόστους. Όπως στη περίπτωση μιας ντετερμινιστικής ισορροπίας, η στοχαστική ισορροπία συμβαίνει υπό πολύ γενικές συνθήκες, οι οποίες σχετίζονται με την κυρτότητα των περιορισμών (Bell and Iida, 1997, Smith 1980). Για τη μελέτη της ύπαρξης και μοναδικότητας ενός καταμερισμού στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών κρίνεται σκόπιμη η θεώρηση του ακόλουθου προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } -h^T d \text{ υπό των περιορισμών } t = Bh, h \geq 0.$$

Το πρόβλημα αυτό έχει λύση με την προϋπόθεση ότι το σύνολο των εφικτών φόρτων των διαδρομών δεν είναι άδειο. Όταν και η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι

κυρτοί, οι βέλτιστες ροές των διαδρομών προσδιορίζονται επακριβώς με την ακόλουθη ανισότητα:

$$(h - h^*)^T d \leq 0, \text{ για όλα τα εφικτά } h$$

Ας σημειωθεί ότι με δεδομένη την ύπαρξη ενός καταμερισμού των μετακινήσεων σε συνθήκες στοχαστικής ισορροπίας, ο αρνητικός ορισμός της gradient $\nabla d(h)$ είναι ικανή και αναγκαία συνθήκη για τη μοναδικότητα αυτού του καταμερισμού. Συνεπώς, σε συνθήκες στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών, οι φόρτοι των διαδρομών είναι μοναδικοί.

Εξετάζεται, τώρα, η περίπτωση των συναρτήσεων κόστους δεξιάς κύρτωσης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η ανισότητα που προσδιορίζει τις βέλτιστες συνθήκες έχει τη μορφή:

$$(h - h^*)^T d \leq 0, \text{ για όλα τα εφικτά } h$$

Αλλά οι περιορισμοί αυξάνονται σε τρεις ως εξής:

$$t = Bh, h \geq 0, s \geq Ah.$$

Το Ιακωβιανό μητρώο των κοστών των διαδρομών δεν ορίζεται, επειδή τα κόστη των συνδέσμων δεν επηρεάζονται από τις αλλαγές στον κυκλοφοριακό φόρτο. Ωστόσο, το Ιακωβιανό μητρώο των $d(h)$ είναι και σε αυτή την περίπτωση αρνητικά ορισμένο, με την προϋπόθεση ότι η ζήτηση για τις διαδρομές μειώνεται καθώς το κόστος μετακίνησης αυξάνεται. Συμπερασματικά, και σε αυτήν την περίπτωση οι φόρτοι των διαδρομών σε συνθήκες στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών είναι μοναδικοί.

Υπό συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών, χρησιμοποιούνται μόνο οι διαδρομές με το ελάχιστο κόστος, ενώ υπό συνθήκες στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών, χρησιμοποιούνται μόνο οι διαδρομές με το ελάχιστο αντιληπτό κόστος μετακίνησης. Επιπρόσθετα, όσον αφορά στην αντίληψη του κόστους στη δεύτερη περίπτωση της στοχαστικής ισορροπίας, δεν είναι τέλεια, αλλά αποτελεί μεταβλητή που μεταβάλλεται τυχαία. Συνεπώς, λόγω της τυχαιότητας της αντίληψης του κόστους σε συνθήκες στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών, κάθε διαδρομή είναι πιθανόν να χρησιμοποιηθεί.

Ισοδύναμο πρόβλημα βελτιστοποίησης

Ο Sheffi (1985) έχει παρουσιάσει ένα γενικευμένο ισοδύναμο πρόβλημα βελτιστοποίησης για τις συνθήκες της στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών, βασισμένο στο

αντιληπτό ελάχιστο κόστος μετακίνησης μεταξύ προέλευσης και προορισμού. Η αντικειμενική συνάρτηση έχει την παρακάτω μορφή:

$$f(v) = -t^T z(v) + v^T c(v) - \sum_{\alpha \lambda \alpha \tau \alpha i} \int_{x=0}^{x=v_i} c_i(x) dx \quad (2.16)$$

Όπου $\mathbf{z}$ είναι το διάνυσμα του αντιληπτού κόστους μετακίνησης μεταξύ προέλευσης και προορισμού. Η αντικειμενική συνάρτηση υποθέτει ότι οι συναρτήσεις κόστους των συνδέσμων είναι ανεξάρτητες. Εάν η σχέση μεταξύ των φόρτων και των κοστών των συνδέσμων είναι μονότονη, οι συναρτήσεις κόστους των συνδέσμων μπορούν αντιστραφούν και με ολοκλήρωση κατά μέρη προκύπτει

$$\sum_i \int_{x=c_{\min}}^{x=c_i} v_i(x) dx = v^T c(v) - \sum_{\alpha \lambda \alpha \tau \alpha i} \int_{x=0}^{x=v_i} c_i(x) dx \quad (2.17)$$

Όταν οι φόρτοι των συνδέσμων παριστάνονται ως συναρτήσεις των κοστών των συνδέσμων, η παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση γίνεται

$$f(c) = -t^T z(c) + \sum_{\alpha \lambda \alpha \tau \alpha i} \int_{x=c_{\min}}^{x=c_i} v_i(x) dx \quad (2.18)$$

Η βέλτιστη τιμή της $f(v)$, ή εναλλακτικά της $f(c)$, προσδιορίζει έναν καταμερισμό της ζήτησης για μετακινήσεις υπό συνθήκες στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών.

II. Πρότυπο καταμερισμού της κυκλοφορίας Logit

A) Το πρότυπο επιλογής διαδρομής Logit

Το πρότυπο αυτό έχει τη μορφή

$$\ln(h_j^*/h_{j'}^*) = -\alpha(g_j^* - g_{j'}^*) \quad (2.19)$$

Όπου α μία παράμετρος διασποράς που θα αναλυθεί παρακάτω, j και j' δύο διαδρομές που συνδέουν το ίδιο ζεύγος σημείων προέλευσης προορισμού και h_j^* και g_j^* ο κυκλοφοριακός φόρτος και το κόστος στη διαδρομή j , σε συνθήκες στοχαστικής ισορροπίας. Ο λογάριθμος του λόγου των φόρτων των δύο διαδρομών είναι ανάλογος της διαφοράς στο κόστος των διαδρομών. Επίσης, διαδρομές με ίδιο κόστος μετακίνησης φορτώνονται με ίσα μερίδια κυκλοφορίας και διαδρομές με υψηλότερα κόστη φορτώνονται με χαμηλότερα μερίδια από

τις διαδρομές με τα χαμηλότερα κόστη. Αξίζει να σημειωθεί ότι για πεπερασμένες διαφορές κόστους, κάθε διαδρομή θα έχει ένα θετικό μερίδιο κυκλοφορίας, αντικατοπτρίζοντας το γεγονός ότι σε συνθήκες στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών, σε αντίθεση με τη ντετερμινιστική ισορροπία των χρηστών, *κάθε διαδρομή χρησιμοποιείται*. Τα παραπάνω συμπεραίνονται από τον προαναφερόμενο τύπο του προτύπου Logit.

Τα πρότυπα επιλογών Logit στηρίζονται συχνά στη θεωρία της *μέγιστης χρησιμότητας (ωφέλειας)*, σύμφωνα με την οποία οι χρήστες των μεταφορικών συστημάτων επιλέγουν τις διαδρομές με τη *μεγαλύτερη αντιληπτή χρησιμότητα*. Συνεχίζοντας, η αντιληπτή χρησιμότητα περιέχει ένα τυχαίο στοιχείο, αντικατοπτρίζοντας τα λάθη στην αντίληψη ή τις διακυμάνσεις στην προτίμηση.

Ας υποθεθεί ότι η αντιληπτή χρησιμότητα μιας διαδρομής j ισούται με το άθροισμα δύο όρων, το αρνητικό του γενικευμένου κόστους $-g_j$ και έναν τυχαίο όρο ε_j (γνωστό και ως τυχαίο σφάλμα) ως εξής:

$$u_j = -g_j + \varepsilon_j \quad (2.20)$$

Τότε η πιθανότητα της διαδρομής j να επιλεγεί από ένα σύνολο διαδρομών J είναι ίση με $\Pr(u_j > u_k \text{ για όλες τις διαδρομές } k \text{ που δεν είναι ίδιες με τη } j \text{ αλλά ανήκουν στο σύνολο } J)$. Όταν ο τυχαίοι όροι ε_j των διαφόρων διαδρομών ενός συνόλου J είναι όμοια και ανεξάρτητα καταναμεμένα με την κατανομή *Gumbel*, τότε

$$\Pr(u_j > u_k \text{ για όλες τις διαδρομές } k \text{ που δεν είναι ίδιες με τη } j \text{ αλλά ανήκουν στο σύνολο } J) = \frac{\exp(-ag_j)}{\sum_{k \in J} \exp(-ag_k)} \quad (2.21)$$

Όσον αφορά στο αντικείμενο της επιλογής διαδρομής, υπάρχει μια διαφωνία σχετικά με την υπόθεση των ανεξάρτητα καταναμεμένων χρησιμότητων, γιατί οι εναλλακτικές διαδρομές πολύ συχνά μοιράζονται τους ίδιους συνδέσμους. Ειδικότερα, εάν η επιλογή διαδρομής βασίζεται σε τυχαίως καταναμεμένες χρησιμότητες των συνδέσμων, τότε οι διαδρομές που μοιράζονται τους ίδιους συνδέσμους έχουν χρησιμότητες που συσχετίζονται. Η αιτία, ωστόσο της τυχαίας διακύμανσης μπορεί να είναι κάτι άλλο, όπως για παράδειγμα η αξία του χρόνου (Bell and Iida, 1997).

Ένα αποτέλεσμα των προσπαθειών ερμηνείας της τυχαίας χρησιμότητας αποτελεί η αναμενόμενη χρησιμότητα από ένα σύνολο διαδρομών $P(w)$, η οποία αναφέρεται από τον Sheffi (1985) ως η ικανοποίηση από το σύνολο $P(w)$ και ισούται με την αναμενόμενη αξία

της μέγιστης χρησιμότητας, που στην περίπτωση του προτύπου Logit έχει την παρακάτω μορφή:

$$E\{Max_{k \in P(w)} u_k\} = \left(\frac{1}{a}\right) \ln\left(\sum_{k \in P(w)} \exp(-ag_k)\right) \quad (2.22)$$

Όπου $E\{.\}$ είναι η αναμενόμενη τιμή της $\{.\}$ (Williams, 1977). Το αναμενόμενο ελάχιστο κόστος για ένα ζεύγος σημείων / κόμβων προέλευσης – προορισμού w ισούται με

$$z_w = -E\{Max_{k \in P(w)} u_k\} = -\left(\frac{1}{a}\right) \ln\left(\sum_{k \in P(w)} \exp(-ag_k)\right) \quad (2.23)$$

Όπου $P(w)$ είναι το σύνολο διαδρομών που συνδέουν το ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού w . Ο παραπάνω όρος αναφέρεται συχνά ως *logsum*, και αναλαμβάνει σημαντικό ρόλο στο *ιεραρχικό πρότυπο Logit* (Bell and Iida, 1997). Ένα πλεονέκτημα του ιεραρχικού προτύπου Logit είναι το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη τη συσχέτιση μεταξύ των χρησιμότητων των διαδρομών. Οι εναλλακτικές διαδρομές που μοιράζονται τους ίδιους συνδέσμους μπορούν να συνδυαστούν με τη χρήση του όρου *logsum*.

B) Καταμερισμός με το πρότυπο Logit για αύξουσες συναρτήσεις κόστους

Όταν πρόκειται για αύξουσες συναρτήσεις κόστους, το κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, που έχει ως λύση έναν καταμερισμό Logit, έχει την εξής μορφή:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } f(h) \text{ υπό των περιορισμών } t = Bh, h \geq 0$$

και παράγει το απαιτούμενο διάνυσμα gradient

$$\nabla f(h) = \ln(h) + ag(h). \quad (2.24)$$

Αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει προταθεί αρχικά από την Fisk (1980). Οι παρακάτω αλγόριθμοι αποτελούν τρόποι επίλυσης του παραπάνω προβλήματος.

Στην παράγραφο αυτή γίνονται δύο προσεγγίσεις όσον αφορά στον καταμερισμό της κυκλοφορίας με το πρότυπο Logit, η πρώτη με συγκράτηση των πληροφοριών σχετικά με τις διαδρομές (μνήμη) και η δεύτερη χωρίς αυτή. Οι αλγόριθμοι που δεν απαιτούν συγκράτηση των πληροφοριών σχετικά με τις διαδρομές παρουσιάζονται πρώτα.

Ο αλγόριθμος που εξετάζεται πρώτα προτάθηκε από τους Powell και Sheffi (1982), στον οποίο γίνεται χρήση της μεθόδου των διαδοχικών μέσων όρων (Mean Successive Average-MSA). Ο αλγόριθμος αυτός έχει τα ακόλουθα τρία βήματα:

Ο αλγόριθμος των Powell και Sheffi για τον καταμερισμό με το πρότυπο Logit

Βήμα 1: (Αρχή)

$$v \leftarrow 0$$

$$n \leftarrow 1$$

Βήμα 2: (Εύρεση ενός καταμερισμού Logit για σταθερά κόστη συνδέσμων)

$$c \leftarrow c(v)$$

$$v^* \leftarrow \text{καταμερισμός Logit για } c$$

Βήμα 3: (Μέθοδος των διαδοχικών μέσων όρων)

$$v \leftarrow (1 - 1/n)v + (1/n)v^*$$

$$n \leftarrow n + 1$$

Εάν η σύγκλιση είναι μη ικανοποιητική, τότε επιστροφή στο βήμα2,
αλλιώς τέλος.

Περιγραφή αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος ξεκινάει με το δίκτυο να είναι άδειο (βήμα 1). Βασισμένα στους τρέχοντες φόρτους των συνδέσμων, οι οποίοι αρχικά είναι μηδενικοί, παράγονται τα προσωρινά κόστη. Ένας καταμερισμός Logit σταθερού κόστους αποδίδει τους βοηθητικούς φόρτους των συνδέσμων (βήμα 2). Οι Powell και Sheffi (1982) προτείνουν τη χρήση του αλγορίθμου του Dial (1971). Οι τρέχοντες και οι βοηθητικοί φόρτοι των συνδέσμων συνδυάζονται τότε με τη μέθοδο των διαδοχικών μέσων όρων για να αποδώσουν τους αναθεωρημένους φόρτους των συνδέσμων (βήμα 3). Εάν η σύγκλιση δεν είναι ικανοποιητική, τότε ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 2 και επαναλαμβάνει τη διαδικασία λαμβάνοντας τις αναθεωρημένες ως τους τρέχοντες φόρτους των συνδέσμων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου μπορεί να βελτιωθεί με τη εφαρμογή της μεθόδου της αναζήτησης γραμμής στο βήμα 3.

Ο αλγόριθμος των Frank-Wolfe, που έχει προαναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο πρότυπο Logit (ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάστηκε από τον Akamatsu (1996) και επεκτάθηκε ώστε να συμπεριλάβει μη σταθερά κόστη μετακίνησης).

Frank-Wolfe αλγόριθμος για καταμερισμό με το πρότυπο Logit χωρίς συγκράτηση πληροφοριών σχετικά με τις διαδρομές

Βήμα 1: (Αρχή)

$$v'' \leftarrow \text{Εφικτοί μη μηδενικοί φόρτοι συνδέσμων}$$

Βήμα 2: (αναζήτηση κατεύθυνσης)

$v^* \leftarrow$ Ελαχιστοποίηση της $LP(v') = v'^T \nabla f(v')$ υπό των περιορισμών $v_o = Ah_o$ για όλα τα $o, t = Bh, h \geq 0$

Βήμα 3: (αναζήτηση γραμμής)

$v' \leftarrow$ Ελαχιστοποίηση της $f(v = v'\lambda + v^*(1 - \lambda))$ υπό του περιορισμού $1 \geq \lambda \geq 0$

Εάν η σύγκλιση δεν είναι ικανοποιητική, τότε επιστροφή στο βήμα2, αλλιώς τέλος.

Ας σημειωθεί ότι h οι φόρτοι των διαδρομών και h_o είναι το h με όλες τις διαδρομές που δεν έχουν σημείο προέλευσης το μηδέν. Επίσης, η f είναι η αντικειμενική συνάρτηση του ισοδύναμου προβλήματος βελτιστοποίησης. Όπως και προηγουμένως, η μέθοδος καταμερισμού του Όλα ή Τίποτα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του βήματος 2.

Ωστόσο, ένας αλγόριθμος που συγκρατεί τις πληροφορίες σχετικά με τους φόρτους των διαδρομών μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικός. Η παραγωγή και η διατήρηση των πληροφοριών αυτών είναι γνωστή ως *παραγωγή στήλης*, καθώς οι στήλες των πινάκων παράγονται καθώς οι επαναλήψεις εξελίσσονται.

Οι Bell *et al* (1993) πρότειναν έναν τέτοιο αλγόριθμο, ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω:

Frank–Wolfe αλγόριθμος για καταμερισμό με το πρότυπο Logit με συγκράτηση πληροφοριών σχετικά με τις διαδρομές

Βήμα 1: (Αρχή)

$v \leftarrow$ Καταμερισμός με τη μέθοδο του Όλα ή Τίποτα με βάση τα $c(0)$

$A, B \leftarrow$ Διαδρομές

Βήμα 2: (αναζήτηση κατεύθυνσης)

$u^* \leftarrow$ Ελαχιστοποίηση της $h^T (\ln(h) - 1)$ υπό τον περιορισμό $v = Ah$

$c^* \leftarrow c(v) + (1/a)u^*$

$v^* \leftarrow$ Καταμερισμός με τη μέθοδο του Όλα ή Τίποτα με βάση τα c^*

$A, B \leftarrow A, B +$ Καινούργιες διαδρομές

Βήμα 3: (αναζήτηση γραμμής)

$v \leftarrow$ Ελαχιστοποίηση της $f(v^*\lambda + v(1 - \lambda))$ υπό του περιορισμού $1 \geq \lambda \geq 0$

Εάν η σύγκλιση δεν είναι ικανοποιητική, τότε επιστροφή στο βήμα2, αλλιώς τέλος.

Περιγραφή αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος αυτός είναι πιο περίπλοκος από τους προηγούμενους. Στο βήμα 1, ξεκινώντας με τα κόστη των συνδέσμων σε άδειο δίκτυο, ένας καταμερισμός με τη μέθοδο του Όλα ή

Τίποτα αποδίδει τους προσωρινούς φόρτους των συνδέσμων. Οι διαδρομές, που παράγονται από τη μέθοδο του Όλα ή Τίποτα, αποτελούν τις αρχικές στήλες των πινάκων επιπτώσεων **A** και **B**. Στο βήμα 2, το βοηθητικό πρόβλημα αποδίδει τη gradient της μέγιστης εντροπίας για τους προσωρινούς φόρτους των συνδέσμων. Τα επαυξημένα κόστη σχηματίζονται. Ένας καταμερισμός με τη μέθοδο του Όλα ή Τίποτα αποδίδει τους βοηθητικούς φόρτους των συνδέσμων. Οι καινούργιες διαδρομές προστίθενται στους πίνακες **A** και **B**. Στο βήμα 3, η αναζήτηση γραμμής αποδίδει τους καινούργιους φόρτους. Εάν η σύγκλιση δεν είναι ικανοποιητική, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 2, λαμβάνοντας τους καινούργιους φόρτους των συνδέσμων ως τους τρέχοντες (προσωρινούς) φόρτους (Bell and Iida, 1997). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο όρος $(1/a)u^*$ παριστάνει το σφάλμα στην αντίληψη των χρηστών όσον αφορά στα κόστη των συνδέσμων.

Γ) Καταμερισμός με το πρότυπο Logit για συναρτήσεις κόστους δεξιάς κύρτωσης

Όταν χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις κόστους δεξιάς κύρτωσης το κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης του Fisk, που έχει ως λύση έναν καταμερισμό Logit, έχει την εξής μορφή:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } f(h) = h^T(\ln(h) - 1) + ac^T Ah \text{ υπό των περιορισμών } t = Bh, s \geq Ah, \\ h \geq 0$$

όπου h οι φόρτοι των διαδρομών και s οι ικανότητες των συνδέσμων. Και η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι κυρτοί, οπότε το πρόβλημα έχει μοναδική λύση. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιούνται δυικές μεταβλητές (dual variables), που έχουν την παρακάτω ερμηνεία. Τα στοιχεία του u είναι θετικά, μόνο όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος στον αντίστοιχο σύνδεσμο είναι ίσος με την κυκλοφοριακή ικανότητα και τότε μπορούν να συνδεθούν με την καθυστέρηση. Στην πράξη, τα στοιχεία του u , διαιρεμένα με την παράμετρο διασποράς a εκφράζουν την καθυστέρηση που λαμβάνει χώρα στους συνδέσμους σε συνθήκες ισορροπίας. Τα στοιχεία του z , επίσης, δε συσχετίζονται με τα κόστη των συντομότερων (με το χαμηλότερο κόστος) διαδρομών για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού, όπως στην περίπτωση της ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών, αλλά είναι ανάλογα της ζήτησης προέλευσης-προορισμού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα στοιχεία του u είναι μοναδικά, εάν οι αντίστοιχοι περιορισμοί είναι γραμμικώς ανεξάρτητοι, που σημαίνει ότι μόνο γραμμικώς ανεξάρτητοι σύνδεσμοι μπορούν να συμπεριληφθούν στον καταμερισμό με το πρόγραμμα Logit. Ο αριθμός των γραμμικώς ανεξάρτητων συνδέσμων ισούται με το συνολικό αριθμό των συνδέσμων μείον τον αριθμό των εσωτερικών κόμβων.

Οι δυικές μεταβλητές μπορούν να εκτιμηθούν με έναν επαναληπτικό αλγόριθμο εξισορρόπησης, τον οποίο παρουσίασε ο Bell (1995).

Επαναληπτικός αλγόριθμος εξισορρόπησης για καταμερισμό της κυκλοφορίας με το πρότυπο Logit

Βήμα 1: (Αρχή)

$$u \leftarrow 0$$

$$z \leftarrow 0$$

Βήμα 2: (επαναληπτική εξισορρόπηση)

Επανάληψη

για όλα τα ζεύγη σημείων προέλευσης – προορισμού w

$$\ln(h) \leftarrow -A^T c a + B^T z - A^T u$$

$$\text{αν } t_w \neq b_w^T h \text{ τότε } z_w \leftarrow z_w + \ln(t_w) - \ln(b_w^T h)$$

για όλους τους συνδέσμους i

$$\ln(h) \leftarrow -A^T c a + B^T z - A^T u$$

$$\text{αν } s_i < a_i^T h \text{ τότε } s_i \leftarrow u_i - \ln(s_i) + \ln(a_i^T h)$$

μέχρι τη σύγκλιση.

Πρέπει να σημειωθεί ότι a_i^T είναι η i -οστή σειρά του πίνακα A και b_w^T είναι η w -οστή σειρά του πίνακα B . Επίσης, για κάθε διαδρομή j και για κάθε αντίστοιχο ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού w ,

$$h_j^* = \exp(z_w^* - a g_j') \quad (2.25)$$

όπου

$$t_w = \exp(z_w^*) \sum_{j \in P(w)} \exp(-a g_j') \quad (2.26)$$

και

$$z_w^* = -\ln\left(\sum_{j \in P(w)} \exp(-a g_j')\right) + \ln(t_w) \quad (2.27)$$

Επιπρόσθετα, όσον αφορά στη σύγκλιση, αυτή αξιολογείται από την άποψη των σχετικών μεταβολών στις μεταβλητές ή το βαθμό συμμόρφωσης στους περιορισμούς (Bell and Iida, 1997).

Συνεχίζοντας, ο Bell (1995) πρότεινε το ακόλουθο σύστημα παραγωγής στήλης. Στην ουσία, το σύστημα αυτό παράγει και γεμίζει με φόρτο πρώτα τις διαδρομές με το μικρότερο κόστος και παράγει καινούργιες διαδρομές, μόνο όταν μπορούν να βρεθούν διαδρομές με μικρότερο κόστος από αυτές που υπάρχουν ήδη. Στον υπολογισμό του κόστους συμπεριλαμβάνεται και η καθυστέρηση.

Σύστημα παραγωγής στήλης (προσανατολισμένο ως προς την ικανότητα) για καταμερισμό με το πρότυπο Logit

Βήμα 1: (Αρχή)

$$u \leftarrow 0$$

Βήμα 2: (Παραγωγή στηλών)

Επανάληψη

$$c' \leftarrow c + u/a$$

 $A, B \leftarrow$ Διαδρομές με το ελάχιστο κόστος c' $u, v, h \leftarrow$ Επαναληπτική εξισορρόπηση

μέχρι καμία καινούργια διαδρομή να μη μπορεί να παραχθεί.

Περιγραφή

Αρχικά, οι δυικές μεταβλητές τίθενται ίσες με το μηδέν και γίνεται έτσι η υπόθεση ότι δεν υπάρχει καμία καθυστέρηση στους συνδέσμους (βήμα 1). Έπειτα, παράγονται οι διαδρομές με το ελάχιστο κόστος και προσδιορίζονται οι δυικές μεταβλητές (βήμα 2). Η καθυστέρηση που συμβαίνει στα φρακαρίσματα της κυκλοφορίας μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία νέων διαδρομών ελάχιστου κόστους. Στα πρώτα στάδια του βήματος 2, είναι πιθανόν να μην υπάρχει επαρκής ικανότητα στις υπάρχουσες διαδρομές ώστε να συμπληρωθεί ο πίνακας των μετακινήσεων Προέλευσης-Προορισμού. Στην περίπτωση αυτή ο αλγόριθμος της επαναληπτικής εξισορρόπησης δεν συγκλίνει. Καθώς η διαδικασία της εξισορρόπησης εξελίσσεται, οι διπλές μεταβλητές που αντιστοιχούν στους συνδέσμους που παρουσιάζουν συμφόρηση τείνουν στο άπειρο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο αλγόριθμος αυτός σταματάει και μεγάλες καθυστερήσεις και υψηλά κόστη αντιστοιχίζονται στους συνδέσμους με συμφόρηση/φρακαρίσματα. Αυτό οδηγεί στην δημιουργία νέων διαδρομών που παρακάμπτουν τα φρακαρίσματα, εάν μπορούν να βρεθούν βέβαια, που έχουν μικρότερο κόστος. Εάν αυτό δεν είναι δυνατό, το σύστημα δεν έχει λύση. Τέλος, ο αλγόριθμος σταματάει, όταν καμία καινούργια διαδρομή με χαμηλότερο κόστος δε μπορεί να βρεθεί.

Σχόλια

Το παραπάνω σύστημα παραγωγής στήλης χαρακτηρίζεται ως *συντηρητικό*, καθώς σταματάει όταν καμία καινούργια διαδρομή με χαμηλότερο κόστος δε μπορεί να βρεθεί. Ωστόσο μπορεί να υπάρχουν και άλλες διαδρομές που μειώνουν σημαντικά την αντικειμενική συνάρτηση του παρακάτω βοηθητικού προβλήματος βελτιστοποίησης:

$$\text{Ελαχιστοποίηση της } E(h) = h^T(\ln(h) - 1) \text{ υπό τον περιορισμό } v = Ah$$

για τους τρέχοντες φόρτους των συνδέσμων. Με άλλα λόγια, στο σημείο αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η προσέγγιση με τα επαυξημένα κόστη των συνδέσμων, που εφαρμόστηκε και για τις αύξουσες συναρτήσεις κόστους (Bell and Iida).

Διορθωμένο επαναληπτικό σύστημα παραγωγής στήλης για καταμερισμό με το πρότυπο Logit

Βήμα 1: (Αρχή)

$$u \leftarrow 0$$

$$w \leftarrow 0$$

Βήμα 2: (Παραγωγή στηλών)

Επανάληψη

$$c' \leftarrow w + ca + u$$

$$A, B \leftarrow \text{Διαδρομές με το ελάχιστο κόστος } c'$$

$$u, v, h \leftarrow \text{Επαναληπτική εξισορρόπηση}$$

$w \leftarrow$ Επίλυση του βοηθητικού προβλήματος με επαναληπτική εξισορρόπηση μέχρι καμία καινούργια διαδρομή να μη μπορεί να παραχθεί.

Περιγραφή

Οι δυικές μεταβλητές για το προαναφερόμενο πρόβλημα προστίθενται στο a , και έτσι, τα τρέχοντα κόστη των συνδέσμων συμπεριλαμβάνουν και τις τρέχουσες καθυστερήσεις. Αυτό οδηγεί στο παραπάνω αναθεωρημένο σύστημα παραγωγής στήλης, το οποίο παράγει συνεπώς περισσότερες διαδρομές.

Δ) Παράμετρος διασποράς α

Στην περίπτωση του προτύπου Logit, η παράμετρος διασποράς α παριστάνει το επίπεδο της πληροφόρησης των χρηστών. Χαμηλές τιμές του α σημαίνουν χαμηλό επίπεδο πληροφόρησης των χρηστών του μεταφορικού δικτύου και γενικά μια έλλειψη ευαισθησίας της ζήτησης στα κόστη των συνδέσμων. Καθώς η τιμή της παραμέτρου διασποράς αυξάνεται, που σημαίνει λιγότερη διασπορά, ο καταμερισμός αυτός τείνει προς έναν καταμερισμό ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών.

III. Πρότυπο καταμερισμού της κυκλοφορίας Probit

A) Το πρότυπο επιλογής διαδρομής Probit

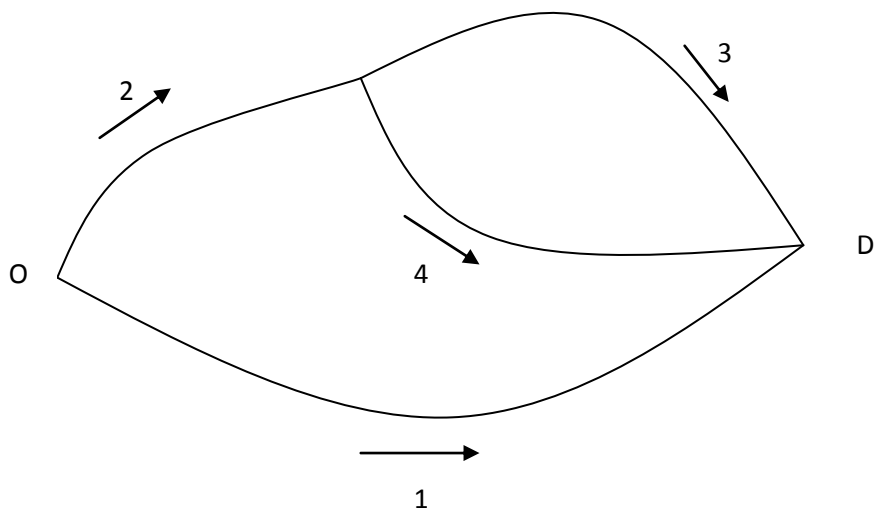
Για δύο διαδρομές που συνδέουν το ίδιο ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού, το πρότυπο Probit έχει τη μορφή:

$$\Phi^{-1}\left(h_i^*/(h_i^* + h_j^*)\right) = -a(g_i^* - g_j^*) \quad (2.28)$$

όπου $\Phi(x)$ είναι το ολοκλήρωμα της μοναδιαίας κανονικής κατανομής από το 0 έως το x και $\Phi^{-1}(\cdot)$ είναι η αντίστροφη συνάρτηση της $\Phi(x)$, που ονομάζεται συνάρτηση Probit. Για στατιστικά ανεξάρτητες διαδρομές (που σημαίνει ότι η πιθανότητα επιλογής της διαδρομής i από τη j δεν σχετίζεται με την πιθανότητα επιλογής μιας άλλης τρίτης διαδρομής k), το πρότυπο αυτό συμπεριφέρεται σαν το πρότυπο Logit (Bell and Iida, 1997). Ωστόσο οι συσχετίσεις μεταξύ των επιλογών διαδρομών είναι πολύ συχνό φαινόμενο, και προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στο πρότυπο Probit, το οποίο τις λαμβάνει σημαντικά υπόψη.

Ας περιγραφτεί η μορφή ενός δικτύου που αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα. Έστω ότι για ένα ζεύγος κόμβων ότι υπάρχουν τρεις εναλλακτικές διαδρομές. Η διαδρομή 1 αποτελείται από τους συνδέσμους 2 και 3. Η διαδρομή 2 αποτελείται από τους συνδέσμους 2 και 4. Τέλος, η διαδρομή 3 αποτελείται από το σύνδεσμο 1. Οι διαδρομές 1 και 2 έχουν έναν κοινό σύνδεσμο, οπότε η πιθανότητα επιλογής της διαδρομής 1 σχετίζεται με την πιθανότητα επιλογής της διαδρομής 2. Αυτή η συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών επιλογών επηρεάζει την πιθανότητα επιλογής της διαδρομής 3. Ο μετακινούμενος έχει να επιλέξει μεταξύ των διαδρομών 1 ή 2 και 3. Με άλλα λόγια, ο μετακινούμενος αν διαλέξει την επιλογή διαδρομής 1 ή 2, τότε θα επιλέξει μεταξύ αυτών των δύο. Στην αρχή, λοιπόν, παρουσιάζονται μόνο 2 επιλογές. Αν αγνοηθεί αυτή η διαδικασία επιλογών, τότε ο κοινός σύνδεσμος των διαδρομών 1 και 2 θα υπερφορτωθεί.

Ωστόσο, όπως έχει προαναφερθεί, το πρότυπο επιλογής διαδρομής Probit δεν έχει κάποιο γνωστό ισοδύναμο πρόβλημα βελτιστοποίησης, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την εύρεση ενός καταμερισμού Probit.



Σχήμα 2.4: Παράδειγμα δικτύου με συσχετισμένες επιλογές διαδρομής (Bell and Iida, 1997)

B) Αλγόριθμοι καταμερισμού Probit

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις καταμερισμού με το πρότυπο Probit, η προσομοίωση Monte Carlo και η προσέγγιση του Clarke. Από αυτές, η πρώτη είναι η πιο διαδεδομένη.

Προσομοίωση Monte Carlo

Τα κόστη των συνδέσμων είναι τυχαιοποιημένα με κατάλληλο τρόπο και επιδιώκεται ένας καταμερισμός του συνολικού φόρτου υπό συνθήκες ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών. Η εύρεση του καταμερισμού Probit γίνεται υπολογίζοντας το μέσο όρο μιας σειράς καταμερισμών ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών. Η τυχαιοποίηση αποτελεί μία προσομοίωση του σφάλματος στην αντίληψη (Bell and Iida, 1997). Πιο συγκεκριμένα, αφού τα κόστη των συνδέσμων επιλέγονται με τυχαίο τρόπο, οι συσχετίσεις στην αντίληψη μεταξύ των διαδρομών που έχουν κοινούς συνδέσμων λαμβάνεται υπόψη.

Η προσομοίωση του Monte Carlo, παρόλο που είναι εννοιολογικά απλή, είναι υπολογιστικά απαιτητική. Ένας εύλογος αριθμός τυχαίων δειγμάτων απαιτείται για να διαπιστωθεί ότι οι μέσες τιμές είναι επαρκώς ανεξάρτητες από τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει εκτενώς χρησιμοποιηθεί από τους Daganzo (1982), Sheffi (1985) και άλλους.

Προσέγγιση του Clarke

Η μέθοδος δίδει τη μέση τιμή και τη διακύμανση για την ελάχιστη τιμή δύο μεταβλητών, οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή με γνωστούς μέσους όρους, διακυμάνσεις και συνδιακύμανση. Στην περίπτωση του παραδείγματος της παραγράφου 2.2.1.2.4.1 και σύμφωνα με την προσέγγιση του Clarke, η πιθανότητα επιλογής του συνδέσμου 1 έναντι του συνδέσμου 2 μπορεί να υπολογιστεί, καθώς η μέση τιμή και η διακύμανση για την ελάχιστη τιμή ανάμεσα στα αντιληπτά κόστη των συνδέσμων 3 και 4 μπορεί να προστεθεί στη μέση τιμή και τη διακύμανση του αντιληπτού κόστους του κοινού συνδέσμου 2 (οι διακυμάνσεις ανεξάρτητων μεταβλητών μπορούν να προστεθούν). Η σύγκριση του αποτελέσματος με τη μέση τιμή και τη διακύμανση του αντιληπτού κόστους του συνδέσμου 1 επιτρέπει τον υπολογισμό της πιθανότητας επιλογής του συνδέσμου 1 έναντι του συνδέσμου 2 (Clarke).

IV. Ελαστική Ζήτηση

Το πρότυπο καταμερισμού στοχαστικής ισορροπίας που έχει παρουσιαστεί μέχρι τώρα έχει ως δεδομένο ένα σταθερό πίνακα μετακινήσεων Προέλευσης-Προορισμού. Ωστόσο, η χρήση σταθερού πίνακα μετακινήσεων, με σκοπό την εκτίμηση των επιπτώσεων στην κυκλοφορία της κατασκευής μεγάλων έργων μεταφορικής υποδομής, έχει προκαλέσει πρόσφατα ανησυχία, εξαιτίας της επίδρασης που έχουν τέτοια έργα στην παραγωγή και τον καταμερισμό της κυκλοφορίας. Όπως έχει αναφερθεί στο πρώτο κεφάλαιο, η κατασκευή νέας υποδομής έχει σαν αποτέλεσμα την προσέλκυση νέας κυκλοφορίας με αποτέλεσμα τον κορεσμό και των καινούργιων έργων. Η νέα αυτή ζήτηση, γνωστή και ως *παρακινημένη κυκλοφορία*, επιβάλλει τη θεώρηση της ζήτησης μεταξύ ενός ζεύγους σημείων προέλευσης-προορισμού ως *μία συνάρτηση του κόστους μετακίνησης* ανάμεσα σε αυτά τα δύο σημεία (Gartner, 1980). Έτσι η συνάρτηση της ζήτησης γράφεται ως εξής:

$$t = t(z)$$

όπου $\mathbf{z}$ είναι ένα διάνυσμα των αναμενόμενων κοστών μεταξύ ενός ζεύγους σημείων προέλευσης-προορισμού.

Η παρουσίαση του προτύπου στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών με ελαστική ζήτηση, που θα δοθεί παρακάτω, ακολουθεί τους Lam *et al.* (1995). Αρχικά, γίνεται η υπόθεση ότι τα κόστη των συνδέσμων είναι σταθερά. Προτού, όμως, γίνει η παρουσίαση πρέπει να δοθούν οι ακόλουθοι ορισμοί και συμβολισμοί.

Έστω ο πίνακας W που έχει ως στοιχεία:

$$w_{mn} = \begin{cases} \exp(-ac_{mn}), & \text{αν ο σύνδεσμος συνδέει τον κόμβο } m \text{ με τον κόμβο } n \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Ο Bell (1995) έχει αποδείξει ότι εάν η ακόλουθη σειρά

$$N = W + W^2 + W^3 + \dots = (I - W)^{-1} - I \quad (2.29)$$

είναι συγκλίνουσα, τότε το ποσοστό της κυκλοφορίας, στο πλαίσιο του προτύπου Logit, που επιλέγει το σύνδεσμο α , ο οποίος συνδέει τους κόμβους k και l , είναι

$$p_{mna} = v_{mk} \exp(-ac_{kl}) v_{ln} / v_{mn} \quad (2.30)$$

όπου v_{mk} , v_{ln} και v_{mn} είναι τα αντίστοιχα στοιχεία του πίνακα N και ο σύνδεσμος α συνδέει τους κόμβους $k \neq m$ και $l \neq n$. Όλες οι διαδρομές, και αυτές που περιέχουν βρόχους, συμπεριλαμβάνονται.

Επίσης, σύμφωνα με την ερμηνεία της τυχαίας χρησιμότητας του προτύπου Logit το αναμενόμενο ελάχιστο κόστος μετακίνησης από τον κόμβο m στον κόμβο n είναι

$$z_{mn} = -(1/a) \ln(v_{mn}) \quad (2.31)$$

Οι φόρτοι των συνδέσμων εκτιμούνται ως εξής:

$$v = Pt(z) \quad (2.32)$$

όπου P είναι πίνακας με ποσοστά επιλογής συνδέσμων.

Η μέθοδος των διαδοχικών μέσων όρων μπορεί να εφαρμοστεί ως εξής:

Μέθοδος των διαδοχικών μέσων όρων για τον καταμερισμό της κυκλοφορίας με το πρότυπο Logit με ελαστική ζήτηση

Βήμα 1: (Αρχή)

$v \leftarrow 0$

$c \leftarrow c(v)$

$n \leftarrow 1$

Βήμα 2: (Μέθοδος των διαδοχικών μέσων όρων)

Επανάληψη

υπολογισμός του $N = (I - W)^{-1} - I$

υπολογισμός του P

υπολογισμός του z

$v \leftarrow (1/n)Pt(Z) + (1 - 1/n)v$

$c \leftarrow c(v)$

$n \leftarrow n + 1$

μέχρι τη σύγκλιση.

2.2.2 Δυναμικά πρότυπα δικτύων

Τα υπάρχοντα πρότυπα αστικών μεταφορικών δικτύων και τα πρότυπα επιλογών μετακίνησης διακρίνονται, ανάλογα με το σκοπό εφαρμογής τους, σε μακροπρόθεσμα και βραχυπρόθεσμα πρότυπα.

Τα πρότυπα που σχεδιάζονται για μακροπρόθεσμους σκοπούς ονομάζονται *στατικά*, τα οποία έχουν αναλυθεί παραπάνω. Τα περισσότερα στατικά ντετερμινιστικά πρότυπα συμφωνούν με την πρώτη αρχή του Wardrop, αποδίδοντας μία ντετερμινιστική ισορροπία των χρηστών και άλλα με τη δεύτερη αρχή του Wardrop, αποδίδοντας μια βέλτιστη λύση για το μεταφορικό σύστημα σαν σύνολο. Και οι δύο κατηγορίες των στατικών ντετερμινιστικών προτύπων υποθέτουν συνθήκες τέλει ενημέρωσης και όμοιας συμπεριφοράς των χρηστών. Μια σημαντική επέκταση των στατικών ντετερμινιστικών προτύπων αποτελούν τα στατικά στοχαστικά πρότυπα, που συνδέονται με τη στοχαστική ισορροπία των χρηστών και λαμβάνουν υπόψη λάθη στην αντίληψη και διακυμάνσεις στην συμπεριφορά.

Εκτός από τα στατικά πρότυπα, υπάρχουν και τα πρότυπα που σχεδιάζονται για βραχυπρόθεσμους σκοπούς, τα οποία ονομάζονται *δυναμικά* πρότυπα. Σε αντίθεση με τα στατικά, τα δυναμικά πρότυπα μπορούν να προβλέψουν σημαντικές χρονοεξαρτώμενες διακυμάνσεις της κυκλοφορίας σε ένα μεταφορικό δίκτυο και τους χρόνους μετακίνησης των οχημάτων κατά τη διάρκεια της μετακίνησής/ταξιδιού τους. Η κατηγορία αυτή των προτύπων είναι, συνεπώς, κατάλληλη για την ανάλυση και εκτίμηση δυναμικών συστημάτων καθοδήγησης, τα οποία πρέπει να έχουν την ικανότητα να επιλύουν προβλήματα μεταφορικών δικτύων σε πραγματικό χρόνο (Ran and Boyce, 1996).

Στα δυναμικά μεταφορικά δίκτυα, η παραδοσιακή υπόθεση συμπεριφοράς των χρηστών των στατικών προτύπων χρειάζεται αναθεώρηση ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι μικρές διάρκειας μεταβολές της κυκλοφορίας. Ο όρος «ισορροπία των χρηστών» αντικαθίσταται με τον όρο «*δυναμική ισορροπία των χρηστών*». Βέβαια, όπως και στα στατικά πρότυπα, υπάρχουν και τα *πρότυπα βελτιστοποίησης του συστήματος*, τα οποία αποδίδουν τη πιο αποτελεσματική (βέλτιστη λύση) για όλο το σύστημα, σαν σύνολο. Η αντικατάσταση αυτή αντανακλά το σκοπό για τον οποίο σχεδιάζονται τα δυναμικά πρότυπα μεταφορών. Αυτός είναι, γενικά, ο επηρεασμός και ο έλεγχος της κυκλοφορίας και των υπόλοιπων αποφάσεων των χρηστών, (π.χ. ώρας αναχώρησης) με βέλτιστο τρόπο, με την παροχή ακριβούς πληροφόρησης και αποτελεσματικών μέτρων ελέγχου της κυκλοφορίας. Πολλά από τα δυναμικά πρότυπα βελτιστοποίησης μπορούν να υιοθετήσουν τις παραπάνω παροχές.

Τα δυναμικά πρότυπα, κατά αντιστοιχία με τα στατικά πρότυπα, διακρίνονται σε ντετερμινιστικά και στοχαστικά. Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν και οι δύο αυτές κατηγορίες των δυναμικών προτύπων, τα οποία όμως αποδίδουν την ισορροπία ή τη βέλτιστη λύση των χρηστών. Τα πρότυπα αυτά αναφέρονται και ως *δυναμικά πρότυπα βέλτιστης λύσης*

των *χρηστών επιλογής διαδρομής* και υποθέτουν ότι οι χρόνοι αναχώρησης των χρηστών είναι δεδομένοι εξ αρχής. Τα δυναμικά πρότυπα βελτιστοποίησης του συστήματος εκφεύγουν του σκοπού της παρούσας διπλωματικής εργασίας και δεν θα αναλυθούν περαιτέρω.

2.2.2.1 Δυναμικά Ντετερμινιστικά πρότυπα

Τα δυναμικά ντετερμινιστικά πρότυπα επιλογής διαδρομής διαχωρίζονται σε ιδανικά και στιγμιαία. Και οι δύο τελευταίες κατηγορίες διαχωρίζονται σε πρότυπα βασισμένα στη διαδρομή και σε πρότυπα βασισμένα στο σύνδεσμο.

I. Ιδανικά δυναμικά πρότυπα επιλογής διαδρομής

Όπως προαναφέρθηκε, τα ιδανικά ντετερμινιστικά πρότυπα επιλογής διαδρομής διακρίνονται σε:

- αυτά που βασίζονται στο χρόνο διαδρομής (1)
- αυτά που βασίζονται στο χρόνο συνδέσμου (2)

Τα πρώτα έχουν μια διαισθητική ερμηνεία. Ωστόσο, η επίλυσή τους εμπεριέχει σαφή απαρίθμηση των διαδρομών, η οποία αποτελεί ένα υπολογιστικά απαιτητικό πρόβλημα για ρεαλιστικού μεγέθους δίκτυα. Ως εκ τούτου, συνίσταται η χρήση προτύπων επιλογής διαδρομής που βασίζονται στον χρόνο συνδέσμου, η επίλυση των οποίων δεν απαιτεί σαφή απαρίθμηση των διαδρομών. Αποδεικνύεται ότι οι ιδανικές δυναμικές βέλτιστες συνθήκες επιλογής διαδρομής βασισμένες στο χρόνο συνδέσμου συνεπάγονται τις ιδανικές δυναμικές βέλτιστες συνθήκες επιλογής διαδρομής βασισμένες στον χρόνο διαδρομής.

Τα προαναφερόμενα πρότυπα είναι περιορισμένα με την έννοια ότι οι μετακινούμενοι έχουν ομογενή χαρακτηριστικά. Ένας τρόπος να αναιρεθεί η υπόθεση αυτή, σε έναν βαθμό, είναι να κατηγοριοποιηθούν οι μετακινούμενοι σε κλάσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε κλάση πρέπει να έχει ευδιάκριτα διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις άλλες κλάσεις, αλλά πρέπει να παρουσιάζει ομοιογένεια εντός της. Πρότυπα πολλαπλών κλάσεων παρουσιάζονται παρακάτω, αφού όμως προηγηθούν τα ιδανικά πρότυπα μίας κλάσης.

A) Ορισμός της ιδανικής κατάστασης

Τα δύο ιδανικά δυναμικά πρότυπα που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι ισοδύναμα με τις ιδανικές δυναμικές βέλτιστες συνθήκες επιλογής διαδρομής. Στη συνέχεια, θεωρείται η

γενίκευση της συμβατικής στατικής βέλτιστης κατάστασης των χρηστών ώστε να περιγράψει τα ιδανικά δυναμικά πρότυπα επιλογής διαδρομής (Merchant and Nemhauser, 1978).

Ιδανική δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών βασισμένη στο χρόνο μετακίνησης: Εάν, για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού και σε κάθε χρονική στιγμή, οι πραγματικοί χρόνοι μετακίνησης που χρειάζονται οι μετακινούμενοι, οι οποίοι αναχωρούν την ίδια στιγμή, είναι ίσοι και ελάχιστοι, τότε η δυναμική κυκλοφοριακή ροή είναι σε μία ιδανική δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών βασισμένη στο χρόνο μετακίνησης (Ran and Boyce, 1996).

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να δοθεί ο ορισμός του *πραγματικού* ή αλλιώς *μελλοντικού* χρόνου μετακίνησης ως ο χρόνος μετακίνησης που χρειάζονται πραγματικά οι μετακινούμενοι για τη μετακίνησή τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι, στα παρακάτω, γίνεται η υπόθεση ότι ο πραγματικός χρόνος μετακίνησης σε ένα σύνδεσμο εξαρτάται από τον αριθμό των οχημάτων, την ροή εισόδου και εξόδου από το σύνδεσμο την χρονική στιγμή t .

Ο ορισμός που δόθηκε για την ιδανική δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών αντιστοιχεί επίσης και σε ένα προληπτικό πρότυπο δυναμικής ισορροπίας των χρηστών, αφού ο πραγματικός χρόνος μετακίνησης προβλέπεται χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο πρότυπο επιλογής διαδρομής. Τέτοιου είδους πρότυπα υποθέτουν ότι κάθε μετακινούμενος έχει τέλεια ενημέρωση σχετικά με τις μελλοντικές κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου. Μια άλλη παραδοχή των συγκεκριμένων προτύπων είναι ότι οι μετακινούμενοι/χρήστες του μεταφορικού δικτύου δεν αναθεωρούν τις αποφάσεις που παίρνουν, μετά την αναχώρησή τους.

Η τυποποίηση των προβλήματος σε αυτήν την ενότητα, των ιδανικών δυναμικών προτύπων επιλογής διαδρομής, βασίζεται στο παρακάτω κριτήριο, σύμφωνα με το οποίο κάθε μετακινούμενος χρησιμοποιεί τη διαδρομή που ελαχιστοποιεί τον πραγματικό χρόνο μετακίνησης αυτού, όταν αναχωρεί από τον κόμβο προέλευσης προς τον κόμβο προορισμού. *Με άλλα λόγια, κάθε μετακινούμενος, λίγο πριν αναχωρήσει, επιλέγει τη διαδρομή που πραγματικά θα είναι η συντομότερη.* Αυτό το κριτήριο επιλογής διαδρομής συνεπάγεται ότι σε μία ιδανική δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών, βασισμένη στο χρόνο μετακίνησης, οι πραγματικοί χρόνοι μετακίνησης σε όλες τις χρησιμοποιούμενες διαδρομές, που συνδέουν ένα ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού, θα είναι ίσοι και όχι μεγαλύτεροι από τους πραγματικούς χρόνους μετακίνησης των μη χρησιμοποιούμενων διαδρομών. Από τα παραπάνω, συμπεραίνεται η αντιστοιχία της ιδανικής δυναμικής ντετερμινιστικής βέλτιστης κατάστασης των χρηστών με αυτή της στατικής ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών (πρώτη αρχή του Wardrop).

B) Ιδανικό πρότυπο με βάση τον χρόνο διαδρομής

Οι συνθήκες του ιδανικού προτύπου επιλογής διαδρομής με βάση τον χρόνο διαδρομής, οι οποίες είναι ισοδύναμες με τον ορισμό της ιδανικής δυναμικής βέλτιστης κατάστασης των χρηστών που παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι οι εξής:

$$\eta_p^{rs^*}(t) - \pi^{rs^*}(t) \geq 0 \quad \forall p, r, s \quad (2.33)$$

$$f_p^{rs^*}(t)[\eta_p^{rs^*}(t) - \pi^{rs^*}(t)] = 0 \quad \forall p, r, s \quad (2.34)$$

$$f_p^{rs}(t) \geq 0 \quad \forall p, r, s \quad (2.35)$$

όπου $\eta_p^{rs}(t)$ ο πραγματικός χρόνος μετακίνησης στη διαδρομή p από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο προορισμού s τη χρονική στιγμή t , $\pi^{rs}(t)$ ο ελάχιστος χρόνος διαδρομής από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο προέλευσης s τη χρονική στιγμή t και $f_p^{rs}(t)$ ο κυκλοφοριακός φόρτος αναχώρησης από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο προέλευσης s τη χρονική στιγμή t . Ο αστερίσκος στις παραπάνω εξισώσεις συμβολίζει ότι οι μεταβλητές του φόρτου αντιστοιχούν στην ιδανική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών με βάση τον χρόνο μετακίνησης.

Το ισοδύναμο πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας είναι το ακόλουθο:

$$\int_0^T \sum_{rs} \sum_p \eta_p^{rs^*}(t) [f_p^{rs}(t) - f_p^{rs^*}(t)] dt \geq 0 \quad (2.36)$$

Το πρότυπο αυτό υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι είναι οι εξής:

- Σχέση μεταξύ μεταβλητών κατάστασης και μεταβλητών ελέγχου
- Περιορισμοί διατήρησης ροής
- Περιορισμοί διάδοσης ροής
- Περιορισμοί ορισμών
- Μη αρνητικές συνθήκες
- Οριακές συνθήκες

Να σημειωθεί ότι οι φόρτοι εισόδου και εξόδου σε ένα σύνδεσμο θεωρούνται ως μεταβλητές ελέγχου, ενώ ο αριθμός οχημάτων σε ένα σύνδεσμο ορίζεται ως μεταβλητή κατάσταση.

Γ) Ιδανικό πρότυπο με βάση τον χρόνο συνδέσμου

Έχει προταθεί ένα πρότυπο βασισμένο σε μεταβλητές συνδέσμου και κόμβου, αντί των μεταβλητών διαδρομής του προηγούμενου προτύπου. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται το ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα της σαφής απαρίθμησης των διαδρομών του δικτύου, που χαρακτήριζε το προηγούμενο πρότυπο (Ran and Boyce, 1996).

Οι συνθήκες του ιδανικού προτύπου επιλογής διαδρομής με βάση τον χρόνο διαδρομής, οι οποίες είναι ισοδύναμες με τον ορισμό της ιδανικής δυναμικής βέλτιστης κατάστασης των χρηστών που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.2.2.1.1, είναι οι εξής:

$$\pi^{ri^*}(t) + \tau_a[t + \pi^{ri^*}(t)] - \pi^{rj^*}(t) \geq 0 \quad \forall a = (i, j), r \quad (2.37)$$

$$u_a^{rs^*}[t + \pi^{ri^*}(t)][\pi^{ri^*}(t) + \tau_a[t + \pi^{ri^*}(t)] - \pi^{rj^*}(t)] = 0 \quad \forall a = (i, j), r, s \quad (2.38)$$

$$u_a^{rs}[t + \pi^{ri^*}(t)] \geq 0 \quad \forall a = (i, j), r, s \quad (2.39)$$

όπου $\pi^{ri^*}(t)$ ο ελάχιστος πραγματικός χρόνος μετακίνησης που βιώνουν οι μετακινούμενοι οι οποίοι αναχωρούν από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο i την χρονική στιγμή t . Ο αστερίσκος, όπως και πριν, δηλώνει ότι οι μεταβλητές συμφωνούν με τις ιδανικές δυναμικές βέλτιστες συνθήκες των χρηστών. Συνεχίζοντας, $\tau_a[t + \pi^{ri^*}(t)]$ είναι ο πραγματικός χρόνος μετακίνησης του συνδέσμου $a = (i, j)$ την χρονική στιγμή $[t + \pi^{ri^*}(t)]$ και $u_a^{rs}(t)$ ο κυκλοφοριακός φόρτος εισόδου στον κόμβο a ανάμεσα σε ένα ζεύγος προέλευσης-προορισμού rs την χρονική στιγμή t .

Αποδεικνύεται ότι οι συνθήκες του ιδανικού προτύπου επιλογής διαδρομής, που βασίζεται στο χρόνο συνδέσμου, συνεπάγονται τις συνθήκες του ιδανικού προτύπου επιλογής διαδρομής, που βασίζεται στον χρόνο διαδρομής.

Το ισοδύναμο πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας είναι το ακόλουθο:

$$\int_0^T \sum_{rs} \sum_a \Omega_a^{rj^*}(t) \{u_a^{rs}[t + \pi^{ri^*}(t)] - u_a^{rs^*}[t + \pi^{ri^*}(t)]\} dt \geq 0 \quad (2.40)$$

$$\text{όπου } \Omega_a^{rj^*}(t) = \pi^{ri^*}(t) + \tau_a[t + \pi^{ri^*}(t)] - \pi^{rj^*}(t) \quad \forall a, r; a = (i, j) \quad (2.41)$$

Το πρότυπο αυτό υπόκειται στους ίδιους περιορισμούς με το ιδανικό πρότυπο με βάση τον χρόνο διαδρομής.

Δ) Ιδανικό πρότυπο πολλαπλών ομάδων χρηστών με βάση το κόστος διαδρομής

Έχει προταθεί ένα ιδανικό δυναμικό πρότυπο βέλτιστης λύσης των χρηστών βασισμένο στα κόστη μετακίνησης αντί των χρόνων μετακίνησης. Οι μετακινούμενοι κατηγοριοποιούνται σε M κλάσεις για κάθε ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού ανάλογα με τα κοινωνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά τους. Όταν $M = 1$, προκύπτει ένα πρότυπο μίας κλάσης, που είναι όμως διαφορετικό από το προαναφερόμενο ιδανικό πρότυπο βασισμένο στον χρόνο διαδρομής (Ran and Boyce, 1996).

Η διαστρωμάτωση των χρηστών σε ομάδες μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Εδώ θα αναφερθούν τέσσερις από αυτούς τους τρόπους οι οποίοι είναι οι εξής:

- 1) Με βάση την προθυμία αλλαγής κατεύθυνσης, εκτροπή
- 2) Με βάση το εισόδημα και την ηλικία
- 3) Με βάση την συμπεριφορά οδήγησης
- 4) Με βάση την συμπεριφορά των χρηστών όσον αφορά στην επιλογή διαδρομής

(Ran and Boyce, 1996).

Τα πρότυπα πολλαπλών κλάσεων, που θα αναλυθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρονται στους πρώτους τρεις τρόπους κατηγοριοποίησης/διαστρωμάτωσης των μετακινούμενων.

Πριν αναφερθούν οι συνθήκες του ιδανικού προτύπου πολλαπλών τάξεων με βάση το κόστος διαδρομής θα οριστεί η ιδανική δυναμική βέλτιστη κατάσταση πολλαπλών ομάδων των χρηστών βασισμένη στο κόστος διαδρομής.

Ιδανική δυναμική βέλτιστη κατάσταση πολλαπλών ομάδων των χρηστών βασισμένη στο κόστος διαδρομής: Εάν, για κάθε ομάδα χρηστών και για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού σε κάθε χρονική στιγμή, τα πραγματικά κόστη μετακίνησης για όλες τις διαδρομές που χρησιμοποιούνται είναι ίσα με το ελάχιστο πραγματικό κόστος μετακίνησης, τότε η δυναμική κυκλοφοριακή ροή είναι σε μία ιδανική δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών βασισμένη στο κόστος διαδρομής (Ran and Boyce, 1996).

Οι συνθήκες του συγκεκριμένου ιδανικού προτύπου επιλογής διαδρομής είναι οι ακόλουθες:

$$\tilde{\eta}_{mp}^{rs*}(t) - \tilde{\pi}_m^{rs*}(t) \geq 0 \quad \forall m, p, r, s \quad (2.42)$$

$$\tilde{f}_{mp}^{rs*}(t) [\tilde{\eta}_{mp}^{rs*}(t) - \tilde{\pi}_m^{rs*}(t)] = 0 \quad \forall m, p, r, s \quad (2.43)$$

$$\tilde{f}_{mp}^{rs}(t) \geq 0 \quad \forall m, p, r, s \quad (2.44)$$

όπου $\tilde{\eta}_{mp}^{rs*}(t)$ είναι το πραγματικό κόστος της διαδρομής p για την ομάδα m από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο προορισμού s την χρονική στιγμή t και $\tilde{\pi}_m^{rs*}(t)$ το ελάχιστο πραγματικό κόστος της διαδρομής p για την ομάδα m από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο προορισμού s την χρονική στιγμή t . Επίσης το $\tilde{f}_{mp}^{rs}(t)$ συμβολίζει το κυκλοφοριακό φόρτο εισόδου στη διαδρομή p για την ομάδα m από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο προορισμού s την χρονική στιγμή t .

Το ισοδύναμο πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας είναι το ακόλουθο:

$$\int_0^T \sum_{rs} \sum_{mp} \tilde{\eta}_{mp}^{rs*}(t) [\tilde{f}_{mp}^{rs}(t) - \tilde{f}_{mp}^{rs*}(t)] dt \geq 0 \quad (2.45)$$

Επιπρόσθετα, οι περιορισμοί του προτύπου είναι παρόμοιοι με αυτούς του ιδανικού προτύπου με βάση τον χρόνο διαδρομής, με τη διαφορά ότι, στο πρώτο, οι περιορισμοί αναφέρονται σε κάθε ομάδα ξεχωριστά.

Ε) Ιδανικό πρότυπο πολλαπλών ομάδων χρηστών με βάση το κόστος συνδέσμου

Προτείνεται ένα ιδανικό δυναμικό πρότυπο βέλτιστης λύσης των χρηστών βασισμένο στα κόστη μετακίνησης αντί των χρόνων μετακίνησης. Οι μετακινούμενοι κατηγοριοποιούνται σε M κλάσεις για κάθε ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού ανάλογα με τα κοινωνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά των μετακινούμενων. Όταν $M = 1$, προκύπτει ένα πρότυπο μίας κλάσης, που είναι όμως διαφορετικό από το προαναφερόμενο ιδανικό πρότυπο βασισμένο στο χρόνο συνδέσμου.

Πριν αναφερθούν οι συνθήκες του ιδανικού προτύπου πολλαπλών κλάσεων με βάση το κόστος συνδέσμου θα οριστεί η ιδανική δυναμική βέλτιστη κατάσταση πολλαπλών ομάδων των χρηστών βασισμένη στο κόστος συνδέσμου.

Ιδανική δυναμική βέλτιστη κατάσταση πολλαπλών ομάδων των χρηστών βασισμένη στο κόστος συνδέσμου: Εάν, για κάθε ομάδα χρηστών και για κάθε ζεύγος σημείων-προορισμού σε κάθε χρονική στιγμή, τα πραγματικά κόστη μετακίνησης για όλες τις διαδρομές που χρησιμοποιούνται είναι ίσα με το ελάχιστο πραγματικό κόστος μετακίνησης, τότε η δυναμική κυκλοφοριακή ροή είναι σε μία ιδανική δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών βασισμένη στο κόστος συνδέσμου (Ran and Boyce, 1996).

Οι συνθήκες του συγκεκριμένου ιδανικού προτύπου επιλογής διαδρομής είναι οι ακόλουθες:

$$\tilde{\pi}_m^{ri^*}(t) + \tilde{\tau}_{ma}[t + \tilde{\pi}_m^{ri^*}(t)] - \tilde{\pi}_m^{rj^*}(t) \geq 0 \quad \forall m, a = (i, j), r \quad (2.46)$$

$$\left[\tilde{\pi}_m^{ri^*}(t) + \tilde{\tau}_{ma}[t + \tilde{\pi}_m^{ri^*}(t)] - \tilde{\pi}_m^{rj^*}(t) \right] u_{ma}^{rs}[t + \tilde{\pi}_m^{ri^*}(t)] = 0 \quad \forall m, a = (i, j), r, s \quad (2.47)$$

$$u_{ma}^{rs}[t + \tilde{\pi}_m^{ri^*}(t)] \geq 0 \quad \forall m, a = (i, j), r, s \quad (2.48)$$

όπου $\tilde{\pi}_m^{ri^*}(t)$ είναι το ελάχιστο κόστος μετακίνησης από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο i για την ομάδα m και την χρονική στιγμή t , $\tilde{\tau}_{ma}[t + \tilde{\pi}_m^{ri^*}(t)]$ το πραγματικό κόστος μετακίνησης στο σύνδεσμο a για την ομάδα m την χρονική στιγμή $[t + \tilde{\pi}_m^{ri^*}(t)]$ και $u_{ma}^{rs}[t + \tilde{\pi}_m^{ri^*}(t)]$ Ο κυκλοφοριακός φόρτος εισόδου στο σύνδεσμο a για την ομάδα m ανάμεσα στο ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού rs την χρονική στιγμή $[t + \tilde{\pi}_m^{ri^*}(t)]$.

Αποδεικνύεται ότι οι συνθήκες του ιδανικού προτύπου πολλαπλών ομάδων χρηστών με βάση το κόστος συνδέσμου συνεπάγονται τις συνθήκες του ιδανικού προτύπου πολλαπλών ομάδων χρηστών με βάση το κόστος διαδρομής.

Το ισοδύναμο πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας είναι το ακόλουθο:

$$\int_0^T \sum_{rs} \sum_{ma} \tilde{\Omega}_{ma}^{rj^*} \{ u_{ma}^{rs}[t + \tilde{\pi}_m^{ri^*}(t)] - u_{ma}^{rs^*}[t + \tilde{\pi}_m^{ri^*}(t)] \} dt \geq 0 \quad (2.49)$$

Το πρότυπο αυτό υπόκειται στους ίδιους περιορισμούς με το ιδανικό δυναμικό πρότυπο πολλαπλών ομάδων χρηστών με βάση το κόστος διαδρομής, της προηγούμενης παραγράφου.

ΣΤ) Ένας αλγόριθμος επίλυσης για ένα ιδανικό πρότυπο επιλογής διαδρομής

Στη συγκεκριμένη παράγραφο, το ιδανικό δυναμικό πρότυπο επιλογής διαδρομής, βασισμένο στο χρόνο συνδέσμου, επιλέγεται να λυθεί με τον αλγόριθμο που θα ακολουθήσει. Αρχικά, εξετάζεται η μέθοδος της χαλάρωσης (relaxation method). Το πρότυπο επαναδιατυπώνεται ως ένα μη γραμμικό πρόγραμμα με διακριτό χρόνο. Έπειτα, οι μέθοδοι της χαλάρωσης και των Frank-Wolfe χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος. Με τη διαδικασία της χαλάρωσης, οι εκτιμημένοι χρόνοι μετακίνησης των συνδέσμων αναθεωρούνται με τις επαναλήψεις. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η τεχνική των Frank-Wolfe για να επιλυθεί το μη γραμμικό πρόβλημα. Όσον αφορά στους περιορισμούς, οι περιορισμοί διάδοσης της ροής ικανοποιούνται αυτόματα και έτσι μένουν μόνο οι περιορισμοί διατήρησης της ροής για τους συνδέσμους και τους κόμβους.

Μετατροπή του ιδανικού προτύπου, με βάση το χρόνο συνδέσμου, σε ένα διακριτό πρότυπο μεταβαλλόμενων ανισοτήτων

Για να μετατραπεί το συνεχές ιδανικό πρότυπο, με βάση τον χρόνο συνδέσμου, σε ένα διακριτό πρότυπο μεταβαλλόμενης ανισότητας, η χρονική περίοδος $[0, T]$ υποδιαιρείται σε K μικρά ίσα χρονικά διαστήματα. Κάθε χρονικό διάστημα είναι μια μονάδα του χρόνου. Έτσι το $u_a(k)$ παριστάνει τον κυκλοφοριακό φόρτο εισόδου στο σύνδεσμο a κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος k . Για λόγους απλούστευσης, οι εκτιμημένοι χρόνοι μετακίνησης των συνδέσμων τροποποιούνται ώστε να αποτελούν πολλαπλάσια του χρονικού διαστήματος, ως ακολούθως:

$$\tilde{\tau}_a(k) = i \text{ εάν } i - 0.5 \leq \tilde{\tau}_a(k) < i + 0.5 \quad (2.50)$$

όπου i είναι ένας ακέραιος και $0 \leq i \leq K$. Σημειώνεται ότι αυτός ο τρόπος στρογγυλοποίησης χρησιμοποιείται μόνο στους περιορισμούς διάδοσης της ροής. Περισσότερη ακρίβεια επιτυγχάνεται, κάνοντας τα χρονικά διαστήματα μικρότερα. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι η εκτίμηση της συνάρτησης του χρόνου των συνδέσμων και η αντικειμενική συνάρτηση δεν έχουν αυτό το σφάλμα της στρογγυλοποίησης (Ran and Boyce, 1996).

Διαμορφώνεται, συνεπώς, το παρακάτω πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{rs} \sum_a \Omega_a^{rs*}(k) \{u_a^{rs}[k + \pi^{ri*}(k)] - u_a^{rs*}[k + \pi^{ri*}(k)]\} \geq 0 \quad (2.51)$$

Οι συμβολισμοί είναι ίδιοι με αυτούς του ιδανικού προτύπου, με βάση το χρόνο συνδέσμου, με τη διαφορά ότι δεν αναφέρονται στην χρονική στιγμή t αλλά στο χρονικό διάστημα k .

Για λόγους απλούστευσης, γίνεται η υπόθεση ότι η χρονική περίοδος $[0, T]$ είναι αρκετά μεγάλη, ώστε κάθε φόρτος αναχώρησης από τον κόμβο προέλευσης r να φθάνει στον προορισμό s πριν ή στο τέλος της περιόδου.

Η διαδικασία χαλάρωσης και η μέθοδος των Frank-Wolfe

Για κάθε επανάληψη της διαδικασίας χαλάρωσης, οι πραγματικοί και οι ελάχιστοι χρόνοι μετακίνησης εκτιμούνται προσωρινά για κάθε κόμβο. Τότε, διαμορφώνεται η αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης (μη γραμμικό πρόβλημα), που είναι ισοδύναμο με το παραπάνω πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας υπό χαλάρωση, το οποίο δεν θα αναλυθεί λεπτομερώς.

Ο αλγόριθμος των Frank-Wolfe είναι αποτελεσματικός στην επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με περιορισμούς δικτύου και έχει ευρεία εφαρμογή στην επίλυση στατικών προτύπων ισορροπίας των χρηστών σε αστικά μεταφορικά δίκτυα (LeBlank *et al.*, 1975) όπως και φάνηκε σε αντίστοιχες παραγράφους. Οι ίδιοι απέδειξαν ότι τα στατικά πρότυπα ισορροπίας των χρηστών μπορούν να απλοποιηθούν σε μια σειρά από προβλήματα εύρεσης των συντομότερων διαδρομών και αναζητήσεις γραμμικών σχέσεων. Με τον τρόπο αυτό, οι χρόνοι υπολογισμού μπορούν να μειωθούν σημαντικά. Η εφαρμογή του αλγόριθμου των Frank-Wolfe στο διακριτό πρόβλημα βελτιστοποίησης που προαναφέρθηκε απαιτεί, σε κάθε επανάληψη την επίλυση ενός γραμμικού προβλήματος, το οποίο δεν θα αναλυθεί λεπτομερώς.

Η παράγραφος αυτή αναφέρεται, ωστόσο, σε ένα δυναμικό πρότυπο. Συνεπώς παρακάτω, θα παρουσιαστεί ο αλγόριθμος επίλυσης του ιδανικού αυτού προτύπου επιλογής διαδρομής, δυναμικής ισορροπίας των χρηστών:

Βήμα 1: (Αρχή)

Εύρεση μιας αρχικής δυνατής λύσης, $\tilde{\tau}_\alpha(k)$

Βήμα 2: (Εσωτερικές επαναλήψεις)

Επίλυση του προτύπου επιλογής διαδρομής (μη γραμμικό πρόγραμμα) για τους φόρτους συνδέσμων με τη χρήση του αλγόριθμου των Frank-Wolfe.

Βήμα 3: (Εξωτερικές επαναλήψεις)

Έλεγχος σύγκλισης της μεθόδου χαλάρωσης.

Εάν η σύγκλιση δεν είναι ικανοποιητική, επιστροφή στο βήμα2 και αναθεώρηση της $\tilde{\tau}_\alpha(k)$, αλλιώς τέλος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των εσωτερικών και ο αριθμός των εξωτερικών επαναλήψεων έχουν συσχέτιση. Όταν ο πρώτος αυξάνεται, τότε ο δεύτερος μειώνεται και το αντίστροφο.

II. Στιγμιαία δυναμικά πρότυπα επιλογής διαδρομής

Όπως προαναφέρθηκε, τα ντετερμινιστικά στιγμιαία πρότυπα επιλογής διαδρομής διακρίνονται σε:

- αυτά που βασίζονται στο χρόνο διαδρομής (1)
- αυτά που βασίζονται στο χρόνο συνδέσμου (2)

Τα πρώτα έχουν μια διαισθητική ερμηνεία. Ωστόσο, η επίλυσή τους απαιτεί σαφή απαρίθμηση των διαδρομών, η οποία αποτελεί ένα υπολογιστικά δύσκολο πρόβλημα για ρεαλιστικά δίκτυα. Ως εκ τούτου, συνίσταται η χρήση προτύπων επιλογής διαδρομής που

βασίζονται στον χρόνο συνδέσμου, η επίλυση των οποίων δεν απαιτεί σαφή απαρίθμηση των διαδρομών. Αποδεικνύεται ότι οι στιγμιαίες δυναμικές βέλτιστες συνθήκες επιλογής διαδρομής βασισμένες στο χρόνο συνδέσμου συνεπάγονται τις στιγμιαίες δυναμικές βέλτιστες συνθήκες επιλογής διαδρομής βασισμένες στον χρόνο διαδρομής.

Τα προαναφερόμενα πρότυπα είναι περιορισμένα με την έννοια ότι οι μετακινούμενοι θεωρούνται ότι είναι ομογενείς. Ένας τρόπος να αναιρεθεί η υπόθεση αυτή, σε έναν βαθμό, είναι να κατηγοριοποιηθούν οι ταξιδιώτες σε τάξεις/ομάδες. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε ομάδα πρέπει να έχει ευδιάκριτα διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις άλλες ομάδες, αλλά πρέπει να παρουσιάζει ομοιογένεια εντός της ομάδας. Πρότυπα πολλαπλών τάξεων παρουσιάζονται παρακάτω, αφού όμως προηγηθούν τα στιγμιαία πρότυπα μίας τάξης.

A) Ορισμός της στιγμιαίας κατάστασης

Τα δύο στιγμιαία δυναμικά πρότυπα που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι ισοδύναμα με τις στιγμιαίες δυναμικές βέλτιστες συνθήκες επιλογής διαδρομής. Στη συνέχεια, θεωρείται η γενίκευση της συμβατικής στατικής βέλτιστης κατάστασης των χρηστών ώστε να περιγράψει τα στιγμιαία δυναμικά πρότυπα επιλογής διαδρομής.

Αρχικά, όμως, θα πρέπει να δοθεί ο ορισμός του *κόμβου απόφασης*, για μία διαδρομή p που συνδέει ένα ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού, ως κάθε κόμβος μιας διαδρομής, η οποία περιλαμβάνει τον κόμβο προέλευσης. Στην συνέχεια, ακολουθεί ο εξής ορισμός:

Στιγμιαία δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών βασισμένη στο χρόνο μετακίνησης: Εάν, για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού, σε κάθε κόμβο απόφασης και σε κάθε χρονική στιγμή, οι στιγμιαίοι χρόνοι μετακίνησης για όλες τις διαδρομές που χρησιμοποιούνται είναι ίσοι με τον ελάχιστο στιγμιαίο χρόνο μετακίνησης, τότε η δυναμική κυκλοφοριακή ροή είναι σε μία στιγμιαία δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών βασισμένη στον χρόνο μετακίνησης (Ran and Boyce, 1996).

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να δοθεί ο ορισμός του *στιγμιαίου* χρόνου μετακίνησης. Ο στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης ενός συνδέσμου σε κάποια χρονική στιγμή t είναι ο χρόνος που θα χρειάζονταν οι μετακινούμενοι για να διανύσουν το σύνδεσμο, όταν οι υπάρχουσες συνθήκες παραμένουν σταθερές. Ο στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης μίας διαδρομής σε κάποια χρονική στιγμή t είναι ο χρόνος που θα χρειάζονταν οι μετακινούμενοι για να διανύσουν τη διαδρομή, όταν οι υπάρχουσες συνθήκες παραμένουν σταθερές. Συμπερασματικά, ο στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης μίας διαδρομής σε κάποια χρονική στιγμή t είναι το άθροισμα των στιγμιαίων χρόνων μετακίνησης όλων των συνδέσμων που αποτελούν τη διαδρομή. Αξίζει να σημειωθεί ότι, στα παρακάτω, γίνεται η υπόθεση ότι ο στιγμιαίος χρόνος

μετακίνησης σε ένα σύνδεσμο εξαρτάται από τον αριθμό των οχημάτων, το κυκλοφοριακό φόρτο εισόδου και εξόδου από το σύνδεσμο. Επίσης, ο χρόνος αυτός είναι το άθροισμα δύο όρων: 1) ενός χρόνου «αναψυχής» (cruise time) που εξαρτάται από τον κυκλοφοριακό φόρτο και 2) ενός χρόνου αναμονής λόγω καθυστέρησης (queuing delay).

Η τυποποίηση του προβλήματος σε αυτήν την ενότητα, των στιγμιαίων ντετερμινιστικών δυναμικών προτύπων επιλογής διαδρομής, βασίζεται στο παρακάτω κριτήριο, σύμφωνα με το οποίο κάθε μετακινούμενος χρησιμοποιεί τη διαδρομή που ελαχιστοποιεί το στιγμιαίο χρόνο μετακίνησής του όταν αναχωρεί από τον κόμβο προέλευσης ή κάποιον άλλο ενδιάμεσο κόμβο προς τον κόμβο προορισμού (Ran and Boyce, 1996). Αυτό το κριτήριο επιλογής διαδρομής συνεπάγεται ότι σε μία στιγμιαία δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών, βασισμένη στον χρόνο μετακίνησης, οι στιγμιαίοι χρόνοι μετακίνησης σε κάθε κόμβο απόφασης όλων των χρησιμοποιούμενων διαδρομών, που συνδέουν ένα ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού, θα είναι ίσοι και όχι μεγαλύτεροι από τους στιγμιαίους χρόνους μετακίνησης των μη χρησιμοποιούμενων διαδρομών.

B) Στιγμιαίο πρότυπο με βάση το χρόνο διαδρομής

Οι συνθήκες του στιγμιαίου προτύπου επιλογής διαδρομής με βάση το χρόνο διαδρομής, οι οποίες είναι ισοδύναμες με τον ορισμό της στιγμιαίας δυναμικής βέλτιστης κατάστασης των χρηστών που παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι οι εξής:

$$\psi_p^{rs^*}(t) - \sigma^{rs^*}(t) \geq 0 \quad \forall p, r, s \quad (2.52)$$

$$f_p^{rs^*}(t) [\psi_p^{rs^*}(t) - \sigma^{rs^*}(t)] = 0 \quad \forall p, r, s \quad (2.53)$$

$$f_p^{rs}(t) \geq 0 \quad \forall p, r, s \quad (2.54)$$

όπου $f_p^{rs^*}(t)$, $\psi_p^{rs^*}(t)$, $\sigma^{rs^*}(t)$ είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος εισόδου, ο στιγμιαίος και ο ελάχιστος στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης στη διαδρομή p , που συνδέει ένα ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού rs , τη χρονική στιγμή t . Ο αστερίσκος στις παραπάνω εξισώσεις συμβολίζει ότι οι μεταβλητές του φόρτου αντιστοιχούν στη στιγμιαία βέλτιστη κατάσταση των χρηστών με βάση τον χρόνο μετακίνησης.

Το ισοδύναμο πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας είναι το ακόλουθο:

$$\int_0^T \sum_{rs} \sum_p \psi_p^{rs^*}(t) [f_p^{rs}(t) - f_p^{rs^*}(t)] dt \geq 0 \quad (2.55)$$

Το πρότυπο αυτό υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι είναι οι εξής:

- Σχέση μεταξύ μεταβλητών κατάστασης και μεταβλητών ελέγχου
- Περιορισμοί διατήρησης ροής

- Περιορισμοί διάδοσης ροής
- Περιορισμοί ορισμών
- Μη αρνητικές συνθήκες
- Οριακές συνθήκες

Να σημειωθεί ότι οι φόρτοι εισόδου και εξόδου σε ένα σύνδεσμο θεωρούνται ως μεταβλητές ελέγχου, ενώ ο αριθμός οχημάτων σε ένα σύνδεσμο ορίζεται ως μεταβλητή κατάστασης.

Γ) Στιγμιαίο πρότυπο με βάση τον χρόνο συνδέσμου

Προτείνεται ένα πρότυπο βασισμένο σε μεταβλητές συνδέσμου, αντί των μεταβλητών διαδρομής του προηγούμενου προτύπου. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται το ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα της σαφής απαρίθμησης των διαδρομών του δικτύου, που χαρακτήριζε το προηγούμενο πρότυπο.

Οι συνθήκες του στιγμιαίου προτύπου επιλογής διαδρομής με βάση τον χρόνο διαδρομής, οι οποίες είναι ισοδύναμες με τον ορισμό της στιγμιαίας δυναμικής βέλτιστης κατάστασης των χρηστών που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.2.2.1.3.1, είναι οι εξής:

$$\theta_a^{r*}(t) \geq 0 \quad \forall a = (i, j), r \quad (2.56)$$

$$u_a^{r*}(t)\theta_a^{r*}(t) = 0 \quad \forall a = (i, j), r \quad (2.57)$$

$$u_a^r(t) \geq 0 \quad \forall a = (i, j), r \quad (2.58)$$

όπου $\theta_a^{r*}(t) = \sigma^{ri*}(t) + c_a^*(t) - \sigma^{rj*}(t) \quad \forall a, r; a = (i, j)$. Το $\sigma^{ri*}(t)$ είναι ο ελάχιστος στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο i για το σύνδεσμο $a = (i, j)$, το $\sigma^{rj*}(t)$ είναι ο ελάχιστος στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο j για το σύνδεσμο a και το $c_a^*(t)$ είναι ο στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης του συνδέσμου a τη χρονική στιγμή t . Το $u_a^r(t)$ είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος εισόδου στο σύνδεσμο a που ανήκει σε μία διαδρομή που ξεκινάει από τον κόμβο προέλευσης r την χρονική στιγμή t . Ο αστερίσκος στις παραπάνω εξισώσεις συμβολίζει ότι οι μεταβλητές του φόρτου αντιστοιχούν στη στιγμιαία βέλτιστη κατάσταση των χρηστών με βάση τον χρόνο μετακίνησης.

Αποδεικνύεται ότι οι συνθήκες του στιγμιαίου προτύπου επιλογής διαδρομής, που βασίζεται στον χρόνο συνδέσμου, συνεπάγονται τις συνθήκες του στιγμιαίου προτύπου επιλογής διαδρομής, που βασίζεται στον χρόνο διαδρομής.

Το ισοδύναμο πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας είναι το ακόλουθο:

$$\int_0^T \sum_r \sum_a \theta_a^{rs*}(t) [u_a^r(t) - u_a^{rs*}(t)] dt \geq 0 \quad (2.59)$$

Το πρότυπο αυτό υπόκειται στους ίδιους περιορισμούς με το ιδανικό πρότυπο με βάση τον χρόνο διαδρομής.

Δ) Στιγμιαίο πρότυπο πολλαπλών ομάδων χρηστών με βάση το κόστος διαδρομής

Προτείνεται ένα στιγμιαίο δυναμικό πρότυπο βέλτιστης λύσης των χρηστών βασισμένο στα κόστη μετακίνησης αντί των χρόνων μετακίνησης. Οι μετακινούμενοι κατηγοριοποιούνται σε M τάξεις για κάθε ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού ανάλογα με τα κοινωνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά τους. Όταν $M = 1$, προκύπτει ένα πρότυπο μίας τάξης, που είναι όμως διαφορετικό από το προαναφερόμενο στιγμιαίο πρότυπο βασισμένο στον χρόνο διαδρομής.

Πριν αναφερθούν οι συνθήκες του στιγμιαίου προτύπου πολλαπλών τάξεων με βάση το κόστος διαδρομής θα οριστεί η στιγμιαία δυναμική βέλτιστη κατάσταση πολλαπλών ομάδων των χρηστών βασισμένη στο κόστος διαδρομής.

Στιγμιαία δυναμική βέλτιστη κατάσταση πολλαπλών ομάδων των χρηστών βασισμένη στο κόστος διαδρομής: Εάν, για κάθε ομάδα χρηστών και για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού σε κάθε χρονική στιγμή, τα στιγμιαία κόστη μετακίνησης για όλες τις διαδρομές που χρησιμοποιούνται είναι ίσα με το ελάχιστο στιγμιαίο κόστος μετακίνησης, τότε η δυναμική κυκλοφοριακή ροή είναι σε μία στιγμιαία δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών βασισμένη στο κόστος διαδρομής (Ran and Boyce, 1996).

Οι συνθήκες του συγκεκριμένου στιγμιαίου προτύπου επιλογής διαδρομής είναι οι ακόλουθες:

$$\tilde{\psi}_{mp}^{rs*}(t) - \tilde{\sigma}_m^{rs*}(t) \geq 0 \quad \forall m, p, r, s \quad (2.60)$$

$$\tilde{f}_{mp}^{rs*}(t) [\tilde{\psi}_{mp}^{rs*}(t) - \tilde{\sigma}_m^{rs*}(t)] = 0 \quad \forall m, p, r, s \quad (2.61)$$

$$\tilde{f}_{mp}^{rs}(t) \geq 0 \quad \forall m, p, r, s \quad (2.62)$$

όπου $\tilde{\psi}_{mp}^{rs*}(t)$ είναι το στιγμιαίο κόστος της διαδρομής p για την ομάδα m από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο προορισμού s την χρονική στιγμή t και $\tilde{\sigma}_m^{rs*}(t)$ το ελάχιστο στιγμιαίο κόστος της διαδρομής p για την ομάδα m από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο προορισμού s την χρονική στιγμή t . Επίσης το $\tilde{f}_{mp}^{rs*}(t)$ συμβολίζει τον κυκλοφοριακό φόρτο

εισόδου στη διαδρομή p για την ομάδα m από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο προορισμού s την χρονική στιγμή t .

Το ισοδύναμο πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας είναι το ακόλουθο:

$$\int_0^T \sum_{rs} \sum_{mp} \tilde{\psi}_{mp}^{rs*}(t) [\tilde{f}_{mp}^{rs}(t) - \tilde{f}_{mp}^{rs*}(t)] dt \geq 0 \quad (2.63)$$

Επιπρόσθετα, οι περιορισμοί του προτύπου είναι παρόμοιοι με αυτούς του στιγμιαίου προτύπου με βάση τον χρόνο διαδρομής, με τη διαφορά ότι, στο πρώτο, οι περιορισμοί αναφέρονται σε κάθε ομάδα m .

Ε) Στιγμιαίο πρότυπο πολλαπλών ομάδων χρηστών με βάση το κόστος συνδέσμου

Προτείνεται ένα στιγμιαίο δυναμικό πρότυπο βέλτιστης λύσης των χρηστών βασισμένο στο κόστος συνδέσμου αντί του χρόνου συνδέσμου. Οι περιορισμοί του προτύπου είναι ίδιοι με τους περιορισμούς του στιγμιαίου προτύπου πολλαπλών ομάδων χρηστών με βάση το κόστος διαδρομής. Η βασική διαφορά αυτών των δύο προτύπων αποτελεί το γεγονός ότι το πρώτο είναι βασισμένο σε μεταβλητές συνδέσμου, ενώ το δεύτερο σε μεταβλητές διαδρομής.

Πριν αναφερθούν οι συνθήκες του στιγμιαίου προτύπου πολλαπλών τάξεων με βάση το κόστος συνδέσμου θα οριστεί η στιγμιαία δυναμική βέλτιστη κατάσταση πολλαπλών ομάδων των χρηστών βασισμένη στο κόστος συνδέσμου.

Ιδανική στιγμιαία βέλτιστη κατάσταση πολλαπλών ομάδων των χρηστών βασισμένη στο κόστος συνδέσμου: Εάν, για κάθε ομάδα χρηστών και για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού σε κάθε χρονική στιγμή, τα στιγμιαία κόστη μετακίνησης για όλες τις διαδρομές που χρησιμοποιούνται είναι ίσα με το ελάχιστο στιγμιαίο κόστος μετακίνησης, τότε η δυναμική κυκλοφοριακή ροή είναι σε μία στιγμιαία δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών βασισμένη στο κόστος συνδέσμου (Ran and Boyce, 1996).

Οι συνθήκες του συγκεκριμένου ιδανικού προτύπου επιλογής διαδρομής είναι οι ακόλουθες:

$$\tilde{\theta}_{ma}^{r*}(t) \geq 0 \quad \forall m, a = (i, j), r \quad (2.64)$$

$$u_{ma}^{r*}(t) \tilde{\theta}_{ma}^{r*}(t) = 0 \quad \forall m, a = (i, j), r \quad (2.65)$$

$$u_{ma}^r(t) \geq 0 \quad \forall m, a = (i, j), r \quad (2.66)$$

όπου $\tilde{\theta}_{ma}^{r*}(t) = \tilde{\sigma}_m^{ri*}(t) + c_{ma}^*(t) - \tilde{\sigma}_m^{ri*}(t) \quad \forall m, a, r; a = (i, j)$. Το $\tilde{\sigma}_m^{ri*}(t)$ είναι ο ελάχιστος στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης για την ομάδα m από τον κόμβο προέλευσης r

στον κόμβο i για το σύνδεσμο $a = (i, j)$ την χρονική στιγμή t , το $\tilde{\sigma}_m^{ri*}(t)$ είναι ο ελάχιστος στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης για την ομάδα m από τον κόμβο προέλευσης r στον κόμβο j για το σύνδεσμο a την χρονική στιγμή t και το $c_{ma}^*(t)$ είναι ο στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης για την ομάδα m του συνδέσμου a τη χρονική στιγμή t . Το $u_{ma}^r(t)$ είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος εισόδου για την ομάδα m στο σύνδεσμο a που ανήκει σε μία διαδρομή που ξεκινάει από τον κόμβο προέλευσης r την χρονική στιγμή t . Ο αστερίσκος στις παραπάνω εξισώσεις συμβολίζει ότι οι μεταβλητές του φόρτου αντιστοιχούν στη στιγμιαία βέλτιστη κατάσταση των χρηστών με βάση τον χρόνο μετακίνησης.

Αποδεικνύεται ότι οι συνθήκες του στιγμιαίου προτύπου επιλογής διαδρομής, που βασίζεται στον χρόνο συνδέσμου, συνεπάγονται τις συνθήκες του στιγμιαίου προτύπου επιλογής διαδρομής, που βασίζεται στον χρόνο διαδρομής.

Το ισοδύναμο πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας είναι το ακόλουθο:

$$\int_0^T \sum_r \sum_{ma} \tilde{\theta}_{ma}^{r*}(t) [u_{ma}^r(t) - u_{ma}^{r*}(t)] dt \geq 0 \quad (2.67)$$

ΣΤ) Ένας αλγόριθμος επίλυσης για ένα στιγμιαίο πρότυπο επιλογής διαδρομής

Στη συγκεκριμένη παράγραφο, το στιγμιαίο δυναμικό πρότυπο επιλογής διαδρομής, βασισμένο στο χρόνο συνδέσμου, επιλέγεται να λυθεί με τον αλγόριθμο που θα ακολουθήσει. Αρχικά, εξετάζεται η μέθοδος της χαλάρωσης (relaxation method). Το πρότυπο επαναδιατυπώνεται ως ένα μη γραμμικό πρόγραμμα με διακριτό χρόνο. Έπειτα, οι μέθοδοι της χαλάρωσης και των Frank-Wolfe χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος. Με τη διαδικασία της χαλάρωσης, οι εκτιμημένοι χρόνοι μετακίνησης των συνδέσμων αναθεωρούνται με τις επαναλήψεις. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η τεχνική των Frank-Wolfe για να επιλυθεί το μη γραμμικό πρόβλημα.

Μετατροπή του στιγμιαίου προτύπου, με βάση το χρόνο συνδέσμου, σε ένα διακριτό πρότυπο μεταβαλλόμενων ανισοτήτων

Για να μετατραπεί το συνεχές στιγμιαίο πρότυπο, με βάση το χρόνο συνδέσμου, σε ένα διακριτό πρότυπο ανισότητας μεταβλητών, η χρονική περίοδος $[0, T]$ υποδιαιρείται σε K μικρά ίσα χρονικά διαστήματα. Κάθε χρονικό διάστημα είναι μια μονάδα του χρόνου. Έτσι το $u_a(k)$ παριστάνει τον κυκλοφοριακό φόρτο εισόδου στο σύνδεσμο a κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος k . Για λόγους απλούστευσης, οι εκτιμημένοι χρόνοι μετακίνησης των συνδέσμων τροποποιούνται ώστε να αποτελούν πολλαπλάσια του χρονικού διαστήματος, ως ακολούθως:

$$\tilde{\tau}_\alpha(k) = i \text{ εάν } i - 0.5 \leq \tilde{\tau}_\alpha(k) < i + 0.5$$

όπου i είναι ένας ακέραιος και $0 \leq i \leq K$. Σημειώνεται ότι αυτός ο τρόπος στρογγυλοποίησης χρησιμοποιείται μόνο στους περιορισμούς διάδοσης της ροής. Περισσότερη ακρίβεια επιτυγχάνεται, κάνοντας τα χρονικά διαστήματα μικρότερα. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι η εκτίμηση της συνάρτησης του στιγμιαίου χρόνου των συνδέσμων και η αντικειμενική συνάρτηση δεν έχουν αυτό το σφάλμα της στρογγυλοποίησης (Ran and Boyce, 1996).

Διαμορφώνεται, συνεπώς, το παρακάτω πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας:

$$\sum_{k=1}^K \sum_r \sum_a \theta_a^{r*}(k) [u_a^r(k) - u_a^{r*}(k)] \geq 0 \quad (2.68)$$

$$\text{όπου } \theta_a^{r*}(k) = \sigma^{ri*}(k) + c_a^{*}(k) - \sigma^{rj*}(k) \quad \forall a, r; a = (i, j) \quad (2.69)$$

Οι συμβολισμοί είναι ίδιοι με αυτούς του στιγμιαίου προτύπου που βασίζεται στο χρόνο συνδέσμου, με τη διαφορά ότι δεν αναφέρονται στην χρονική στιγμή t αλλά στο χρονικό διάστημα k .

Για λόγους απλούστευσης, γίνεται η υπόθεση ότι η χρονική περίοδος $[0, T]$ είναι αρκετά μεγάλη, ώστε κάθε φόρτος αναχώρησης από τον κόμβο προέλευσης r να φθάνει στον προορισμό s πριν ή στο τέλος της περιόδου.

Η διαδικασία χαλάρωσης και η μέθοδος των Frank-Wolfe

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος επίλυσης του στιγμιαίου προτύπου, που είναι βασισμένο στο χρόνο διαδρομής, είναι όμοιος με τον αλγόριθμο επίλυσης του ιδανικού προτύπου, που είναι βασισμένο στο χρόνο διαδρομής. Για το λόγο αυτό, ο αλγόριθμος θα παρουσιαστεί περιληπτικά ως εξής:

Βήμα 1: (Αρχή)

Εύρεση μιας αρχικής δυνατής λύσης, $\tilde{\tau}_\alpha(k)$

Βήμα 2: (Εσωτερικές επαναλήψεις)

Επίλυση του προτύπου επιλογής διαδρομής (μη γραμμικό πρόβλημα) για τους φόρτους των συνδέσμων με τη χρήση του αλγόριθμου των Frank – Wolfe.

Βήμα 3: (Εξωτερικές επαναλήψεις)

Έλεγχος σύγκλισης της μεθόδου χαλάρωσης.

Εάν η σύγκλιση δεν είναι ικανοποιητική, επιστροφή στο βήμα2 και αναθεώρηση της $\tilde{\tau}_\alpha(k)$, αλλιώς τέλος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των εσωτερικών και ο αριθμός των εξωτερικών επαναλήψεων έχουν συσχέτιση. Όταν ο πρώτος αυξάνεται, τότε ο δεύτερος μειώνεται και το αντίστροφο.

2.2.2.2 Δυναμικά Στοχαστικά πρότυπα

Δυναμικά πληροφοριακά συστήματα αναπτύσσονται για να ενημερώνουν τους μετακινούμενους σχετικά με τις βέλτιστες ώρες αναχώρησης και τις συντομότερες διαδρομές, ώστε να αποφεύγουν τις καθυστερήσεις λόγω συμφόρησης (μέσω της παροχής ενημέρωσης σχετικά με τις προβλεπόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες). Ωστόσο, κάποιοι μετακινούμενοι μπορεί να μην στηρίζονται στην πληροφόρηση που παρέχεται από τα συστήματα ενημέρωσης. Επίσης, μετακινούμενοι, χωρίς τέτοια συστήματα, δεν έχουν τέλεια πληροφόρηση σχετικά με τις κυκλοφοριακές συνθήκες του συγκοινωνιακού δικτύου και, έτσι, χρησιμοποιούν τη δική τους εμπειρία (ιστορικός χρόνος) και αντίληψη για να λαμβάνουν αποφάσεις μετακίνησης. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθούν δυναμικά πρότυπα επιλογής διαδρομής υπό συνθήκες τέλει αλλά και ατελούς πληροφόρησης (Ran and Boyce, 1996).

Όπως έχει προαναφερθεί, η κατάσταση της τέλει πληροφόρησης των χρηστών συνιστά συνθήκη των ντετερμινιστικών προτύπων. Λίγα είναι τα πρότυπα που εφαρμόζονται για την περιγραφή της κατάστασης ατελούς πληροφόρησης και μη ντετερμινιστικών συνθηκών κυκλοφορίας. Τα πρότυπα αυτά είναι τα στοχαστικά πρότυπα, τα οποία αποτελούν μια στοχαστική γενίκευση των ντετερμινιστικών προτύπων επιλογής διαδρομής. Στην ενότητα αυτή θα γίνει αναφορά στα *δυναμικά στοχαστικά πρότυπα*, τα οποία χρησιμοποιούνται για να προσφέρουν μία προσέγγιση στο πρόβλημα επιλογής διαδρομής σε συνθήκες δυναμικής στοχαστικής βέλτιστης κατάστασης των χρηστών.

Τα προβλήματα αυτού του τύπου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με:

- 1) το τυχαίο στοιχείο που ενυπάρχει στην αντίληψη των διαρκειών μετακίνησης από τους χρήστες του δικτύου
- 2) την τυχειότητα στις κυκλοφοριακές συνθήκες ανάμεσα στα ζεύγη προέλευσης-προορισμού
- 3) την τυχειότητα της κατάστασης της κυκλοφορίας στους συνδέσμους και των διαρκειών μετακίνησης που αντιστοιχούν σε αυτούς.

(Ran and Boyce, 1996)

Επιπρόσθετα, τα δυναμικά στοχαστικά πρότυπα παρέχουν, σε σχέση με τα αντίστοιχα στατικά, μία καλύτερη αναπαράσταση της συμπεριφοράς των χρηστών του μεταφορικού δικτύου όσον αφορά τις επιλογές τους κατά τις μετακινήσεις. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός

ότι τα δυναμικά στοχαστικά πρότυπα λαμβάνουν σημαντικά υπόψη τον χρονοεξαρτώμενο κυκλοφοριακό φόρτο και τις χρονικά μεταβαλλόμενες διάρκειες μετακίνησης. Τα δυναμικά στοχαστικά πρότυπα παρέχουν, και σε σχέση με τα ντετερμινιστικά δυναμικά πρότυπα, μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της συμπεριφοράς των χρηστών. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι στα πρώτα ο κυκλοφοριακός φόρτος, που αναχωρεί από ένα σημείο προέλευσης προς ένα σημείο προορισμού, κατανέμεται σε πολλές διαδρομές με διαφορετικούς χρόνους μετακίνησης, ενώ στα δεύτερα μόνο στις διαδρομές με τον ελάχιστο χρόνο μετακίνησης.

Σύμφωνα με το πρώτο κριτήριο κατηγοριοποίησης των προβλημάτων των δυναμικών στοχαστικών προτύπων, οι αντιλήψεις του χρόνου μετακίνησης για μια διαδρομή μπορεί να μεταβάλλεται από χρήστη σε χρήστη, λόγω του σφάλματος στην αντίληψη κάθε μετακινούμενου. Με άλλα λόγια, κάθε μετακινούμενος αντιλαμβάνεται και επεξεργάζεται με το δικό του τρόπο τους χρόνους μετακίνησης. Αυτός ο αντιληπτός χρόνος μετακίνησης αποτελεί μία τυχαία μεταβλητή κατανεμημένη στον πληθυσμό των μετακινούμενων (Ran and Boyce, 1996). Εξαιτίας αυτής της διακύμανσης στην αντίληψη του χρόνου μετακίνησης, οι μετακινούμενοι μπορεί να επιλέξουν διαφορετικές διαδρομές με δεδομένο ένα ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού, παρόλο που γίνεται η υπόθεση ότι όλοι επιλέγουν τη διαδρομή την οποία αντιλαμβάνονται ως συντομότερη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία λαμβάνεται υπόψη μόνο το τυχαίο στοιχείο που ενυπάρχει στην αντίληψη της διάρκειας μετακίνησης από τους χρήστες του δικτύου. Επίσης, κατ' αντιστοιχία με τα ντετερμινιστικά δυναμικά πρότυπα, γίνεται η διάκριση των δυναμικών στοχαστικών προτύπων σε ιδανικά και στιγμιαία. Τα ιδανικά δυναμικά στοχαστικά πρότυπα επιλογής διαδρομής παρουσιάζονται πρώτα.

I. Ιδανικά δυναμικά στοχαστικά πρότυπα επιλογής διαδρομής

Καταρχήν, παρουσιάζονται οι ορισμοί των χρόνων μετακίνησης στα ιδανικά στοχαστικά προβλήματα. Τα προβλήματα αυτά αποσκοπούν στο να καθοριστεί πόσοι μετακινούμενοι χρησιμοποιούν κάθε διαδρομή σε κάθε κόμβο προέλευσης και σε κάθε χρονική στιγμή. Έπειτα, παρουσιάζονται δύο ιδανικά στοχαστικά πρότυπα επιλογής διαδρομής, τα οποία τυποποιούνται σαν ένα πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας που υπόκειται σε μια ομάδα περιορισμών. Τα ιδανικά ντετερμινιστικά δυναμικά πρότυπα επιλογής διαδρομής, που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2.2.2.1.1, είναι μια ειδική περίπτωση των ιδανικών στοχαστικών προτύπων επιλογής διαδρομής όταν η διακύμανση του αντιληπτού πραγματικού χρόνου μετακίνησης είναι μηδενική.

Για την επίλυση των ιδανικών στοχαστικών προτύπων βέλτιστης λύσης των χρηστών για μεγάλα μεταφορικά δίκτυα, χρειάζεται να αναπτυχθούν αλγόριθμοι που αποφεύγουν την απαρίθμηση των διαδρομών (Ran and Boyce, 1996). Επίσης, η συνεχής μεταβαλλόμενη

ανισότητα μετατρέπεται σε μία *διακριτή* μεταβαλλόμενη ανισότητα. Η μέθοδος της *χαλάρωσης* έρχεται και σε αυτό το σημείο να επιλύσει το πρόβλημα της διακριτής μεταβαλλόμενης ανισότητας. Με τη μέθοδο αυτή, το πρόβλημα τυποποιείται ως ένα μη γραμμικό πρόβλημα το οποίο επιλύεται με τη μέθοδο *των διαδοχικών μέσων όρων*.

Παρακάτω, δύο συναρτήσεις επιλογής διαδρομής εξετάζονται κατ' αντιστοιχία με τα στατικά πρότυπα δικτύων, η πολυωνυμική Logit και η πολυωνυμική Probit. Για το πολυωνυμικό πρότυπο Probit, η δοκιμή του Monte Carlo προτείνεται για την εκτίμηση των δυναμικών πιθανοτήτων επιλογής διαδρομής. Για το πολυωνυμικό πρότυπο Logit, ένας δυναμικός αλγόριθμος επιλογής διαδρομής (DYNASTOCH1) προτείνεται για τον ίδιο σκοπό. Ο αλγόριθμος αυτός είναι όμοιος με τον αλγόριθμο STOCH του Dial και επιλύει ένα ιδανικό δυναμικό πρόβλημα επιλογής διαδρομής το οποίο δεν εξαρτάται από την κυκλοφοριακή ροή. Στον αλγόριθμο DYNASTOCH1, δεν απαιτείται σαφής απαρίθμηση των διαδρομών και οι πιθανότητες επιλογής διαδρομής υπολογίζονται επακριβώς.

A) Ορισμός της ιδανικής δυναμικής στοχαστικής κατάστασης και η στοχαστική επιλογή διαδρομής

Παρακάτω, παρουσιάζεται ο ορισμός της ιδανικής δυναμικής στοχαστικής βέλτιστης κατάστασης των χρηστών, η οποία είναι μια στοχαστική γενίκευση της ιδανικής ντετερμινιστικής βέλτιστης κατάστασης των χρηστών.

Ιδανική στοχαστική δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών: Εάν, για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού και σε κάθε χρονική στιγμή, οι πραγματικοί χρόνοι μετακίνησης για όλες τις χρησιμοποιούμενες διαδρομές, που αντιλαμβάνονται οι μετακινούμενοι οι οποίοι αναχωρούν την ίδια χρονική στιγμή, είναι ίσοι και ελάχιστοι, τότε η δυναμική ροή του δικτύου είναι σε μία ιδανική στοχαστική δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών (Ran and Boyce, 1996).

Η βέλτιστη αυτή κατάσταση, που μόλις ορίστηκε, μπορεί να θεωρηθεί ως μία *προληπτική* στοχαστική δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών, καθώς ο μέσος πραγματικός χρόνος διαδρομής είναι ένας προβλεπόμενος μέσος χρόνος διαδρομής.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να προσδιοριστεί ο όρος του πραγματικού αντιληπτού χρόνου μετακίνησης. Γίνεται, λοιπόν, η υπόθεση ότι ο αντιληπτός πραγματικός χρόνος διαδρομής είναι μια τυχαία μεταβλητή για κάθε χρονική στιγμή. Επίσης, υποτίθεται ότι κάθε μετακινούμενος επιλέγει τη διαδρομή με τον ελάχιστο αντιληπτό πραγματικό χρόνο μετακίνησης. Αν το $\Omega_p^s(t)$ συμβολίζει τον *αντιληπτό πραγματικό* χρόνο μετακίνησης για

φόρτους που αναχωρούν από τον κόμβο προέλευσης r και κατευθύνονται προς τον κόμβο s και διανύουν τη διαδρομή p την χρονική στιγμή t , τότε ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\Omega_p^{rs}(t) = \eta_p^{rs}(t) + \xi_p^{rs}(t) \quad \forall r, s, p \quad (2.70)$$

όπου $\eta_p^{rs}(t)$ είναι ένα ντετερμινιστικό μέγεθος, το οποίο συμβολίζει τον μέσο πραγματικό χρόνος διαδρομής ενώ $\xi_p^{rs}(t)$ είναι ένας όρος τυχαίου σφάλματος που αντιστοιχεί στη διαδρομή p . Ο τυχαίος όρος μπορεί να παριστάνει σφάλματα που οφείλονται στην ελλιπή πληροφόρηση των χρηστών σχετικά με τις εναλλακτικές διαδρομές, στις διαφοροποιήσεις των προτιμήσεων σε ατομικό επίπεδο, ή σε σφάλματα που εμπεριέχονται στις υποθέσεις των προτύπων.

Το δυναμικό στοχαστικό πρότυπο επιλογής διαδρομής στηρίζεται και σε άλλες υποθέσεις. Με γνωστή την κατανομή των τυχαίων σφαλμάτων, η κατανομή των αντιληπτών χρόνων των διαδρομών μπορεί να υπολογιστεί. Γενικά, γίνεται η υπόθεση ότι $E[\xi_p^{rs}(t)] = 0$ και έτσι $E[\Omega_p^{rs}(t)] = \eta_p^{rs}(t)$ (2.71). Με άλλα λόγια, ο μέσος αντιληπτός πραγματικός χρόνος διαδρομής ισούται με τον μέσο πραγματικό χρόνο διαδρομής. Λόγω αυτής της υπόθεσης, οι χρόνοι μετακίνησης $\Omega_p^{rs}(t)$ και $\eta_p^{rs}(t)$ συχνά αναφέρονται ως αντιληπτός και μετρημένος αντίστοιχα.

Η τυποποίηση του προβλήματος σε αυτήν την ενότητα, των ιδανικών δυναμικών στοχαστικών προτύπων επιλογής διαδρομής, βασίζεται στο παρακάτω κριτήριο, σύμφωνα με το οποίο κάθε μετακινούμενος χρησιμοποιεί τη διαδρομή που ελαχιστοποιεί τον αντιληπτό πραγματικό χρόνο μετακίνησής του. Συνεπώς, με την υπόθεση αυτή, η πιθανότητα μια εναλλακτική διαδρομή p να επιλεγθεί από ένα σύνολο εναλλακτικών διαδρομών που συνδέουν ένα ζεύγος προέλευσης-προορισμού rs ή η συνάρτηση επιλογής διαδρομής μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

$$P_p^{rs}(t) = \text{Prob}[\Omega_p^{rs}(t) \leq \Omega_q^{rs}(t), \forall \text{διαδρομή } q \text{ ανάμεσα στο } rs] \quad \forall r, s, p \quad (2.72)$$

όπου Prob είναι η συνάρτηση επιλογής που παριστάνει το ποσοστό των μετακινούμενων που επιλέγει τη εναλλακτική διαδρομή p . Ο χρονοεξαρτώμενος κυκλοφοριακός φόρτος διαδρομής υπολογίζεται ως εξής:

$$f_p^{rs}(t) = f^{rs}(t) P_p^{rs}(t) \quad \forall r, s, p \quad (2.73)$$

όπου $f^{rs}(t)$ είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος που αναχωρεί από τον κόμβο προέλευσης r προς τον κόμβο προορισμού s την χρονική στιγμή t .

Β) Δύο συναρτήσεις επιλογής διαδρομής

Εξετάζονται οι συναρτήσεις επιλογής διαδρομής Logit και Probit. Όσον αφορά στη συνάρτηση επιλογής διαδρομής **Logit**, ισχύουν οι παρακάτω υποθέσεις/παραδοχές:

$$\Omega_p^{rs}(t) = \eta_p^{rs}(t) - \frac{1}{\theta \varepsilon_p^{rs}(t)} \quad \forall r, s, p \quad (2.74)$$

όπου θ μια μη αρνητική παράμετρος που κλιμακώνει τον αντιληπτό πραγματικό χρόνο διαδρομής και $\varepsilon_p^{rs}(t)$ είναι ένας όρος τυχαίου σφάλματος που αντιστοιχεί στη διαδρομή p . Οι μεταβλητές $\varepsilon_p^{rs}(t)$ είναι όμοια και ανεξάρτητα κατανοημένες σύμφωνα με την κατανομή Gumbel για κάθε χρονική στιγμή με παράμετρο θέσης ίση με το μηδέν και παράμετρο κλίμακας θ (Ben-Akiva and Lerman, 1985). Η πολωνυμική συνάρτηση επιλογών Logit για ένα δεδομένο σύνολο εναλλακτικών επιλογών ορίζεται ως εξής:

$$P_p^{rs}(t) = \frac{\exp[-\theta \eta_p^{rs}(t)]}{\sum_q \exp[-\theta \eta_q^{rs}(t)]} \quad \forall r, s, p \quad (2.75)$$

Έτσι, για κάθε εναλλακτική διαδρομή p που χρησιμοποιείται την χρονική στιγμή t , ο κυκλοφοριακός φόρτος σύμφωνα με το πρότυπο Logit είναι:

$$f_p^{rs}(t) = f^{rs}(t) \frac{\exp[-\theta \eta_p^{rs}(t)]}{\sum_q \exp[-\theta \eta_q^{rs}(t)]} \quad \forall r, s, p \quad (2.76)$$

Όταν $\theta \rightarrow \infty$ τότε $\text{Var}[\Omega_p^{rs}(t)] \rightarrow 0$ και ο αντιληπτός πραγματικός χρόνος μετακίνησης ανάμεσα σε ένα Ο-Δ(Προέλευση – Προορισμός) ισούται με τον μέσο πραγματικό χρόνο μετακίνησης. Στην περίπτωση αυτή, οι μετακινούμενοι επιλέγουν τις διαδρομές με τον ελάχιστο πραγματικό χρόνο μετακίνησης σε κάθε χρονική στιγμή, όπως στο ιδανικό ντετερμινιστικό δυναμικό πρότυπο επιλογής διαδρομής (Ran and Boyce, 1996).

Παρατηρήσεις

Στην πράξη, το πρότυπο Logit πρέπει να εφαρμόζεται με πλήρη διερεύνηση των απλουστευτικών παραδοχών του:

- Η υπόθεση της ανεξαρτησίας των όρων του τυχαίου σφάλματος απαιτεί δύο εναλλακτικές να εξετάζονται ανεξάρτητα από έναν μετακινούμενο, αγνοώντας το πόσο συσχετισμένες οι δύο αυτές επιλογές μπορεί να είναι.
- Η υπόθεση της όμοιας κατανομής των όρων των τυχαίων σφαλμάτων απαιτεί ίση διακύμανση στις εναλλακτικές, αγνοώντας τις σχετικές διαφορές στο ντετερμινιστικό τμήμα της συνάρτησης κόστους.

Για τους λόγους αυτούς το πρότυπο Logit είναι αρκετά περιοριστικό. Ωστόσο, το συγκεκριμένο πρότυπο έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά λόγω της απλότητάς του και της αποτελεσματικής μεθόδου επίλυσής του.

Ένα άλλο πρότυπο, το οποίο, όμως, λαμβάνει υπόψη τη συσχέτιση μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών αποτελεί το πολυωνυμικό πρότυπο **Probit**. Το πρότυπο αυτό μπορεί να είναι θεωρητικά πιο σωστό, αλλά υπολογιστικά είναι πιο δύσκολο σε σύγκριση με το προηγούμενο.

Το πρότυπο Probit προέρχεται από τη θεωρία διακριτών επιλογών και περιγράφεται από τις εξισώσεις (2.74) έως (2.76), όπου οι μεταβλητές $\xi_p^{rs}(t)$ της εξίσωσης (2.74) ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή που δίνεται από ένα διάνυσμα με μηδενικά και ένα πίνακα συνδιακύμανσης για τις διαδρομές p σε κάθε χρονική στιγμή t . Σε αντίθεση με το πρότυπο Logit, η εξίσωση (2.76) δεν μπορεί εκφραστεί σε κλειστή μορφή και δεν υπάρχουν περιορισμοί ανεξαρτησίας και όμοιας κατανομής των όρων του τυχαίου σφάλματος. Επιπρόσθετα, η συνάρτηση επιλογής διαδρομής χαρακτηρίζεται από έναν πίνακα συνδιακύμανσης με θετικά μη διαγώνια στοιχεία, όταν δύο ή περισσότερες διαδρομές έχουν ένα ή περισσότερους κοινούς συνδέσμους, σε αντίθεση με τον προηγούμενο πρότυπο όπου ο πίνακας συνδιακύμανσης είναι διαγώνιος. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι το πρότυπο Probit λαμβάνει υπόψη τη συσχέτιση μεταξύ των εναλλακτικών.

Γ) Περιορισμοί δικτύου και το ισοδύναμο πρόβλημα μεταβαλλόμενων ανισοτήτων

Τα στοχαστικά ιδανικά δυναμικά πρότυπα επιλογής διαδρομής έχουν παρόμοιους περιορισμούς με τα ντετερμινιστικά ιδανικά δυναμικά πρότυπα επιλογής διαδρομής.

Το ισοδύναμο πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας περιγράφεται ως εξής:

$$G_p^{rs}(t) = \{f_p^{rs}(t) - f_p^{rs*}(t)\} \geq 0 \quad \forall t \quad (2.77)$$

όπου $G_p^{rs}(t)$ είναι ένας όρος κόστους όπου

$$G_p^{rs}(t) = \frac{\partial \eta_p^{rs}(t)}{\partial f_p^{rs}(t)} [f_p^{rs}(t) - f^{rs}(t)P_p^{rs}(t)] \quad \forall r, s, p \quad (2.78)$$

Δ) Αλγόριθμος επίλυσης για ένα ιδανικό δυναμικό στοχαστικό πρότυπο επιλογής διαδρομής

Το πρότυπο επαναδιατυπώνεται ως ένα μη γραμμικό πρόβλημα με διακριτό χρόνο, όπως και στην περίπτωση του ιδανικού ντετερμινιστικού δυναμικού προτύπου. Έπειτα, οι μέθοδοι της χαλάρωσης και η μέθοδος των διαδοχικών μέσων όρων χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος. Με τη διαδικασία της χαλάρωσης, οι εκτιμημένοι χρόνοι μετακίνησης των συνδέσμων αναθεωρούνται με τις επαναλήψεις. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η μέθοδος των διαδοχικών μέσων όρων για να επιλυθεί το μη γραμμικό πρόβλημα. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τους Sheffi και Powell το 1982.

Για κάθε επανάληψη της διαδικασίας χαλάρωσης, οι πραγματικοί και οι ελάχιστοι χρόνοι μετακίνησης εκτιμούνται προσωρινά για κάθε κόμβο. Τότε, διαμορφώνεται η αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης (μη γραμμικό πρόβλημα), που είναι ισοδύναμο με το παραπάνω πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας υπό χαλάρωση, το οποίο δεν θα αναλυθεί λεπτομερώς (βλ. Dannielle, 2009).

Παρακάτω, θα παρουσιαστεί ο αλγόριθμος επίλυσης του ιδανικού αυτού στοχαστικού προτύπου επιλογής διαδρομής, δυναμικής ισορροπίας των χρηστών:

Βήμα 1: (Αρχή)

Εύρεση μιας αρχικής δυνατής λύσης, $\tilde{\tau}_\alpha(k)$

Βήμα 2: (Εσωτερικές επαναλήψεις)

Επίλυση του ιδανικού στοχαστικού δυναμικού προβλήματος βέλτιστης λύσης των χρηστών (μη γραμμικό πρόγραμμα), το οποίο δεν εξαρτάται από τον κυκλοφοριακό φόρτο, χρησιμοποιώντας στοχαστική δυναμική φόρτιση του δικτύου. Εύρεση μεγέθους του βήματος με τη μέθοδο των διαδοχικών μέσων όρων.

Βήμα 3: (Εξωτερικές επαναλήψεις)

Έλεγχος σύγκλισης της μεθόδου χαλάρωσης.

Εάν η σύγκλιση δεν είναι ικανοποιητική, επιστροφή στο βήμα2 και αναθεώρηση της $\tilde{\tau}_\alpha(k)$, αλλιώς τέλος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των εσωτερικών και ο αριθμός των εξωτερικών επαναλήψεων έχουν συσχέτιση. Όταν ο πρώτος αυξάνεται, τότε ο δεύτερος μειώνεται και το αντίστροφο.

II. Στιγμιαία δυναμικά στοχαστικά πρότυπα επιλογής διαδρομής

Καταρχήν, παρουσιάζονται οι ορισμοί των χρόνων μετακίνησης στα στιγμιαία στοχαστικά προβλήματα. Τα προβλήματα αυτά αποσκοπούν στο να καθοριστεί πόσοι μετακινούμενοι χρησιμοποιούν κάθε διαδρομή σε κάθε κόμβο απόφασης και σε κάθε χρονική στιγμή. Έπειτα, παρουσιάζονται δύο στιγμιαία δυναμικά στοχαστικά πρότυπα επιλογής διαδρομής, τα οποία τυποποιούνται σαν ένα πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας που υπόκειται σε μια ομάδα περιορισμών. Τα στιγμιαία ντετερμινιστικά δυναμικά πρότυπα επιλογής διαδρομής, που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2.2.2.1.3, είναι μια ειδική περίπτωση των στιγμιαίων στοχαστικών προτύπων επιλογής διαδρομής όταν η διακύμανση του αντιληπτού πραγματικού χρόνου μετακίνησης είναι μηδενική.

Για την επίλυση των στιγμιαίων στοχαστικών προτύπων βέλτιστης λύσης των χρηστών για μεγάλα μεταφορικά δίκτυα, χρειάζεται να αναπτυχθούν αλγόριθμοι που αποφεύγουν την απαρίθμηση των διαδρομών (Ran and Boyce, 1996). Επίσης, η συνεχής μεταβαλλόμενη ανισότητα μετατρέπεται σε μία *διακριτή* μεταβαλλόμενη ανισότητα. Η μέθοδος της *χαλάρωσης* έρχεται και σε αυτό το σημείο να επιλύσει το πρόβλημα της διακριτής μεταβαλλόμενης ανισότητας. Με τη μέθοδο αυτή, το πρόβλημα τυποποιείται ως ένα μη γραμμικό πρόβλημα το οποίο επιλύεται με τη μέθοδο *των διαδοχικών μέσων όρων*.

Παρακάτω, δύο συναρτήσεις επιλογής διαδρομής εξετάζονται κατ' αντιστοιχία με τα στατικά πρότυπα δικτύων, η πολωνυμική Logit και η πολωνυμική Probit. Για το πολωνυμικό πρότυπο Probit, η δοκιμή του Monte Carlo προτείνεται για την εκτίμηση των δυναμικών πιθανοτήτων επιλογής διαδρομής. Για το πολωνυμικό πρότυπο Logit, ένας δυναμικός αλγόριθμος επιλογής διαδρομής (DYNASTOCH2) προτείνεται για τον ίδιο σκοπό. Ο αλγόριθμος αυτός είναι όμοιος με τον αλγόριθμο STOCH του Dial και επιλύει ένα ιδανικό δυναμικό πρόβλημα επιλογής διαδρομής το οποίο δεν εξαρτάται από την κυκλοφοριακή ροή. Στον αλγόριθμο DYNASTOCH2, δεν απαιτείται σαφή απαρίθμηση των διαδρομών και οι πιθανότητες επιλογής διαδρομής υπολογίζονται επακριβώς.

A) Ορισμός της στιγμιαίας δυναμικής στοχαστικής κατάστασης και η στοχαστική επιλογή διαδρομής

Παρακάτω, παρουσιάζεται ο ορισμός της στιγμιαίας δυναμικής στοχαστικής βέλτιστης κατάστασης των χρηστών, η οποία είναι μια στοχαστική γενίκευση της στιγμιαίας ντετερμινιστικής βέλτιστης κατάστασης των χρηστών.

Στιγμιαία στοχαστική δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών: Εάν, για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού σε κάθε κόμβο απόφασης και σε κάθε χρονική στιγμή, οι

αντιληπτοί στιγμιαίοι χρόνοι μετακίνησης για όλες τις χρησιμοποιούμενες διαδρομές, είναι ίσοι με τον ελάχιστο αντιληπτό στιγμιαίο χρόνο διαδρομής, τότε η δυναμική ροή του δικτύου είναι σε μία στιγμιαία στοχαστική δυναμική βέλτιστη κατάσταση των χρηστών (Ran and Boyce, 1996).

Ο ορισμός αυτός υποθέτει ότι οι μετακινούμενοι επιλέγουν διαδρομή χρησιμοποιώντας τη δικιά τους αντίληψη για τους τρέχοντες χρόνους μετακίνησης και συνεπώς ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι περισσότερο διασκορπισμένος στις εναλλακτικές διαδρομές από ότι στα ντετερμινιστικά δυναμικά πρότυπα επιλογής διαδρομής.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να προσδιοριστεί ο όρος του αντιληπτού στιγμιαίου χρόνου μετακίνησης. Γίνεται, λοιπόν, η υπόθεση ότι ο αντιληπτός στιγμιαίος χρόνος διαδρομής είναι μια τυχαία μεταβλητή για κάθε χρονική στιγμή. Επίσης, υποτίθεται ότι κάθε μετακινούμενος επιλέγει τη διαδρομή με τον ελάχιστο αντιληπτό στιγμιαίο χρόνο μετακίνησης. Αν το $\Psi_p^{rs}(t)$ συμβολίζει τον αντιληπτό στιγμιαίο χρόνο μετακίνησης για φόρτους που αναχωρούν από τον κόμβο προέλευσης r και κατευθύνονται προς τον κόμβο s και διανύουν τη διαδρομή p την χρονική στιγμή t , τότε ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\Psi_p^{rs}(t) = \psi_p^{rs}(t) + \xi_p^{rs}(t) \quad \forall r, s, p \quad (2.79)$$

όπου $\psi_p^{rs}(t)$ είναι ένα ντετερμινιστικό μέγεθος, το οποίο συμβολίζει τον μέσο ή μετρημένο στιγμιαίο χρόνο διαδρομής ενώ $\xi_p^{rs}(t)$ είναι ένας όρος τυχαίου σφάλματος που αντιστοιχεί στη διαδρομή p . Ο τυχαίος όρος μπορεί να παριστάνει σφάλματα που οφείλονται στην ελλιπή πληροφόρηση των χρηστών σχετικά με τις εναλλακτικές διαδρομές, στις διαφοροποιήσεις των προτιμήσεων σε ατομικό επίπεδο, ή σε σφάλματα που εμπεριέχονται στις υποθέσεις των προτύπων.

Το δυναμικό στοχαστικό πρότυπο επιλογής διαδρομής στηρίζεται και σε άλλες υποθέσεις. Με γνωστή την κατανομή των τυχαίων σφαλμάτων, η κατανομή των αντιληπτών χρόνων των διαδρομών μπορεί να υπολογιστεί. Γενικά, γίνεται η υπόθεση ότι $E[\psi_p^{rs}(t)] = 0$ και έτσι $E[\Psi_p^{rs}(t)] = \psi_p^{rs}(t)$ (2.2). Με άλλα λόγια, ο μέσος αντιληπτός στιγμιαίος χρόνος διαδρομής ισούται με τον μέσο στιγμιαίο χρόνο διαδρομής. Λόγω αυτής της υπόθεσης, οι χρόνοι μετακίνησης $\Psi_p^{rs}(t)$ και $\psi_p^{rs}(t)$ συχνά αναφέρονται ως αντιληπτός και μετρημένος αντίστοιχα.

Η τυποποίηση του προβλήματος σε αυτήν την ενότητα, των στιγμιαίων δυναμικών στοχαστικών προτύπων επιλογής διαδρομής, βασίζεται στο παρακάτω κριτήριο, σύμφωνα με το οποίο κάθε μετακινούμενος χρησιμοποιεί τη διαδρομή που ελαχιστοποιεί τον αντιληπτό στιγμιαίο χρόνο μετακίνησής του, όταν αναχωρεί από τον κόμβο προέλευσης ή οποιοδήποτε

ενδιάμεσο κόμβο προς τον κόμβο προορισμού (Ran and Boyce, 1996). Συνεπώς, με την υπόθεση αυτή, η πιθανότητα μια εναλλακτική διαδρομή p να επιλεγεί από ένα σύνολο εναλλακτικών διαδρομών που συνδέουν ένα ζεύγος προέλευσης-προορισμού rs ή η συνάρτηση επιλογής διαδρομής μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

$$P_p^{rs}(t) = Prob[\Psi_p^{rs}(t) \leq \Psi_q^{rs}(t), \forall \text{ διαδρομή } q \text{ ανάμεσα στο } rs] \quad \forall r, s, p \quad (2.80)$$

όπου Prob είναι η συνάρτηση επιλογής που παριστάνει το ποσοστό των μετακινούμενων που επιλέγει τη εναλλακτική διαδρομή p . Ο χρονοεξαρτώμενος κυκλοφοριακός φόρτος διαδρομής υπολογίζεται ως εξής:

$$f_p^{rs}(t) = f^{rs}(t) P_p^{rs}(t) \quad \forall r, s, p \quad (2.81)$$

όπου $f^{rs}(t)$ είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος που αναχωρεί από τον κόμβο προέλευσης r προς τον κόμβο προορισμού s την χρονική στιγμή t .

Β) Δύο συναρτήσεις επιλογής διαδρομής

Τα πιο κοινώς χρησιμοποιημένα στιγμιαία δυναμικά στοχαστικά πρότυπα επιλογής διαδρομής αποτελούν, και στην περίπτωση αυτή, τα πολωνυμικά πρότυπα Logit και Probit. Τα δύο αυτά πρότυπα είναι όμοια με τα αντίστοιχα ιδανικά δυναμικά στοχαστικά πρότυπα, με τη διαφορά ότι τα πρώτα αναφέρονται σε αντιληπτούς στιγμιαίους χρόνους μετακίνησης, ενώ τα δεύτερα αναφέρονται σε αντιληπτούς πραγματικούς χρόνους μετακίνησης.

Γ) Περιορισμοί-Ισοδύναμο πρόβλημα μεταβαλλόμενων ανισοτήτων-Αλγόριθμος επίλυσης

Οι περιορισμοί, το ισοδύναμο πρόβλημα μεταβαλλόμενης ανισότητας και ο αλγόριθμος επίλυσης των προτύπων είναι όμοια με εκείνα των ιδανικών δυναμικών στοχαστικών προτύπων επιλογής διαδρομής, με τη διαφορά ότι τα πρώτα αναφέρονται σε αντιληπτούς στιγμιαίους χρόνους μετακίνησης, ενώ τα δεύτερα αναφέρονται σε αντιληπτούς πραγματικούς χρόνους μετακίνησης.

2.3 Παρουσίαση της λειτουργίας των μεταφορικών δικτύων με βάση την θεωρία του βέλτιστου ελέγχου

Η εφαρμογή της θεωρίας του βέλτιστου ελέγχου στη δυναμική προτυποποίηση των μεταφορικών δικτύων προτιμάται όλο και περισσότερο, καθώς οι ραγδαίες εξελίξεις στις εγκαταστάσεις και τεχνικές προγραμματισμού έχουν καταστήσει την θεωρία αυτή εφαρμόσιμη για συγκοινωνιακά προβλήματα μεγάλης κλίμακας. Ο σκοπός της θεωρίας του βέλτιστου ελέγχου είναι να καθοριστούν στρατηγικές ελέγχου που οδηγούν μια διαδικασία να ικανοποιεί τους φυσικούς περιορισμούς και ταυτόχρονα ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν κάποιο κριτήριο επίδοσης (Ran and Boyce, 1996). Η θεωρία του βέλτιστου ελέγχου έχει πολλά πλεονεκτήματα στην επίλυση χρονοεξαρτώμενων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Επίσης, έχει πολλές ομοιότητες με τα στατικά προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως η θεωρία του μη-γραμμικού προγραμματισμού. Η αναφορά στο βέλτιστο έλεγχο στην παρούσα διπλωματική εργασία σχετίζεται με την προτυποποίηση των επιλογών των μετακινούμενων.

Η τυποποίηση ενός προβλήματος βέλτιστου ελέγχου συνδέεται με μια χρονοεξαρτώμενη διαδικασία ή σύστημα και απαιτεί τα ακόλουθα:

1. μια μαθηματική αναπαράσταση της διαδικασίας που θα ελεγχθεί ή θα βελτιστοποιηθεί,
2. μια καταγραφή των φυσικών περιορισμών
3. καθορισμός ενός κριτηρίου απόδοσης (π.χ. κριτηρίου κόστους) ή μιας αντικειμενικής συνάρτησης

Ο βέλτιστος έλεγχος ορίζεται ως ο έλεγχος που ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση εντός ενός χρονικά μεταβαλλόμενου πλαισίου.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να έχει κάποια φυσική ερμηνεία ή σε άλλα προβλήματα μπορεί να είναι τεχνητή. Όσον αφορά στις δύο υποθέσεις για τη λειτουργία των δικτύων, η αντικειμενική συνάρτηση έχει διαφορετικές ιδιότητες και διαφορετική ερμηνεία. Στην περίπτωση της βέλτιστης λύσης του συστήματος (system optimum), η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζει το συνολικό χρόνο μετακίνησης, ο οποίος πρέπει να ελαχιστοποιηθεί για να επιτευχθεί η βέλτιστη αυτή κατάσταση του συστήματος. Η αντικειμενική συνάρτηση, τότε, αναφέρεται στο σύνολο του μεταφορικού συστήματος και έχει άμεση *φυσική σημασία*. Στην περίπτωση της ισορροπίας των χρηστών (ντετερμινιστική ή στοχαστική), επιδιώκεται να επιτευχθούν ίσοι και ελάχιστοι χρόνοι μετακίνησης σε κάθε χρησιμοποιούμενη διαδρομή για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης προορισμού. Σε ένα τέτοιο πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου, προκύπτει η ανάγκη εύρεσης μιας *τεχνητής* αντικειμενικής συνάρτησης ώστε οι προκύπτουσες συνθήκες βελτιστοποίησης αυτού να παριστάνουν επιθυμητές φυσικές ιδιότητες.

Εδώ κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια παρένθεση που μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα. Είναι, πλέον, γνωστό ότι οι δύο βέλτιστες αυτές καταστάσεις, τόσο από την πλευρά των χρηστών όσο και από την πλευρά του συστήματος, είναι αντικρουόμενες, λόγω των αντικρουόμενων συμφερόντων που ικανοποιούνται στις δύο αυτές περιπτώσεις. Και σε αυτήν την περίπτωση η θεωρία του βέλτιστου ελέγχου μπορεί να φανεί χρήσιμη. Με την επιβολή δυναμικής τιμολόγησης της συμφοράς, μπορεί να σχεδιαστεί ένα τέτοιο πρότυπο βέλτιστου ελέγχου το οποίο να εξισορροπεί τα δύο αυτά αντικρουόμενα κριτήρια επιλογής διαδρομής.

2.3.1 Συνεχής και διακριτός βέλτιστος έλεγχος

Όπως και στην περίπτωση των δυναμικών προτύπων, όπου τα πρότυπα διακρίνονταν σε συνεχή και διακριτά, έτσι και στην περίπτωση των προτύπων βέλτιστου ελέγχου, η διάκριση είναι ίδια. Συνεπώς, υπάρχουν πρότυπα *συνεχούς* αλλά και *διακριτού* βέλτιστου ελέγχου. Η μετατροπή των συνεχών προβλημάτων σε διακριτά γίνεται και εδώ με τη διακριτοποίηση της χρονικής περιόδου μελέτης, για παράδειγμα της $(0, T)$ σε ίσα χρονικά διαστήματα, k .

Στα συνεχή προβλήματα βέλτιστου ελέγχου, ελαχιστοποιούνται οι συναρτήσεις κόστους, οι οποίες είναι ολοκληρώματα των βαθμωτών συναρτήσεων κόστους. Από την άλλη μεριά, στα διακριτά προβλήματα βέλτιστου ελέγχου, οι συναρτήσεις κόστους αντιστοιχίζονται σε κάθε χρονικό διάστημα k . Συνεπώς, οι συναρτήσεις κόστους ελαχιστοποιούνται οι οποίες, όμως, στην προκειμένη περίπτωση είναι αθροίσματα των βαθμωτών συναρτήσεων κόστους (Papageorgiou, 1999).

Μια πρόσθετη διαφορά των δύο αυτών κατηγοριών βέλτιστου ελέγχου συνιστά το γεγονός ότι τα συνεχή προβλήματα επιλύονται με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους, ενώ τα διακριτά προβλήματα επιλύονται (μεταξύ άλλων) με τους ακόλουθους αλγόριθμους:

- αλγόριθμος μείωσης διαστημάτων για προβλήματα ελαχιστοποίησης μίας διάστασης
- ο αλγόριθμος των Frank-Wolfe.

Οι αλγόριθμοι έχουν παρουσιαστεί για τα στατικά μη-γραμμικά προβλήματα, αλλά μπορούν εύκολα να επεκταθούν και για τα δυναμικά προβλήματα.

2.4 Κριτική και επιλογή προτύπου στην παρούσα διπλωματική εργασία

Η επιλογή του προτύπου για την αναπαράσταση του φαινομένου της εκδήλωσης της ζήτησης σε ένα κοινωνιακό πεδίο/δίκτυο που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, πραγματοποιήθηκε από την συγκριτική αξιολόγηση των προτύπων

που με συντομία περιγράφηκαν προηγούμενα. Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται συγκριτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των διαθέσιμων προτύπων:

Πίνακας 2.2: Σύγκριση Ντετερμινιστικών και Στοχαστικών Προτύπων

Ντετερμινιστικά Πρότυπα	Στοχαστικά Πρότυπα
Κάθε χρήστης διαλέγει τη διαδρομή με το μικρότερο πραγματικό χρόνο μετακίνησης.	Κάθε χρήστης διαλέγει τη διαδρομή με το μικρότερο αντιληπτό χρόνο μετακίνησης.
Οι μετακινούμενοι έχουν πλήρη και τέλεια ενημέρωση σχετικά με τις κυκλοφοριακές συνθήκες.	Οι μετακινούμενοι έχουν μυωπική αντίληψη σχετικά με τις κυκλοφοριακές συνθήκες.
Οι μετακινούμενοι κάνουν σωστές επιλογές και έχουν όμοια συμπεριφορά.	Λαμβάνονται υπόψη σφάλματα στην αντίληψη και οι μετακινούμενοι μπορεί να έχουν ανόμοια συμπεριφορά.
Στην κατάσταση ντετερμινιστικής ισορροπίας των χρηστών, κανένας μετακινούμενος δεν μπορεί να μειώσει το χρόνο μετακίνησής του με το να αλλάζει διαδρομή μονομερώς.	Στην κατάσταση στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών, κανένας μετακινούμενος δεν πιστεύει ότι μπορεί να μειώσει τον αντιληπτό χρόνο μετακίνησής του με το να αλλάζει διαδρομές μονομερώς.

Πίνακας 2.3: Σύγκριση Στατικών και Δυναμικών Προτύπων

Στατικά Πρότυπα	Δυναμικά Πρότυπα
Αναφέρονται σε μία αντιπροσωπευτική χρονική περίοδο, στην οποία τα μεγέθη που θεωρούνται παρουσιάζουν ομοιομορφία.	Λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή των κυκλοφοριακών μεγεθών κατά τη διάρκεια του χρόνου.
Λαμβάνονται υπόψη οι μεγάλης διάρκειας μεταβολές της κυκλοφορίας.	Λαμβάνονται υπόψη και οι μικρής διάρκειας μεταβολές της κυκλοφορίας.
Χρησιμοποιούνται συνήθως για μακροπρόθεσμους σκοπούς.	Χρησιμοποιούνται συνήθως για βραχυπρόθεσμους σκοπούς.

Κατόπιν της κριτικής παράθεσης που προηγήθηκε ως προς τα διαθέσιμα πρότυπα αναπαράστασης της διαδικασίας εκδήλωσης της ζήτησης σε ένα συγκοινωνιακό πεδίο/δίκτυο, η επιλογή του προτύπου που θα προταθεί/χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική γίνεται με στόχο την κατά το δυνατόν ρεαλιστικότερη απόδοση του φαινομένου αυτού. Με δεδομένο ότι η τυπική διαδικασία προτυποποίησης της εκδήλωσης της ζήτησης

πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη κυρίως την διαδικασία επιλογής (και αναθεώρησης) της διαδρομής, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει προσπάθεια της εισαγωγής ενός ακόμη 'βήματος' επιλογών των χρηστών, που αφορά στην επιλογή ώρας εκκίνησης της μετακίνησης (ή ώρας αναχώρησης). Η εισαγωγή του βήματος αυτού (που κατατάσσει τελικά το προτεινόμενο πρότυπο στα μικτά δικτυακά πρότυπα), αναμένεται αφενός να αποδίδει με ρεαλιστικότερο τρόπο το φαινόμενο της εκδήλωσης της ζήτησης στη συγκοινωνιακή υποδομή και αφετέρου (ως συνέπεια) να είναι χρησιμότερο στην διαδικασία υποστήριξης της λήψης αποφάσεων (διαχειριστικών ή επεμβατικών) σε αυτά. Η παραπάνω ιδέα για την προπαρασκευή ενός τέτοιου προτύπου απορρέει από τις ιδιότητες των στατικών προτύπων στρατηγικού σχεδιασμού των δικτύων, αλλά και από την αναθεωρητική (αναδραστική) φύση των δυναμικών προτύπων καταμερισμού της ζήτησης.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται η χρήση ενός ημιδυναμικού (αναθεωρητικού) στοχαστικού πολυωνυμικού προτύπου Logit (MNL) για την προσομοίωση της δυναμικής μικτής διαδικασίας επιλογής χρόνου εκκίνησης μετακίνησης και επιλογής διαδρομής και την συνέλιξή του με ένα ημι-δυναμικό κυκλοφοριακό πρότυπο. Επιλέχθηκε η διαδικασία επιλογών να αναπαρασταθεί μέσω του προτύπου Logit διότι αποτελεί ξεκάθαρο και αποδεκτό πρακτικό πρότυπο διακριτών επιλογών των χρηστών, ενώ η ένωσή του με ένα κυκλοφοριακό πρότυπο αποδίδει μια προσέγγιση της εξελικτικής διαδικασίας φόρτισης ενός συγκοινωνιακού πεδίου.

Εδώ έχει επιλεγεί ένα ημιδυναμικό πρότυπο και όχι ένα στατικό. Αυτό διότι επιδιώκεται μια προσέγγιση στο συνδυασμένο πρόβλημα επιλογής ώρας αναχώρησης και διαδρομής από τους χρήστες και ο καθορισμός των φόρτων κάθε συνδέσμου του δικτύου υπό ανάλυση σε κάθε χρονική στιγμή. Σε αντίθεση με αυτό, ένα στατικό πρότυπο αναφέρεται σε μία δεδομένη/αντιπροσωπευτική χρονική στιγμή ή σε μία χρονική περίοδο κατά την οποία, όμως, το φαινόμενο που περιγράφει παραμένει σταθερό, ή καλύτερα, παρουσιάζει μια ομοιομορφία. Για το λόγο αυτό, το ημιδυναμικό πρότυπο είναι πιο ρεαλιστικό από ένα στατικό, καθώς προσεγγίζει το μεταβαλλόμενο φαινόμενο (στην προκειμένη περίπτωση τον καταμερισμό της ζήτησης στο συγκοινωνιακό δίκτυο) κατά τη διάρκεια (και εντός) μίας ευρείας περιόδου μελέτης. Ωστόσο, το πρότυπο δεν μπορεί να χαρακτηριστεί πλήρως ως δυναμικό, το οποίο θα ήταν ακόμα πιο ρεαλιστικό. Αυτό διότι η εκτίμηση του χρόνου μετακίνησης κάθε συνδέσμου του δικτύου, με βάση τον οποίο υπολογίζεται ο καταμερισμός της κυκλοφορίας στο δίκτυο για κάθε χρονικό διάστημα, θα βασιστεί στη συνάρτηση BPR (U.S. Department of Commerce, 1964). Ο τύπος αυτός είναι προσεγγιστικός και χρησιμοποιείται κατά κανόνα στα στατικά πρότυπα.

Επίσης, επιλέχθηκε ένα στοχαστικό πρότυπο και όχι ένα ντετερμινιστικό. Αυτό αποδίδεται στην υπόθεση της τυχαιότητας που υιοθετείται και χαρακτηρίζει το προαναφερόμενο πρόβλημα επιλογής ώρας αναχώρησης και διαδρομής από τους χρήστες. Όπως έχει

προαναφερθεί η στοχαστική προσέγγιση του καταμερισμού της κυκλοφορίας στο δίκτυο αποτελεί μια γενίκευση της προσδιοριστικής-ντετερμινιστικής προσέγγισης. Σε αντίθεση με την τελευταία, οι μετακινούμενοι δεν αντιλαμβάνονται τη διάρκεια μετακίνησης που αντιστοιχεί σε κάθε διαδρομή με την ίδια ακρίβεια, γι' αυτό και η διάρκεια μετακίνησης αποτελεί μια τυχαία μεταβλητή. Συνεπώς, γίνεται λόγος για πιθανότητα φόρτισης του δικτύου ή ειδικότερα για πιθανότητα επιλογής μίας ώρας αναχώρησης και μίας διαδρομής, η οποία ταυτίζεται με την πιθανότητα ο αντιληπτός χρόνος μετακίνησης από τους χρήστες, που αντιστοιχεί σε αυτή την επιλογή να είναι ο ελάχιστος (και συνεπώς βέλτιστος). Όπως προαναφέρθηκε, η αντίληψη του χρόνου μετακίνησης για μια διαδρομή από τους χρήστες του οδικού δικτύου κυμαίνεται από χρήστη σε χρήστη εξαιτίας του σφάλματος στην αντίληψη του κάθε χρήστη (μυωπική αντίληψη των χρηστών). Εξαιτίας αυτής της διακύμανσης στην αντίληψη των χρόνων μετακίνησης, οι μετακινούμενοι μπορεί να επιλέγουν διαφορετικές διαδρομές και με τον τρόπο αυτό, φορτίζονται όλοι οι σύνδεσμοι και όχι μόνο οι σύνδεσμοι μιας διαδρομής.

Πρόκειται για ένα πρότυπο *διακριτού χρόνου* βασισμένο στη *διαδρομή*. Η περίοδος μελέτης είναι διακριτοποιημένη. Ειδικότερα, η περίοδος μελέτης είναι υποδιαιρεμένη σε ίσα χρονικά διαστήματα. Συνεπώς, όλες οι μεταβλητές δεν αναφέρονται σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, αλλά σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Επίσης το πρότυπο βασίζεται στη διαδρομή, καθώς η απαρίθμηση των διαδρομών γίνεται εξ αρχής.

Επιπλέον, το πρότυπο που εξετάζεται χαρακτηρίζεται ως *μεσοσκοπικό*. Τα μεσοσκοπικά πρότυπα μπορούν να απεικονίζουν ικανοποιητικά τις συνολικές ή τις μακροσκοπικές ιδιότητες της κυκλοφορίας (όπως τη μέση ταχύτητα, την πυκνότητα και την κυκλοφοριακή ροή), χωρίς να εξετάζουν την αλληλεπίδραση των μεμονωμένων οχημάτων. Η μεσοσκοπική προσομοίωση της κυκλοφορίας είναι περισσότερο αποτελεσματική υπολογιστικά, καθώς επιτρέπει γρηγορότερη προσομοίωση (σε σύγκριση με τη μικροσκοπική προσομοίωση στο ίδιο μέγεθος δικτύου) και συνεπώς επιτρέπει εφαρμογές σε πολύ μεγαλύτερο δίκτυο (σε σύγκριση με τη μικροσκοπική προσομοίωση για την ίδια περίοδο μελέτης). Ωστόσο, τόσο τα μεσοσκοπικά όσο και τα μικροσκοπικά πρότυπα ακολουθούν τις θεμελιώδεις μακροσκοπικές σχέσεις που χαρακτηρίζουν την κυκλοφορία.

Επίσης, πρόκειται για ένα *εξατομικευμένο* και όχι *αθροιστικό* πρότυπο. Τα εξατομικευμένα πρότυπα χρησιμοποιούν τη θεωρία συμπεριφοράς των ατόμων, τα οποία όταν τηρούνται ορισμένες υποθέσεις, είναι εφικτό να ομαδοποιηθούν σε επίπεδο συνόλου ή πληθυσμού. Τα αθροιστικά πρότυπα, από την άλλη, δεν επιχειρούν να εξηγήσουν την ατομική συμπεριφορά αλλά τη συμπεριφοράς μίας ομάδας (Σταθόπουλος και Καρλαύτης, 2008). Στο παρόν πρότυπο γίνεται η υπόθεση ότι κάθε χρήστης κάνει τις επιλογές του και εξετάζεται, δηλαδή, η ατομική συμπεριφορά και μετά οι επιλογές του ανάγονται στο σύνολο της μεταφορικής ζήτησης, η οποία καταμερίζεται σε ομάδες χρηστών, ώρες αναχώρησης και διαδρομές.

Επιπρόσθετα, σημειώνεται ότι το πρότυπο Logit που επιλέχτηκε αποτελεί ένα *μεικτό* πρότυπο ιστορικού και πραγματικού χρόνου, καθώς οι οδηγοί λαμβάνουν αποφάσεις στηριζόμενοι σε πληροφόρηση *ιστορικού* και *πραγματικού* χρόνου. Η πληροφόρηση ιστορικού χρόνου σε κάθε χρονική περίοδο αφορά στους χρόνους μετακίνησης στην ίδια χρονική περίοδο k της προηγούμενης ημέρας, ενώ η πληροφόρηση πραγματικού χρόνου σε κάθε χρονική περίοδο αφορά στους χρόνους μετακίνησης των διαδρομών στην αμέσως προηγούμενη χρονική περίοδο πριν την εκκίνηση της μετακίνησης.

Δεν πρέπει να παραληφθεί ότι το πρότυπο βασίζεται και υπολογίζει χρόνους μετακίνησης, οι οποίοι είναι *στιγμιαίοι* (*Instantaneous*). Όπως προαναφέρθηκε, ο στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης σε κάποιο χρονικό διάστημα ενός συνδέσμου είναι ο χρόνος μετακίνησης που θα χρειάζονταν οι μετακινούμενοι για να διανύσουν το σύνδεσμο, εάν οι υπάρχουσες (δηλαδή στο τρέχον διάστημα) κυκλοφοριακές συνθήκες παρέμεναν αμετάβλητες. Επίσης, ο στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης για μία διαδρομή υπολογίζεται ως το άθροισμα των χρόνων μετακίνησης των συνδέσμων που αποτελούν τη διαδρομή, οι οποίοι αντιστοιχούν στο ίδιο δεκαπεντάλεπτο, το δεκαπεντάλεπτο αναχώρησης.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι το πολυωνυμικό αυτό ημιδυναμικό στοχαστικό πρότυπο Logit διακριτών επιλογών εξετάζει και προβλέπει τη συμπεριφορά των χρηστών σχετικά με την *επιλογή ώρας αναχώρησης σε συνδυασμό με την επιλογή διαδρομής*. Ο συνδυασμός αυτός των επιλογών είναι ιδιαίτερα χρήσιμος και καθιστά το πρότυπο πιο ρεαλιστικό αφενός, αλλά και χρήσιμος για ένα πλήθος πιθανών αναλύσεων αφετέρου. Είναι παραδεκτό ότι οι οδηγοί επιλέγουν εναλλακτικές διαδρομές και ώρες αναχώρησης ώστε να μειώσουν τους χρόνους μετακίνησης και να αποφύγουν τη συμφόρηση, με στόχο όμως την ολοκλήρωση της μετακίνησής τους σε κάποιο (προκαθορισμένο) χρόνο. Ειδικά οι μετακινούμενοι προς την εργασία έχουν μεγάλες απαιτήσεις να αποφύγουν τις διαδρομές που εμφανίζουν κυκλοφοριακή συμφόρηση ώστε να φθάσουν στον χώρο εργασίας στην ώρα τους. Επίσης, κάθε αλλαγή στις ώρες αναχώρησης προκαλεί αλλαγή στους φόρτους των διαδρομών και το αντίστροφο, γεγονός που υποδεικνύει ότι οι δύο αυτές επιλογές δεν είναι ανεξάρτητες, αλλά αντιθέτως αλληλοεξαρτώνται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΗΜΙΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

3.1 Παραδοχές-υποθέσεις

Όπως προαναφέρθηκε, στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται ένα ημιδυναμικό στοχαστικό πολυωνυμικό πρότυπο Logit (MNL) διακριτών επιλογών. Όσον αφορά στις παραδοχές - υποθέσεις, που χαρακτηρίζουν το πρότυπο που παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, σημειώνονται τα παρακάτω.

i. Το πρότυπο αυτό έχει τις γενικές υποθέσεις ενός στοχαστικού προτύπου Logit.

Το προτεινόμενο πρότυπο αποτελεί και ένα ξεκάθαρο πρότυπο τυχαίας χρησιμότητας. Βασίζεται, δηλαδή, στην υπόθεση ότι οι *τυχαίοι όροι* των χρησιμότητων των εναλλακτικών διαδρομών, ε_j (όπου ισχύει $U_j = V_j + \varepsilon_j \quad \forall j \in I$), είναι όμοιοι και ανεξάρτητα κατανομημένοι σύμφωνα με μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κατανομή Gumbel, η οποία έχει μηδενική μέση τιμή και παράμετρο θ (Cascetta, 2001). Η οριακή συνάρτηση κατανομής πιθανότητας για κάθε τυχαίο όρο δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$F_{\varepsilon_j}(x) = Pr[\varepsilon_j \leq x] = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x}{\theta} - \Phi\right)\right] \quad (3.1)$$

όπου Φ είναι η σταθερά του Eulero, που είναι περίπου ίση με 0.577. Ειδικότερα, η μέση τιμή και η διακύμανση είναι αντίστοιχα:

$$E[\varepsilon_j] = 0 \quad \forall j \in I \quad (3.2)$$

$$Var[\varepsilon_j] = \sigma_\varepsilon^2 = \frac{\pi^2 \theta^2}{6} \quad \forall j \in I \quad (3.3)$$

Επίσης, η ανεξαρτησία των τυχαίων σφαλμάτων υπονοεί ότι η συνδιακύμανση μεταξύ καθενός ζεύγους τυχαίων όρων είναι μηδενική, δηλαδή ισχύει:

$$Cov[\varepsilon_j, \varepsilon_h] = 0 \quad \forall j, h \in I \quad (3.4)$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι και η *αντιληπτή χρησιμότητα* U_j , είναι μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κατανομή Gumbel. Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας, η μέση τιμή και η διακύμανση της είναι αντίστοιχα:

$$F_{U_j} = Pr[U_j \leq x] = Pr[\varepsilon_j \leq x - V_j] = \exp \left[-\exp \left(-\frac{(x-V_j)}{\theta} - \Phi \right) \right] \quad (3.5)$$

$$E[U_j] = V_j \quad (3.6)$$

$$Var[U_j] = \pi^2 \theta^2 / 6 \quad (3.7)$$

Με βάση τις υποθέσεις σχετικά με τους τυχαίους όρους ε_j , και τις αντιληπτές χρησιμότητες U_j , προκύπτει ότι ο πίνακας διακύμανσης-συνδιακύμανσης των τυχαίων σφαλμάτων, Σ_ε , για τις διαθέσιμες εναλλακτικές m , είναι ένας διαγώνιος πίνακας που ισούται με

$$\Sigma_\varepsilon = \sigma_\varepsilon^2 I = \left(\frac{\pi^2 \theta^2}{6} \right) I \quad (3.8)$$

Κάθε μεταβλητή που ακολουθεί την κατανομή Gumbel έχει μία σημαντική ιδιότητα γνωστή και ως *σταθερότητα όσον αφορά στη μεγιστοποίηση*. Το μέγιστο των ανεξάρτητων μεταβλητών Gumbel με ίση παράμετρο θ είναι, επίσης, μία μεταβλητή Gumbel με παράμετρο θ . Με άλλα λόγια, εάν οι U_j είναι ανεξάρτητες μεταβλητές Gumbel με ίση παράμετρο θ αλλά με διαφορετικές μέσες τιμές V_j , τότε η μεταβλητή U_M :

$$U_M = \max_j \{U_j\} \quad (3.9)$$

είναι και αυτή μία μεταβλητή που ακολουθεί την κατανομή Gumbel με παράμετρο θ και μέση τιμή V_M που δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$V_M = E[U_M] = \theta \ln \sum_j \exp(V_j/\theta) \quad (3.10)$$

Υπό τις προαναφερόμενες υποθέσεις, η πιθανότητα της επιλογής της εναλλακτικής j από ένα σύνολο διαθέσιμων εναλλακτικών επιλογών $(1, 2, \dots, m) \in I$ μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$p[j] = \exp(V_j/\theta) / \sum_{i=1}^m \exp(V_i/\theta) \quad (3.11)$$

Η τελευταία αυτή έκφραση ορίζει και το πολωνυμικό πρότυπο Logit το οποίο χρησιμοποιείται και στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Υπό την προϋπόθεση ότι η παράμετρος θ είναι ανεξάρτητη της συστηματικής χρησιμότητας, το πολωνυμικό πρότυπο Logit έχει κάποιες σημαντικές ιδιότητες, οι οποίες είναι οι εξής:

- η εξάρτηση από τις διαφορές μεταξύ των συστηματικών χρησιμότητων

- η επιρροή της διακύμανσης των όρων των τυχαίων σφαλμάτων
- η ανεξαρτησία από τρίτες εναλλακτικές

οι οποίες δεν θα αναλυθούν στο συγκεκριμένο σημείο.

ii. Ειδικές παραδοχές του προτεινόμενου προτύπου

Καταρχήν, πρέπει να σημειωθεί ότι η (ευρεία) περίοδος μελέτης διακριτοποιείται σε ίσα χρονικά διαστήματα. Εντός του κάθε διακριτού χρονικού διαστήματος, οι κυκλοφοριακές συνθήκες παραμένουν αμετάβλητες. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι σε κάθε όχημα αντιστοιχεί ένας μετακινούμενος. Οι μετακινούμενοι χωρίζονται σε κλάσεις/ ομάδες με ομογενή χαρακτηριστικά, δηλαδή, ανάλογα με την αξία του χρόνου μετακίνησης (VOTT) και το είδος της πληροφόρησης την οποία λαμβάνουν. Η αξία του χρόνου μετακίνησης εξαρτάται από την οικονομική κατάσταση και το σκοπό της μετακίνησης των χρηστών.

Επιπρόσθετα, κανένας μετακινούμενος δεν αναθεωρεί την επιλογή της διαδρομής, που έκανε κατά την αναχώρησή του (όχι en route diversion). Τέλος, οι επιλογές μετακίνησης των χρηστών είναι δύο βημάτων: η επιλογή χρονικού διαστήματος αναχώρησης και η επιλογή διαδρομής (και παράλληλα και μέσου). Στο προτεινόμενο πρότυπο, τα δύο αυτά βήματα υποτίθεται ότι γίνονται ταυτόχρονα, παρόλο που στην πράξη, το ένα έπεται του άλλου.

iii. Υποθέσεις που αφορούν στο θεωρητικό υπόβαθρο του προτεινόμενου προτύπου.

Το ημιδυναμικό στοχαστικό πρότυπο συνδυασμένων επιλογών, που θα αναπτυχθεί εδώ, υπολογίζει την κατανομή των μετακινούμενων στις διάφορες ώρες αναχώρησης και διαδρομές ανάμεσα σε ένα ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού, με την υπόθεση της ύπαρξης σφαλμάτων στην αντίληψη των τρεχόντων χρόνων μετακίνησης από τους χρήστες. Το ντετερμινιστικό αντίστοιχο πρότυπο αποδίδει κάποια διασπορά των μετακινούμενων, επειδή λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις της κυκλοφοριακής συμφόρησης, αλλά υποθέτει ότι οι μετακινούμενοι είναι εξολοκλήρου ενήμεροι των τρεχουσών κυκλοφοριακών συνθηκών και ότι δεν υπάρχουν σφάλματα αντίληψης (Ran and Boyce, 1996). Αντίθετα με το ντετερμινιστικό αυτό πρότυπο, στο ημιδυναμικό στοχαστικό πρότυπο, που παρουσιάζεται, αποδίδεται διασπορά στο σφάλμα της αντίληψης των χρηστών.

Η θεμελιώδης υπόθεση στη θεωρία των διακριτών επιλογών είναι ότι η ατομική προτίμηση για μία εναλλακτική από ένα σύνολο επιλογών μπορεί να παρασταθεί με ένα μέτρο χρησιμότητας. Στο κεφάλαιο 2, αναφέρθηκε η έννοια του γενικευμένου κόστους, που αποτελεί το άθροισμα πληθώρας μεταβλητών, όπως ο χρόνος μετακίνησης, η απόσταση, το άμεσο κόστος (φόροι, διόδια, κατανάλωση καυσίμων, χρέωση στάθμευσης, κ.α.), η αξιοπιστία, η ασφάλεια και η άνεση, εκφρασμένων σε κόστη μέσω του πολλαπλασιασμού

τους με κατάλληλους συντελεστές. Στο σημείο αυτό έρχεται η έννοια της χρησιμότητας ή της ωφέλειας να αντικαταστήσει την έννοια του γενικευμένου κόστους. Οι δύο αυτές έννοιες είναι αντίθετες. Βέβαια, δεν πρέπει να παραληφθεί ότι στο συγκεκριμένο πρότυπο, ο χρόνος που χρειάζεται ένας μετακινούμενος για να σταθμεύσει το αυτοκίνητό του και να φθάσει στο χώρο επιβίβασης του μετρό δεν συμπεριλαμβάνεται στον τύπο του γενικευμένου κόστους και κατ' επέκταση της χρησιμότητας. Το γεγονός αυτό καθιστά το πρότυπο λιγότερο ρεαλιστικό (που όμως μπορεί να εισαχθεί στο κόστος προσπέλασης των κόμβων).

Συνεχίζοντας, η έννοια της χρησιμότητας ή της ωφέλειας χρησιμοποιείται πολύ συχνά στα πρότυπα μεταφορών που περιγράφουν τη συμπεριφορά των χρηστών. Τα πρότυπα αυτά, όπως και το συγκεκριμένο ημιδυναμικό πρότυπο, βασίζονται στην αρχή της *μεγιστοποίησης* (βελτιστοποίησης) της χρησιμότητας, υπό διάφορους περιορισμούς (χρονικούς, κόστους, κ.λπ.) Γίνεται, λοιπόν, η υπόθεση ότι οι χρήστες του μεταφορικού συστήματος αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της ωφέλειας που μπορούν να αποκτήσουν από τη μετακίνησή τους μέσα στα όρια των περιορισμών που ενδεχομένως υπάρχουν για την πραγματοποίηση της μετακίνησης αυτής (Σταθόπουλος και Καρλαύτης, 2008). Επίσης, δεν πρέπει να παραληφθεί ότι το σύνολο των εναλλακτικών επιλογών είναι *πεπερασμένο*.

Η χρησιμότητα μιας εναλλακτικής α (U_α) αποτελείται, αριθμητικά, από δύο ξεχωριστά μέρη. Το πρώτο μέρος είναι η *συνάρτηση συστηματικής χρησιμότητας* V_α , ενώ το δεύτερο είναι η *τυχαία διαταραχή* ε_α . Η συστηματική χρησιμότητα είναι άμεσα υπολογίσιμη και εξαρτάται από διάφορες ανεξάρτητες μεταβλητές, ενώ ο τυχαίος όρος αντικατοπτρίζει την πλευρά εκείνη της συμπεριφοράς του μετακινούμενου που δεν εμπίπτει στον αντιπροσωπευτικό ή συστηματικό όρο (Σταθόπουλος και Καρλαύτης, 2008). Και στον συγκεκριμένο πρότυπο, ισχύει για τη χρησιμότητα μιας οποιασδήποτε εναλλακτικής επιλογής η παρακάτω σχέση:

$$U_\alpha = V_\alpha + \varepsilon_\alpha. \quad (3.12)$$

Η αντίληψη, συνεπώς, της χρησιμότητας της επιλογής p από ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών που αφορούν τη μετακίνηση μεταξύ ενός ζεύγους κόμβων προέλευσης-προορισμού $i - j$, υπολογίζεται ως εξής:

$$u_p^{ij} = v_p^{ij} + \varepsilon_p^{ij} \quad \forall i, j, p \quad (3.13)$$

όπου v_p^{ij} και ε_p^{ij} ο συστηματικός όρος και ο όρος του τυχαίου σφάλματος αντίστοιχα. Μια σημαντική υπόθεση του προτύπου είναι ότι τα τυχαία σφάλματα ε_p^{ij} είναι όμοια και ανεξάρτητα κατανεμημένα σύμφωνα με την κατανομή Gumbel.

3.1.1 Αναγνώριση των κρίσιμων παραμέτρων

Το προτεινόμενο πρότυπο είναι ένα πρότυπο καταμερισμού της κυκλοφορίας στο δίκτυο και λαμβάνει υπόψη τη στοχαστικότητα στην επιλογή διαδρομής και ώρας αναχώρησης, καθώς και την ετερογένεια των χρηστών όσον αφορά στην αξία του χρόνου μετακίνησης και το είδος της πληροφόρησης την οποία λαμβάνουν. Μελετάται η δυναμική συμπεριφορά των χρηστών τόσο βραχυπρόθεσμα (εντός της ημέρας) όσο και μακροπρόθεσμα (από μέρα σε μέρα).

Η *συνάρτηση της χρησιμότητας* στο συγκεκριμένο πρότυπο για μια ομάδα, έστω A , των χρηστών δίδεται από τον παρακάτω τύπο:

$$u_{A,p}^{ij,l-k} = v_{A,p}^{ij,l-k} + \varepsilon_{A,p}^{ij,l-k} = -\theta^{l-k} C_{A,p}^{ij,l-k} + \omega V_{A,p}^{l+m} + \varepsilon_{A,p}^{ij,l-k} \quad (3.14)$$

όπου

L : το τρέχον χρονικό διάστημα,

k ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων που προηγούνται του τρέχοντος χρονικού διαστήματος (υστέρηση),

$l - k$: ένα χρονικό διάστημα, η πληροφορία σχετικά με το κόστος διαδρομής του οποίου χρησιμοποιείται από έναν χρήστη της ομάδας A για να επιλέξει μία διαδρομή p που συνδέει ένα ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού $i - j$ κατά το χρονικό διάστημα αναχώρησης l ,

$l + m$: χρονικό διάστημα στόχος, αφίξεως στον προορισμό,

$C_{A,p}^{ij,l-k}$: το αντιληπτό κόστος διαδρομής στο χρονικό διάστημα $l - k$,

θ^{l-k} : μία παράμετρος διασποράς ή αντίληψης του κόστους από τους χρήστες στο χρονικό διάστημα $l - k$,

$V_{A,p}^{l+m}$ είναι η χρησιμότητα αφίξεως στο χρονικό διάστημα στόχος $l + m$ ενός χρήστη της ομάδας A , που επιλέγει τη διαδρομή p και αναχωρεί στο χρονικό διάστημα l

ω : ένας συντελεστής βαρύτητας της χρησιμότητας της ώρας αφίξεως στο γενικό τύπο της χρησιμότητας (3.14),

$\varepsilon_{A,p}^{ij,l-k}$: το τυχαίο σφάλμα των εκτιμήσεων που κατανέμεται κατά Gumbel.

Η διαθεσιμότητα και η ποιότητα της πληροφόρησης που επεξεργάζονται οι χρήστες, ώστε να λαμβάνουν ή να τροποποιούν τις επιλογές τους για μετακίνηση, μπορούν να επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση των κορεσμένων αστικών οδικών δικτύων. Έχει αποδειχθεί ότι η αύξηση της παροχής αξιόπιστης πληροφόρησης πραγματικού χρόνου στους χρήστες του οδικού δικτύου, μέχρι ενός συγκεκριμένου σημείου, είναι χρήσιμη για την απόδοση του συστήματος. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η μέγιστη αναλογία διείσδυσης πληροφόρησης

πραγματικού χρόνου είναι περίπου **25%**. Από την άλλη μεριά, εάν όλοι οι χρήστες είχαν πρόσβαση στην ίδια πληροφόρηση πραγματικού χρόνου, ανταποκρίνονταν αμέσως και χαρακτηρίζονταν όλοι από ατομικιστικό ορθολογισμό, η απόδοση του συστήματος θα έπεφτε απότομα, δηλαδή, υψηλά κόστη διαδρομής και έντονη συμφόρηση θα παρουσιάζονταν στο δίκτυο (Dimitriou and Stathopoulos, 2008). Αυτό αιτιολογείται καθώς όλοι οι μετακινούμενοι θα άλλαζαν διαδοχικά και συνεχώς διαδρομές (με εξάρτηση ως προς τον βαθμό αντίδρασης των χρηστών) και θα προκαλείτο κυκλοφοριακή αστάθεια (Mahmassani and Jayakrishan, 1991).

Στο σημείο αυτό θα γίνει αναφορά στην παράμετρο διασποράς ή αντίληψης του κόστους από τους χρήστες, θ για τις δύο ομάδες. Ωστόσο, πριν γίνει αυτό, πρέπει να διευκρινιστεί ότι σχετικά μικρές τιμές του θ συνεπάγονται μεγαλύτερη διασπορά στα αντιληπτά κόστη, χαμηλότερης ποιότητας πληροφόρηση πραγματικού χρόνου και μεγαλύτερη κατανομή των χρηστών στις διαθέσιμες διαδρομές του δικτύου. Συνεπώς, για τους χρήστες της πρώτης ομάδας, οι οποίοι δέχονται πληροφόρηση ιστορικού χρόνου και συγκεκριμένα της προηγούμενης ημέρα, επιλέγεται μια χαμηλή τιμή της παραμέτρου. Η χαμηλή αυτή τιμή οφείλεται στην ατελή πληροφόρηση σχετικά με τις τρέχουσες κυκλοφοριακές συνθήκες που συνεπάγεται ότι οι χρήστες μπορεί να επιλέγουν πολλές εναλλακτικές διαδρομές. Οι υπόλοιποι χρήστες δέχονται πληροφόρηση πραγματικού χρόνου και, συνεπώς, προτιμάται για αυτούς μια σχετικά μεγάλη τιμή της παραμέτρου, που υποδεικνύει ότι οι μετακινούμενοι έχουν μία ακριβή αντίληψη των τρεχουσών συνθηκών και επιλέγουν τις πραγματικά συντομότερες διαδρομές. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι πρέπει $0 < \theta \leq 5.0$.

3.1.2 Περιγραφή των απαραίτητων διαθέσιμων στοιχείων

Τα διάφορα πρότυπα καταμερισμού της κυκλοφορίας, που περιγράφηκαν προηγουμένως καθώς και αυτό που αναπτύχθηκε εδώ, απαιτούν και εξαρτώνται από πλήθος δεδομένων, παραμέτρων και μεταβλητών, στοιχεία απαραίτητα να προσδιοριστούν πριν την εφαρμογή τους. Η ακριβής φύση αυτών των παραμέτρων και των δεδομένων εξαρτάται από τα επιμέρους στοιχεία που συνθέτουν τα πρότυπα αυτά και μπορούν να διαχωριστούν σε *δεδομένα ζήτησης* και *δεδομένα δικτύου*. Τα δεδομένα ζήτησης περιλαμβάνουν χρονικά μεταβαλλόμενους πίνακες μετακινήσεων προέλευσης προορισμού και δεδομένα και παραμέτρους που περιγράφουν τη συμπεριφορά των χρηστών (Network Modeling Committee, TRB, 2010). Στο συγκεκριμένο πρότυπο, οι παράμετροι συμπεριφοράς των μετακινούμενων, όπως οι θ , k , $VOTT$, έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 3.1.1. Έχει διαπιστωθεί ότι το σύνολο των δεδομένων και των παραμέτρων αυτών μπορεί να είναι πολύ μεγάλο σε ρεαλιστικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, ο αριθμός των μη μηδενικών

κυκλοφοριακών φόρτων σε έναν πίνακα μετακινήσεων αυξάνεται δραματικά με την αύξηση του μεγέθους του δικτύου και με την αύξηση της περιόδου μελέτης. Όσον αφορά στις ποσότητες που περιγράφουν το δίκτυο, είναι και αυτές πολυάριθμες, ειδικά όταν προσδιορίζονται σε επίπεδο συνδέσμου. Παρακάτω, Θα αναφερθούν τα διάφορα δεδομένα που πρέπει να προσδιοριστούν πριν την εφαρμογή του προτύπου.

3.1.2.1 Δεδομένα Ζήτησης

Οι χρονικά μεταβαλλόμενοι πίνακες μετακινήσεων Προέλευσης-Προορισμού, που όπως έχει αναφερθεί τα στοιχεία τους παριστάνουν τον αριθμό των μετακινήσεων από ένα σημείο προέλευσης προς ένα σημείο προορισμού, αποτελούν τα δεδομένα ζήτησης στα δυναμικά πρότυπα καταμερισμού της κυκλοφορίας. Στο συγκεκριμένο πρότυπο, χρησιμοποιούνται τέτοιοι πίνακες που δείχνουν τη ζήτηση για μετακίνηση για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού. Οι μετακινήσεις μεταβάλλονται μεταξύ των σημείων προέλευσης και προορισμού και των ωρών αναχώρησης. Η ορθή μέθοδος εκτίμησης τέτοιων διακυμάνσεων αποτελεί η σύνθεση πινάκων, που παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις αναχωρήσεις των μετακινούμενων εντός σχετικά μικρών ίσων χρονικών διαστημάτων. Η διάρκεια αυτού του διαστήματος εξαρτάται από τη μεταβλητότητα της πραγματικής ζήτησης και την επιθυμητή ακρίβεια του προτύπου. Συνεχίζοντας, η διάρκεια αυτή κυμαίνεται από πέντε λεπτά έως μία ώρα. Στο συγκεκριμένο ημιδυναμικό στοχαστικό πρότυπο επιλέγεται, όπως έχει ήδη ειπωθεί, το δεκαπεντάλεπτο ως το ελάχιστο χρονικό διάστημα μελέτης, το οποίο χρησιμοποιείται στα υπάρχοντα δυναμικά πρότυπα καταμερισμού της κυκλοφορίας, εφόσον θεωρείται ότι εντός του διαστήματος αυτού μπορεί να υποτεθεί ότι οι συνθήκες του δικτύου είναι ομογενείς.

Το μέγεθος του πίνακα μετακινήσεων Προέλευσης-Προορισμού καθορίζεται από τον αριθμό των ζωνών και μπορεί να είναι ιδιαίτερα εκτεταμένο, όταν πρόκειται για ρεαλιστικές περιοχές. Ενώ το μέγεθος του κάθε πίνακα μετακινήσεων μπορεί να είναι μεγάλο, ο αριθμός των ζευγών κόμβων/σημείων προέλευσης-προορισμού συνήθως είναι πιο περιορισμένος

Συνεχίζοντας, στην εξίσωση (3.14) έγινε χρήση του όρου της χρησιμότητας της ώρας αφίξεως από τους χρήστες. Η χρησιμότητα της ώρας αφίξεως στην παρούσα διπλωματική έχει εκτιμηθεί από την καμπύλη της ζήτησης αφίξεως στους προορισμούς (βλ. Κεφ. 4). Η καμπύλη αυτή παριστάνει το πλήθος των μετακινούμενων που επιθυμούν να φθάσουν στον προορισμό τους σε ένα δεδομένο δεκαπεντάλεπτο (δεκαπεντάλεπτο στόχος, $l + m$) και συνδέεται, συνεπώς με τη ζήτηση για αναχώρηση σε προηγούμενο δεκαπεντάλεπτο (δεκαπεντάλεπτο αναχώρησης, l) ανάλογα με τον χρόνο μετακίνησης. *Κάθε χρήστης, συνεπώς, επιλέγει ώρα αναχώρησης και διαδρομή ανάλογα με το πότε θέλει να φθάσει στον*

προορισμό του και με τις κυκλοφοριακές συνθήκες που λαμβάνει υπόψη. Είναι, λοιπόν, λογικό η χρησιμότητα αφίξεως να συμπεριλαμβάνεται στη γενική συνάρτηση χρησιμότητας (3.14), με κάποιο συντελεστή σπουδαιότητας ή βαρύτητας, που επηρεάζει την επιλογή της διαδρομής από τους χρήστες οι οποίοι αναχωρούν σε ένα δεδομένο δεκαπεντάλεπτο.

3.1.2.2 Δεδομένα δικτύου

Τα δυναμικά πρότυπα καταμερισμού της κυκλοφορίας απαιτούν πιο λεπτομερή ανάλυση της εξέλιξης της κυκλοφορίας από τα στατικά πρότυπα. Τα δυναμικά πρότυπα απαιτούν δίκτυα που περιλαμβάνουν τον αριθμό των λωρίδων κυκλοφορίας σε κάθε σύνδεσμο, την ύπαρξη λωρίδων επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, δύσκολες στροφές και τη συνδεσιμότητα των λωρίδων (Network Modeling Committee, TRB, 2010).

Η αναπαράσταση του δικτύου στο πρότυπο της παρούσας διπλωματικής εργασίας βασίζεται σε δορυφορικούς χάρτες από το διαδίκτυο (συγκεκριμένα, Googlemaps). Με τον όρο ‘αναπαράσταση του δικτύου’ εννοείται ο προσδιορισμός στο χάρτη των συνδέσμων και των κόμβων που απαρτίζουν το οδικό δίκτυο. Οι κόμβοι παριστάνουν διασταυρώσεις και σημεία απόκλισης και σύγκλισης λωρίδων. Οι σύνδεσμοι παριστάνουν τις φυσικές συνδέσεις των κόμβων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι σύνδεσμοι χωρίζονται σε μικρότερα τμήματα ώστε να παραστήσουν τις διάφορες αλλαγές στη γεωμετρία του οδικού δικτύου. Στο προτεινόμενο πρότυπο, ωστόσο, οι τελευταίες λεπτομέρειες δεν λαμβάνονται υπόψη και το δίκτυο περιλαμβάνει μεγάλους τομείς με τα κυρίαρχα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών.

3.2 Μαθηματικό υπόβαθρο

Στην παράγραφο αυτή, θα παρουσιαστούν κάποιοι χρήσιμοι μαθηματικοί τύποι που υπολογίζουν σημαντικές μεταβλητές οι οποίες αποτελούν ενδιάμεσα ή τελικά αποτελέσματα του προτύπου. Πρέπει να σημειωθεί ότι, για λόγους απλότητας γίνεται αναφορά σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα θεωρείται ότι λαμβάνει πληροφόρηση ιστορικού χρόνου και η δεύτερη, πραγματικού χρόνου. Συνεπώς, οι παρακάτω μεταβλητές εκτιμούνται ως εξής:

- Χρόνος μετακίνησης διαδρομής – *PTT* (min)

$$PTTA_p^l = \frac{60 C_{A,p}^{l,l}}{VOTTA} \quad (3.15)$$

$$PTTB_p^l = \frac{60 C_{B,p}^{l,l}}{VOTTB} \quad (3.16)$$

Όπου:

$VOTT$ (€/h):αξία του χρόνου μετακίνησης

l : τρέχον χρονικό διάστημα

$C_{A,p}^{ij,l}$: κόστος διαδρομής p που συνδέει το ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού ij στο χρονικό διάστημα l για την ομάδα A. Παρακάτω συμβολίζεται και ως PCA_p^l .

A : ομάδα A

B : ομάδα B

- Χρόνος αφίξεως – AT

$$ATA_p(l) = l + PTTA_p(l) \quad (3.17)$$

$$ATB_p(l) = l + PTTB_p(l) \quad (3.18)$$

- Χρησιμότητα αφίξεως στον προορισμό – V

$$V_{A,p}^l = demA_4(l) = Acl \ dem_D4(l) \quad (3.19)$$

$$V_{B,p}^l = demB_4(l) = Bcl \ dem_D4(l) \quad (3.20)$$

Όπου:

dem_D4 : Ζήτηση αφίξεως στο σημείο προορισμού 4

Acl : ποσοστό των χρηστών της ομάδας A

$Bcl = 1 - Acl$: ποσοστό των χρηστών της ομάδας B

- Συστηματική χρησιμότητα – $v_p^{ij,l}$

Για την πρώτη ημέρα:

$$\text{Ομάδα A: } v_{A,p}^{ij,l} = -\theta^{l-k} C_{A,p}^{ij,l} + \omega V_{A,p}^{l+m} \quad (3.21)$$

$$\text{Ομάδα B: } v_{B,p}^{ij,l} = -\theta^{l-1} C_{B,p}^{ij,l} + \omega V_{B,p}^{l+m} \quad (3.22)$$

Όπου:

$\theta_A = \theta^{l-k}$: συντελεστής αντίληψης κόστους για την ομάδα A

$\theta_B = \theta^{l-1}$: συντελεστής αντίληψης κόστους για την ομάδα B

$C_{A,p}^{ij,l}$: κόστος διαδρομής p στο χρονικό διάστημα l για την ομάδα A

$C_{B,p}^{ij,l}$: κόστος διαδρομής p στο χρονικό διάστημα l για την ομάδα B

$V_{A,p}^{l+m}, V_{B,p}^{l+m}$: χρησιμότητες αφίξεως στο χρονικό διάστημα στόχος $l + m$, για αναχώρηση στο χρονικό διάστημα l

ω : συντελεστής βαρύτητας των χρησιμοτήτων αφίξεως $V_{A,p}^{l+m}, V_{B,p}^{l+m}$

Για τις επόμενες μέρες:

$$\text{Ομάδα A: } v_{A,p}^{ij,l-k} = -\theta^{l-k} C_{A,p}^{ij,l-k} + \omega V_{A,p}^{l+m} \quad (3.23)$$

$$\text{Ομάδα B: } v_{B,p}^{ij,l-1} = -\theta^{l-1} C_{B,p}^{ij,l-1} + \omega V_{B,p}^{l+m} \quad (3.24)$$

$C_{A,p}^{ij,l-k}$: κόστος διαδρομής p στο χρονικό διάστημα $l - k$ για την ομάδα A

$C_{B,p}^{ij,l-1}$: κόστος διαδρομής p στο χρονικό διάστημα $l - 1$ για την ομάδα B

ii. Πιθανότητα επιλογής ώρας αναχώρησης - dtP^l

$$dtP_A^l = \frac{demA_{ij}^l}{sumdemA_{ij}^l} \quad (3.25)$$

$$dtP_B^l = \frac{demB_{ij}^l}{sumdemB_{ij}^l} \quad (3.26)$$

όπου $demA_{ij}^l$ η ζήτηση για αναχώρηση στο χρονικό διάστημα l και $sumdemA_{ij}^l = \sum_l demA_{ij}^l$ η ημερήσια συνολική ζήτηση, για την ομάδα A. Επίσης, ισχύει:

$$demA_{ij}^l = Acl dem_{ij}^l \quad (3.27)$$

$$demB_{ij}^l = Bcl dem_{ij}^l \quad (3.28)$$

όπου dem_{ij}^l η συνολική ζήτηση αναχώρησης στο χρονικό διάστημα l και για τις δύο ομάδες.

iii. Πιθανότητα επιλογής διαδρομής για δεδομένη ώρα αναχώρησης στο χρονικό διάστημα l - PP_p^l (Δεσμευμένη πιθανότητα).

Για την πρώτη ημέρα:

$$PP_{A,p}^l = exp(v_{A,p}^{ij,l}) / \sum_{p \in P} exp(v_{A,p}^{ij,l}) \quad (3.29)$$

$$PP_{B,p}^l = \exp(v_{B,p}^{ij,l}) / \sum_{p \in P} \exp(v_{B,p}^{ij,l}) \quad (3.30)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η πιθανότητα αυτή είναι δεσμευμένη, καθώς υπολογίζεται η πιθανότητα επιλογής διαδρομής με δεδομένη την επιλογή της ώρας αναχώρησης. Δηλαδή αν Y το γεγονός ότι επιλέγεται μία διαδρομή p και X το γεγονός ότι επιλέγεται ένα χρονικό διάστημα αναχώρησης l , τότε η παραπάνω πιθανότητα είναι η δεσμευμένη πιθανότητα $PP_p^l = P(Y/X)$. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται για την πρώτη ημέρα, κυρίως, όπου η ζήτηση είναι καταμερισμένη σε διαστήματα αναχώρησης, εξαρχής.

Για τις επόμενες ημέρες:

$$PP_{A,p}^l = \exp(v_{A,p}^{ij,l-k}) / \sum_{p \in P} \exp(v_{A,p}^{ij,l-k}) \quad (3.31)$$

$$PP_{B,p}^l = \exp(v_{B,p}^{ij,l-1}) / \sum_{p \in P} \exp(v_{B,p}^{ij,l-1}) \quad (3.32)$$

- iv. Πιθανότητα επιλογής ώρας αναχώρησης και διαδρομής στο χρονικό διάστημα l - $dtPP_p^l$ (Πιθανότητα της τομής).

Για την πρώτη ημέρα:

$$dtPP_{A,p}^l = \exp(v_{A,p}^{ij,l}) / \sum_l \sum_{p \in P} \exp(v_{A,p}^{ij,l}) \quad (3.33)$$

$$dtPP_{B,p}^l = \exp(v_{B,p}^{ij,l}) / \sum_l \sum_{p \in P} \exp(v_{B,p}^{ij,l}) \quad (3.34)$$

Κάθε δυνατός συνδυασμός ώρας αναχώρησης και διαδρομής επιλέγεται από ένα σύνολο $3 \times a$ τέτοιων εναλλακτικών συνδυασμών για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού ij , με σκοπό την μεγιστοποίηση της αντιληπτής χρησιμότητας μεταξύ των εναλλακτικών.

Επίσης ισχύει:

$$dtPP_{A,p}^l = PP_{A,p}^l \quad dtP_A^l = PP_{A,p}^l \frac{demA_{ij}^l}{sumdemA_{ij}^l} \quad (3.35)$$

$$dtPP_{B,p}^l = PP_{B,p}^l \quad dtP_B^l = PP_{B,p}^l \frac{demB_{ij}^l}{sumdemB_{ij}^l} \quad (3.36)$$

Ας γίνει και εδώ η υπόθεση ότι Y είναι το γεγονός ότι επιλέγεται μία διαδρομή p και X το γεγονός ότι επιλέγεται ένα χρονικό διάστημα αναχώρησης l . Η παραπάνω πιθανότητα $dtPP_p^l$ είναι, τότε, η πιθανότητα της τομής των δύο γεγονότων, δηλ. $dtPP_p^l = P(X \cap Y)$. Επίσης,

εξηγήθηκε παραπάνω, ότι η πιθανότητα PP_p^l είναι μία δεσμευμένη πιθανότητα, δηλ. $PP_p^l = P(Y/X)$. Από τη θεωρία πιθανοτήτων, ισχύει ότι $P(X \cap Y) = P(X) P(Y/X)$. Οι παραπάνω τύποι εκφράζουν ακριβώς αυτή τη μαθηματική σχέση, όπου το $P(X)$ συμβολίζεται με dtP^l .

Για τις επόμενες ημέρες:

$$dtPP_{A,p}^l = \exp(v_{A,p}^{ij,l-k}) / \sum_l \sum_{p \in P} \exp(v_{A,p}^{ij,l-k}) \quad (3.37)$$

$$dtPP_{B,p}^l = \exp(v_{B,p}^{ij,l-1}) / \sum_l \sum_{p \in P} \exp(v_{B,p}^{ij,l-1}) \quad (3.38)$$

Για τις επόμενες μέρες ισχύουν και οι τύποι (3.34) και (3.35), αλλά επειδή η ζήτηση για αναχώρηση σε κάθε χρονικό διάστημα l είναι ζητούμενη και όχι δεδομένη, δεν χρησιμοποιούνται.

ν. Φόρτος διαδρομής - PF_{ijp}^l (οχήματα/15λεπτο)

Για την πρώτη ημέρα:

$$PF_{Aijp}^l = demA_{ij}^l PP_{A,p}^l = demA_{ij}^l \exp(v_{A,p}^{ij,l}) / \sum_{p \in P} \exp(v_{A,p}^{ij,l}) \quad (3.39)$$

$$PF_{Bijp}^l = demB_{ij}^l PP_{B,p}^l = demB_{ij}^l \exp(v_{B,p}^{ij,l}) / \sum_{p \in P} \exp(v_{B,p}^{ij,l}) \quad (3.40)$$

ή από τους τύπους:

$$PF_{Aijp}^l = sumdemA_{ij}^l dtPP_{A,p}^l = sumdemA_{ij}^l \exp(v_{A,p}^{ij,l}) / \sum_l \sum_{p \in P} \exp(v_{A,p}^{ij,l}) \quad (3.41)$$

$$PF_{Bijp}^l = sumdemB_{ij}^l dtPP_{B,p}^l = sumdemB_{ij}^l \exp(v_{B,p}^{ij,l}) / \sum_l \sum_{p \in P} \exp(v_{B,p}^{ij,l}) \quad (3.42)$$

Να σημειωθεί ότι, επειδή η ζήτηση για κάθε χρονικό διάστημα είναι γνωστή για την πρώτη ημέρα, ενδείκνυται η χρήση των τύπων (3.39) και (3.40) για τον υπολογισμό του φόρτου κάθε διαδρομής, επειδή είναι πιο ξεκάθαροι.

Για τις επόμενες ημέρες:

$$PF_{Aijp}^l = demA_{ij}^l PP_{A,p}^l = demA_{ij}^l \exp(v_{A,p}^{ij,l-k}) / \sum_{p \in P} \exp(v_{A,p}^{ij,l-k}) \quad (3.43)$$

$$PF_{Bijp}^l = demB_{ij}^l PP_{B,p}^l = demB_{ij}^l \exp(v_{B,p}^{ij,l-1}) / \sum_{p \in P} \exp(v_{B,p}^{ij,l-1}) \quad (3.44)$$

ή από τους τύπους:

$$PF_{Aijp}^l = sumdemA_{ij}^l dtPP_{A,p}^l = sumdemA_{ij}^l \exp(v_{A,p}^{ij,l-k}) / \sum_l \sum_{p \in P} \exp(v_{A,p}^{ij,l-k}) \quad (3.45)$$

$$PF_{Bijp}^l = sumdemB_{ij}^l dtPP_{B,p}^l = sumdemB_{ij}^l \exp(v_{B,p}^{ij,l-1}) / \sum_l \sum_{p \in P} \exp(v_{B,p}^{ij,l-1}) \quad (3.46)$$

Να σημειωθεί ότι η ζήτηση για κάθε χρονικό διάστημα δεν είναι γνωστή για την δεύτερη ημέρα και μετά, ενώ η συνολική ημερήσια είναι. Ενδείκνυται, συνεπώς, η χρήση των τύπων (3.45) και (3.46) για τον υπολογισμό του φόρτου κάθε διαδρομής.

vi. Κυκλοφοριακός φόρτος συνδέσμου – LF (οχήματα/15λεπτο)

Αρχικά, υπολογίζεται ο κυκλοφοριακός φόρτος των συνδέσμων από τον φόρτο κάθε διαδρομής. Έστω ότι το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός του φόρτου των συνδέσμων από τη διαδρομή p , που συνδέει ένα ζεύγος προέλευσης-προορισμού ij για τις N ομάδες ξεχωριστά. Τότε ισχύει:

$$LFA_p = intxp \, demA_{ij} \quad (3.47)$$

$$LFB_p = intxp \, demB_{ij} \quad (3.48)$$

όπου LFA_p , είναι ένας πίνακας διαστάσεων $(17 \times ax)$, τα στοιχεία του οποίου είναι οι φόρτοι των συνδέσμων από τη διαδρομή p για τα ax χρονικά διαστήματα της περιόδου μελέτης (όπου x ο αριθμός των ημερών), όπου a , ο αριθμός των διακριτών χρονικών διαστημάτων που εμπεριέχονται σε μία ημέρα. Ο πίνακας $intxp$ διαστάσεων (17×1) ονομάζεται πίνακας επιπτώσεων συνδέσμου-διαδρομής (incidence matrix), τα στοιχεία του οποίου είναι: $a_{kpij} = 1$ εάν η διαδρομή p από το σημείο προέλευσης i στο σημείο προορισμού j περιλαμβάνει το σύνδεσμο k , ειδάλως τα στοιχεία είναι μηδενικά. Σε κάθε διαδρομή αντιστοιχεί και ένας τέτοιος πίνακας. Ο πίνακας $demA_{ij}$ διαστάσεων $(1 \times ax)$ έχει ως στοιχεία τα $demA_{ij}^l$ για κάθε l της περιόδου μελέτης.

Οι συνολικοί φόρτοι των συνδέσμων από όλες τις διαδρομές προκύπτουν από το άθροισμα των LF_p για όλες τις δυνατές διαδρομές όλων των ζευγών προέλευσης προορισμού. Συνεπώς:

$$LFA = \sum_{p \in I} LFA_p \quad (3.49)$$

$$LFB = \sum_{p \in I} LFB_p \quad (3.50)$$

όπου LFA είναι ένας πίνακας διαστάσεων $(17 \times ax)$ και I το σύνολο όλων των δυνατών διαδρομών (9) για όλα τα ζεύγη προέλευσης προορισμού (3). Οι δύο παραπάνω τύποι μπορούν να αναφέρονται στα στοιχεία των πινάκων αυτών ως εξής:

$$LFA_k^l = \sum_{p \in I} LFA_{k,p}^l \quad (3.51)$$

$$LFB_k^l = \sum_{p \in I} LFB_{k,p}^l \quad (3.52)$$

vii. Χρόνος μετακίνησης συνδέσμου - $LTT_k^l(\text{min})$ ή t_m

$$LTTA_k^l = fTT_k [1 + 0.15 \left(\frac{LFA_k^l}{Cap_k} \right)^3] \quad (3.53)$$

$$LTTB_k^l = fTT_k [1 + 0.15 \left(\frac{LFB_k^l}{Cap_k} \right)^3] \quad (3.54)$$

όπου fTT_k ο χρόνος μετακίνησης ελεύθερης ροής του συνδέσμου k και Cap_k η κυκλοφοριακή ικανότητα του συνδέσμου k .

viii. Κόστος συνδέσμου - LC_k^l (€)

$$LCA_k^l = VOTTA LTTA_k^l / 60 \quad (3.55)$$

$$LCB_k^l = VOTTB LTTB_k^l / 60 \quad (3.56)$$

ix. Κόστος διαδρομής - PC_p^l (€)

Το κόστος διαδρομής υπολογίζεται ως το άθροισμα των κοστών των συνδέσμων που αποτελούν τη διαδρομή. Και η μεταβλητή αυτή υπολογίζεται για κάθε ομάδα ξεχωριστά.

3.2.1 Διατύπωση του προτύπου

Το συγκεκριμένο πρότυπο Logit είναι ένα ημιδυναμικό στοχαστικό πρότυπο καταμερισμού της κυκλοφορίας στις διάφορες ώρες αναχώρησης και διαδρομές του δικτύου.

Το πρότυπο έχει σχεδιαστεί να αποδίδει αποτελέσματα για οποιοδήποτε πεπερασμένο αριθμό ημερών, εκκινώντας από γνωστές αρχικές συνθήκες. Ο αριθμός αυτός συμβολίζεται από τη μεταβλητή x (αριθμός ημερών) και ορίζεται στην αρχή του προγράμματος, δηλαδή

λαμβάνεται ως δεδομένος. Για παράδειγμα, το πρόγραμμα τρέχει για x μέρες και για ax χρονικά διαστήματα, όπου a ο αριθμός των διακριτών χρονικών διαστημάτων που περιλαμβάνονται σε μία ημέρα. Όπως έχει προαναφερθεί, πρόκειται για ένα πρότυπο διακριτού χρόνου, ο οποίος είναι διαιρεμένος σε ίσα χρονικά διαστήματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι, για λόγους απλότητας γίνεται αναφορά σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα θεωρείται ότι λαμβάνει πληροφόρηση ιστορικού χρόνου και η δεύτερη πραγματικού χρόνου (με προϋπολογισμένα ποσοστά της κάθε ομάδας).

Πρέπει να σημειωθεί ότι η πρώτη ημέρα αντιμετωπίζεται διαφορετικά από τις υπόλοιπες ημέρες της περιόδου μελέτης. Αυτό συμβαίνει, επειδή η ζήτηση για αναχώρηση για κάθε χρονικό διάστημα της πρώτης ημέρας λαμβάνεται ως γνωστή, ενώ για τις επόμενες μέρες προβλέπεται από το πρότυπο, αποτελεί δηλαδή αποτέλεσμα. Ειδικότερα, το πρότυπο μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

Αρχικά, γίνεται μία εκτίμηση του κόστους μετακίνησης για το πρώτο χρονικό διάστημα για κάθε διαδρομή και για κάθε ομάδα (με βάση χρόνους μετακίνησης ελεύθερης ροής). Έπειτα και μετά τον ορισμό της παραμέτρου x , ο δείκτης του τρέχοντος χρονικού διαστήματος λαμβάνει την τιμή 1 ($lp = 1$), όπως και ο δείκτης ημέρας ($z = 1$). Οι παρακάτω διαδικασίες (έλεγχοι και υπολογισμοί) επαναλαμβάνονται για τιμές του lp από 1 έως ax και για τιμές του z από 1 έως $x - 1$, μέχρι, δηλαδή να τελειώσει η περίοδος μελέτης. Μετά τον προσδιορισμό των lp και z , γίνεται έλεγχος του τρέχοντος χρονικού διαστήματος και αν είναι εντός της πρώτης ημέρας, τότε ακολουθούν οι υπολογισμοί της χρησιμότητας για κάθε δυνατή επιλογή διαδρομής και ώρας αναχώρησης στο τρέχον χρονικό διάστημα και στη συνέχεια της πιθανότητας επιλογής αυτών από τους χρήστες. Με πολλαπλασιασμό της ζήτησης για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού (Π-Π) με τη συγκεκριμένη πιθανότητα επιλογής, προκύπτει η κυκλοφοριακός φόρτος για κάθε διαδρομή, για κάθε Π-Π στο τρέχον χρονικό διάστημα. Έπειτα, υπολογίζονται οι φόρτοι των συνδέσμων κάθε διαδρομής, πολλαπλασιάζοντας τη ζήτηση για κάθε Π-Π με τους πίνακες επιπτώσεων (ένας πίνακας για κάθε διαδρομή). Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, οι πίνακες επιπτώσεων συνδέσμου-διαδρομής έχουν στοιχεία: $a_{kpij} = 1$ εάν η διαδρομή p από το σημείο προέλευσης i στο σημείο προορισμού j περιλαμβάνει το σύνδεσμο k , ειδάλλως τα στοιχεία είναι μηδενικά. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο συνολικός φόρτος κάθε συνδέσμου, ο χρόνος μετακίνησης σε κάθε σύνδεσμο μέσω της συνάρτησης BPR, το κόστος μετακίνησης σε κάθε σύνδεσμο με πολλαπλασιασμό του προηγούμενου χρόνου μετακίνησης με το συντελεστή της αξίας του χρόνου μετακίνησης. Έπειτα, εκτιμάται μια νέα τιμή του κόστους μετακίνησης για κάθε δυνατή διαδρομή, που προκύπτει ως άθροισμα των κοστών των συνδέσμων που απαρτίζουν την κάθε μία. Δεν πρέπει να παραληφθεί ότι οι παραπάνω υπολογισμοί αφορούν στην κάθε ομάδα ξεχωριστά και αντιστοιχούν πάντα στο τρέχον χρονικό διάστημα.

Εάν το δεκαπεντάλεπτο ανήκει στη δεύτερη ημέρα και μετά, τότε ένας ενδιαμέσος βρόχος ξεκινάει όπου $g \leq lp < f$, $g = az + 1$ και $f = a(z + 1)$, αναφέρεται, δηλαδή, σε μία επόμενη ημέρα (Για $z = 1$, δηλαδή, ο βρόχος αναφέρεται στη δεύτερη ημέρα). Για τη συγκεκριμένη ημέρα, υπολογίζεται η χρησιμότητα για κάθε δυνατό συνδυασμό ώρας αναχώρησης (εντός της συγκεκριμένης ημέρας) και διαδρομής μόνο για την ομάδα Α. Η χρησιμότητα αυτή μπορεί τώρα να υπολογιστεί, γιατί είναι συνάρτηση του κόστους μετακίνησης του ίδιου χρονικού διαστήματος της προηγούμενης ημέρας, τα οποία έχουν υπολογιστεί σε προηγούμενα βήματα. Εάν το χρονικό διάστημα είναι το τελευταίο της συγκεκριμένης ημέρας ή μεταγενέστερο ($lp \geq f$), ο βρόχος αυτός (ενδιάμεσος) κλείνει και το πρότυπο προχωράει σε έναν ενδιαμέσο υπολογισμό που θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω.

Μετά το τέλος του προηγούμενου βρόχου και του ενδιαμέσου αυτού υπολογισμού, ξεκινάει ένας άλλος ενδιαμέσος βρόχος, ο οποίος αναφέρεται και πάλι στην ίδια ημέρα του προηγούμενου βρόχου ($g \leq lp < f$). Για τη συγκεκριμένη ημέρα, λοιπόν, υπολογίζεται η πιθανότητα επιλογής ώρας αναχώρησης και διαδρομής μόνο για την ομάδα Α, η οποία πολλαπλασιαζόμενη με την ημερήσια συνολική ζήτηση της ομάδας Α (που παραμένει σταθερή για κάθε ημέρα) δίνει την τη ζήτηση για το τρέχον χρονικό διάστημα της ομάδας Α. Η ζήτηση για το τρέχον χρονικό διάστημα της ομάδας Β υπολογίζεται στη συνέχεια, καθώς είναι υποπολλαπλάσιο της ζήτησης της ομάδας Α στο τρέχον χρονικό διάστημα. Ακολουθεί ο υπολογισμός του κόστους μετακίνησης για κάθε διαδρομή και ομάδα με τον ίδιο τρόπο της πρώτης ημέρας. Εάν το χρονικό διάστημα είναι το τελευταίο της συγκεκριμένης ημέρας ή μεταγενέστερο ($lp \geq f$), ο βρόχος αυτός κλείνει και ένας άλλος νέος ενδιαμέσος βρόχος ξεκινάει.

Ο καινούργιος βρόχος αναφέρεται και αυτός στην ίδια ημέρα με τους προηγούμενους ($g \leq lp < f$). Για τη συγκεκριμένη ημέρα, υπολογίζεται η χρησιμότητα για κάθε δυνατό συνδυασμό ώρας αναχώρησης (εντός της συγκεκριμένης ημέρας) και διαδρομής για την ομάδα Β. Η χρησιμότητα αυτή μπορεί τώρα να υπολογιστεί, γιατί είναι συνάρτηση των κοστών μετακίνησης του προηγούμενου χρονικού διαστήματος, τα οποία έχουν υπολογιστεί στον προηγούμενο βρόχο. Εάν το χρονικό διάστημα είναι το τελευταίο της συγκεκριμένης ημέρας ή μεταγενέστερο ($lp \geq f$), ο βρόχος αυτός κλείνει και το πρότυπο προχωράει σε έναν ενδιαμέσο υπολογισμό που θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω.

Μετά το τέλος του προηγούμενου βρόχου και του ενδιαμέσου αυτού υπολογισμού, ξεκινάει ένας άλλος ενδιαμέσος βρόχος, ο οποίος αναφέρεται και πάλι στην ίδια ημέρα του προηγούμενου βρόχου ($g \leq lp < f$). Για τη συγκεκριμένη ημέρα, λοιπόν, υπολογίζεται η πιθανότητα επιλογής ώρας αναχώρησης και διαδρομής μόνο για την ομάδα Β. Εάν το χρονικό διάστημα είναι το τελευταίο της συγκεκριμένης ημέρας ή μεταγενέστερο ($lp \geq f$), ο βρόχος αυτός κλείνει.

Μετά την παραπάνω διαδικασία, ο δείκτης του τρέχοντος χρονικού διαστήματος, lp , παίρνει την επόμενη του τιμή και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την καινούργια αυτή τιμή (μέχρι $lp = ax$). Τότε, ο μεγάλος αυτός βρόχος κλείνει και ο δείκτης ημέρας, z , παίρνει την επόμενη του τιμή. Το πρότυπο, συνεπώς, αρχίζει να δίνει αποτελέσματα για τις επόμενες ημέρες. Εάν το z , πάρει την τιμή $x - 1$, ο μεγάλος αυτός εξωτερικός βρόχος κλείνει και το πρότυπο σταματάει, έχοντας υπολογίσει τα ζητούμενα αποτελέσματα. Το βασικότερο από αυτά είναι η πρόβλεψη της ζήτησης για τη δεύτερη μέρα και μετά και ο καταμερισμός αυτής στις διάφορες ώρες αναχώρησης και διαδρομές.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο πρότυπο αποτελεί ένα σύνθετο σύστημα πολλών υποσυστημάτων. Παρακάτω, θα παρουσιαστεί, πιο αναλυτικά, το υποσύστημα των δυναμικών επιλογών των χρηστών και το υποσύστημα της δυναμικής της κυκλοφορίας.

3.2.1.1 Το υποσύστημα των δυναμικών επιλογών των χρηστών

Στο προτεινόμενο πρότυπο Logit, γίνεται η υπόθεση ότι οι χρήστες επιλέγουν ταυτόχρονα ώρα αναχώρησης και διαδρομή με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιούν την αντιληπτή χρησιμότητα. Μια πρόσθετη παραδοχή είναι ότι οι μετακινούμενοι δεν αναθεωρούν την επιλογή της διαδρομής κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, ενώ επίσης η πρώτη ημέρα εξετάζεται ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες μέρες της περιόδου μελέτης.

Για την πρώτη ημέρα, οι επιλογές των χρηστών σχετικά με την ώρα αναχώρησης λαμβάνονται ως δεδομένες. Με άλλα λόγια, είναι δεδομένος ο καταμερισμός της ημερήσιας συνολικής ζήτησης στα ίσα διακριτά χρονικά διαστήματα της πρώτης ημέρας και ζητείται ο καταμερισμός της ζήτησης κάθε χρονικού διαστήματος στις δυνατές διαδρομές. Επιπρόσθετα, οι χρήστες επιλέγουν σύμφωνα με τη δικιά τους αντίληψη των τρεχόντων κοστών μετακίνησης ή της χρησιμότητας κάθε επιλογής. Υπενθυμίζεται ότι οι συστηματικές χρησιμότητες και η πιθανότητα επιλογής διαδρομής με δεδομένη την ώρα αναχώρησης υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους, που έχουν σημειωθεί και προηγουμένως:

$$\text{Ομάδα Α: } v_{A,p}^{ij,l} = -\theta^{l-k} C_{A,p}^{ij,l} + \omega V_{A,p}^{l+m} \quad (3.57)$$

$$\text{Ομάδα Β: } v_{B,p}^{ij,l} = -\theta^{l-1} C_{B,p}^{ij,l} + \omega V_{B,p}^{l+m} \quad (3.58)$$

$$PP_{A,p}^l = \exp(v_{A,p}^{ij,l}) / \sum_{p \in P} \exp(v_{A,p}^{ij,l}) \quad (3.59)$$

$$PP_{B,p}^l = \exp(v_{B,p}^{ij,l}) / \sum_{p \in P} \exp(v_{B,p}^{ij,l}) \quad (3.60)$$

Το υποσύστημα των δυναμικών επιλογών των χρηστών παρέχει μία επέκταση του στατικού στοχαστικού καταμερισμού ισορροπίας των χρηστών σε ένα επαναληπτικό εξελικτικό καταμερισμό με μνήμη. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, για τις επόμενες μέρες, κάθε μετακινούμενος επιλέγει διαδρομή και ώρα αναχώρησης σύμφωνα με την ιστορία του κόστους μετακίνησης του δικτύου, το οποίο αναφέρεται στο αντίστοιχο διακριτό χρονικό διάστημα της προηγούμενης ημέρας για την ομάδα A και στο προηγούμενο χρονικό διάστημα της τρέχουσας ημέρας για την ομάδα B.

Ειδικότερα, γίνεται η υπόθεση ότι η πρώτη ομάδα χρηστών επιλέγει με βάση την εμπειρία της, δηλαδή σύμφωνα με την αντίληψη του κόστους μετακίνησης που έχει βιώσει στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα της προηγούμενης ημέρας. Από την άλλη μεριά, η δεύτερη ομάδα των χρηστών επιλέγει επεξεργάζοντας πληροφόρηση πραγματικού χρόνου, δηλαδή σύμφωνα με την αντίληψη του κόστους μετακίνησης του προηγούμενου χρονικού διαστήματος.

Για τις επόμενες μέρες η συνολική ημερήσια ζήτηση, παρόλο που είναι γνωστή, δεν είναι καταμερισμένη εξ αρχής στα διάφορα χρονικά διαστήματα (όπως στην πρώτη ημέρα). Ζητείται, λοιπόν, να υπολογιστεί ο καταμερισμός της ζήτησης αυτής στα διάφορα χρονικά διαστήματα ανά ημέρα και στις διάφορες δυνατές διαδρομές ανά ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού. Οι συστηματικές χρησιμότητες και η πιθανότητα επιλογής διαδρομής και ώρας αναχώρησης υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους, που έχουν σημειωθεί και προηγουμένως:

$$\text{Ομάδα A: } v_{A,p}^{ij,l-k} = -\theta^{l-k} C_{A,p}^{ij,l-k} + \omega V_{A,p}^{l+m} \quad (3.61)$$

$$\text{Ομάδα B: } v_{B,p}^{ij,l-1} = -\theta^{l-1} C_{B,p}^{ij,l-1} + \omega V_{B,p}^{l+m} \quad (3.62)$$

$$dtPP_{A,p}^l = \exp(v_{A,p}^{ij,l-k}) / \sum_l \sum_{p \in P} \exp(v_{A,p}^{ij,l-k}) \quad (3.63)$$

$$dtPP_{B,p}^l = \exp(v_{B,p}^{ij,l-1}) / \sum_l \sum_{p \in P} \exp(v_{B,p}^{ij,l-1}) \quad (3.64)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πιθανότητες των παραπάνω επιλογών για όλες τις μέρες υπολογίζονται με χρήση συναρτήσεων Logit. Το πρότυπο Logit αποτελεί ένα από τα κυριότερα και ξεκάθαρα στοχαστικά πρότυπα διακριτών επιλογών.

3.2.1.2 Το υποσύστημα της δυναμικής της κυκλοφορίας

Το ημιδυναμικό αυτό υποσύστημα διακριτού χρόνου, εκτίμησης της ζήτησης για μετακίνηση, παρουσιάζεται παρακάτω. Η ζήτηση της πρώτης ομάδας των χρηστών αποτελεί πολλαπλάσιο της ζήτησης της δεύτερης ομάδας των χρηστών σε κάθε χρονικό διάστημα.

Η ανάπτυξη της ζήτησης της πρώτης ημέρας είναι δεδομένη, ενώ για τις επόμενες μέρες, εκτιμάται από το προτεινόμενο πρότυπο. Για την πρώτη ημέρα, συνεπώς, ο κυκλοφοριακός φόρτος κάθε διαδρομής σε κάθε χρονικό διάστημα υπολογίζεται από τους τύπους:

$$PF_{Aijp}^l = demA_{ij}^l PP_{A,p}^l = demA_{ij}^l exp(v_{A,p}^{ij,l}) / \sum_{p \in P} exp(v_{A,p}^{ij,l}) \quad (3.65)$$

$$PF_{Bijp}^l = demB_{ij}^l PP_{B,p}^l = demB_{ij}^l exp(v_{B,p}^{ij,l}) / \sum_{p \in P} exp(v_{B,p}^{ij,l}) \quad (3.66)$$

Συνεχίζοντας, όπως αναφέρθηκε στις παραδοχές, η ημερήσια ζήτηση παραμένει σταθερή για κάθε ημέρα και ισούται, συνεπώς, με τη συνολική ζήτηση της πρώτης ημέρας που είναι γνωστή εκ των προτέρων. Η ημερήσια αυτή ζήτηση της πρώτης ημέρας ανακαταμερίζεται με διαφορετικό τρόπο για κάθε μία από τις επόμενες ημέρες. Με χρήση των παρακάτω τύπων εκτιμάται ο κυκλοφοριακός φόρτος κάθε διαδρομής (Path flow – Pf) κάθε ζεύγους σημείων προέλευσης-προορισμού ij , σε κάθε χρονικό διάστημα l , για κάθε ομάδα ξεχωριστά ως εξής:

$$PF_{Aijp}^l = sumdemA_{ij}^l dtPP_{A,p}^l = sumdemA_{ij}^l exp(v_{A,p}^{ij,l-k}) / \sum_l \sum_{p \in P} exp(v_{A,p}^{ij,l-k}) \quad (3.67)$$

$$PF_{Bijp}^l = sumdemB_{ij}^l dtPP_{B,p}^l = sumdemB_{ij}^l exp(v_{B,p}^{ij,l-1}) / \sum_l \sum_{p \in P} exp(v_{B,p}^{ij,l-1}) \quad (3.68)$$

όπου l το τρέχον χρονικό διάστημα, στο οποίο υπολογίζεται ο κυκλοφοριακός φόρτος της διαδρομής p για τις δύο ομάδες χρηστών. Η διαδρομή p ανήκει στο σύνολο των εναλλακτικών διαδρομών για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης i και προορισμού j , P , το οποίο αποτελείται από τρεις εναλλακτικές διαδρομές για κάθε ij .

Στο πρότυπο αυτό, ο καταμερισμός της ζήτησης, για την δεύτερη μέρα και μετά, γίνεται πρώτα για την πρώτη ομάδα, που επεξεργάζεται πληροφόρηση ιστορικού χρόνου και μετά για τη δεύτερη ομάδα οι οποία πληροφορείται για το κόστος μετακίνησης του προηγούμενου χρονικού διαστήματος. Ο λόγος αναφέρεται στην παράγραφο 3.2.1. Για τον καταμερισμό της ζήτησης της ομάδας A χρειάζεται να έχει προηγηθεί ο υπολογισμός της πιθανότητας του

συνδυασμού των δύο διακριτών επιλογών (διαδρομής και ώρας αναχώρησης) από τους χρήστες.

Δεν πρέπει να παραληφθεί ότι, η ζήτηση και για τις δύο ομάδες, εκτιμάται μετά τον υπολογισμό των φόρτων διαδρομής της ομάδας A. Η ζήτηση για μετακίνηση από το σημείο προέλευσης i προς το σημείο προορισμού j της ομάδας A προκύπτει ως το άθροισμα των φόρτων των διαδρομών που συνδέουν αυτά τα δύο σημεία. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται η ζήτηση της ομάδας A, αλλά και η ζήτηση της ομάδας B, ως υποπολλαπλάσιο της πρώτης. Έπειτα εκτιμάται το κόστος διαδρομής για της δύο ομάδες, οπότε μπορούν να υπολογιστούν οι χρησιμότητες της ομάδας B, η πιθανότητα του συνδυασμού των δύο διακριτών επιλογών (διαδρομής και ώρας αναχώρησης) και στη συνέχεια οι φόρτοι των διαδρομών σύμφωνα με τον αμέσως προηγούμενο τύπο.

Τέλος, ο υπολογισμός των φόρτων των συνδέσμων γίνεται όμοια για όλες τις μέρες και για τις δύο ομάδες. Δεν θα αναλυθεί, όμως, πάλι στο σημείο αυτό, καθώς έχει αναφερθεί αναλυτικά στην παράγραφο 3.2 (Μαθηματικό υπόβαθρο).

3.2.2 Συσχέτιση παραμέτρων

Οι παράμετροι, που απαρτίζουν το προτεινόμενο πρότυπο, συσχετίζονται μεταξύ τους. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι διαφόρου τύπου συσχετίσεις των παραμέτρων αυτών.

i. Παράμετρος θ - διασπορά των χρηστών στις εναλλακτικές διαδρομές

Η παράμετρος αυτή παριστάνει τη διασπορά των χρηστών όσον αφορά στην αντίληψη του κόστους μετακίνησης. Σχετικά μικρές τιμές του θ σημαίνουν μεγαλύτερη διασπορά των χρηστών στα αντιληπτά κόστη και κατ' επέκταση, ευρύτερη κατανομή των μετακινούμενων στις διαθέσιμες διαδρομές. Από την άλλη μεριά, σχετικά μεγάλες τιμές του θ συνεπάγονται μικρότερη διασπορά στα αντιληπτά κόστη, περισσότερη ακρίβεια στην αντίληψη των τρεχουσών συνθηκών και, συνεπώς, πιο συχνή επιλογή των πραγματικά συντομότερων (ή καλύτερα οικονομικότερων) διαδρομών από τους χρήστες του διατροπικού δικτύου. Οι συνήθεις τιμές του θ κυμαίνονται κάτω του 5, δηλαδή $\theta \leq 5$.

ii. Παράμετρος θ - σύγκλιση προτύπου

Καταρχήν, πρέπει να σημειωθεί ότι η σύγκλιση του προτύπου καθορίζεται από μία πληθώρα παραγόντων, μία από τις οποίες είναι και η παράμετρος θ . Για μία δοσμένη διαμόρφωση της ζήτησης και της προσφοράς, μικρές τιμές του θ εξασφαλίζουν *γρηγορότερη*

σύγκλιση του προτύπου. Μικρές τιμές του θ , όπως προαναφέρθηκε, σημαίνουν μεγάλα και ευρέως διασκορπισμένα σφάλματα αντίληψης του κόστους μετακίνησης, τα οποία συνεπάγονται μία ευρεία κατανομή της ζήτησης στις δυνατές διαδρομές και καθιστούν τις επιλογές των χρηστών λιγότερο ευαίσθητες στις πραγματικά μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου.

iii. Παράμετρος k – είδος πληροφόρησης

Η παράμετρος k συμβολίζει τον αριθμό των χρονικών διαστημάτων (δεκαπενταλέπτων) πριν το τρέχον χρονικό διάστημα l και $l - k$ είναι ένα χρονικό διάστημα, του οποίου η πληροφορία σχετικά με το αντίστοιχο κόστος μετακίνησης, χρησιμοποιείται από τους χρήστες για να επιλέξουν διαδρομή κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος l . Συνήθως, επιλέγεται ένα πρότυπο με «μικρή» μνήμη, ειδικά στην περίπτωση των μητροπολιτικών δικτύων, που οι μετακινούμενοι χρησιμοποιούν το δίκτυο πολύ συχνά και τυποποιημένα.

iv. Παράμετροι $\theta - k$

Οι συγκεκριμένες παράμετροι εμφανίζουν κάποια συσχέτιση μεταξύ τους. Για παράδειγμα, στους χρήστες της ομάδας που επεξεργάζονται πληροφόρηση ιστορικού χρόνου αντιστοιχεί μία σχετικά μικρή τιμή του θ . Στους χρήστες της ομάδας που επεξεργάζονται πληροφόρηση πραγματικού χρόνου προτιμάται για αυτούς μία μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου θ . Αυτό αιτιολογείται ως εξής: Οι χρήστες της δεύτερης ομάδας έχουν μια πιο ακριβή αντίληψη των κυκλοφοριακών συνθηκών από την άλλη ομάδα, καθώς η πληροφόρηση πραγματικού χρόνου (μέσω του διαδικτύου) είναι πιο σαφής από ότι είναι συνήθως η πληροφόρηση ιστορικού χρόνου (εμπειρία). Συνεπώς, οι χρήστες της ομάδας που λαμβάνουν πληροφόρηση πραγματικού χρόνου εμφανίζουν μικρότερη διασπορά στις εναλλακτικές διαδρομές, δηλαδή διαλέγουν πιο συχνά τις βέλτιστες διαδρομές. Συμπερασματικά, μια μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου k συνεπάγεται μια μικρότερη τιμή της παραμέτρου θ .

v. Παράμετρος ω - χρησιμότητα-σύγκλιση

Η παράμετρος αυτή παριστάνει τη βαρύτητα της χρησιμότητας αναχώρησης στο γενικευμένο τύπο της χρησιμότητας. Όπως είναι γνωστό, η συστηματική χρησιμότητα κάθε επιλογής ώρας αναχώρησης l και διαδρομής p και για τις δύο ομάδες δίνεται από τους παρακάτω τύπους:

$$\text{Ομάδα A: } v_{A,p}^{ij,l} = -\theta^{l-k} C_{A,p}^{ij,l-k} + \omega V_{A,p}^{l+m}$$

$$\text{Ομάδα B: } v_{B,p}^{ij,l} = -\theta^{l-1} C_{B,p}^{ij,l-1} + \omega V_{B,p}^{l+m}$$

Επειδή ο πρώτος όρος (π.χ. $-\theta^{l-k} C_{A,p}^{ij,l-k}$) είναι αρνητικός και ο δεύτερος (π.χ. $\omega V_{A,p}^{l+m}$) είναι θετικός και επειδή η χρησιμότητα αποτελεί εκθέτη του e , για να αποκτήσουν ίδια κλίμακα οι δύο αυτοί όροι, είναι επιθυμητό η αριθμητική τιμή του πρώτου όρου να είναι μεγάλη και η αριθμητική τιμή του δεύτερου όρου να είναι μικρή και μάλιστα να βρίσκονται στην περιοχή γύρω από το μηδέν. Μια σχετικά υψηλή τιμή του ω , συνεπάγεται αύξηση της αριθμητικής τιμής του δεύτερου όρου, με αποτέλεσμα οι δύο αυτοί όροι να μην έχουν ίδια κλίμακα (ίδια βαρύτητα).

Όσον αφορά στην σύγκλιση του προτύπου, ή αλλιώς την επίτευξη της δυναμικής στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών, επισημαίνεται ότι με την αύξηση του ω , η στοχαστική ισορροπία επιτυγχάνεται αργότερα.

vi. **Acl, Bcl** - ποσοστό πληροφόρησης πραγματικού χρόνου

Το **Bcl** αποτελεί το ποσοστό της ομάδας B στο σύνολο των χρηστών. Επειδή η ομάδα B επεξεργάζεται πληροφόρηση πραγματικού χρόνου, το ποσοστό αυτό αποτελεί και το ποσοστό της πληροφόρησης πραγματικού χρόνου. Για την συγκεκριμένη πληροφόρηση, γίνεται η παραδοχή ότι είναι αληθινή και αξιόπιστη. Το **Acl** αποτελεί το ποσοστό της ομάδας A στο σύνολο των χρηστών και συνεπώς ισούται με **Acl = 100% – Bcl**. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι ως αποδεκτό και ρεαλιστικό ποσοστό των χρηστών που μπορούν να λαμβάνουν πληροφόρηση πραγματικού χρόνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί το 25% (Mahmassani and Jayakrishan, 1991). Ειδικά όταν υπάρχει η εκτροπή από τη διαδρομή (αναθεώρηση της επιλογής διαδρομής) κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, το πολύ αυξημένο ποσοστό της πληροφόρησης πραγματικού χρόνου συνεπάγεται απομάκρυνση από την ισορροπία. Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι ο περιορισμός αυτός δεν μπορεί να γενικευθεί σε όλα τα πρότυπα, εξαιτίας των διαφορετικών παραδοχών που τα χαρακτηρίζουν και του πόσο δυναμικά είναι.

vii. **Acl, Bcl** - σύγκλιση του προτύπου

Το ποσοστό της πληροφόρησης πραγματικού χρόνου αναλαμβάνει σημαντικό ρόλο σχετικά με το εάν και το πότε θα επιτευχθεί η δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση του ποσοστού της πληροφόρησης πραγματικού χρόνου, μέχρι ενός ορίου, έχει σαν αποτέλεσμα τη γρηγορότερη σύγκλιση, αλλά μετά το όριο αυτό, το σύστημα

συνήθως απομακρύνεται από την κατάσταση ισορροπίας. Η γρηγορότερη σύγκλιση αποδίδεται στο γεγονός ότι, με την αύξηση του *Bcl* και την αντίστοιχη μείωση του *Acl*, ο αριθμός των μετακινούμενων που επιλέγουν τις βέλτιστες διαδρομές αυξάνεται και ο αριθμός των μετακινούμενων που αναζητούν διαδρομές με χαμηλότερο κόστος μετακίνησης μειώνεται. Ωστόσο, για την εξασφάλιση της δυναμικής στοχαστικής ισορροπίας, η οποία χαρακτηρίζεται από μία σταθερότητα (δεν υπάρχει κίνητρο από τους χρήστες να αλλάξουν επιλογές), το ποσοστό αυτό δεν είναι επιθυμητό να αυξάνεται απεριόριστα. Πολύ μεγάλες τιμές του *Bcl* μπορεί να καταστήσουν τις επιλογές των χρηστών υπερβολικά ευαίσθητες στις πραγματικά μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου, που συνεπάγεται την εκτροπή από την ισορροπία.

viii. Σύγκλιση προτύπου – απόδοση μεταφορικού συστήματος

Η απόδοση του μεταφορικού συστήματος εκτιμάται, στην παρούσα διπλωματική εργασία, με το συνολικό χρόνο μετακίνησης. Συγκεκριμένα, μια χαμηλή τιμή του συνολικού χρόνου μετακίνησης συνεπάγεται μία ικανοποιητική απόδοση του συστήματος. Συνεχίζοντας, η σύγκλιση του προτύπου αποτελεί μία προσέγγιση στη δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών. Στην περίπτωση της δυναμικής στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών, αλλά και στην περίπτωση της βέλτιστης κατάστασης του συστήματος, ο συνολικός χρόνος μετακίνησης είναι μειωμένος και η απόδοση, συνεπώς, του συστήματος είναι βελτιωμένη. Ειδικότερα, στην πρώτη περίπτωση, ο αντιληπτός χρόνος μετακίνησης για τον κάθε χρήστη είναι ίσος και ελάχιστος, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, ο συνολικός χρόνος μετακίνησης είναι ελάχιστος. Συμπερασματικά, όσο πιο γρήγορα επέρχεται η σύγκλιση του προτύπου, ή αλλιώς η δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών, τόσο πιο γρήγορα βελτιώνεται η απόδοση του μεταφορικού συστήματος.

ix. Ποσοστό πληροφόρησης πραγματικού χρόνου – συμφόρηση – απόδοση μεταφορικού συστήματος

Συγκρίνονται δύο περιπτώσεις προτύπων. Στο πρώτο πρότυπο (1), ένα περιορισμένο ποσοστό χρηστών επεξεργάζεται πληροφόρηση πραγματικού χρόνου, ενώ στο δεύτερο πρότυπο (2), όλοι οι χρήστες επεξεργάζονται τέτοιους είδους πληροφόρηση. Έχει παρατηρηθεί ότι σε περιόδους έντονης συμφόρησης, το μεταφορικό σύστημα της περίπτωσης (1) έχει καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με αυτό της περίπτωσης (2). Αυτό αιτιολογείται ως εξής: Στην δεύτερη περίπτωση, όπου όλοι οι μετακινούμενοι επεξεργάζονται και ακολουθούν την ίδια πληροφόρηση πραγματικού χρόνου, κάνουν όλοι ταυτόχρονα τις ίδιες επιλογές με αποτέλεσμα οι χρήστες να συνεχίζουν να αντιμετωπίζουν συμφόρηση και αυξημένο κόστος

μετακίνησης. Το μεταφορικό σύστημα, στην προκειμένη περίπτωση (2) χαρακτηρίζεται από μειωμένη απόδοση, αφού ο συνολικός χρόνος μετακίνησης είναι σημαντικά αυξημένος. Έχει παρατηρηθεί, ωστόσο, ότι σε περιόδους χαμηλής ζήτησης η απόδοση του μεταφορικού συστήματος είναι περίπου ίδια και για τις δύο περιπτώσεις. Οι διαπιστώσεις αυτές αποδίδονται στο γεγονός ότι σε συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των χρηστών είναι έντονες, με αποτέλεσμα μικρές διαταράξεις στη φόρτιση του δικτύου να έχουν σημαντική επίδραση στην απόδοση του συστήματος. Από την άλλη μεριά, σε συνθήκες χαμηλής ζήτησης, όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των χρηστών δεν είναι έντονες, οι διαταράξεις στη φόρτιση του δικτύου δεν έχουν σημαντική επίδραση στην απόδοση του συστήματος, καθώς οι μετακινούμενοι μπορούν πιο εύκολα να αναγνωρίσουν τις βέλτιστες επιλογές μετακίνησης.

x. Συμφόρηση – Χρήση της γραμμής του Μετρό

Καταρχήν, όπως έχει προαναφερθεί, το υπο-δίκτυο του Μετρό δεν επηρεάζεται από τη συμφόρησή του. Ο χρόνος και το κόστος μετακίνησής του, δηλαδή, δεν επηρεάζονται από τον αριθμό των μετακινούμενων που το χρησιμοποιούν ανά χρονικό διάστημα (τον φόρτο του). Υπάρχει, ωστόσο, μία συσχέτιση μεταξύ της χρήσης του Μετρό και της συμφόρησης του οδικού δικτύου. Έχει παρατηρηθεί ότι σε ώρες αυξημένης μεταφορικής ζήτησης του οδικού δικτύου (ώρες συμφόρησης), η χρήση του Μετρό είναι αυξημένη και σε ώρες μη συμφόρησης, η χρήση του Μετρό είναι μειωμένη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο προαναφερόμενο λόγο, ότι, δηλαδή, το Μετρό δεν επηρεάζεται από τη συμφόρησή του και, συνεπώς, δεν έχει καθυστερήσεις.

Σημείωση: Όλα τα παραπάνω σχόλια τεκμηριώνονται από αντίστοιχα διαγράμματα, τα οποία παρατίθενται στην παράγραφο 4.5.

3.3 Προσέγγιση στη δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών-υποθέσεις

Το παρόν πρότυπο αναζητά μία δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών και όχι μία βέλτιστη λύση του συστήματος. Αυτό οφείλεται στην παραδοχή του προτύπου ότι οι χρήστες επιλέγουν με βάση το *ατομικό τους συμφέρον*. Οι χρήστες, δηλαδή, δεν διέπονται από αλτρουιστικό ορθολογισμό, αλλά επιλέγουν με σκοπό τη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας για τους ίδιους. Στην κατάσταση αυτή της ισορροπίας, οι αντιληπτοί χρόνοι μετακίνησης όλων των χρησιμοποιούμενων διαδρομών είναι ίσοι και ελάχιστοι. Αντίθετα, στη βέλτιστη κατάσταση όσον αφορά στο σύστημα, ο συνολικός χρόνος μετακίνησης είναι ελάχιστος.

Το παρόν πρότυπο αποδίδει μία προσέγγιση της δυναμικής στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών. Αυτό οφείλεται στις παρακάτω παραδοχές, οι οποίες το χαρακτηρίζουν:

- i. Οι χρήστες προβαίνουν σε *λογικές και σωστές* επιλογές, ώστε να επιδιώκουν συνειδητά το ατομικό τους συμφέρον, δηλαδή τη μεγιστοποίηση της αντιληπτής χρησιμότητας.
- ii. Το πρότυπο αναγνωρίζει ότι οι χρήστες είναι *καλά* αλλά όχι τέλεια ενημερωμένοι. Με άλλα λόγια, οι χρήστες έχουν μυωπική αντίληψη των τρεχουσών κυκλοφοριακών συνθηκών, για αυτό και χρησιμοποιείται ο όρος ‘αντιληπτοί χρόνοι μετακίνησης’-στοχαστικότητα του προτύπου.
- iii. Το ποσοστό των χρηστών, που επεξεργάζεται πληροφόρηση πραγματικού χρόνου, είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό των χρηστών που επιλέγουν με βάση την εμπειρία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι χρήστες οι οποίοι είναι *ευαίσθητοι*, όσον αφορά στις επιλογές τους, στις μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες να είναι λίγοι, που σημαίνει ότι η πιθανότητα να διαφοροποιούνται οι επιλογές των χρηστών από μέρα σε μέρα είναι σχετικά μειωμένη.
- iv. Η ισορροπία αναφέρεται στη σταθεροποίηση της συμπεριφοράς/των επιλογών των χρηστών από μέρα σε μέρα. Η ισορροπία αυτή οφείλεται σε σημαντικό βαθμό στη *διαδικασία εκμάθησης*, με την οποία οι εμπειρίες της προηγούμενης ημέρας των χρηστών επηρεάζουν τις προσδοκίες και τις επιλογές τους σε επόμενες περιόδους. Οι συγκεκριμένοι χρήστες τροποποιούν τις επιλογές τους με βάση την εμπειρία της προηγούμενης ημέρας, με αποτέλεσμα από κάποια μέρα και μετά να είναι ευχαριστημένοι με τις επιλογές τους. Οι επιλογές αυτές σταθεροποιούνται από το σημείο αυτό και μετά και εξασφαλίζεται έτσι η δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών.
- v. Οι ίδιοι χρήστες χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο δίκτυο κάθε μέρα, με αποτέλεσμα οι χρήστες να *μαθαίνουν* αλλά και να μην διαφοροποιούνται δραματικά οι κυκλοφοριακές συνθήκες από μέρα σε μέρα.
- vi. Πρέπει να εξασφαλισθεί μία *ισορροπία* ανάμεσα στην ανάγκη, που απαιτεί η αντίληψη των τρεχουσών κυκλοφοριακών συνθηκών να είναι αρκετά *ακριβής* ώστε να βελτιστοποιούνται οι επιλογές των χρηστών, και στην ανάγκη, που απαιτεί οι χρήστες να *μην είναι υπερβολικά ευάλωτοι* στις αλλαγές των συνθηκών αυτών. Η εξισορρόπηση αυτή των δύο αναγκών είναι θεμελιώδης προϋπόθεση για την εξασφάλιση της δυναμικής στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών.

Σημειώνεται ότι αν όλοι οι χρήστες είχαν πρόσβαση στην ίδια πληροφόρηση πραγματικού χρόνου και την επεξεργάζονταν με τον ίδιο τρόπο, τότε θα είχαν παρόμοια συμπεριφορά.

Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα η συμμόρφωση να συνέχιζε να υπάρχει και στις νέες επιλογές τους, οι χρήστες δεν θα έμεναν ικανοποιημένοι με τις επιλογές τους και οι τελευταίες δεν θα σταθεροποιούνταν. Η ισορροπία, συνεπώς των χρηστών θα συνέβαινε πολύ αργότερα ή και καθόλου.

Το πρότυπο, παρόλο τις εκτενείς παραδοχές/υποθέσεις του, είναι αποδοτικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι περιγράφει την εξέλιξη ενός μεταφορικού συστήματος προς μία δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών και προσεγγίζει την ισορροπία αυτή. Η ισορροπία αυτή, χάρη στη σταθερότητά της, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν στο μεταφορικό σύστημα (διαχείριση κυκλοφορίας, πρόβλεψη μελλοντικών φόρτων και κυκλοφοριακών συνθηκών γενικότερα, εκπομπές καυσαερίων κ.α.). Άλλωστε, τυπικά, όλα τα μοντέλα είναι αφαιρετικές απεικονίσεις της πραγματικότητας. Το κρίσιμο ερώτημα είναι εάν παρέχουν αποτελέσματα που είναι ρεαλιστικά και αξιοποιήσιμα στην εκάστοτε περιοχή ενδιαφέροντος.

3.4 Σχολιασμός προτύπου με βάση τη θεωρία του βέλτιστου ελέγχου

Το προτεινόμενο πρότυπο, επιδιώκει την αναπαράσταση της δυναμικής εξέλιξης της λειτουργίας ενός ρεαλιστικού δικτύου, με βάση το σχήμα του βέλτιστου ελέγχου (σχ. 3.4). Με άλλα λόγια, με τον τρόπο αυτό, προτυποποιείται δυναμικά η εξέλιξη της λειτουργίας του μεταφορικού πεδίου.

Πρόκειται για μία περίπτωση δυναμικού στοχαστικού βέλτιστου ελέγχου διακριτού χρόνου. Ο έλεγχος χαρακτηρίζεται ως στοχαστικός, καθώς οι επιλογές των χρηστών και των δύο κλάσεων (ανάδραση/ συμπεριφορά των χρηστών) εξαρτώνται από το πως οι χρήστες αντιλαμβάνονται τις αντίστοιχες κυκλοφοριακές συνθήκες. Επειδή στην αντίληψη αυτή ενυπάρχει το τυχαίο σφάλμα, υπολογίζονται οι πιθανότητες κάθε εναλλακτικής επιλογής. Επιπρόσθετα, ο έλεγχος χαρακτηρίζεται ως δυναμικός, καθώς οι χρήστες αναθεωρούν τις αποφάσεις τους σε κάθε διάστημα ελέγχου t . Επίσης, ο έλεγχος χαρακτηρίζεται ως βέλτιστος, καθώς οι χρήστες αποσκοπούν σε κάθε διάστημα ελέγχου t να βελτιστοποιούν τις επιλογές τους, διαλέγουν, δηλαδή, την εναλλακτική επιλογή με τη μέγιστη αντιληπτή χρησιμότητα. Τέλος, ο βέλτιστος έλεγχος είναι διακριτού χρόνου, καθώς η χρονική περίοδος μελέτης είναι διαιρεμένη σε ίσα διακριτά χρονικά διαστήματα ελέγχου.

Τα δυναμικά μεταφορικά συστήματα, όπως αυτά των αστικών μεταφορικών δικτύων, περιγράφονται από επαναληπτικές εσωτερικές σχέσεις ανάμεσα στους χρήστες και στις υπάρχουσες κυκλοφοριακές συνθήκες. Οι χρήστες, σε κάθε χρονικό διάστημα ελέγχου t , κάνουν τις επιλογές τους στηριζόμενοι στην πληροφόρηση σχετικά με τις συνθήκες του

δικτύου, οι οποίες και αυτές διαμορφώνονται με βάση τις επιλογές των χρηστών και ο βρόγχος κλείνει. Πρόκειται, λοιπόν για ένα σχήμα Βέλτιστου Ελέγχου κλειστού βρόγχου.

Συνεχίζοντας, οι χρήστες του μεταφορικού δικτύου αποκρίνονται στις υπάρχουσες κυκλοφοριακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, οι μετακινούμενοι επιλέγουν ώρα αναχώρησης, μέσο και διαδρομή με βάση το πότε επιθυμούν να φθάσουν στον προορισμό τους και τις κυκλοφοριακές συνθήκες που λαμβάνουν υπόψη. Η ανάδραση των χρηστών όλων των ομάδων παρέχει τη φόρτιση του δικτύου σε κάθε χρονικό διάστημα. Με τον τρόπο αυτό, δηλαδή, με βάση τις κυκλοφοριακές συνθήκες και τις επιλογές των χρηστών στο τρέχον χρονικό διάστημα, διαμορφώνονται οι κυκλοφοριακές συνθήκες (χρόνοι μετακίνησης συνδέσμων-διαδρομών, κόστη μετακίνησης κ.α.) στο επόμενο χρονικό διάστημα και έτσι η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε χρονικό διάστημα της περιόδου μελέτης.

Δεν πρέπει, επίσης, να παραληφθεί ότι το παρόν πρότυπο αποδίδει μια προσέγγιση μίας δυναμικής στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών. Από ένα σημείο και μετά, δηλαδή, οι επιλογές των χρηστών σταθεροποιούνται και εξασφαλίζεται, τότε, η βέλτιστη λύση ή η ισορροπία των χρηστών. Υπό συνθήκες ισορροπίας, οι μετακινούμενοι συνεχίζουν να ελέγχουν ποια εναλλακτική επιλογή αντιλαμβάνονται ως βέλτιστη, αλλά οι επιλογές σταθεροποιούνται, εφόσον, βέβαια, οι εξωτερικές επιδράσεις του μεταφορικού δικτύου παραμένουν αμετάβλητες.

Στο σημείο αυτό, κρίνεται απαραίτητο να γίνει ένας διαχωρισμός μεταξύ των δύο εννοιών του μαθηματικού προτύπου και της στρατηγικής ελέγχου. Ένα μαθηματικό πρότυπο μίας διαδικασίας αποτελείται από ένα σύνολο εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν, με μεγάλη ή μικρή ακρίβεια, τη συμπεριφορά της διαδικασίας. Ένα μαθηματικό πρότυπο, συνεπώς, το οποίο λαμβάνει υπόψη κάποια δεδομένα εισόδου και κάποιες εξωτερικές επιδράσεις, χρησιμοποιείται για να υπολογίσει/εκτιμήσει τα αποτελέσματά του. Για παράδειγμα, ένα κυκλοφοριακό πρότυπο (όπως στην προκειμένη περίπτωση) μπορεί να λαμβάνει υπόψη τη συμπεριφορά των μετακινούμενων, τη μεταφορική ζήτηση, διάφορα συμβάντα, τις περιβαλλοντικές συνθήκες κ.α. και να υπολογίζει τους χρόνους ή τα κόστη μετακίνησης που αντιστοιχούν στους συνδέσμους του δικτύου (Papageorgiou, 1999).

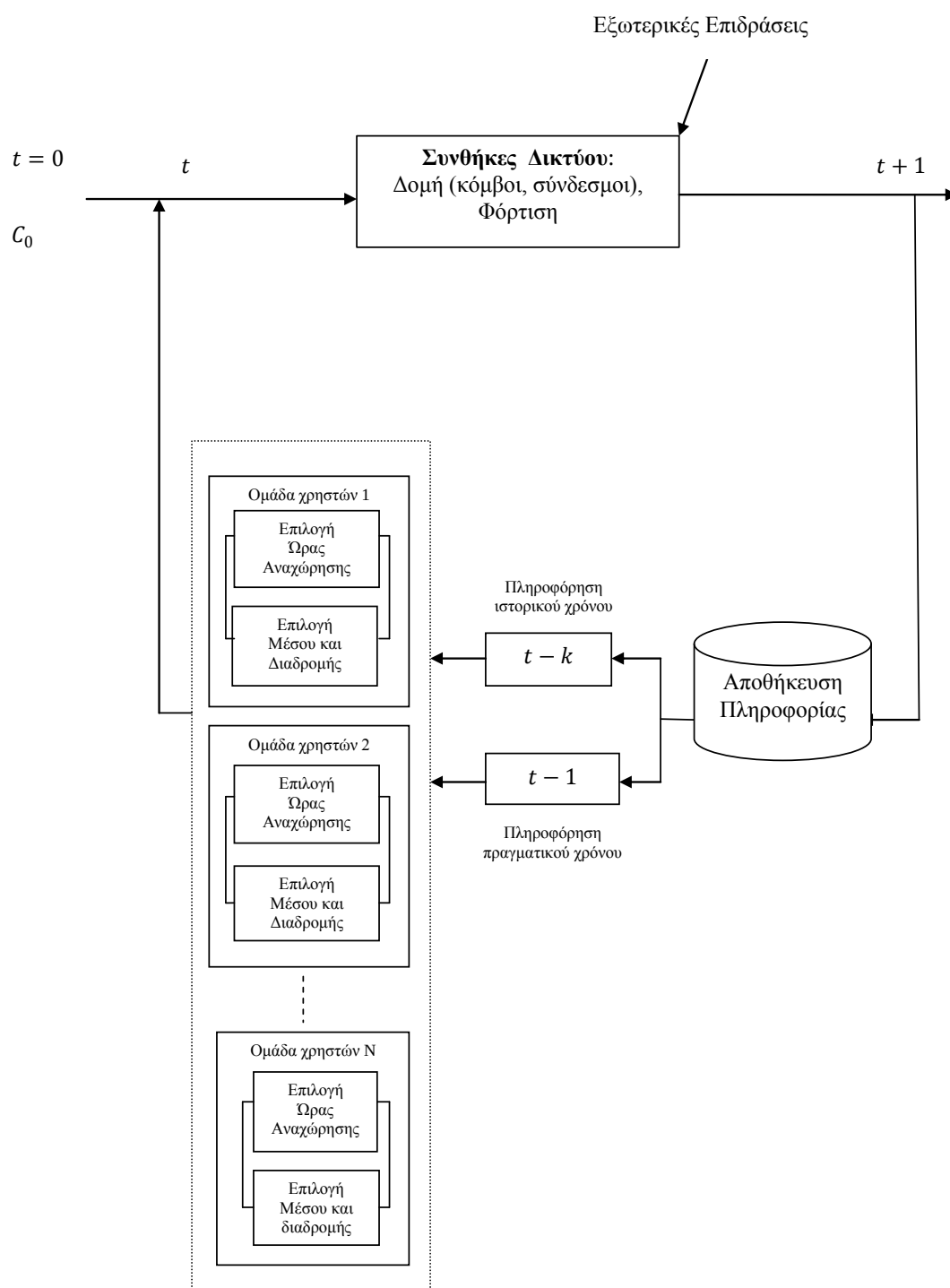
Αξίζει να σημειωθεί ότι για την ίδια διαδικασία μπορεί να υπάρχουν διάφορα χρήσιμα πρότυπα με διαφορετικά επίπεδα ανάλυσης, ακρίβειας και πολυπλοκότητας. Για παράδειγμα, για την περίπτωση της κυκλοφοριακής ροής σε αστικά δίκτυα, τα υπάρχοντα πρότυπα είναι μικροσκοπικά ή μακροσκοπικά, στατικά ή δυναμικά, στοχαστικά ή ντετερμινιστικά. Τα δυναμικά πρότυπα περιγράφουν την εξέλιξη με τον χρόνο της αντίστοιχης διαδικασίας (Papageorgiou, 1999).

Από την άλλη μεριά, η στρατηγική ελέγχου είναι ένας αλγόριθμος που υπολογίζει τις αποφάσεις από τον έλεγχο σε κάθε χρονικό διάστημα t . Η στρατηγική ελέγχου υπολογίζει τα

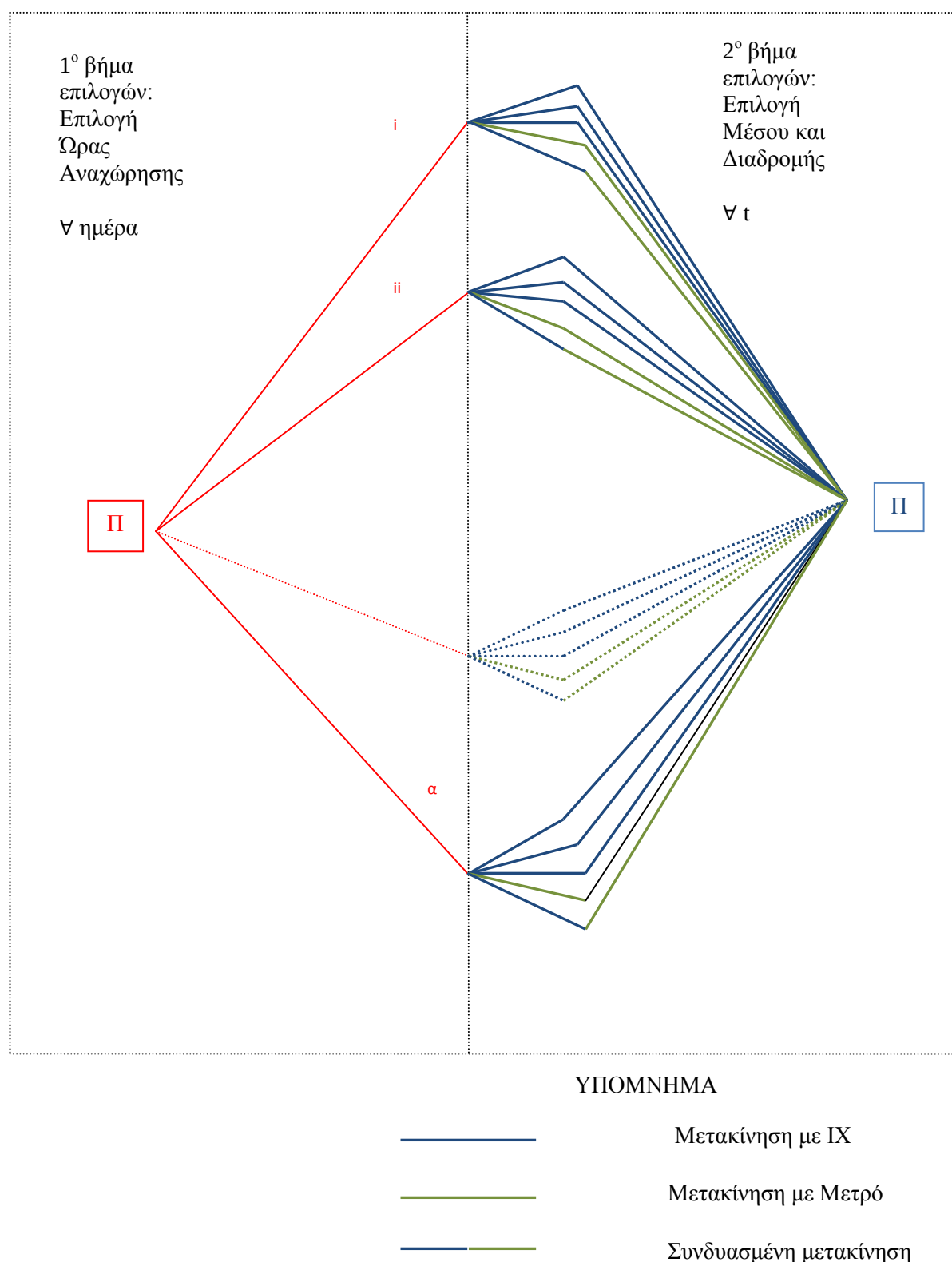
δεδομένα εισόδου στο μαθηματικό πρότυπο, που σχολιάστηκε παραπάνω. Στρατηγικές ελέγχου αποτελεί η φωτεινή σηματοδότηση, η σήμανση, η τιμολόγηση της συμφοράς κ.α.

Στο παρόν πρότυπο, το μαθηματικό πρότυπο αφορά στις κυκλοφοριακές συνθήκες που χαρακτηρίζουν το δίκτυο. Ο βέλτιστος έλεγχος ασκείται από τους χρήστες του δικτύου. Η στρατηγική αυτή του βέλτιστου ελέγχου υπολογίζει τις αποφάσεις των χρηστών, όσον αφορά στην επιλογή ώρας αναχώρησης και διαδρομής, και κατ' επέκταση τις κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου σε κάθε χρονικό διάστημα t . Τα προηγούμενα αποτελούν και τα δεδομένα εισόδου στο κυκλοφοριακό πρότυπο, από το οποίο υπολογίζονται οι κυκλοφοριακές συνθήκες για το αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα. Στις εξωτερικές επιδράσεις ανήκει η μεταφορική ζήτηση, το ημερήσιο μητρώο της ζήτησης για κάθε ζεύγος προέλευσης-προορισμού, τα συμβάντα (προβλέψιμα ή μη), οι περιβαλλοντικές συνθήκες κ.α. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι προβλέψιμα συμβάντα είναι μελλοντικά γεγονότα με αναμενόμενη όχληση, π.χ. η αυξημένη κυκλοφορία από ένα στάδιο μετά από κάποιο αγώνα, ενώ τα μη προβλέψιμα συμβάντα είναι, για παράδειγμα τα ατυχήματα, οι βλάβες οχημάτων, η παράνομη στάθμευση κ.λπ. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τις κυκλοφοριακές συνθήκες (χρόνοι μετακίνησης συνδέσμων-διαδρομών, κόστη μετακίνησης κ.α.), καθώς είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τις υπηρεσίες των μεταφορών.

Σε γενικές γραμμές, το προτεινόμενο πρότυπο, το οποίο περιγράφει ένα αστικό δίκτυο συνδυασμένων μετακινήσεων, βασίζεται σε μία δομή βέλτιστου ελέγχου διακριτού χρόνου (σχ. 3.1). Σύμφωνα με το συγκεκριμένο σχήμα, οι χρήστες και των δύο ομάδων συμπεριφέρονται με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιστοποιούν τις επιλογές τους. Οι χρήστες, με τις επιλογές τους, προσαρμόζονται αλλά και διαμορφώνουν τις συνθήκες της κυκλοφορίας.



Σχήμα 3.4: Σχήμα Βέλτιστου Ελέγχου



ΣΧΗΜΑ 3.5: Σύνολο Βηματικών Δυναμικών Επιλογών των Χρηστών

Το σχήμα 3.5 περιγράφει τη στρατηγική των δυναμικών επιλογών των χρηστών. Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι το σύνολο των επιλογών αποτελείται από δύο βήματα, το πρώτο βήμα της επιλογής ώρας αναχώρησης και το δεύτερο της επιλογής διαδρομής.

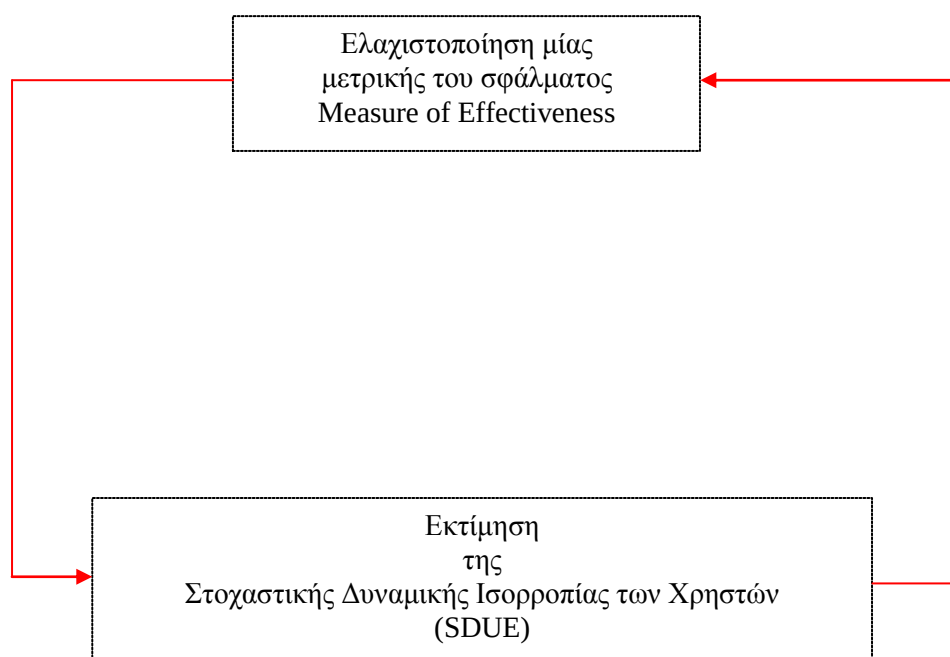
Η επιλογή της ώρας αναχώρησης γίνεται πρώτη, για κάθε ημέρα, ενώ η επιλογή διαδρομής ακολουθεί και γίνεται για κάθε διάστημα της περιόδου μελέτης. Στην πράξη, λόγω αυτής της χρονικής αλληλουχίας των δύο επιλογών, εκτιμάται πρώτα η πιθανότητα επιλογής ώρας αναχώρησης από το σύνολο των a εναλλακτικών επιλογών της μίας μέρας και ακολουθεί η πιθανότητα επιλογής διαδρομής από το σύνολο των τριών εναλλακτικών διαδρομών για κάθε ζεύγος προέλευσης-προορισμού. Ωστόσο, στο πρότυπο Logit, τα δύο αυτά βήματα θεωρούνται ότι γίνονται ταυτόχρονα. Για το λόγο αυτό, το παρόν πρότυπο Logit ονομάζεται Πολυωνυμικό (Multinomial) και όχι Ιεραρχικό (Hierarchical). Επειδή η πιθανότητα επιλογής διαδρομής υπολογίζεται δεδομένης της ώρας αναχώρησης, η πιθανότητα αυτή είναι μία δεσμευμένη πιθανότητα.

Με αναφορά στο παρόν πρότυπο μπορούν να ειπωθούν τα παρακάτω: Με το πρότυπο Logit, υπολογίζεται η πιθανότητα επιλογής ενός συνδυασμού ώρας αναχώρησης και διαδρομής από το σύνολο των $a \times n$ εναλλακτικών συνδυασμών, ως η πιθανότητα η αντιληπτή χρησιμότητα που αντιστοιχεί στη συνδυασμένη επιλογή να είναι η μεγαλύτερη από αυτές που αντιστοιχούν στις εναλλακτικές συνδυασμένες επιλογές, όπου a , ο αριθμός των ίσων διακριτών χρονικών διαστημάτων που περιλαμβάνει η περίοδος μελέτης και n , ο αριθμός των εναλλακτικών διαδρομών που ενώνουν κάθε ζεύγος Προέλευσης-Προορισμού. Με τον όρο ‘συνδυασμένη επιλογή’ εννοείται η επιλογή ώρας αναχώρησης και διαδρομής, η τομή, δηλαδή, των δύο αυτών διακριτών επιλογών.

Συνοπτικά μπορούν να σημειωθούν τα εξής: Με βάση τις πιθανότητες των επιλογών των χρηστών, το σύνολο των μετακινούμενων καταμερίζεται σε ώρες αναχώρησης και διαδρομές. Συνεχίζοντας, οι επιλογές των χρηστών προτυποποιούνται σαν ένα επαναλαμβανόμενο ‘παίγνιο’ με μνήμη. Σε κάθε επανάληψη του ‘παιγνίου’ αυτού, οι χρήστες προσαρμόζουν τις επιλογές τους ανάλογα με τις προβλέψεις σχετικά με τη συμπεριφορά όλων των άλλων χρηστών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του γενικευμένου κόστους μετακίνησης, που αντιστοιχεί στη δική τους επιλογή. Με αυτήν την αντίληψη της διαδικασίας επιλογής από τους χρήστες, είναι δυνατό να θεωρηθούν ενδογενείς μακροπρόθεσμες αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της συμπεριφοράς των υπολοίπων χρηστών σε κάθε χρήστη. Με άλλα λόγια, διερευνάται η εξέλιξη της συμπεριφοράς των χρηστών σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον (μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες) βασισμένη στην ιστορία του κόστους μετακίνησης. Η ιστορία του κόστους μετακίνησης υπάρχει στο μεταφορικό σύστημα ως πληροφόρηση, εμπειρία ή φήμη.

3.5 Βαθμονόμηση του προτύπου

Στο συγκεκριμένο στάδιο επιχειρείται η βελτίωση/διόρθωση του προτύπου, ώστε οι εκτιμήσεις του προτύπου να είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες εμπειρικές παρατηρήσεις. Με τη διαδικασία αυτή, τα αποτελέσματα του προτύπου αποκτούν ρεαλισμό και ποιότητα. Η βελτίωση αυτή του προτύπου αποτελεί μία διαδικασία βελτιστοποίησης δύο επιπέδων. Πρόκειται, δηλαδή, για έναν προγραμματισμό δύο επιπέδων (Bi-Level Programming), όπως περιγράφεται από το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.6: Προγραμματισμός δύο επιπέδων για τη βελτίωση του προτύπου

Τα δύο επίπεδα της βελτίωσης του προτύπου περιγράφονται παρακάτω:

Στο ένα επίπεδο ελαχιστοποιείται το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error-MAE), ως ένας δείκτης απόδοσης του προτύπου (Measure of Effectiveness), μια μετρική του σφάλματος που αποδίδει την απόσταση των εκτιμήσεων του προτύπου από τις αντίστοιχες μετρήσεις. Ο τύπος της ελαχιστοποίησης του MAE δίνεται ως εξής:

$$\text{Min}[Er] = \text{Min}[MAE] = \text{Min} \left[\sum_{t,i} \frac{|x_i^t - \hat{x}_i^t|}{t} \right] \quad (3.57)$$

όπου:

i : θέση μέτρησης,

t : μία ημέρα (στην οποία έχει επιτευχθεί η δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών),

Y_i^t : ωριαία παρατήρηση της ημέρας t στη θέση μέτρησης i ,

X_i^t : ωριαία εκτίμηση του προτύπου, της ημέρας t στη θέση μέτρησης i .

Με την ελαχιστοποίηση του συγκεκριμένου σφάλματος, επιτυγχάνεται το καλύτερο ταίριασμα των αποτελεσμάτων του προτύπου με τα εμπειρικά δεδομένα. Ας σημειωθεί ότι υπάρχουν και άλλα μέτρα του σφάλματος, αλλά στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα, το οποίο (με την ελαχιστοποίησή του) βελτιώνει το πρότυπο σε ικανοποιητικό βαθμό.

Στο άλλο επίπεδο, εκτιμάται η δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών. Ειδικότερα, σε κάθε δοκιμή, επιλέγονται κάποιες τιμές συγκεκριμένων παραμέτρων και υπολογίζονται για αυτές οι φόρτοι που αντιστοιχούν στην DSUE. Με δεδομένους τους φόρτους στην DSUE και τις αντίστοιχες μετρήσεις, υπολογίζεται το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE) που αντιστοιχεί σε κάθε δοκιμή.

Έπειτα, ελέγχεται ποια δοκιμή αντιστοιχεί στο ελάχιστο σφάλμα. Οι τιμές των παραμέτρων που αντιστοιχούν σε αυτή τη δοκιμή είναι οι κατάλληλοι. Με αυτή τη διαδικασία προκύπτει το βαθμονομημένο πρότυπο.

Το παραπάνω σχήμα περιγράφει, συνεπώς, αυτή ακριβώς τη διαδικασία. Σύμφωνα με αυτή συμβαίνουν τα εξής: Με δεδομένη τη DSUE κάθε δοκιμής υπολογίζεται το αντίστοιχο MAE και στο τέλος επιλέγεται η δοκιμή που δίδει το ελάχιστο, μεταξύ των δοκιμών, σφάλμα.

3.6 Επανεκτίμηση της ζήτησης

Κατά τη διαδικασία αυτή, οι κατάλληλες παράμετροι του προτύπου έχουν ήδη προσδιοριστεί. Η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθεί και αυτή το σχήμα του προγραμματισμού/της βελτιστοποίησης δύο επιπέδων. Στο ένα επίπεδο ελαχιστοποιείται το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα μεταξύ εκτιμήσεων και παρατηρήσεων και στο άλλο επίπεδο, βελτιστοποιούνται οι επιλογές των χρηστών, προσδιορίζονται δηλαδή οι φόρτοι σε συνθήκες δυναμικής στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών. Τα δύο αυτά επίπεδα είναι αλληλένδετα, καθώς με βάση το ένα υπολογίζεται το άλλο μέγεθος.

Σε κάθε δοκιμή, το συνολικό ημερήσιο μητρώο της ζήτησης για κάθε ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού μεταβάλλεται με κάποιο βήμα. Σε κάθε δοκιμή, εκτιμώνται οι φόρτοι των συνδέσμων στη δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών και με βάση τους φόρτους αυτούς και τις αντίστοιχες μετρήσεις εκτιμάται το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα. Και στη διαδικασία αυτή επιλέγεται η δοκιμή με το ελάχιστο Μέσο Απόλυτο Σφάλμα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το βαθμονομημένο πρότυπο μπορεί να έχει και άλλες χρήσεις, εκτός της εκτίμησης της ζήτησης για μετακίνηση. Άλλες χρήσεις μπορεί να είναι η εκτίμηση:

- των στρεφουσών κινήσεων,
- των περιβαλλοντικών επιπτώσεων,
- των επιπτώσεων ενός ατυχήματος στην κυκλοφορία και του πόσο γρήγορα πρέπει να γίνει παρέμβαση για την εκκαθάριση του ατυχήματος,
- των επιπτώσεων της εφαρμογής διαφόρων στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας,
- του τι θα συνέβαινε αν σταματούσε η χρήση ενός τμήματος (για παράδειγμα) του μεταφορικού δικτύου κ.α.

3.7 Αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος βαθμονόμησης και επανεκτίμησης της ζήτησης

Ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος της βαθμονόμησης και επανεκτίμησης της ζήτησης έχει ως εξής:

Αν A το σύνολο των μεταβλητών, τότε σε κάθε δοκιμή αυξάνονται και μειώνονται οι τιμές των μεταβλητών του συνόλου A , με κάποιο σταθερό βήμα και υπολογίζεται το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) για κάθε δοκιμή. Επειδή και τα δύο παραπάνω προβλήματα εμπεριέχουν ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης του σφάλματος, όπως προαναφέρθηκε, επιλέγεται η δοκιμή με το ελάχιστο σφάλμα. Σταδιακά, λοιπόν, προσεγγίζεται η ελάχιστη τιμή του MAE που αντιστοιχεί στη δοκιμή με τις κατάλληλες τιμές όλων των μεταβλητών του συνόλου A .

3.8 Περιορισμοί για την χρήση του προτύπου

Το συγκεκριμένο πρότυπο έχει τους περιορισμούς και τις υποθέσεις που χαρακτηρίζουν ένα ημιδυναμικό στοχαστικό πολυωνυμικό πρότυπο Logit. Στην πράξη, ένα τέτοιο πρότυπο πρέπει να εφαρμόζεται με πλήρη θεώρηση των παραδοχών του.

Καταρχήν, το παρόν πρότυπο είναι ημιδυναμικό (ή αλλιώς ψευδοδυναμικό). Παρόλο που εκτιμάται η μεταβολή της ζήτησης ως προς τον χρόνο (εδώ διαιρεμένος σε δεκαπεντάλεπτα), δεν υπάρχει ένα ρεαλιστικό και αναλυτικό δυναμικό και εξατομικευμένο κυκλοφοριακό πρότυπο για την εκτίμηση των καθυστερήσεων και συνεπώς του πραγματικού κόστους μετακίνησης. Για την εκτίμηση του χρόνου μετακίνησης κάθε συνδέσμου χρησιμοποιείται η συνάρτηση BPR, η οποία προσφέρει μία μη γραμμική προσέγγιση σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα πολύ ανώτερης τάξης. Παρόλο που στη συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται ο πραγματικός κυκλοφοριακός φόρτος του κάθε συνδέσμου για κάθε δεκαπεντάλεπτο,

υπολογίζεται, με τη βοήθεια αυτής, ο μέσος χρόνος μετακίνησης. Συνεπώς, στην πραγματικότητα, οι χρόνοι μετακίνησης μπορεί να έχουν σημαντικές αποκλίσεις από αυτούς που χρησιμοποιούνται στο παρόν πρότυπο. Η χρήση της συνάρτησης BPR χρησιμοποιείται κατά κανόνα σε στατικά πρότυπα και καθιστά, συνεπώς, το πρότυπο ημιδυναμικό.

Υπάρχουν και άλλοι περιορισμοί, όσον αφορά στο ρεαλισμό του προτύπου. Ένας από αυτούς είναι η υπόθεση ότι οι χρήστες δεν μπορούν να αναθεωρήσουν τις επιλογές τους κατά τη διάρκεια της μετακίνησης. Με άλλα λόγια, οι μετακινούμενοι δεν μπορούν να αλλάξουν διαδρομή μετά την επιλογή ώρας αναχώρησης και διαδρομής στην αρχή της μετακίνησης.

Επίσης, εκτιμούνται οι στιγμιαίοι (Instantaneous Travel Times) και όχι οι πραγματικοί χρόνοι μετακίνησης (Experienced Travel Times). Η συντομότερη διαδρομή, που στηρίζεται σε στιγμιαίους χρόνους μετακίνησης, έχει τον ελάχιστο χρόνο μετακίνησης που αποτελεί το άθροισμα των χρόνων των συνδέσμων, οι οποίοι αποτελούν τη διαδρομή, που επικρατούν κατά την αναχώρηση. Ο τρόπος αυτός εκτίμησης του χρόνου μετακίνησης, δε λαμβάνει υπόψη τη συμφόρηση που μπορεί να προκαλείται από τα οχήματα τα οποία αναχωρούν αργότερα από αυτά που αναχωρούν στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, αλλά εισέρχονται στον ίδιο σύνδεσμο στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Στη συνέχεια, θα αναφερθούν οι περιορισμοί που επιβάλλουν οι απλουστευτικές παραδοχές ενός προτύπου Logit. Η υπόθεση της *ανεξαρτησίας των όρων των τυχαίων σφαλμάτων* απαιτεί δύο εναλλακτικές επιλογές να θεωρούνται ανεξάρτητα από έναν λήπτη αποφάσεων, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη συσχέτιση που μπορεί να υπάρχει ανάμεσα τους. Με άλλα λόγια, η αναλογία των πιθανοτήτων δύο εναλλακτικών επιλογών είναι σταθερή και ανεξάρτητη του αριθμού και της συστηματικής χρησιμότητας των υπολοίπων εναλλακτικών επιλογών (Cascetta, 2001):

$$\frac{p[j]}{p[h]} = \exp\left(\frac{V_j}{\theta}\right) / \exp\left(\frac{V_h}{\theta}\right)$$

Η παραπάνω ιδιότητα μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να οδηγήσει σε αμφισβητούμενα αποτελέσματα. Έστω, για παράδειγμα, η περίπτωση της επιλογής ανάμεσα σε δύο εναλλακτικές διαδρομές **A** και **B** ίσης συστηματικής χρησιμότητας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η πιθανότητα επιλογής κάθε μίας εναλλακτικής, υπολογιζόμενη με το πρότυπο Logit, ισούται με 0.50 και η αναλογία μεταξύ των πιθανοτήτων επιλογών της **A** και **B** ισούται με ένα:

$$\frac{p[A]}{p[B]} = \frac{\exp\left(\frac{V_A}{\theta}\right)}{\exp\left(\frac{V_B}{\theta}\right)} = 1$$

Ας υποθεθεί ότι μία άλλη τρίτη εναλλακτική διαδρομή Γ προστίθεται στο σύνολο των εναλλακτικών επιλογών. Επίσης, η εναλλακτική διαδρομή Γ έχει ίση συστηματική χρησιμότητα και είναι όμοια με τη διαδρομή B . Οι διαδρομές B και Γ έχουν, δηλαδή, κάποιους κοινούς συνδέσμους και έχουν, συνεπώς, συσχέτιση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η αναλογία μεταξύ των πιθανοτήτων επιλογών της A και B παραμένει ίση με ένα. Ωστόσο, κάθε μία από τις τρεις εναλλακτικές διαδρομές θα έχει μία πιθανότητα να επιλεγεί ίση με $1/3$. Συνεπώς, η πιθανότητα επιλογής της διαδρομής A μειώνεται από 0.5 σε 0.33. Το αποτέλεσμα αυτό είναι μη ρεαλιστικό. Οι οδηγοί, είναι πιο πιθανόν, να επιλέγουν πρώτα ανάμεσα στις διαδρομές A και B ή Γ και μετά ανάμεσα στις διαδρομές B και Γ , οι οποίες συσχετίζονται, συνεπώς οι πιθανότητες επιλογής των τριών εναλλακτικών διαδρομών δεν είναι, συνήθως, ίσες. Ένα πιο ρεαλιστικό πρότυπο (π.χ. το πολυωνυμικό πρότυπο Probit) μπορεί να προκύψει, με την εισαγωγή μίας συνδιακύμανσης μεταξύ των τυχαίων όρων των εναλλακτικών διαδρομών B και Γ .

Ακολουθεί μια άλλη απλοποιητική παραδοχή του προτύπου Logit. Αυτή είναι η υπόθεση ότι οι όροι των τυχαίων σφαλμάτων της συνάρτησης χρησιμότητας είναι *όμοια καταναμεμημένοι* σύμφωνα με την κατανομή Gumbel. Η συγκεκριμένη υπόθεση έχει σαν συνέπεια την ίση διακύμανση στις εναλλακτικές επιλογές, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι σχετικές διαφορές του ντετερμινιστικού τμήματος (συστηματικός όρος) των χρησιμοτήτων των εναλλακτικών επιλογών.

Οι περιορισμοί του προτύπου, όσον αφορά στον υπολογισμό των αναλογιών των πιθανοτήτων επιλογής μεταξύ των εναλλακτικών διαδρομών που εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση, είναι πλέον γνωστές. Το πρότυπο Logit, ωστόσο, έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά, χάρη στην απλότητά του και επειδή μία αποτελεσματική μέθοδος επίλυσης έχει παρουσιαστεί από τον Dial (1971). Συμπερασματικά, στις εφαρμογές, το πρότυπο αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιείται με σαφώς ευδιάκριτες εναλλακτικές επιλογές, για τις οποίες οι υποθέσεις των ανεξάρτητων και όμοια καταναμεμημένων όρων των τυχαίων σφαλμάτων είναι εύλογες.

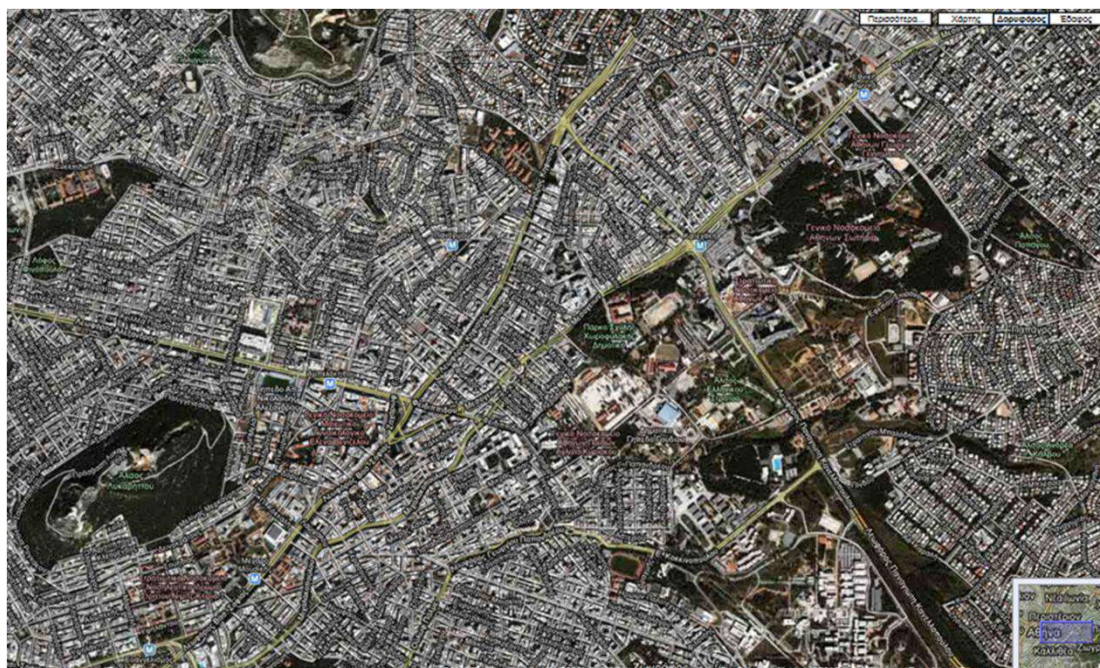
Επιπρόσθετα, το συγκεκριμένο πρότυπο δεν λαμβάνει υπόψη την ελαστικότητα της ζήτησης. Με άλλα λόγια, η ζήτηση δεν αποτελεί συνάρτηση του (αντιληπτού) κόστους μετακίνησης, παρόλο που επηρεάζεται έμμεσα από αυτό. Η ελαστικότητα της ζήτησης προσδίδει ρεαλισμό στο πρότυπο. Ωστόσο, η ζήτηση στο παρόν πρότυπο δεν επηρεάζεται άμεσα από το κόστος μετακίνησης αλλά έμμεσα. Ειδικότερα, οι μετακινούμενοι λαμβάνουν πληροφόρηση σχετικά με το κόστος μετακίνησης πραγματικού και παρελθοντικού χρόνου και με βάση αυτά, επιλέγουν ώρα αναχώρησης και διαδρομή. Με βάση την πιθανότητα επιλογής κάποιου συνδυασμού ώρας αναχώρησης και διαδρομής από το σύνολο των εναλλακτικών συνδυασμών επιλογών, η ημερήσια συνολική ζήτηση (που παραμένει σταθερή από μέρα σε μέρα) κατανέμεται στα διάφορα χρονικά διαστήματα και στις διάφορες

εναλλακτικές διαδρομές. Συνεπώς, η ζήτηση επηρεάζεται έμμεσα, μέσω του προτύπου, από το προηγούμενο αντιληπτό κόστος μετακίνησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

4.1 Περιοχή μελέτης

Το ημιδυναμικό στοχαστικό πρότυπο, που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, εφαρμόζεται σε ένα ρεαλιστικό δίκτυο. Το υπολογιστικό παράδειγμα του κεφαλαίου αυτού αναφέρεται σε ένα τμήμα της μητροπολιτικής περιοχής της Αττικής. Η περιοχή μελέτης που εξετάζεται φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχήμα 4.1: Περιοχή μελέτης, τμήμα της μητροπολιτικής περιοχής της Αττικής

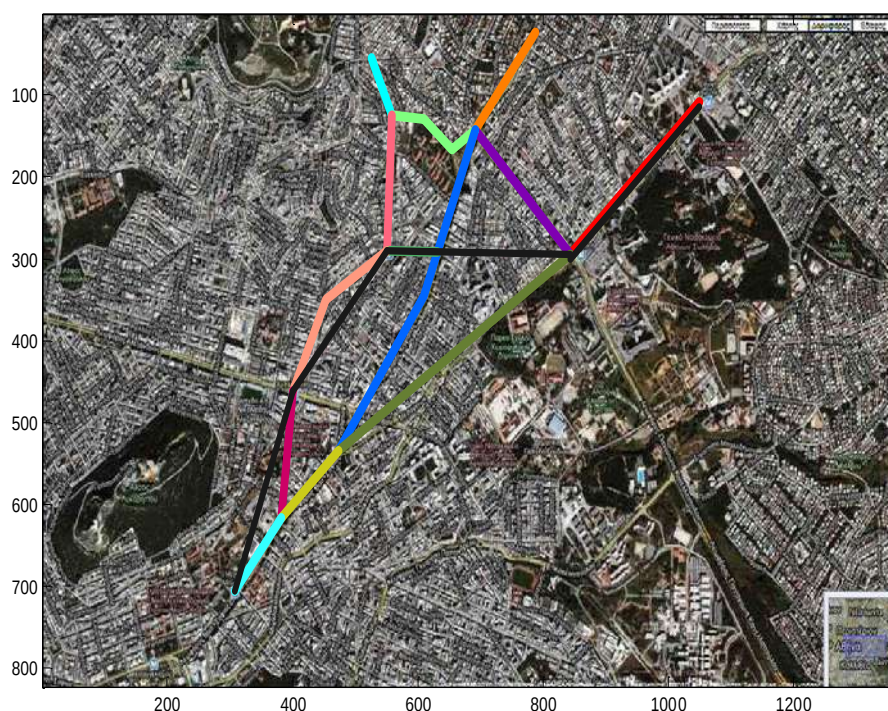
Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει ένα τμήμα κεντρικών αρτηριών και συλλεκτήριων οδών. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει ένα τμήμα της Λεωφόρου Βασιλίσσης Σοφίας, ένα μεγάλο τμήμα της Λεωφόρου Κηφισίας, της Μεσογείων, την Πανόρμου, την Κατεχάκη και άλλες μικρότερες οδούς. Το υπολογιστικό παράδειγμα, που θα ακολουθήσει, αναφέρεται τόσο στο οδικό αυτό δίκτυο της Αττικής όσο και σε ένα τμήμα του Μετρό. Περισσότερα για το δίκτυο θα αναφερθούν αμέσως παρακάτω, όπου περιγράφεται η κωδικοποίησή του.

4.2 Κωδικοποίηση του δικτύου

Με τον όρο ‘κωδικοποίηση του δικτύου’ εννοείται ο προσδιορισμός στον χάρτη των συνδέσμων και των κόμβων που απαρτίζουν το οδικό δίκτυο, περιλαμβάνοντας τα κρίσιμα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Οι κόμβοι παριστάνουν διασταυρώσεις και σημεία

απόκλισης και σύγκλισης λωρίδων. Οι σύνδεσμοι αντιστοιχούν στις φυσικές συνδέσεις των κόμβων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι σύνδεσμοι χωρίζονται σε μικρότερα τμήματα ώστε να παραστήσουν τις διάφορες αλλαγές στη γεωμετρία του οδικού δικτύου. Στο παρόν πρότυπο, ωστόσο, οι τελευταίες λεπτομέρειες δεν λαμβάνονται υπόψη και το δίκτυο περιλαμβάνει μεγάλους τομείς με τα κυρίαρχα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών. Για το λόγο αυτό, μπορεί να ειπωθεί ότι η κωδικοποίηση, που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρέχει χαμηλή, σχετικά, ανάλυση του πραγματικού δικτύου.

Το δίκτυο αυτό περιλαμβάνει τέσσερις ζώνες και, συνεπώς, τέσσερα κεντροειδή που αποτελούν τους κόμβους προέλευσης και προορισμού. Συγκεκριμένα, το παρόν δίκτυο έχει έναν μόνο κόμβο προορισμού, ο οποίος βρίσκεται επί της Λεωφόρου Β. Σοφίας και τρεις κόμβους προέλευσης, ο ένας επί της Μεσογείων, ο δεύτερος επί της Λεωφόρου Κηφισίας και ο τρίτος επί της οδού Ν. Φλώρου. Εκτός του οδικού αυτού δικτύου, εισάγεται και ένα τμήμα της γραμμής 3 του Μετρό και, συγκεκριμένα, οι σύνδεσμοι Μέγαρο Μουσικής-Αμπελόκηποι –Πανόρμου-Κατεχάκη. Στην παρακάτω δορυφορική εικόνα παρουσιάζεται το συγκεκριμένο δίκτυο:



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση και κωδικοποίηση του δικτύου

Στην εικόνα αυτή, κάθε σύνδεσμος παριστάνεται με διαφορετικό χρώμα. Με μαύρο χρώμα παριστάνονται οι υπόγειοι σύνδεσμοι του Μετρό.

Πρέπει να αναφερθεί ότι όλες οι μετακινήσεις κατευθύνονται προς το κέντρο της Αθήνας, έχουν, δηλαδή, κοινό σημείο προορισμού επί της Λεωφόρου Βασιλίσσης Σοφίας. Τα ζεύγη προέλευσης-προορισμού (Π-Π) είναι τρία και σε κάθε ένα από αυτά αντιστοιχούν τρεις διαδρομές. Συνολικά, δηλαδή, οι δυνατές διαδρομές που εξετάζονται είναι εννέα. Δύο από τις διαδρομές αυτές, για κάθε ζεύγος προέλευσης-προορισμού, αποτελούνται από συνδέσμους μόνο του οδικού δικτύου, ενώ η τρίτη διαδρομή αποτελείται από συνδέσμους του οδικού δικτύου και του Μετρό. Δεν πρέπει να παραληφθεί, ότι οι δυνατές διαδρομές, που συνδέουν τα τρία αυτά ζεύγη προέλευσης-προορισμού, είναι πολύ περισσότερες. Ωστόσο, επειδή η σαφής απαρίθμηση των διαδρομών αποτελεί ένα υπολογιστικά δύσκολο πρόβλημα, ιδίως για πραγματικά δίκτυα, επιλέχθηκαν οι τρεις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διαδρομές για κάθε ζεύγος Π-Π, για λόγους απλοποίησης του προβλήματος.

Παρακάτω, θα γίνει αναφορά σε διάφορα δεδομένα και παραμέτρους που χαρακτηρίζουν το δίκτυο. Καταρχήν, όπως έχει αναφερθεί, η εκτίμηση του χρόνου μετακίνησης κάθε συνδέσμου του δικτύου βασίζεται στη συνάρτηση BPR (Bureau of Public Roads) και υπολογίζεται ως εξής:

$$t_m = t_m^0 (1 + \beta (f_m / y_m)^\mu) \quad (4.1)$$

όπου t_m^0 είναι ο χρόνος μετακίνησης του συνδέσμου που αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερης ροής και β , μ είναι παράμετροι κλίμακας (εδώ $\beta = 0.15$ και $\mu = 3$). Επιπλέον, τα f_m και y_m συμβολίζουν τον κυκλοφοριακό φόρτο και την ικανότητα του συνδέσμου αντίστοιχα. Ο χρόνος ελεύθερης ροής κάθε συνδέσμου υπολογίζεται ως εξής:

$$t_m^0 = \frac{L}{V} \quad (4.2)$$

όπου L και V το μήκος και η ταχύτητα ελεύθερης ροής του συνδέσμου αντίστοιχα. Η ταχύτητα ελεύθερης ροής κυμαίνεται από 50 σε 80 km/hr. Η ταχύτητα ελεύθερης ροής των 80 km/hr αντιστοιχεί στις λεωφόρους.

Η κυκλοφοριακή ικανότητα κάθε συνδέσμου του οδικού δικτύου υπολογίζεται ως εξής:

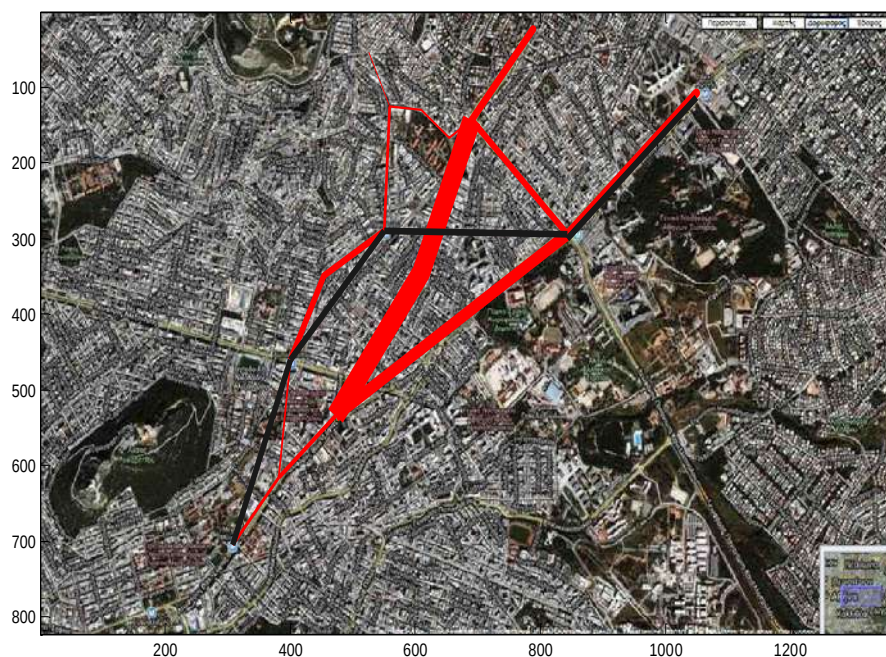
$$y_m = L K_a \ln \quad (4.3)$$

όπου K_a είναι η πυκνότητα της κυκλοφορίας και ισούται με $K_a = 240$ οχημ/km και $\ln$ είναι ο αριθμός των λωρίδων του συνδέσμου. Ο αριθμός των λωρίδων των συνδέσμων κυμαίνεται από 2 έως 5. Στην πραγματικότητα, ο αριθμός των λωρίδων και τα άλλα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται κατά μήκος των συνδέσμων. Ωστόσο, τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στο πρότυπο είναι σταθερά κατά μήκος των συνδέσμων, καθώς χρησιμοποιούνται αυτά που απαντιούνται στο μεγαλύτερο τμήμα αυτών.

Πίνακας 4.1: Κυκλοφοριακή Ικανότητα Οδών

Σύνδεσμος	L (km)	K_a (οχημ/km)	ln	y_m (οχήμ/15λεπτο)
1	1.1	240	3	792
2	0.6	240	5	720
3	0.9	240	3	648
4	0.3	240	2	144
5	0.6	240	2	288
6	0.7	240	2	336
7	1.7	240	5	2040
8	1.6	240	3	1152
9	0.3	240	2	144
10	0.9	240	3	648
11	0.6	240	2	288
12	0.5	240	4	480
13	0.4	240	4	384

Στην παρακάτω εικόνα, παριστάνονται οι σύνδεσμοι του οδικού δικτύου με κόκκινο χρώμα, με πάχος ανάλογο με την κυκλοφοριακή ικανότητα αυτών:



Σχήμα 4.3: Παρουσίαση της κυκλοφοριακής ικανότητας των συνδέσμων του οδικού δικτύου στο δίκτυο

Σημειώνεται ότι στο σχήμα 4.3, σε 1mm πάχος συνδέσμου του οδικού δικτύου αντιστοιχεί κυκλοφοριακή ικανότητα περίπου ίση με 530οχήμ/15λεπτο.

Όσον αφορά στους υπόγειους συνδέσμους του Μετρό, η κυκλοφοριακή ικανότητα αυτών δεν παριστάνεται στην παραπάνω εικόνα, γι' αυτό και δεν παριστάνονται με κόκκινο χρώμα.

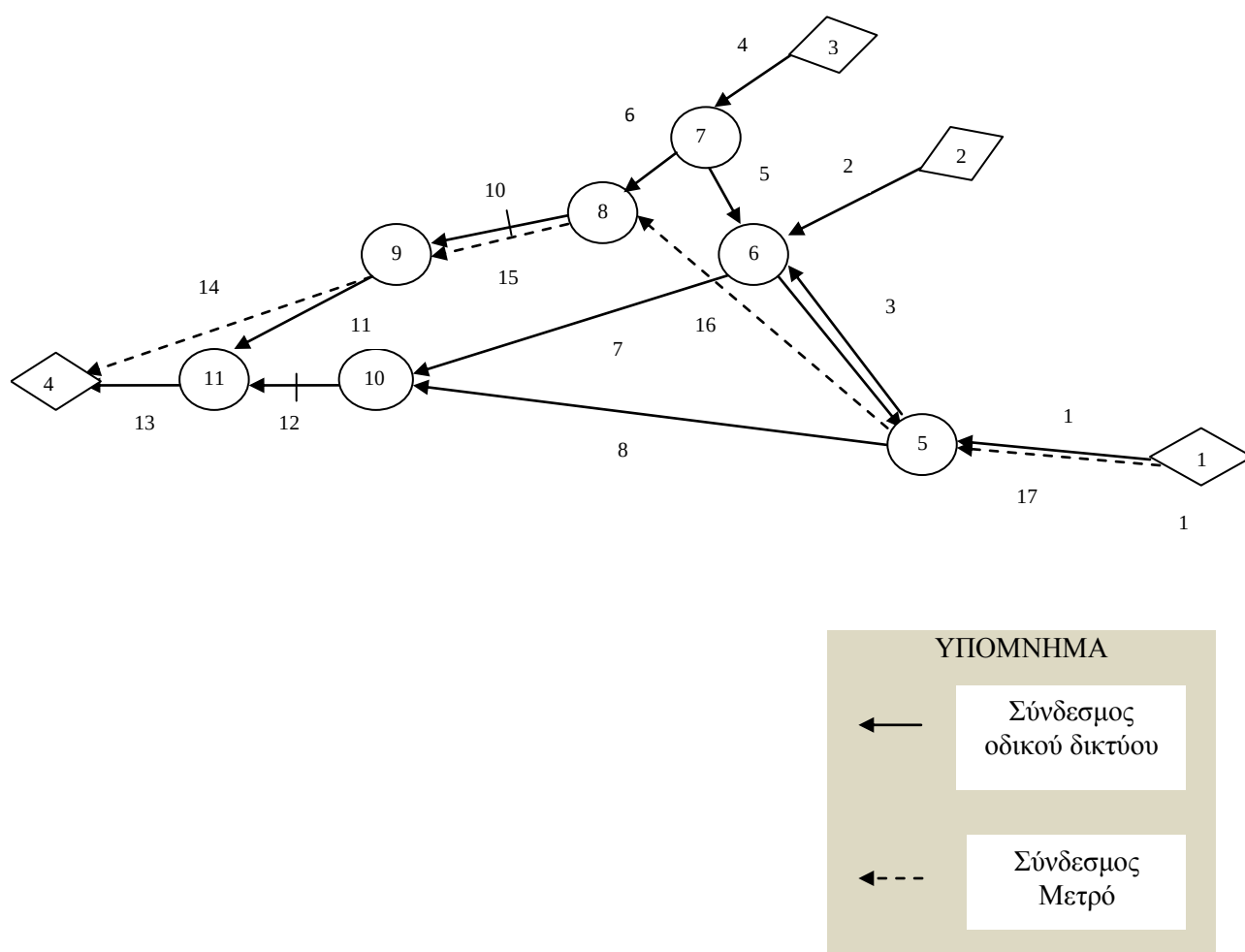
Για την κυκλοφοριακή ικανότητα κάθε συνδέσμου του Μετρό λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Κάθε συρμός μπορεί να μεταφέρει έως και 1062 επιβάτες
- Σε μία καθημερινή ημέρα, οι συρμοί διέρχονται κάθε 3 λεπτά
- Σε ένα δεκαπεντάλεπτο διέρχονται, συνεπώς, 5 συρμοί

Συμπερασματικά, η κυκλοφοριακή ικανότητα κάθε συνδέσμου του Μετρό ισούται περίπου με **5000 επιβ/15λεπτο**.

4.3 Δίκτυο Ανάλυσης

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το δίκτυο στο οποίο γίνεται η ανάλυση. Όπως έχει προαναφερθεί το δίκτυο αποτελεί ένα σύνολο κόμβων και συνδέσμων. Στο συγκεκριμένο σχήμα φαίνεται και η αρίθμηση αυτών των στοιχείων.



Σχήμα 4.4: Σχήμα συνδέσμων-κόμβων - Δίκτυο Ανάλυσης

Ο κυκλοφοριακός φόρτος έχει προσανατολισμό από την περιφέρεια προς το κέντρο της Αθήνας. Έτσι, ο κόμβος 4 είναι το Μέγαρο Μουσικής και οι κόμβοι 1, 2 και 3 είναι σημεία επί της Μεσογείων, της Λεωφόρου Κηφισίας και της οδού Νικολάου Φλώρου αντίστοιχα. Οι κόμβοι 1, 2 και 3 αποτελούν τους κόμβους προέλευσης, ενώ ο κόμβος 4 αποτελεί τον κόμβο προορισμού.

Παρακάτω, σημειώνονται οι σύνδεσμοι που ανήκουν στη κάθε μία διαδρομή. Σε κάθε ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού αντιστοιχούν τρεις εναλλακτικές διαδρομές.

Συνεπώς, οι δυνατές διαδρομές που εξετάζονται είναι εννέα. Ας σημειωθεί ότι το πρότυπο είναι βασισμένο στη διαδρομή και οι δυνατές διαδρομές απαριθμούνται με σαφήνεια εξαρχής.

Ζεύγος κόμβων προέλευσης προορισμού 1-4

Διαδρομές-Σύνδεσμοι

Διαδρομή 1: 1-8-12-13

Διαδρομή 2: 1-3-7-12-13

Διαδρομή 3: 17-16-15-14

Ζεύγος κόμβων προέλευσης προορισμού 2-4

Διαδρομές-Σύνδεσμοι

Διαδρομή 4: 2-7-12-13

Διαδρομή 5: 2-3-8-12-13

Διαδρομή 6: 2-3-16-15-14

Ζεύγος κόμβων προέλευσης προορισμού 3-4

Διαδρομές-Σύνδεσμοι

Διαδρομή 7: 4-5-7-12-13

Διαδρομή 8: 4-6-10-11-13

Διαδρομή 9: 4-6-15-14

4.4 Προσαρμογή προτύπου στο δειγματικό χώρο

Καταρχήν η χρονική περίοδος μελέτης της εξέλιξης της κυκλοφορίας στο συγκεκριμένο δειγματικό χώρο διαιρείται σε δεκαπεντάλεπτα, για να περιγραφούν με λεπτομέρεια και με δυναμικό τρόπο οι χρονικές διακυμάνσεις της κυκλοφορίας. Πρέπει, επίσης, να αναφερθεί ότι σε κάθε όχημα αντιστοιχεί ένας μετακινούμενος.

Το πρότυπο αναγνωρίζει δύο ομάδες χρηστών του οδικού δικτύου, οι οποίες διαφέρουν ως προς την αξία του χρόνου μετακίνησης και το είδος της πληροφόρησης την οποία λαμβάνουν. Ειδικότερα, οι μετακινούμενοι χωρίζονται σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα λαμβάνει πληροφόρηση ιστορικού χρόνου και η δεύτερη ομάδα δέχεται πληροφόρηση πραγματικού

χρόνου. Βέβαια πρέπει να αναφερθεί ότι κάθε ομάδα παρουσιάζει ομοιογένεια εντός αυτής και παρουσιάζει κάποια σαφή και διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις άλλες.

Η αξία του χρόνου μετακίνησης συμβολίζεται με $VOTT$ και σχετίζεται με το σκοπό μετακίνησης και το επίπεδο του εισοδήματος (ή αλλιώς την οικονομική κατάσταση) των μετακινούμενων. Υψηλό $VOTT$ αντιστοιχεί σε μετακινήσεις με σκοπό την εργασία και σε μετακινούμενους με υψηλό κατά κεφαλήν εισόδημα. Χαμηλό $VOTT$ αντιστοιχεί σε πιο ελαστικές μετακινήσεις. Οι μετακινούμενοι στην προκειμένη περίπτωση έχουν χαμηλό κατά κεφαλήν εισόδημα. Σημειώνεται ότι:

$$C = VOTT \times t \quad (4.4)$$

όπου C το κόστος και t ο αντίστοιχος χρόνος μετακίνησης.

Επιπρόσθετα, όσον αφορά στην *πληροφόρηση* που παρέχεται στους μετακινούμενους, αυτή είναι ιστορικού χρόνου ($k = 96$) για την πρώτη ομάδα και πραγματικού χρόνου ($k = 1$) για τη δεύτερη ομάδα. Ειδικότερα, η εξίσωση (3.14) περιλαμβάνει την εντός της ημέρας και την από μέρα σε μέρα δυναμική της διαδικασίας λήψης αποφάσεων από τους μετακινούμενους. Η τιμή του $k = 1$ δηλώνει ότι οι μετακινούμενοι επεξεργάζονται πληροφορίες που αντιστοιχούν στο αμέσως προηγούμενο δεκαπεντάλεπτο, περιγράφοντας την εντός της ημέρας δυναμική της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Η τιμή του $k = 96$ δηλώνει ότι οι μετακινούμενοι επεξεργάζονται πληροφορίες που αντιστοιχούν στο αντίστοιχο δεκαπεντάλεπτο της προηγούμενης ημέρας, περιγράφοντας την από μέρα σε μέρα δυναμική της διαδικασίας λήψης αποφάσεων από τους χρήστες (Dimitriou and Stathopoulos, 2008, Dimitriou and Tsekeris, 2008). Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι οι μετακινούμενοι της πρώτης ομάδας ($k = 96$), λαμβάνουν αποφάσεις σύμφωνα με την εμπειρία, ενώ οι μετακινούμενοι της δεύτερης ομάδας ($k = 1$), λαμβάνουν αποφάσεις σύμφωνα με τα δυναμικά συστήματα πληροφόρησης ως προς την ώρα αναχώρησης και τη διαδρομή (π.χ. ηλεκτρονικές πινακίδες, κατάλληλες ιστοσελίδες στο διαδίκτυο κ.λπ.).

Και στις δύο περιπτώσεις, οι χρήστες επεξεργάζονται τις πληροφορίες τις οποίες λαμβάνουν και ανάλογα με την ακρίβεια με την οποία τις αντιλαμβάνονται και το πότε θέλουν να φθάσουν στον προορισμό τους επιλέγουν τις βέλτιστες, κατ' αυτούς, διαδρομές και ώρες αναχώρησης. Η πληροφόρηση ιστορικού χρόνου αποτελεί ουσιαστικά την εμπειρία των χρηστών και αναφέρεται στους χρόνους μετακίνησης στην ίδια χρονική περίοδο της προηγούμενης ημέρας. Οι χρήστες, λοιπόν, της πρώτης ομάδας αντιλαμβάνονται τα κόστη μετακίνησης που έχουν βιώσει την προηγούμενη ημέρα, με κάποια όμως σφάλματα στην αντίληψη και σύμφωνα με αυτά κάνουν τις επιλογές τους. Από την άλλη μεριά, η πληροφόρηση πραγματικού χρόνου παρέχεται στους μετακινούμενους της δεύτερης ομάδας μέσω των δυναμικών συστημάτων πληροφόρησης (π.χ. μέσω διαδικτύου, από τα κινητά τηλέφωνα των χρηστών) και αναφέρεται στα κόστη μετακίνησης των διαδρομών στην

αμέσως προηγούμενη χρονική περίοδο. Τα λάθη που υπεισέρχονται στη συγκεκριμένη περίπτωση αφορούν στην εμπιστοσύνη που δείχνουν οι χρήστες σε αυτή και στο κατά πόσο δρουν σύμφωνα με αυτή. Επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι η πληροφόρηση πραγματικού χρόνου είναι έγκυρη και αξιόπιστη.

Μια άλλη σημαντική υπόθεση-παραδοχή συνιστά ότι η συνολική ημερήσια ζήτηση είναι σταθερή για όλες τις ημέρες της περιόδου μελέτης. Επίσης, σταθερή θεωρείται και η κατανομή της ζήτησης αφίξεως στον προορισμό για κάθε ημέρα. Δεν πρέπει, επίσης, να παραλειφθεί ότι η πρώτη ομάδα αποτελεί το 80% της συνολικής ζήτησης για κάθε ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού του δικτύου σε κάθε χρονική στιγμή και η δεύτερη ομάδα αποτελεί το υπόλοιπο 20%.

Οι αντιλήψεις του χρόνου μετακίνησης για μια διαδρομή μπορεί, συνεπώς, να μεταβάλλεται από χρήστη σε χρήστη, λόγω του σφάλματος στην αντίληψη κάθε μετακινούμενου. Με άλλα λόγια, κάθε μετακινούμενος αντιλαμβάνεται το δικό του χρόνο μετακίνησης. Αυτός ο αντιληπτός χρόνος μετακίνησης αποτελεί μία τυχαία μεταβλητή κατανομημένη στον πληθυσμό των μετακινούμενων (Ran and Boyce, 1996). Εξαιτίας αυτής της διακύμανσης στην αντίληψη του χρόνου μετακίνησης, οι μετακινούμενοι μπορεί να επιλέγουν διαφορετικές διαδρομές με δεδομένο ένα ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού, παρόλο που γίνεται η υπόθεση ότι όλοι επιλέγουν τη διαδρομή την οποία αντιλαμβάνονται ως συντομότερη. Το τυχαίο αυτό στοιχείο στην αντίληψη του χρόνου μετακίνησης από τους χρήστες δικαιολογεί και τον χαρακτηρισμό του προτύπου ως στοχαστικό.

Επιπρόσθετα, όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο για την κριτική του προτύπου, το πρότυπο είναι βασισμένο στη διαδρομή. Οι δυνατές διαδρομές καθορίζονται εξαρχής. Η απαρίθμηση των διαδρομών είναι, γενικά, μία δύσκολη υπόθεση. Συνεπώς, για λόγους απλούστευσης, επιλέγονται τρεις δυνατές διαδρομές για κάθε ζεύγος κόμβων προέλευσης-προορισμού (Π-Π), οι οποίες είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες. Τα ζεύγη κόμβων προέλευσης-προορισμού είναι και αυτά τρία.

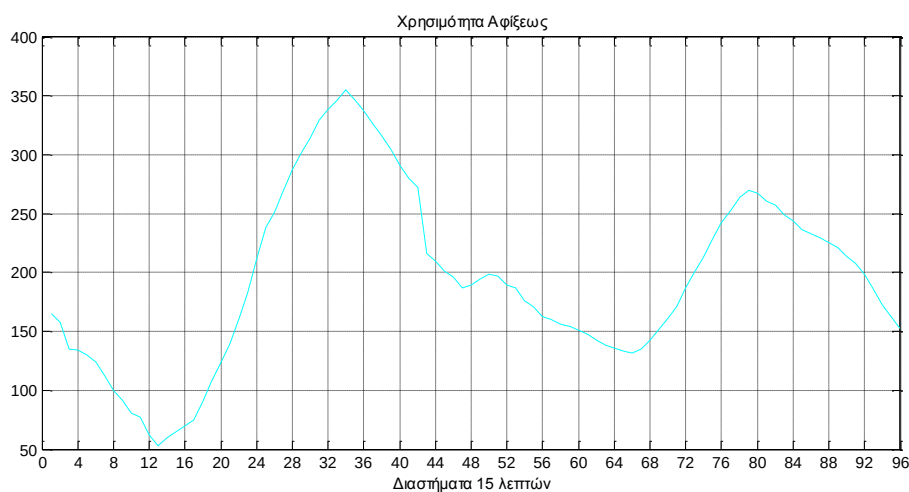
Σύμφωνα με τα παραπάνω, η *συνάρτηση της χρησιμότητας* στο συγκεκριμένο πρότυπο για τις δύο ομάδες των χρηστών δίδεται ως εξής:

$$\text{Ομάδα Α: } u_{A,p}^{ij,l-96} = -\theta^{l-96} C_{A,p}^{ij,l-96} + \omega V_{A,p}^{l+m} + \varepsilon_{A,p}^{ij,l-96} \quad (4.5)$$

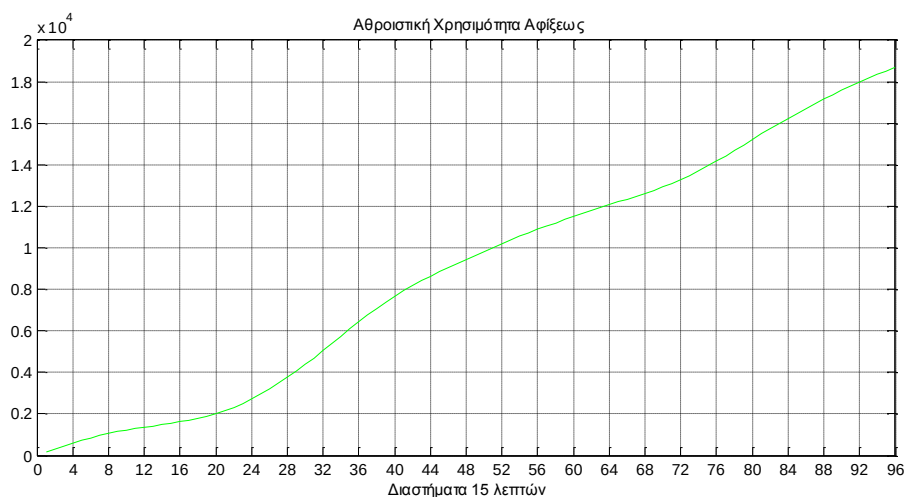
$$\text{Ομάδα Β: } u_{B,p}^{ij,l-1} = -\theta^{l-1} C_{B,p}^{ij,l-1} + \omega V_{B,p}^{l+m} + \varepsilon_{B,p}^{ij,l-1} \quad (4.6)$$

όπου $\theta^{l-96} < \theta^{l-1}$.

Παρακάτω παρουσιάζονται σε διαγράμματα η χρησιμότητα και η αθροιστική χρησιμότητα αφίξεως στον προορισμό.



Σχήμα 4.5: Εξέλιξη της χρησιμότητας αφίξεως στον προορισμό

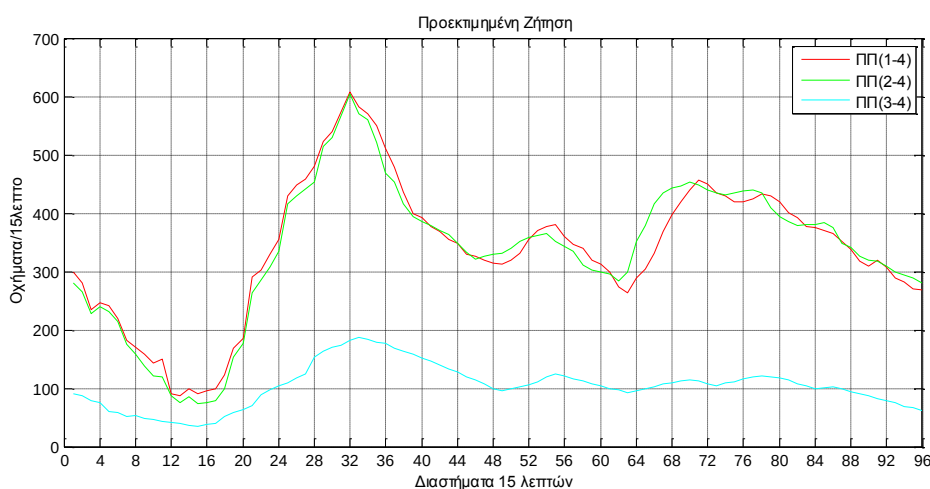


Σχήμα 4.6: Εξέλιξη της αθροιστικής Χρησιμότητας Αφίξεως στον προορισμό

Η χρησιμότητα αφίξεως υπολογίστηκε με βάση τη *ζήτηση αφίξεως στον προορισμό*. Η ζήτηση αφίξεως είναι σταθερή από μέρα σε μέρα και προκύπτει από τη συνολική ζήτηση αναχώρησης (και από τα τρία ζεύγη Π-Π) μετατοπισμένη προς τα δεξιά κατά μία αναμενόμενη διάρκεια μετακίνησης, περίπου ίση με 15 min.

Τα χρονικά μεταβαλλόμενα δεδομένα της ζήτησης των προτύπων μπορούν να προέλθουν από πολλαπλές πηγές. Στο συγκεκριμένο πρότυπο, χρησιμοποιούνται προεκτιμημένοι πίνακες μετακινήσεων σε συνδυασμό με τις προβλέψεις του προτύπου. Ειδικότερα, η κατανομή της ζήτησης σε ίσα χρονικά διαστήματα για την πρώτη ημέρα μελέτης είναι δεδομένη. Προέρχεται από καμπύλες που περιγράφουν τη διακύμανση της κυκλοφορίας μίας

καθημερινής ημέρας προς τον κέντρο της Αθήνας. Τα στοιχεία εισόδου εκτιμήθηκαν και δεν προέκυψαν από μετρήσεις. Ωστόσο μετρήσεις ελήφθησαν από το Εργαστήριο Σιδηροδρομικής και Μεταφορών του ΕΜΠ, οι οποίες αφορούν στους κυκλοφοριακούς φόρτους κάποιων συνδέσμων, στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του προτύπου. Η ζήτηση αυτή για κάθε Π-Π εμφανίζει δύο αιχμές. Η πρώτη αιχμή είναι πρωινή και αφορά στην προσέλευση στην εργασία. Η πρωινή κυκλοφοριακή αιχμή είναι πιο έντονη από την δεύτερη αιχμή, την βραδινή. Η τελευταία αυτή αιχμή αφορά στην προσέλευση στο κέντρο της Αθήνας με σκοπό την αναψυχή. Η ζήτηση μετά την πρώτη ημέρα προβλέπεται από το πρότυπο και υπολογίζεται για τα δεκαπεντάλεπτα με έναν επαναληπτικό αλγόριθμο εκτίμησης ζήτησης και κόστους (ή χρόνου) μετακίνησης.



Σχήμα 4.7: Εξέλιξη της προεκτιμημένης ζήτησης την πρώτη ημέρα

Να σημειωθεί ότι στο υπόμνημα, το ΠΠ(1-4) συμβολίζει τη ζήτηση για μετακίνηση από τον κόμβο Προέλευσης 1 στο κόμβο Προορισμού 4.

4.5 Προσαρμογή παραμέτρων-αξιοπιστία

Στην παράγραφο αυτή, θα εκτελεστούν πολλές και διαφορετικές δοκιμές για να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του προτύπου σε διαφορετικές συνθήκες. Από τις δοκιμές αυτές και τα αντίστοιχα αποτελέσματα, προσδιορίζεται και η ποιότητα των αποτελεσμάτων του προτύπου, ή, με άλλα λόγια, η αξιοπιστία του.

Πριν παρουσιαστούν, όμως, οι δοκιμές και τα αντίστοιχα διαγράμματα, κρίνεται σκόπιμη η αναφορά στις προϋποθέσεις για να χαρακτηριστεί ένα πρότυπο, δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας, αξιόπιστο. Συνεπώς, ένα τέτοιο πρότυπο είναι αξιόπιστο, όταν:

- i. συγκλίνει, εάν το φαινόμενο που περιγράφει ισορροπεί, ή, πιο συγκεκριμένα, όταν ο αλγόριθμος αναζητάει μια στοχαστική

δυναμική ισορροπία όσον αφορά στον καταμερισμό της κυκλοφορίας,

- ii. παρουσιάζει ευαισθησία στις μεταβολές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το πρόβλημα,
- iii. αναπαράγει με ρεαλιστικό τρόπο τη δυναμική της κυκλοφορίας.

Παρακάτω παρουσιάζονται με συντομία οι προαναφερόμενες προϋποθέσεις:

i. Σύγκλιση

Σχεδόν όλοι οι αλγόριθμοι δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας, που αναζητούν μία ισορροπία, προσαρμόζουν τον καταμερισμό χρησιμοποιώντας έναν επαναληπτικό αλγόριθμο επίλυσης. Η διαδικασία υποτίθεται ότι έχει αρχίσει να συγκλίνει ή ότι έχει φθάσει σε μία αποδεκτή προσέγγιση μίας λύσης ισορροπίας των χρηστών, όταν δεν υπάρχει κανένα κίνητρο για κάθε χρήστη να αλλάξει επιλογή. Αυτό μεταφράζεται σε αμελητέα αλλαγή στο διάγραμμα της ζήτησης ή στους χρόνους μετακίνησης μετά από αρκετές επαναλήψεις (Network Modeling Committee, TRB, 2010).

Το παρόν πρότυπο συγκλίνει, όταν τα διαγράμματα των διαφόρων μεγεθών (π.χ. της ζήτησης) αρχίζουν να επαναλαμβάνονται για κάθε μέρα. Όταν πρόκειται, όμως, για διαγράμματα που εκφράζουν τη διαφορά διαφόρων μεγεθών από μέρα σε μέρα (π.χ. η διαφορά της ζήτησης) για κάθε δεκαπεντάλεπτο, τότε το πρότυπο συγκλίνει, όταν τα διαγράμματα τείνουν στο μηδέν.

ii. Ευαισθησία της λύσης

Η ευαισθησία και η σταθερότητα είναι δύο έννοιες που σχετίζονται με τον τρόπο με τον οποίο η λύση ενός προβλήματος μεταβάλλεται, όταν αλλάζουν οι παράμετροι που το χαρακτηρίζουν. Στην περίπτωση των προτύπων δυναμικού στοχαστικού καταμερισμού της κυκλοφορίας, οι έννοιες αυτές χρησιμοποιούνται με ένα άτυπο τρόπο, για να περιγράψουν τις αναμενόμενες μεταβολές των αποτελεσμάτων, όταν το πρόβλημα αυτό καθεαυτό αλλάζει. Πρέπει να σημειωθεί ότι, εάν η επίλυση σε ένα τροποποιημένο πρότυπο παρουσιάζει μη αναμενόμενα χαρακτηριστικά, αυτό μπορεί να υποδηλώνει μία πτωχή προσέγγιση της ισορροπίας για το αυθεντικό ή το τροποποιημένο πρόβλημα ή και για τα δύο (Network Modeling Committee, TRB, 2010). Συνεπώς, οι μεταβολές των παραμέτρων του προτύπου και η παρατήρηση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων είναι πολύ σημαντικές για την αξιολόγηση του προτύπου, όσον αφορά την αξιοπιστία του.

iii. Ρεαλισμός στη δυναμική της κυκλοφορίας

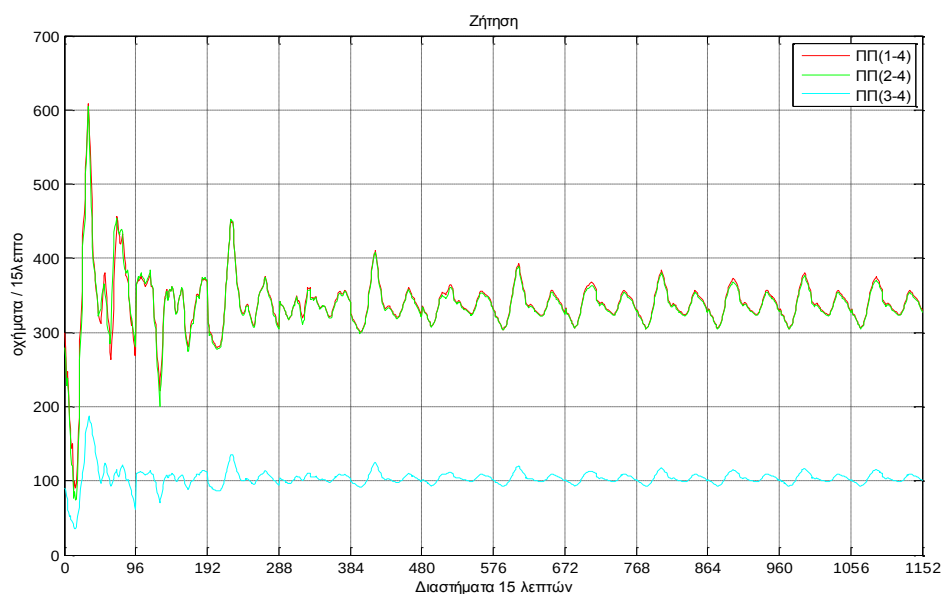
Καταρχήν, όσο πιο δυναμικό είναι ένα πρότυπο, τόσο πιο συνεπή είναι τα αποτελέσματά του με τις πραγματικές κυκλοφοριακές συνθήκες. Η συνέπεια αυτή των αποτελεσμάτων προσδίδει στο πρότυπο ρεαλισμό. Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα ενός αρκετά δυναμικού και στοχαστικού προτύπου εξαρτώνται σημαντικά από τα δεδομένα τα οποία έχουν επιλεχθεί. Είναι, συνεπώς, κρίσιμο να εξασφαλισθεί, ότι το πρότυπο είναι ικανοποιητικά βαθμονομημένο. Με την έννοια της βαθμονόμησης εννοείται ότι οι παράμετροι και τα δεδομένα ενός προτύπου προσαρμόζονται κατάλληλα, ώστε τα αποτελέσματα που δίνει να είναι συγκρίσιμα, σε ικανοποιητικό βαθμό, με τις πραγματικές μετρήσεις της κυκλοφορίας, οι οποίες αναφέρονται πάντα σε μία περιοχή μελέτης.

Συνεχίζοντας, η βαθμονόμηση χωρίζεται σε δύο κύρια στάδια, την ποιοτική ανάλυση και την ποσοτική ανάλυση. Στην ποιοτική ανάλυση, η οποία ξεκινά από τα πρώτα, κιόλας, τρεξίματα του προτύπου, μπορεί να είναι μικρής σημασίας να ξεκινήσει η σύγκριση των αποτελεσμάτων του προτύπου με τα εμπειρικά δεδομένα, ειδικά όταν το πρότυπο δεν συγκλίνει σε μία σταθερή λύση (Network Modeling Committee, TRB, 2010). Μετά τη συγκεκριμένη φάση της βαθμονόμησης, είναι πιθανόν να υπάρχουν, ακόμα, πολλά λάθη στα δεδομένα και τις παραμέτρους του προτύπου, παρόλο που το πρότυπο έχει βελτιωθεί αρκετά. Για το λόγο αυτό, ακολουθεί η ποσοτική φάση της βαθμονόμησης, κατά την οποία γίνεται άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα εμπειρικά δεδομένα που συνεπάγεται την περαιτέρω βελτίωση της αξιοπιστίας του προτύπου.

Στην παράγραφο αυτή, επιχειρείται σε έναν βαθμό η ποιοτική ανάλυση και επιδιώκεται μία βελτίωση της απόδοσης του προτύπου.

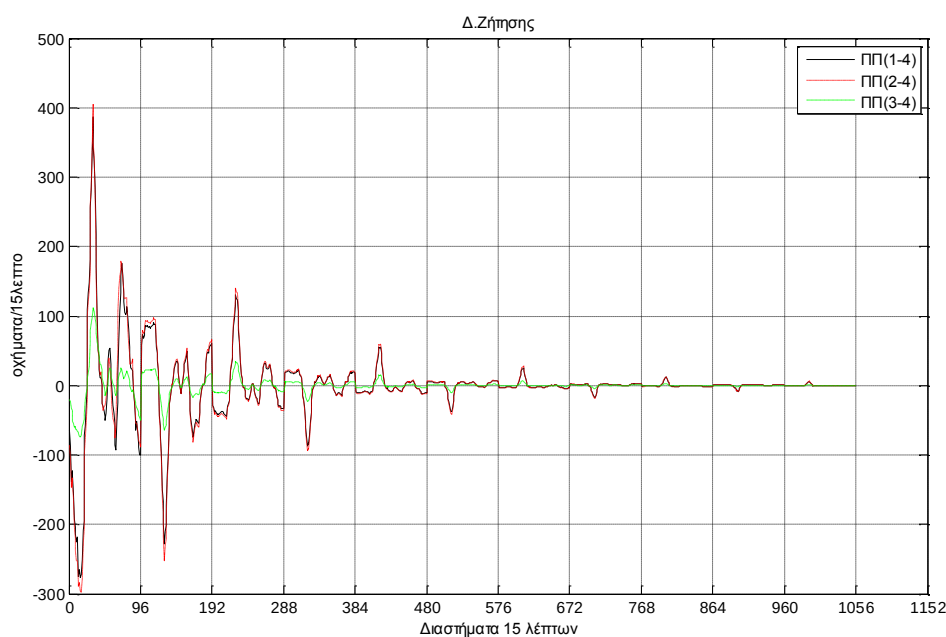
Τα αποτελέσματα πρέπει να συμφωνούν με τις συσχετίσεις των διαφόρων παραμέτρων και να αναπαράγουν με ρεαλιστικό τρόπο το δυναμικό φάσμα των επιλογών των χρηστών. Τα διαγράμματα τα οποία εξετάζονται είναι της ζήτησης, της διαφοράς της ζήτησης από μέρα σε μέρα για κάθε δεκαπεντάλεπτο κ.α. Επίσης, εξετάζεται και η απόδοση του μεταφορικού συστήματος για τις διάφορες περιπτώσεις. Το μέγεθος μέτρησης της απόδοσης του προτύπου, επιλέγεται να είναι, ο συνολικός χρόνος μετακίνησης, καθώς είναι ένα μέγεθος που δίνει μία συνολική εικόνα του μεταφορικού συστήματος. Ακολουθούν οι διάφορες δοκιμές και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων του προτύπου για κάθε μία από αυτές:

Περίπτωση (1): Για $\theta_A = 0.5$, $\theta_B = 1.5$, $VOTTA = 8\text{€/hr}$, $VOTTB = 9\text{€/hr}$, $\omega = 1/3000$, $Acl = 0.80$, $Bcl = 0.20$ προκύπτουν τα εξής διαγράμματα, τα οποία παρουσιάζουν αποτελέσματα για 12 μέρες:

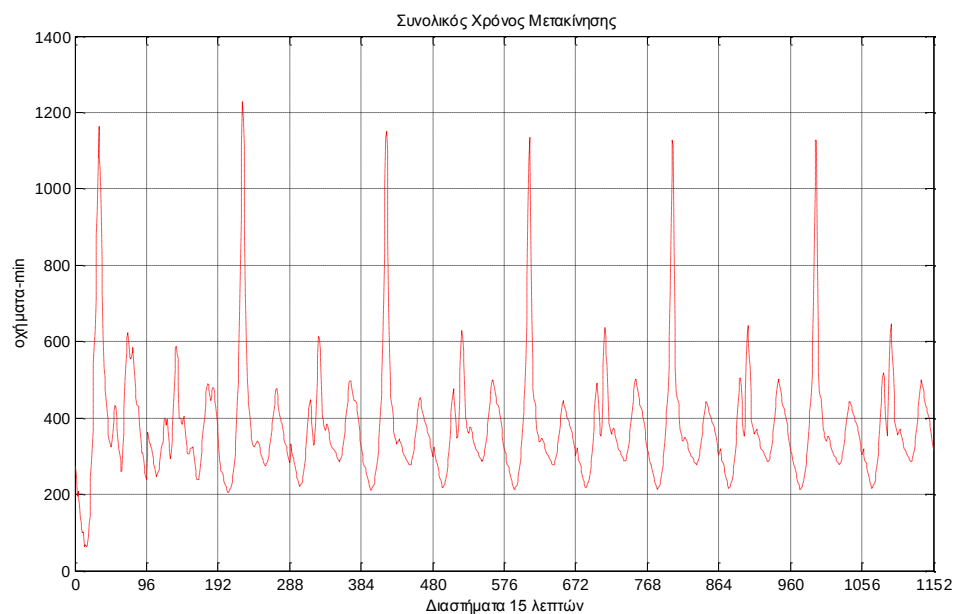


Σχήμα 4.8: Εξέλιξη της Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για την Περίπτωση (1)

Παρατηρείται ότι το διάγραμμα της ζήτησης για κάθε ζεύγος σημείων προέλευσης-προορισμού, προς το τέλος της ένατης ημέρας αρχίζει να επαναλαμβάνεται από μέρα σε μέρα, που σημαίνει ότι το πρότυπο συγκλίνει ή αλλιώς ισορροπεί. Η ισορροπία αυτή του προτύπου είναι μία δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών.

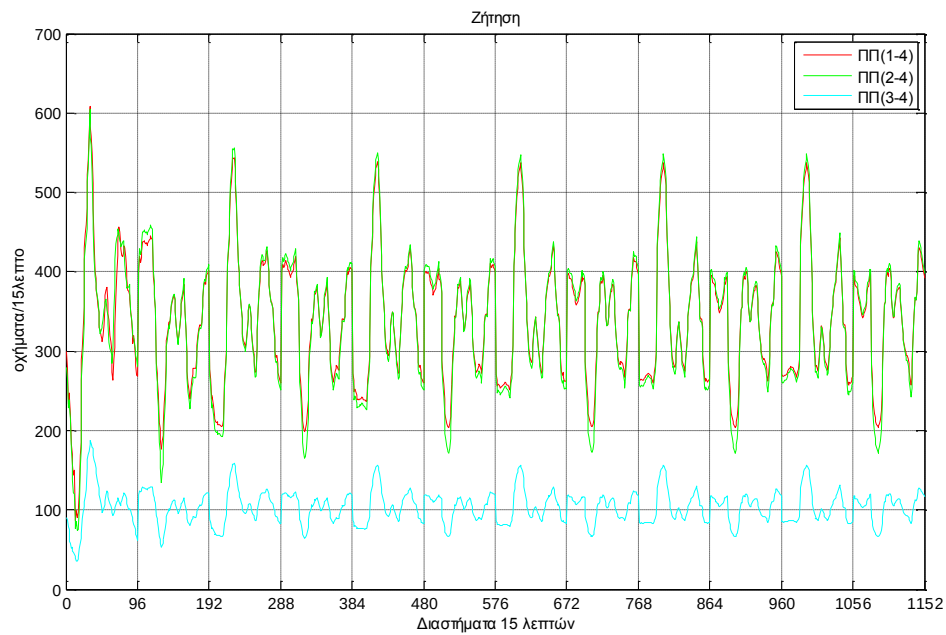


Σχήμα 4.9: Εξέλιξη της Διαφοράς Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για την Περίπτωση (1)

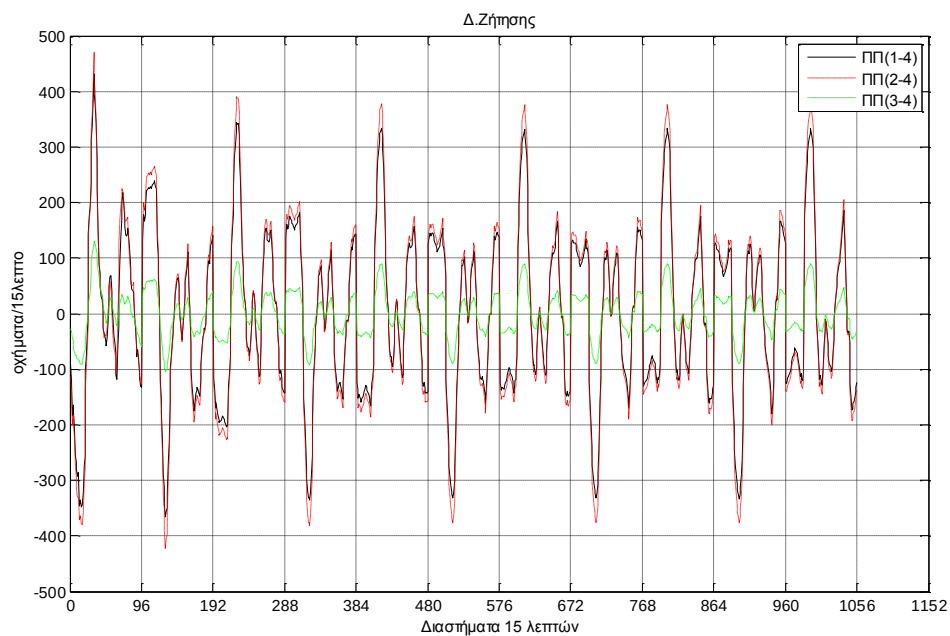


Σχήμα 4.10: Εξέλιξη του Συνολικού Χρόνου Μετακίνησης για την Περίπτωση (1)

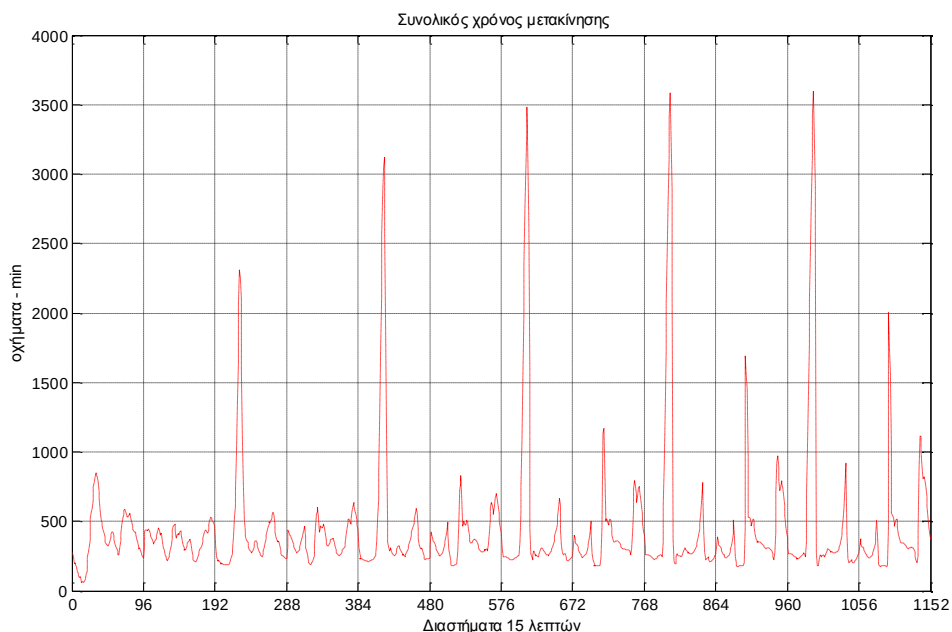
Περίπτωση (2): Για $\theta_A = 1.0$, $\theta_B = 2.0$ και τις υπόλοιπες παραμέτρους ίδιες με της περίπτωσης (1) προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:



Σχήμα 4.11: Εξέλιξη της Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για την Περίπτωση (2)



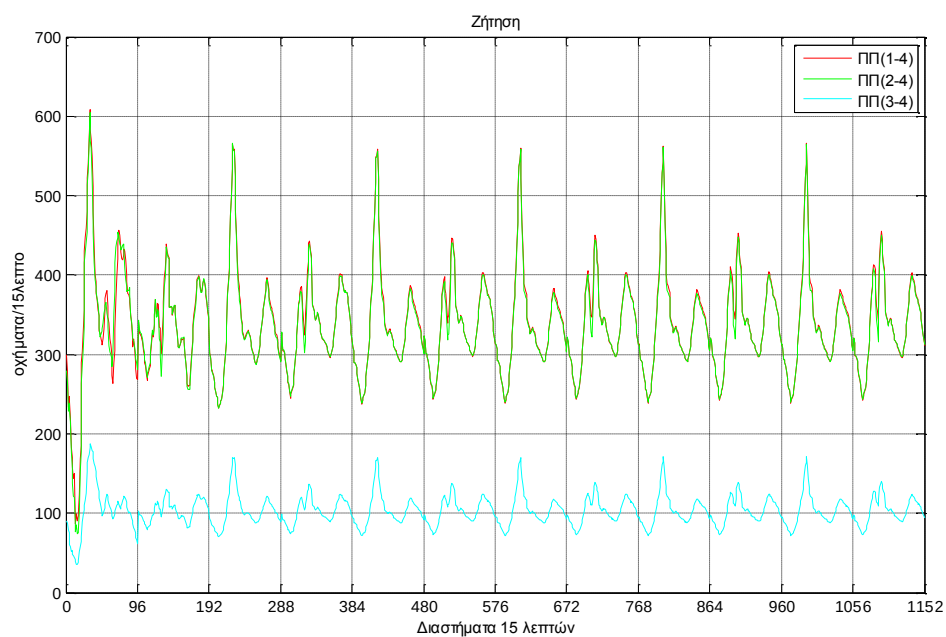
Σχήμα 4.12: Εξέλιξη της Διαφοράς Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για την Περίπτωση (2)



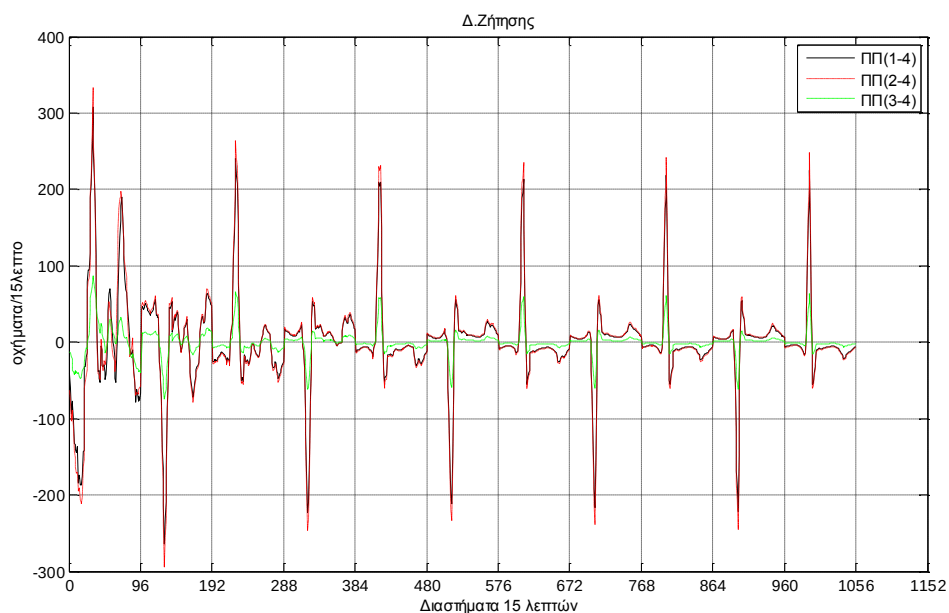
Σχήμα 4.12: Εξέλιξη του Συνολικού Χρόνου Μετακίνησης για την Περίπτωση (2)

Παρατηρείται από τα διαγράμματα, ότι με την αύξηση του θ , οι ακραίες τιμές αυξάνονται και τα διαγράμματα γίνονται λιγότερο ομαλά. Επίσης, όσον αφορά στη δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών, επισημαίνεται ότι επιτυγχάνεται πολύ αργότερα ή και καθόλου, πέρα από την περίοδο μελέτης των 12 ημερών. Δηλαδή, με την αύξηση του θ , η στοχαστική ισορροπία επιτυγχάνεται αργότερα. Επίσης, από το διάγραμμα του συνολικού χρόνου μετακίνησης παρατηρείται ότι η απόδοση του συστήματος είναι μικρότερη από αυτή της προηγούμενης περίπτωσης, καθώς ο συνολικός χρόνος μετακίνησης λαμβάνει υψηλότερες τιμές.

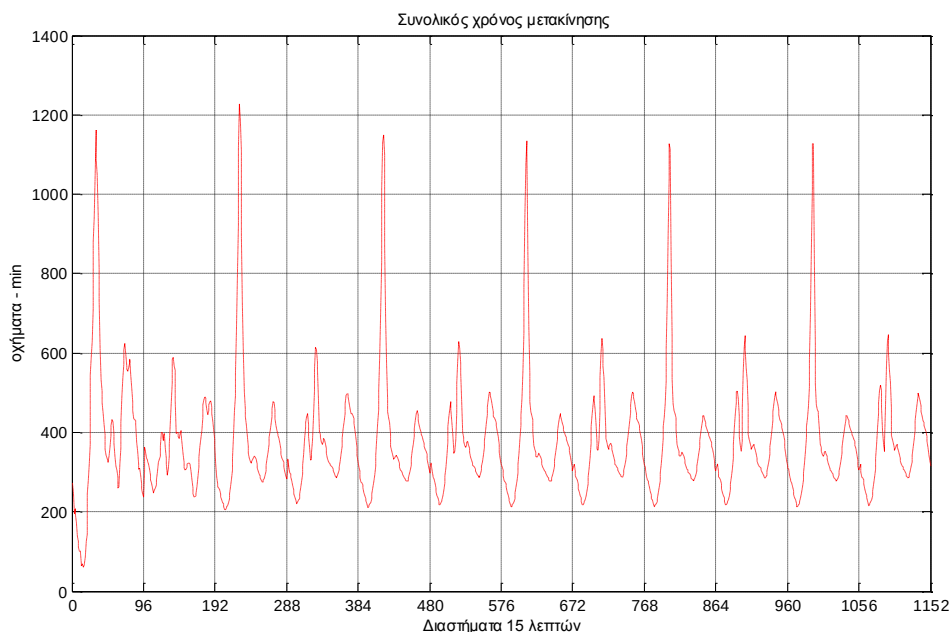
Περίπτωση (3): Για $\omega = 1/1000$ και τα υπόλοιπα όπως αυτά της περίπτωσης (1), τα διαγράμματα διαμορφώνονται ως εξής:



Σχήμα 4.13: Εξέλιξη της Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για την Περίπτωση (3)



Σχήμα 4.14: Εξέλιξη της Διαφοράς Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για την Περίπτωση (3)

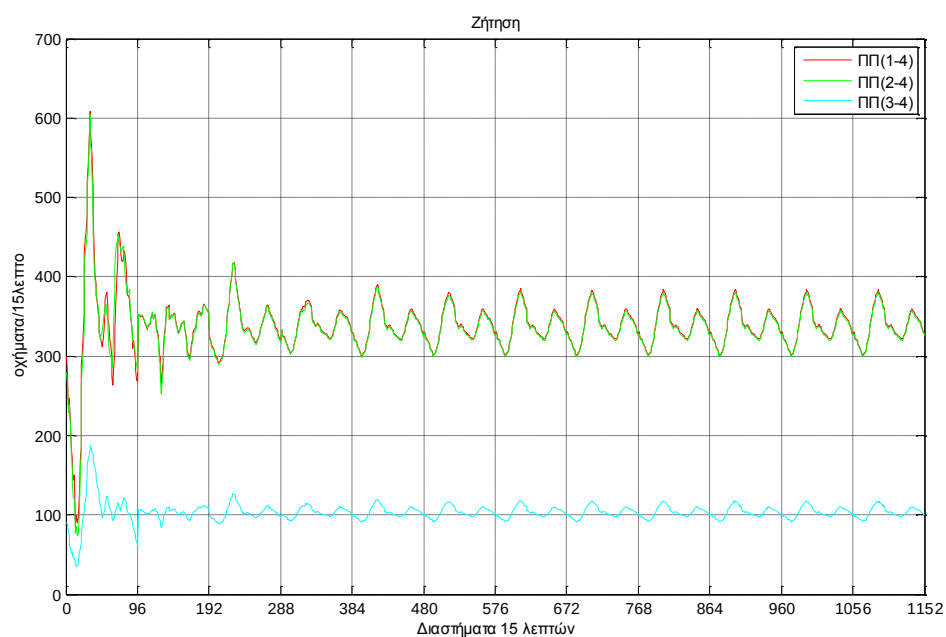


Σχήμα 4.15: Εξέλιξη του Συνολικού Χρόνου Μετακίνησης για την Περίπτωση (3)

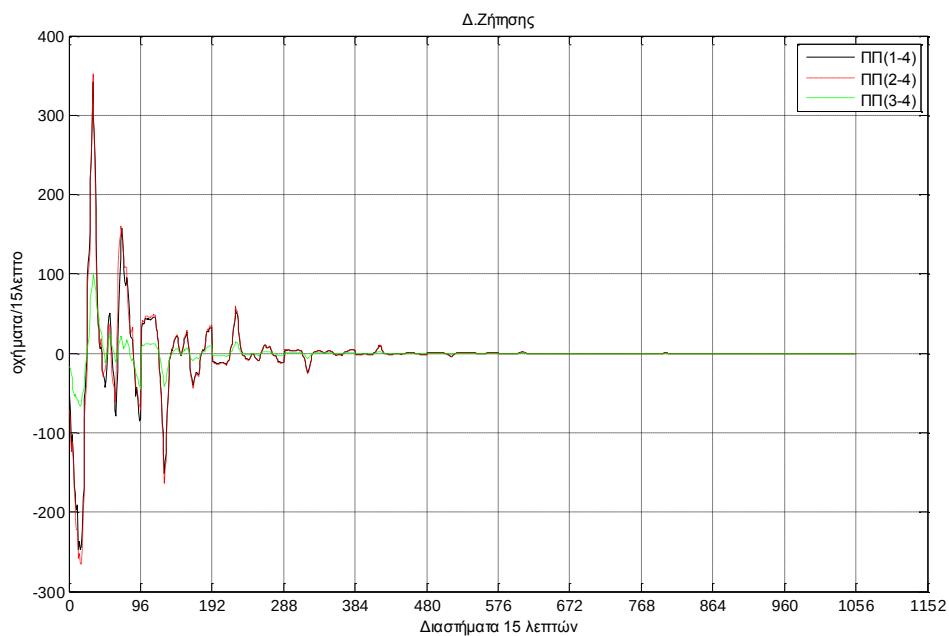
Παρατηρείται ότι με την αύξηση του ω , οι ακραίες τιμές αυξάνονται και τα διαγράμματα γίνονται λιγότερο ομαλά. Όπως έχει αναφερθεί, η αύξηση του ω , συνεπάγεται αύξηση της αριθμητικής τιμής του δεύτερου όρου της χρησιμότητας, με αποτέλεσμα οι δύο όροι αυτής να μην έχουν ίδια κλίμακα.

Επίσης, όσον αφορά στη στοχαστική ισορροπία, επισημαίνεται ότι επιτυγχάνεται πολύ αργότερα, πέρα από την περίοδο μελέτης των 12 ημερών. Δηλαδή, με την αύξηση του ω , η στοχαστική ισορροπία επιτυγχάνεται αργότερα ή και καθόλου (ανάλογα και με τις υπόλοιπες παραμέτρους – συνθήκες του προτύπου). Επιπρόσθετα, από το διάγραμμα του συνολικού χρόνου μετακίνησης, η απόδοση του συστήματος σε σχέση με αυτή της περίπτωσης (1) δεν έχει αλλάξει αισθητά.

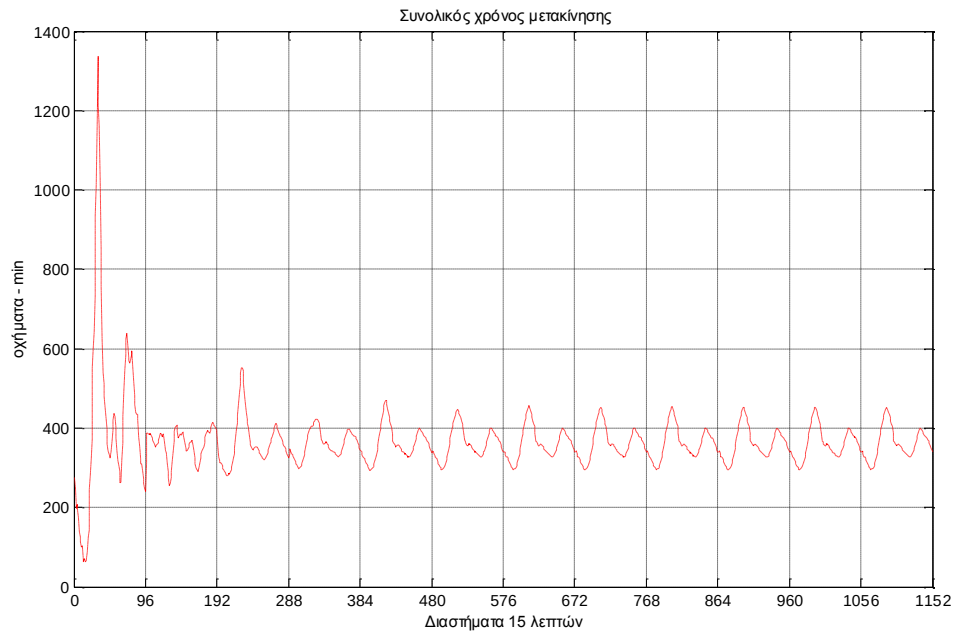
Περίπτωση (4): Για $\theta_A = 0.3$, $\theta_B = 1.0$ και τα υπόλοιπα όπως αυτά της περίπτωσης (1), τα διαγράμματα διαμορφώνονται ως εξής:



Σχήμα 4.16: Εξέλιξη της Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για την Περίπτωση (4)



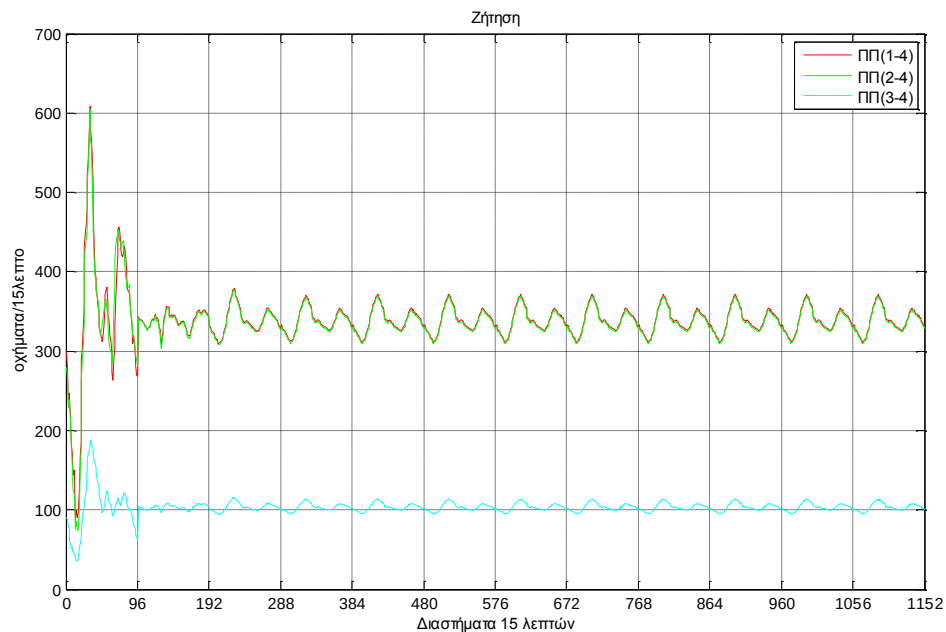
Σχήμα 4.17: Εξέλιξη της Διαφοράς Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για την Περίπτωση (4)



Σχήμα 4.18: Εξέλιξη του Συνολικού Χρόνου Μετακίνησης για την Περίπτωση (4)

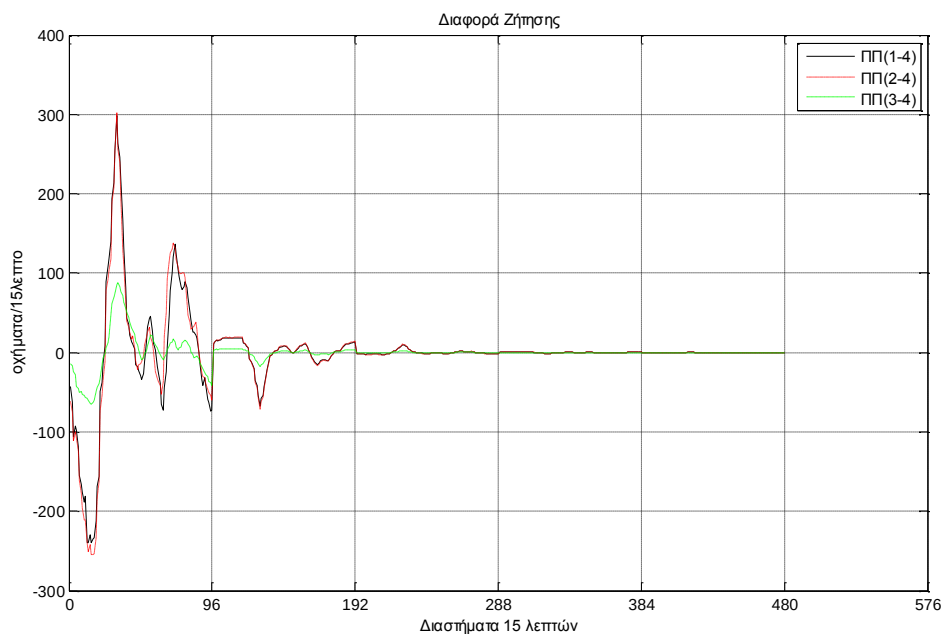
Παρατηρείται ότι με τη μείωση του θ , τα διαγράμματα γίνονται πιο ομαλά και η δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών επιτυγχάνεται γρηγορότερα. Στην περίπτωση αυτή, η στοχαστική ισορροπία αρχίζει να παρουσιάζεται μετά την πέμπτη ημέρα, νωρίτερα της περίπτωσης (1). Επίσης, από το διάγραμμα του συνολικού χρόνου μετακίνησης, η απόδοση του συστήματος σε σχέση με αυτή της περίπτωσης (1) έχει βελτιωθεί αισθητά.

Περίπτωση (5): Για $Acl = 0.50$, $Bcl = 0.50$ και τα υπόλοιπα ίδια με της περίπτωσης (1), τα διαγράμματα διαμορφώνονται ως εξής:



Σχήμα 4.19: Εξέλιξη της Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για την Περίπτωση (5)

Το διάγραμμα της ζήτησης αρχίζει να επαναλαμβάνεται (από μέρα σε μέρα) μετά την τρίτη ημέρας, τότε το πρότυπο ισορροπεί. Επειδή, το πρότυπο ισορροπεί τόσο νωρίς εξετάζονται τα υπόλοιπα διαγράμματα για έξι ημέρες.

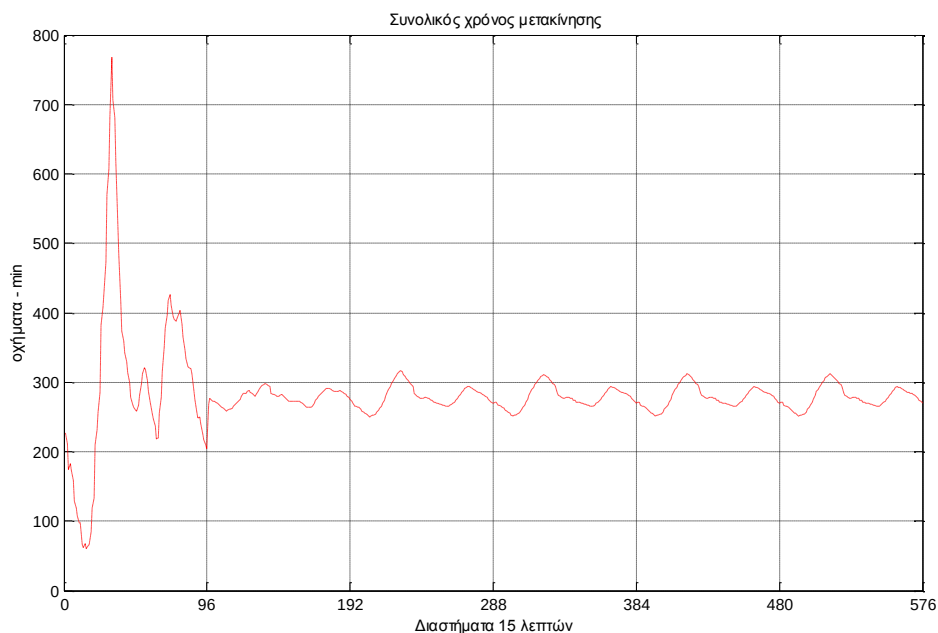


Σχήμα 4.20: Εξέλιξη της Διαφοράς Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για την Περίπτωση (5)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η αύξηση του ποσοστού της πληροφόρησης πραγματικού χρόνου, **Bcl** (μέχρι ενός ορίου), έχει σαν αποτέλεσμα τη γρηγορότερη σύγκλιση. Η γρηγορότερη σύγκλιση αποδίδεται στο γεγονός ότι, με την αύξηση του **Bcl** και την αντίστοιχη μείωση του **Acl**, ο αριθμός των μετακινούμενων που επιλέγουν τις βέλτιστες διαδρομές αυξάνεται και ο αριθμός των μετακινούμενων που αναζητούν διαδρομές με χαμηλότερα κόστη μετακίνησης μειώνεται. Με τον τρόπο αυτό, οι επιλογές των χρηστών σταθεροποιούνται από μέρα σε μέρα.

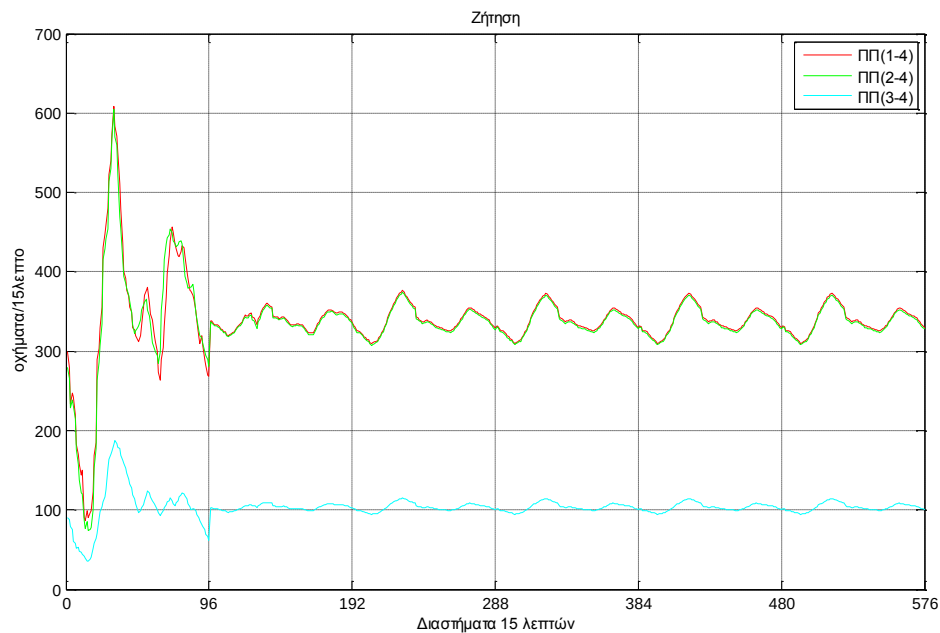
Η ύπαρξη του ορίου (25% πειραματικά) σχετίζεται με το γεγονός ότι πολύ μεγάλες τιμές του **Bcl** μπορεί να καταστήσουν τις επιλογές των χρηστών υπερβολικά ευαίσθητες στις πραγματικά μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου, που συνεπάγεται την έλλειψη ισορροπίας, ή αλλιώς, τη συνεχή αστάθεια στη συμπεριφορά των χρηστών. Ωστόσο, το όριο αυτό των 25% για την πληροφόρηση πραγματικού χρόνου δεν αντιπροσωπεύει το συγκεκριμένο πρότυπο, εφόσον, ειδικά, οι χρήστες δεν μπορούν να αναθεωρήσουν την επιλογή διαδρομής κατά τη διάρκεια της μετακίνησής τους.

Ακολουθεί και το διάγραμμα του συνολικού χρόνου μετακίνησης, από το οποίο συμπεραίνεται ότι το πρότυπο συγκλίνει μετά την τρίτη ημέρα και ότι η απόδοση του μεταφορικού συστήματος είναι πιο βελτιωμένη από όλες τις παραπάνω περιπτώσεις.

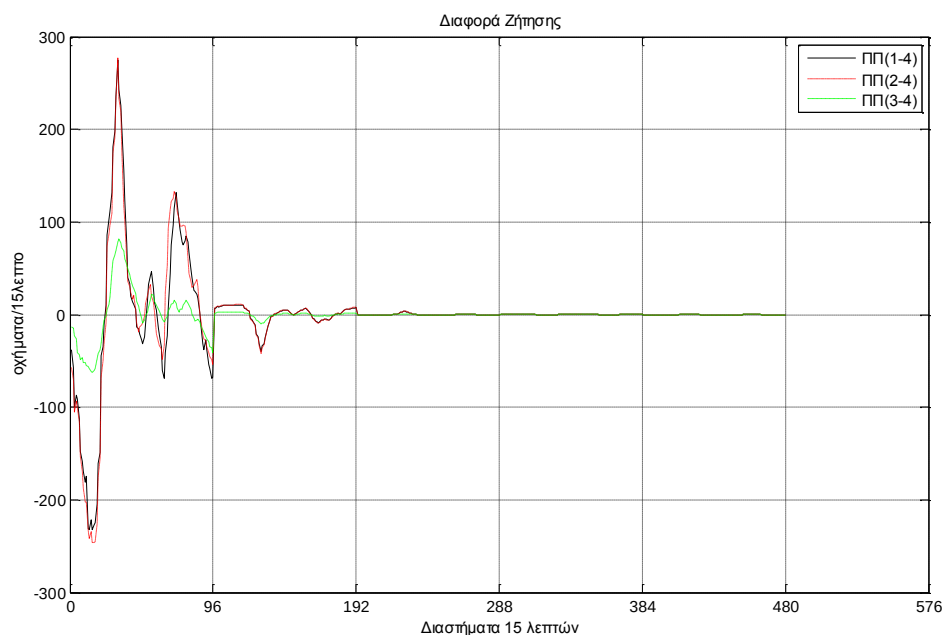


Σχήμα 4.21: Εξέλιξη του Συνολικού Χρόνου Μετακίνησης για την περίπτωση (5)

Περίπτωση (6): Για $Acl = 0.50$, $Bcl = 0.50$ και $\theta_A = 0.3$, $\theta_B = 1.0$ και τα υπόλοιπα όπως της περίπτωσης (1), τα διαγράμματα διαμορφώνονται ως εξής:



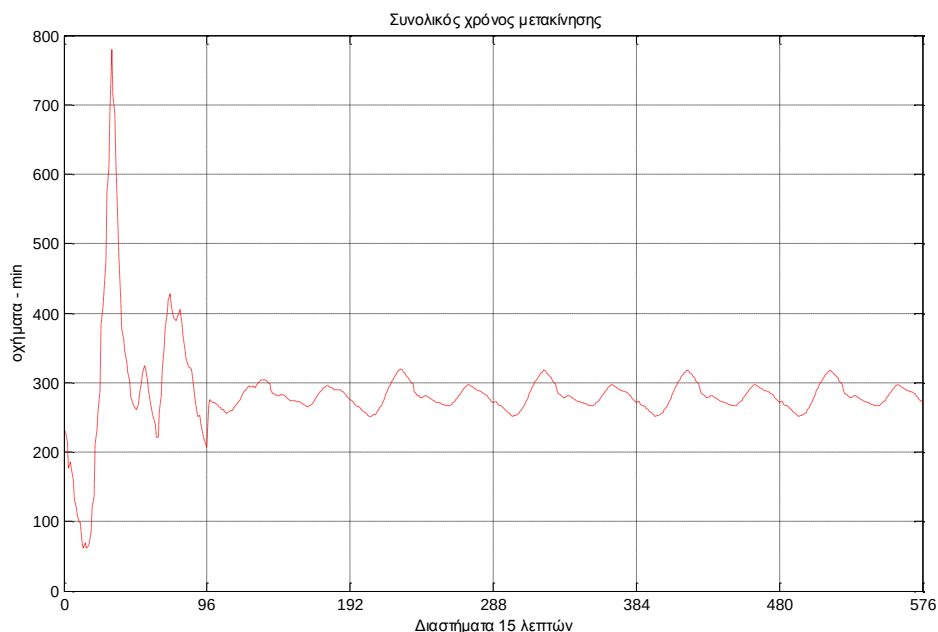
Σχήμα 4.22: Εξέλιξη της Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για την Περίπτωση (6)



Σχήμα 4.23: Εξέλιξη της Διαφοράς Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για την Περίπτωση (6)

Το διάγραμμα της ζήτησης αρχίζει να επαναλαμβάνεται μετά τη δεύτερη ημέρα, τότε το πρότυπο ισορροπεί. Επειδή, το πρότυπο ισορροπεί τόσο νωρίς εξετάζονται τα διαγράμματα

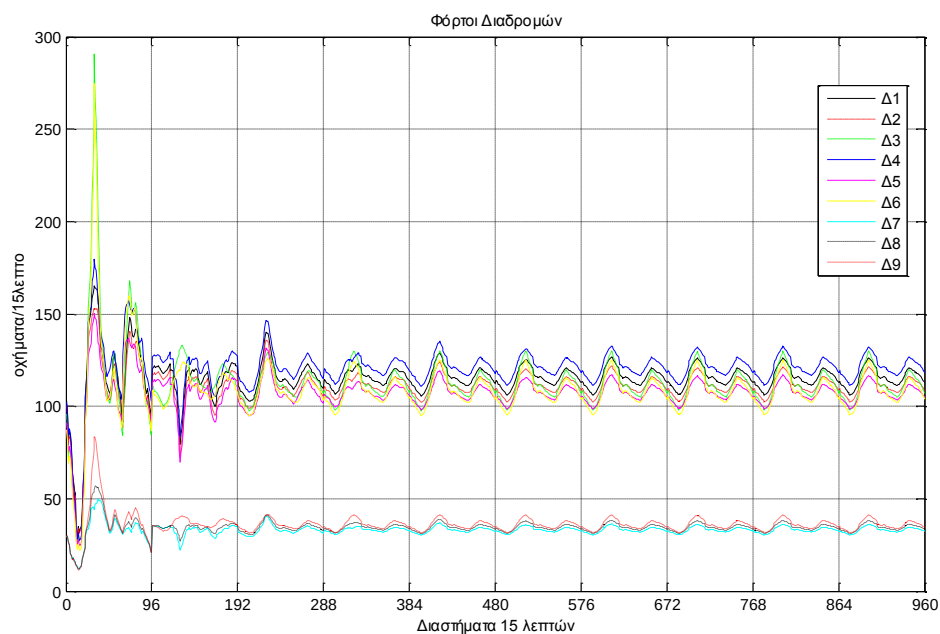
για έξι ημέρες. Ακολουθεί το διάγραμμα του συνολικού χρόνου μετακίνησης, που αποτελεί μέτρο της απόδοσης του μεταφορικού συστήματος.



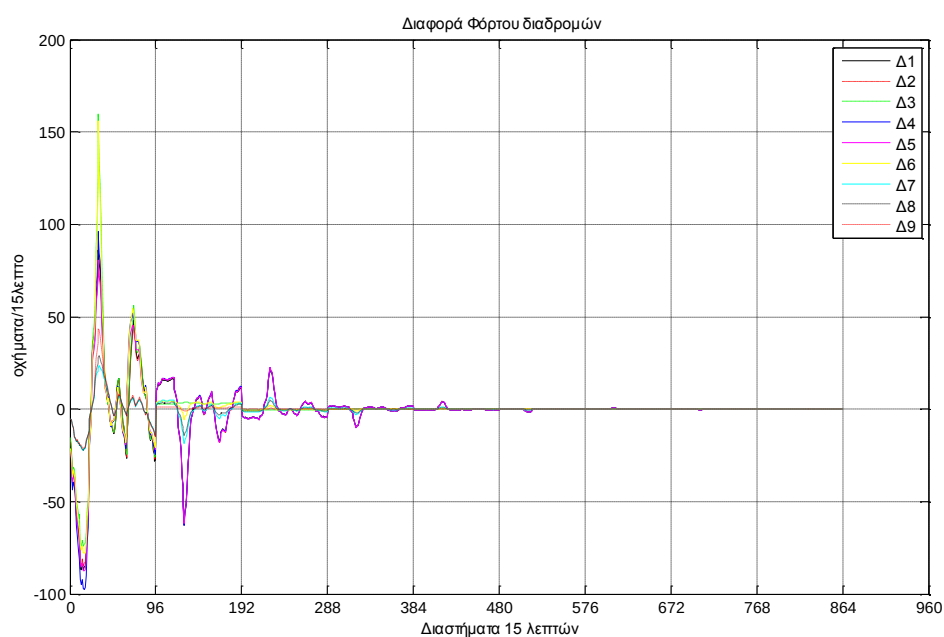
Σχήμα 4.24: Εξέλιξη του Συνολικού Χρόνου Μετακίνησης για την Περίπτωση (6)

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το θ και για τις δύο ομάδες είναι μικρότερο και το ποσοστό της πληροφόρησης πραγματικού χρόνου είναι υψηλότερο από αυτό της πρώτης περίπτωσης. Και οι δύο αυτές παράμετροι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη σύγκλιση του προτύπου. Συνεπώς, η μεταβολή αυτή των παραμέτρων έχει σαν συνέπεια την νωρίτερη σύγκλιση του προτύπου σε σύγκριση με όλων των παραπάνω περιπτώσεων. Επίσης, όσον αφορά στην απόδοση του μεταφορικού συστήματος, αυτή είναι παρόμοια με αυτή της προηγούμενης δοκιμής, δηλαδή σημαντικά βελτιωμένη σε σχέση αυτή της πρώτης δοκιμής.

Για την περίπτωση (4) υπολογίζονται και κάποια άλλα διαγράμματα. Στην περίπτωση αυτή, η σύγκλιση επέρχεται πιο αργά από τις επόμενες περιπτώσεις, (5) και (6). Τα διαγράμματα των κυκλοφοριακών φόρτων των διαδρομών και των διαφορών φόρτων των διαδρομών από μέρα σε μέρα παρουσιάζονται παρακάτω:



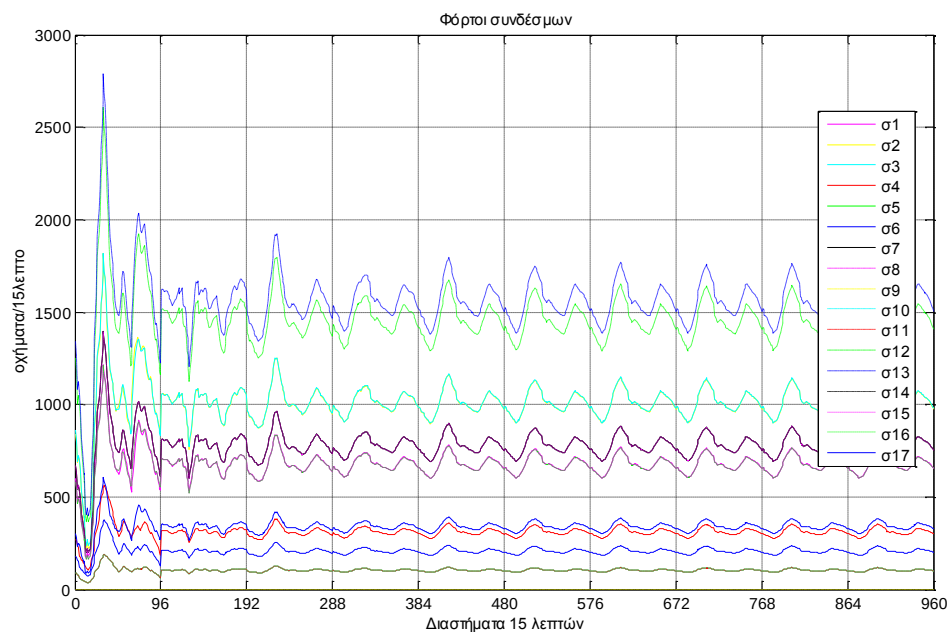
Σχήμα 4.25: Εξέλιξη των κυκλοφοριακών φόρτων των διαδρομών για την Περίπτωση (4)
Όπου Δ: Διαδρομή.



Σχήμα 4.26: Εξέλιξη των διαφορών των φόρτων των διαδρομών για την Περίπτωση (4)
Όπου Δ: Διαδρομή

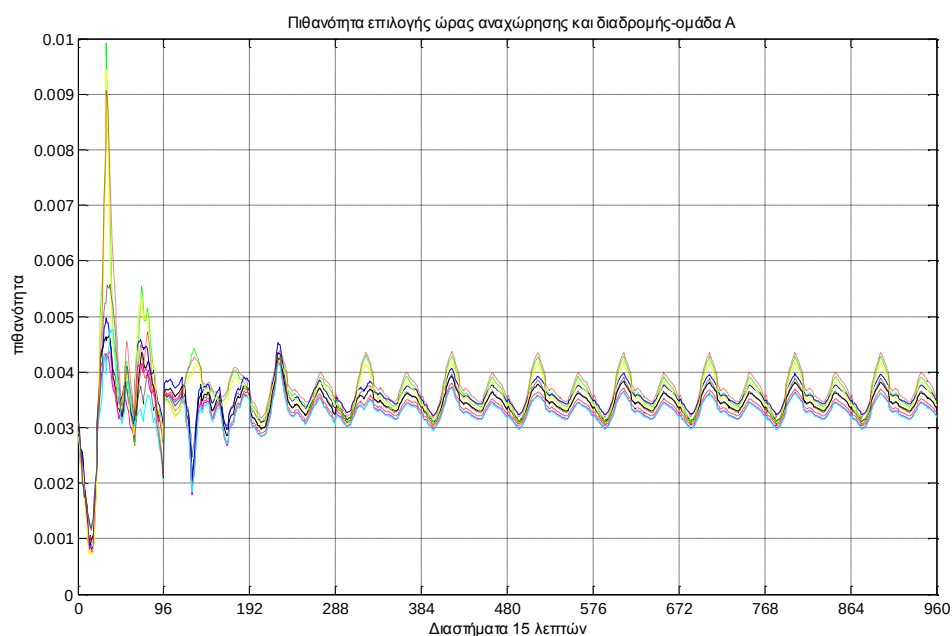
Τα διαγράμματα παρουσιάζονται για δέκα ημέρες. Από όλα τα διαγράμματα, συμπεραίνεται ότι η στοχαστική δυναμική ισορροπία επέρχεται προς το τέλος της πέμπτης ημέρας.

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των φόρτων για κάθε σύνδεσμο και της πιθανότητας επιλογής ώρας αναχώρησης και διαδρομής για τις δύο ομάδες ξεχωριστά:

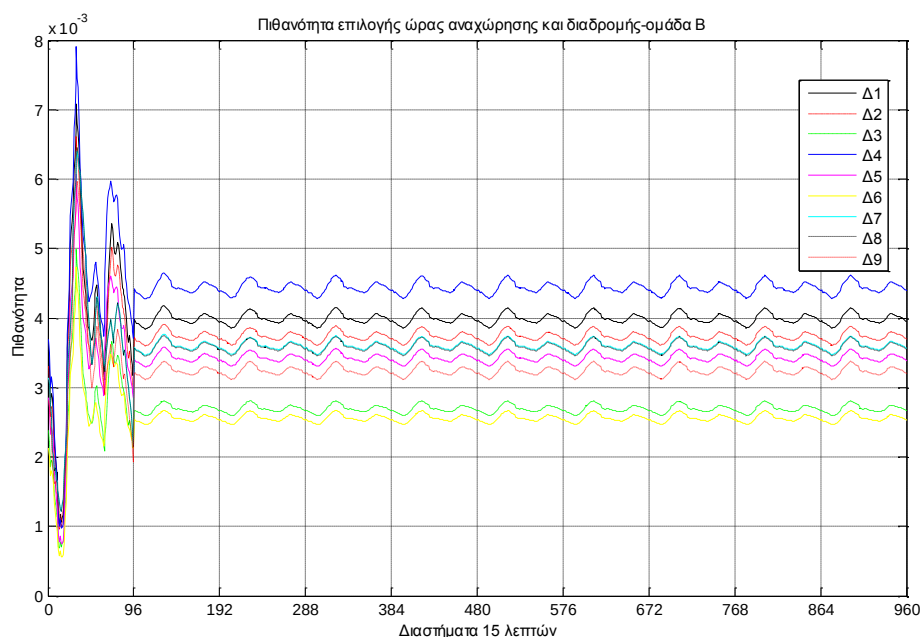


Σχήμα 4.27: Εξέλιξη των φόρτων των συνδέσμων για την Περίπτωση (4)

Όπου σ: σύνδεσμος



Σχήμα 4.28: Εξέλιξη της πιθανότητας επιλογής ώρας αναχώρησης και διαδρομής της ομάδας Α για την Περίπτωση (4)



Σχήμα 4.29: Εξέλιξη της πιθανότητας επιλογής ώρας αναχώρησης και διαδρομής της ομάδας B για την Περίπτωση (4)

Επειδή οι χρήστες της δεύτερης ομάδας έχουν μια πιο ακριβή αντίληψη των τρεχουσών κυκλοφοριακών συνθηκών σε σύγκριση με την πρώτη, καθώς επεξεργάζονται πληροφόρηση πραγματικού χρόνου, εμφανίζουν μικρότερη διασπορά στις εναλλακτικές διαδρομές, δηλαδή διαλέγουν πιο συχνά τις βέλτιστες διαδρομές. Οι επιλογές τους, συνεπώς, σταθεροποιούνται πιο γρήγορα από της πρώτης ομάδας. Επιπρόσθετα, για τον παραπάνω λόγο, οι διαφορές μεταξύ των πιθανοτήτων των εναλλακτικών επιλογών ώρας αναχώρησης και διαδρομής σε κάθε δεκαπεντάλεπτο για την ομάδα B είναι μεγαλύτερες σε σχέση με της ομάδας A. Η ομάδα B, γνωρίζοντας καλύτερα τις τρέχουσες κυκλοφοριακές συνθήκες, επιλέγει μαζικότερα και πιο συχνά τις βέλτιστες επιλογές ώρας αναχώρησης και διαδρομής σε σύγκριση με την ομάδα A.

4.6 Η διαδικασία της βαθμονόμησης του προτύπου

Καταρχήν οι παράμετροι οι οποίοι διερευνούνται είναι το θ (θ_A και θ_B), που εκφράζει την αντίληψη του κόστους μετακίνησης από τους χρήστες και το μ , ο οποίος είναι ένας εκθέτης που βρίσκεται στην συνάρτηση υπολογισμού του χρόνου μετακίνησης στο σύνδεσμο (BPR) :

$$t_m = t_m^0 (1 + \beta (f_m / y_m)^\mu)$$

όπου t_m^0 είναι ο χρόνος μετακίνησης του συνδέσμου που αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερης ροής και β , μ είναι παράμετροι κλίμακας (εδώ $\beta = 0.15$ και $\mu = 3$ (αρχική τιμή)). Επιπλέον,

τα f_m και y_m αντιστοιχούν στον κυκλοφοριακό φόρτο και την ικανότητα του συνδέσμου αντίστοιχα. Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι πραγματοποιείται μία βηματική διερεύνηση των συγκεκριμένων παραμέτρων και συγκεκριμένα το βήμα είναι συνήθως 5%.

Δεν πρέπει να παραληφθεί ότι οι αρχικές τιμές των παραμέτρων είναι αυτές της περίπτωσης (4) της παραγράφου 3.5. Η περίπτωση (4) επιλέχτηκε από το πρωταρχικό στάδιο της βαθμονόμησης, την ποιοτική ανάλυση, όπου έγιναν τα πρώτα τρεξίματα του προτύπου. Κρίθηκε η πιο κατάλληλη, καθώς στη συγκεκριμένη περίπτωση το πρότυπο συγκλίνει αρκετά γρήγορα και το μεταφορικό σύστημα έχει καλή απόδοση σε σύγκριση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Όσον αφορά στις επόμενες περιπτώσεις (5) και (6), παρόλο που το πρότυπο συγκλίνει πιο γρήγορα και το σύστημα έχει καλύτερη απόδοση (μικρότερο συνολικό χρόνο μετακίνησης) από την περίπτωση (4), το ποσοστό πληροφόρησης πραγματικού χρόνου είναι αρκετά μεγαλύτερο του 25%, το οποίο δεν είναι εύλογο. Το όριο αυτό, όπως έχει και προαναφερθεί, έχει σημειωθεί ως αποτέλεσμα έρευνας σε διάφορες δημοσιεύσεις και συνεπώς λαμβάνεται ως έχει.

Τα **βήματα της βαθμονόμησης** έχουν ως εξής:

(Υβριδική Αναζήτηση-Hybrid Search)

Βήμα 1:

Μεταβολή των θ_{A0} και θ_{B0} με βήμα 5%, με μ_0 σταθερό $\longrightarrow$
Προσδιορισμός των θ_{A1} και θ_{B1} .

Βήμα 2:

Μεταβολή του μ_0 με βήμα 5%, με θ_{A1} και θ_{B1} σταθερά $\longrightarrow$
Προσδιορισμός του μ_1 .

Βήμα 3:

Μεταβολή των θ_{A1} και θ_{B1} με βήμα 5%, με μ_1 σταθερό $\longrightarrow$
Προσδιορισμός των θ_{A2} και θ_{B2} .

Βήμα 4:

Μεταβολή του μ_1 με βήμα 5%, με θ_{A2} και θ_{B2} σταθερά $\longrightarrow$
Προσδιορισμός του μ_2 .

Κάθε ένα από τα παραπάνω βήματα ακολουθεί τον προγραμματισμό του σχήματος. Όσο αυξάνονται τα βήματα, προσεγγίζονται οι παράμετροι με μεγαλύτερη ακρίβεια.

4.6.1 Περιγραφή των μετρήσεων της κυκλοφορίας

Οι μετρήσεις λήφθηκαν στις 12/05/2009 και αφορούν στους συνδέσμους 10 και 12. Οι μετρήσεις είναι οι ωριαίοι φόρτοι της κυκλοφορίας στους δύο αυτούς συνδέσμους με προσανατολισμό προς το κέντρο της Αθήνας. Επίσης, οι μετρήσεις δόθηκαν από το εργαστήριο Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

Σύνδεσμος (10): Οδός Πανόρμου

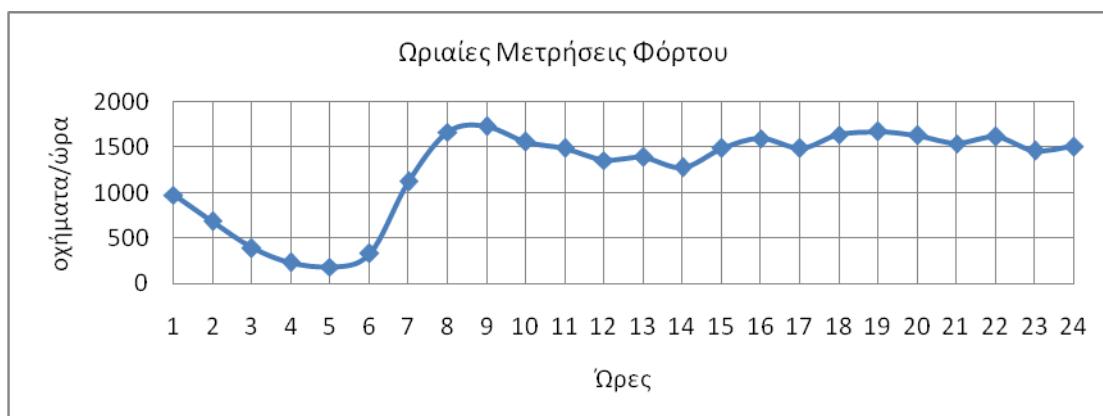
Περιγραφή θέσης: 200μ πριν από τη Λ. Κηφισίας



Σχήμα 4.30: Ωριαίες μετρήσεις φόρτου του συνδέσμου (10) για μία ημέρα

Σύνδεσμος (12): Λ. Βας. Σοφίας

Περιγραφή θέσης: κόμβος Αλεξάνδρας-Βας. Σοφίας



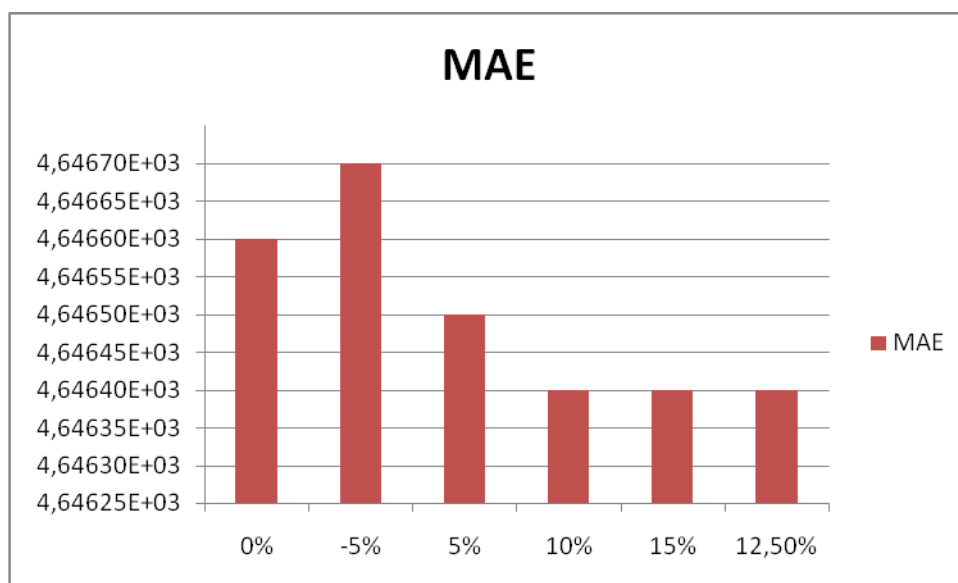
Σχήμα 4.31: Ωριαίες μετρήσεις φόρτου του συνδέσμου (12) για μία ημέρα

Πρέπει να σημειωθεί ότι επειδή το πρότυπο εκτιμά 15λεπτους φόρτους και οι μετρήσεις είναι ωριαίες, τα αποτελέσματα του προτύπου και συγκεκριμένα οι φόρτοι των δύο αυτών συνδέσμων αθροίζονται σε ωριαίους, ώστε να γίνει η σύγκριση των εκτιμήσεων με τις αντίστοιχες παρατηρήσεις/μετρήσεις.

4.6.2 Τα αποτελέσματα των βημάτων της βαθμονόμησης

Βήμα 1:

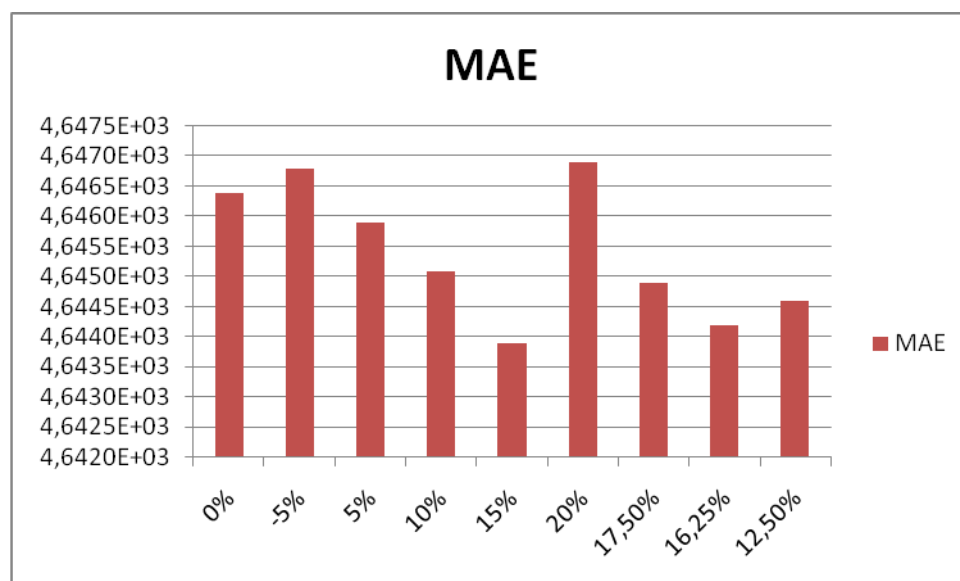
Μεταβολή των θ_{A0} και θ_{B0} με βήμα 5%, με $\mu_0 = 3$ σταθερό $\longrightarrow$ Προσδιορισμός των θ_{A1} και θ_{B1} . Προέκυψε $\theta_{A1} = 0.3375$ και $\theta_{B1} = 1.125$. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στην δοκιμή 6, στην οποία τα θ είναι αυξημένα κατά 12.5% σε σχέση με τα αρχικά.



Σχήμα 4.32: 1^ο βήμα βαθμονόμησης-Δοκιμές και αντίστοιχα MAE

Βήμα 2:

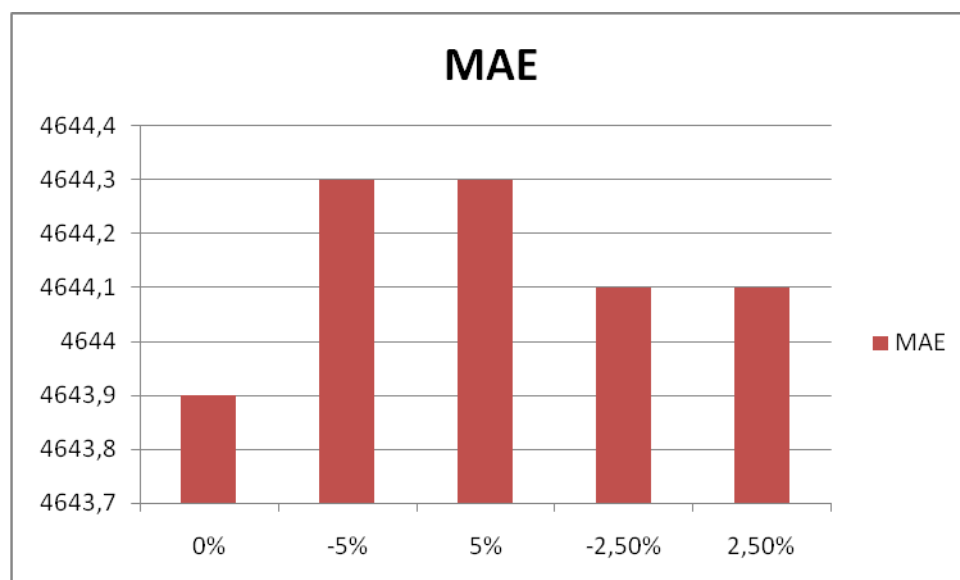
Μεταβολή του μ_0 με βήμα 5%, με θ_{A1} και θ_{B1} σταθερά $\longrightarrow$ Προσδιορισμός του μ_1 . Προέκυψε $\mu_1 = 3.45$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην δοκιμή 5, στην οποία το μ είναι αυξημένο κατά 15% σε σχέση με το αρχικό.



Σχήμα 4.33: 2^ο βήμα βαθμονόμησης-Δοκιμές και αντίστοιχα MAE

Βήμα 3:

Μεταβολή των θ_{A1} και θ_{B1} με βήμα 5%, με μ_1 σταθερό $\longrightarrow$ Προσδιορισμός των θ_{A2} και θ_{B2} . Προέκυψε $\theta_{A2} = 0.3375$ και $\theta_{B2} = 1.125$. Οι τιμές αυτές των θ είναι ίδιες με τα αποτελέσματα του βήματος 1.

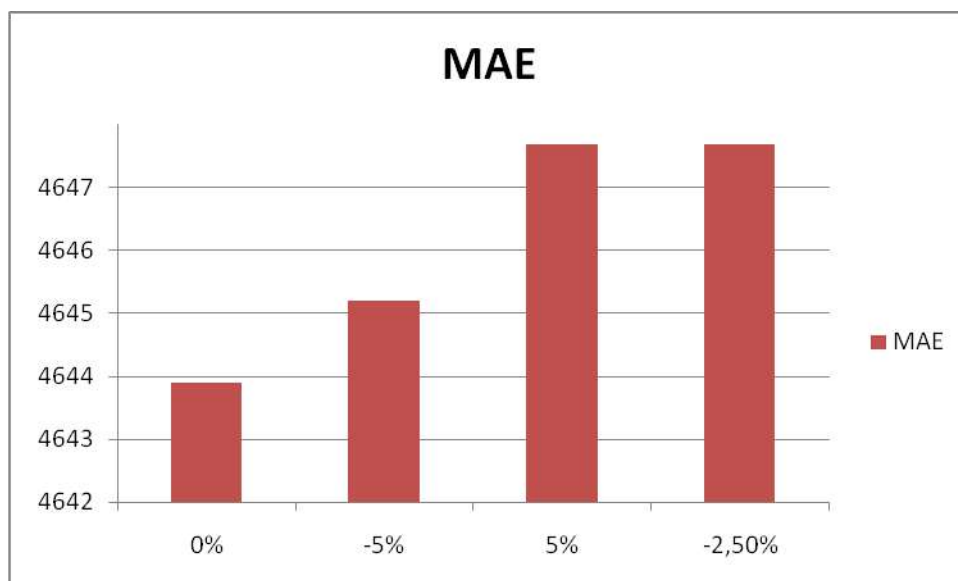


Σχήμα 4.34: 3^ο βήμα βαθμονόμησης-Δοκιμές και αντίστοιχα MAE

Βήμα 4:

Μεταβολή του μ_1 με βήμα 5%, με θ_{A2} και θ_{B2} σταθερά $\longrightarrow$ Προσδιορισμός του μ_2 .

Προέκυψε $\mu_2 = 3.45$. Η τιμή αυτή του μ είναι ίδια με το αποτέλεσμα του βήματος 2.



Σχήμα 4.35: 4^ο βήμα βαθμονόμησης-Δοκιμές και αντίστοιχα MAE

Συνεπώς, οι κατάλληλοι παράμετροι είναι οι: $\theta_A = 0.3375$

$$\theta_B = 1.125$$

$$\mu = 3.45$$

Δηλαδή, αυτές οι τιμές των παραμέτρων αντιστοιχούν στο βαθμονομημένο πλέον πρότυπο.

Ακολουθεί η εκτίμηση της ζήτησης. Η εκτίμηση της ζήτησης είναι μία άλλη διαδικασία, η οποία εκτελείται μετά τη βαθμονόμηση του προτύπου.

Συμπερασματικά, η αλυσίδα είναι η εξής:

- Δημιουργία προτύπου
- Βαθμονόμηση προτύπου
- Χρήση βαθμονομημένου προτύπου για διάφορους σκοπούς (όπως, εκτίμηση ζήτησης, εκτίμηση των επιπτώσεων από την εισαγωγή διαφόρων πολιτικών/μέτρων σχεδιασμού ή διαχείρισης της υποδομής κ.λπ.)

4.7 Τα αποτελέσματα της επανεκτίμησης της ζήτησης

Τα αποτελέσματα της επανεκτίμησης της ζήτησης παρουσιάζονται παρακάτω:

Η αρχική συνολική ημερήσια μεταφορική ζήτηση για κάθε ένα από τρία ζεύγη κόμβων προέλευσης-προορισμού είναι:

$$sdem_01 = 32531$$

$$sdem_O2=32337$$

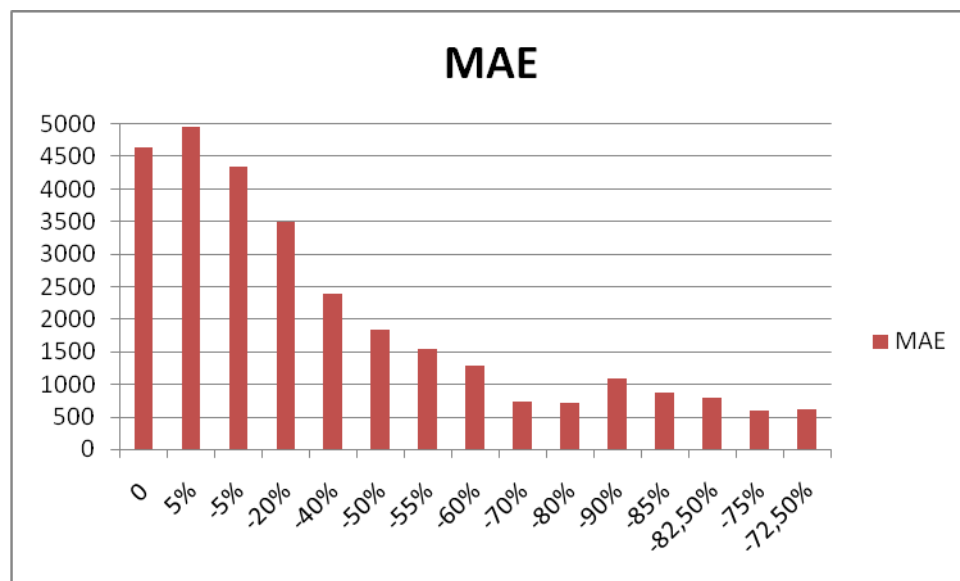
$$sdem_O3=9936$$

Τα αποτελέσματα της εκτίμησης της ζήτησης προέκυψαν από τη δοκιμή (14), η συνολική ημερήσια ζήτηση της οποίας είναι μειωμένη σε σχέση με την αρχική κατά 75%. Δηλαδή η συνολική ημερήσια ζήτηση για κάθε ένα από τρία ζεύγη κόμβων προέλευσης-προορισμού εκτιμάται ως εξής:

$$sdem_O1=0.25*32531=8132.75$$

$$sdem_O2=0.25*32337=8084.25$$

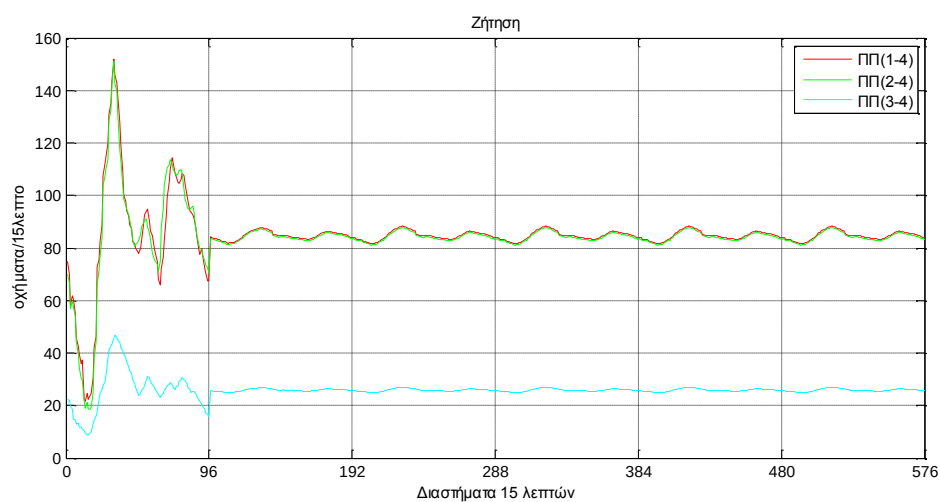
$$sdem_O3=0.25*9936=2484$$



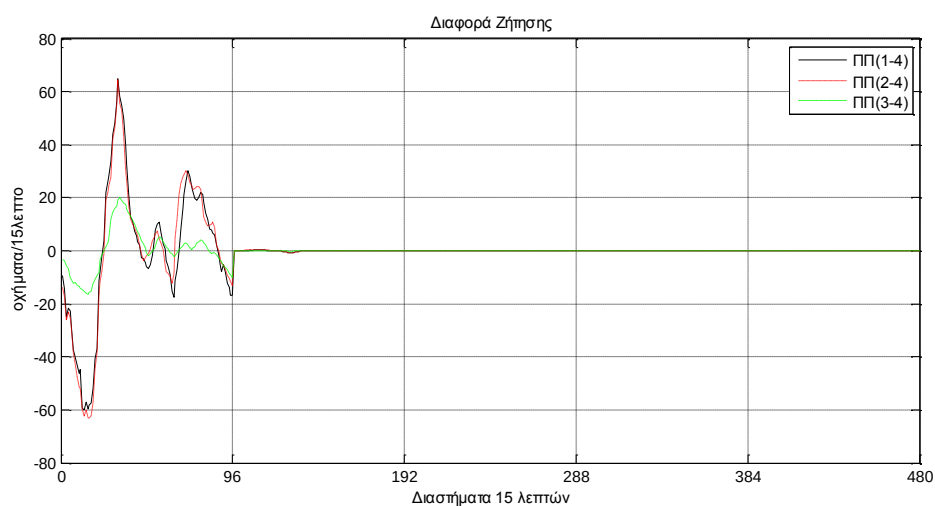
Σχήμα 4.36: Εκτίμηση της ζήτησης-Δοκιμές και αντίστοιχα MAE.

4.8 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

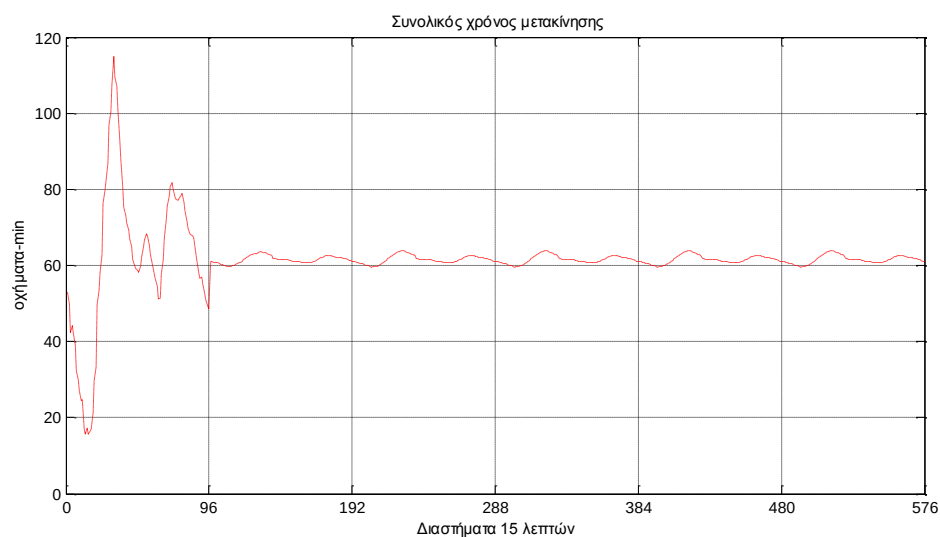
Παρακάτω, παρουσιάζονται κάποια από τα αποτελέσματα του βαθμονομημένου προτύπου με τη ζήτηση όπως εκτιμήθηκε στην παράγραφο 4.5. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων, όπου ο οριζόντιος άξονας είναι ο άξονας του χρόνου σε δεκαπεντάλεπτα. Μελετάται η εξέλιξη των διαφορών κυκλοφοριακών μεγεθών για έξι μέρες.



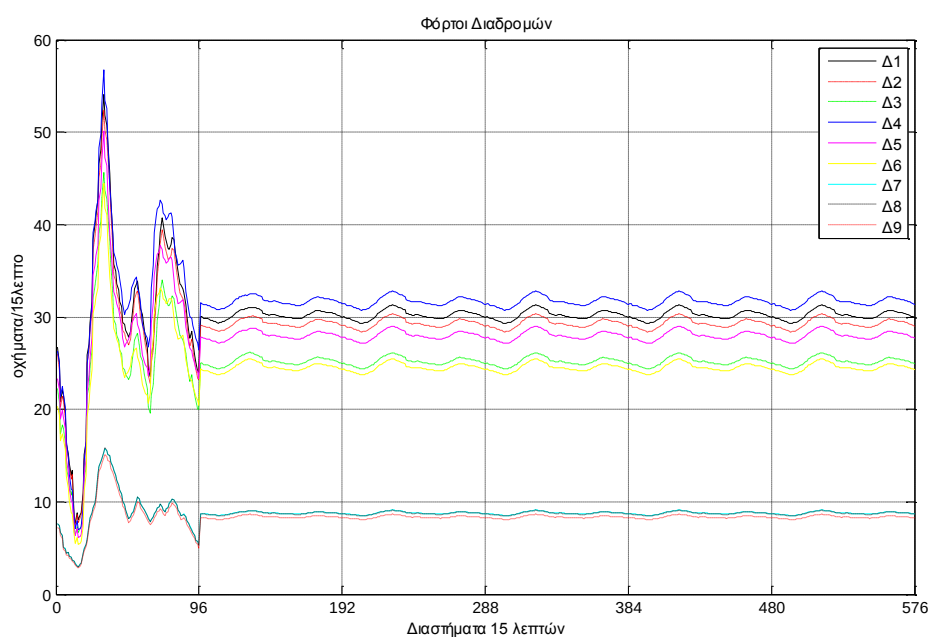
Σχήμα 4.37: Εξέλιξη της ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για το βαθμονομημένο πρότυπο



Σχήμα 4.38: Εξέλιξη της Διαφοράς Ζήτησης ανά ζεύγος Π-Π για το βαθμονομημένο πρότυπο

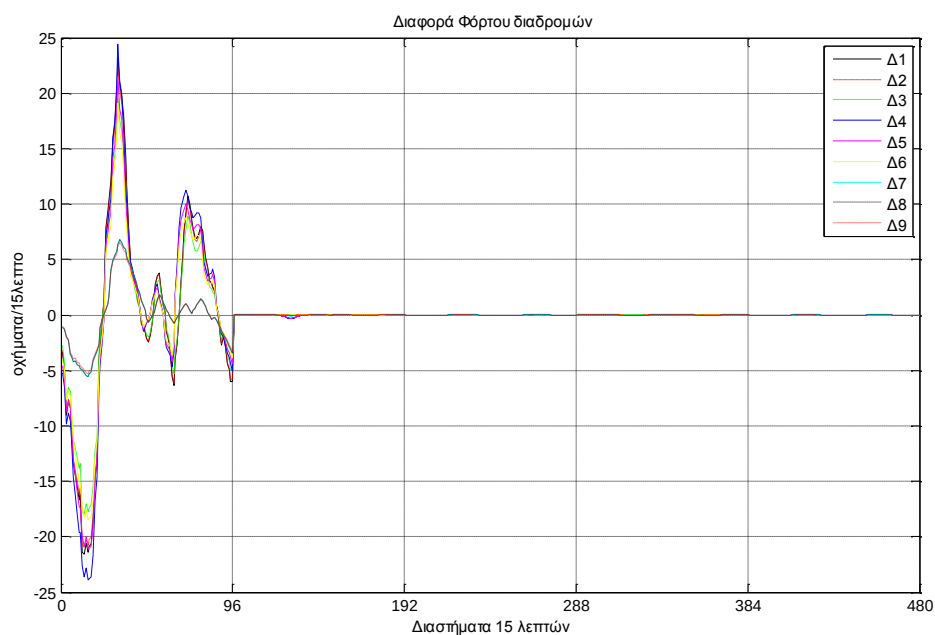


Σχήμα 4.39: Εξέλιξη του Συνολικού Χρόνου Μετακίνησης για το βαθμονομημένο πρότυπο

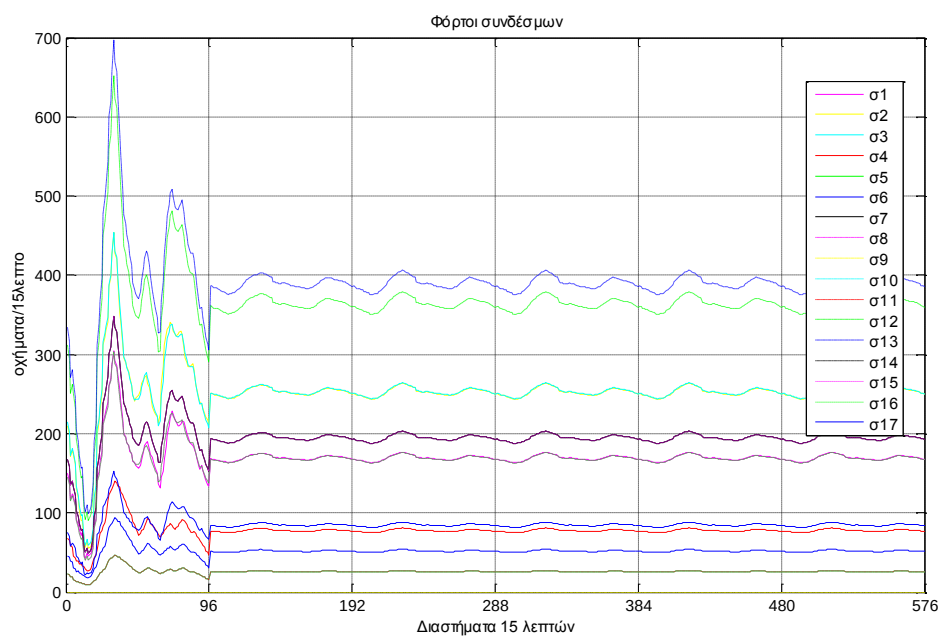


Σχήμα 4.40: Εξέλιξη των φόρτων των διαδρομών για το βαθμονομημένο πρότυπο

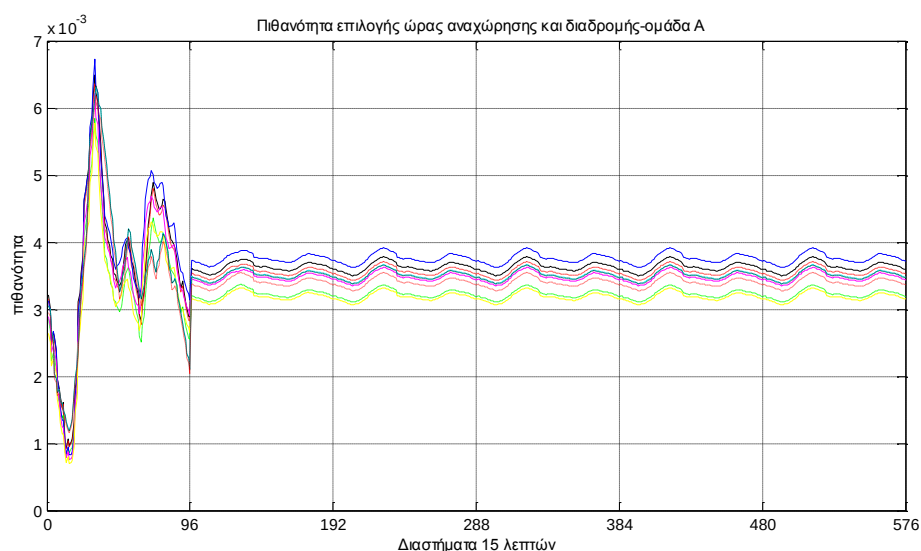
Όπου Δ: Διαδρομή



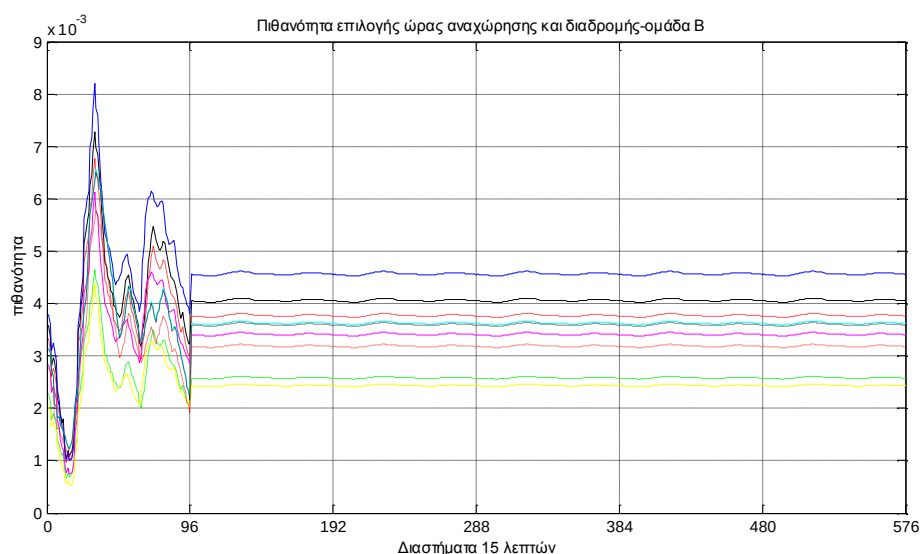
Σχήμα 4.41: Εξέλιξη των διαφορών των φόρτων των διαδρομών για το βαθμονομημένο πρότυπο
όπου Δ: Διαδρομή



Σχήμα 4.42: Εξέλιξη των φόρτων των διαδρομών για το βαθμονομημένο πρότυπο
Όπου σ: σύνδεσμος



Σχήμα 4.43: Εξέλιξη της πιθανότητας επιλογής ώρας αναχώρησης και διαδρομής της ομάδας Α, για το βαθμονομημένο πρότυπο



Σχήμα 4.44: Εξέλιξη της πιθανότητας επιλογής ώρας αναχώρησης και διαδρομής της ομάδας Β, για το βαθμονομημένο πρότυπο

Τα αποτελέσματα του προτύπου, που περιγράφονται με τη μορφή των παραπάνω διαγραμμάτων, είναι τα πιο αξιόπιστα και τα πιο ρεαλιστικά, καθώς έχουν προκύψει από τη βαθμονόμηση του προτύπου και την εκτίμηση της ημερήσιας ζήτησης. Το συγκεκριμένο πρότυπο έχει τις κατάλληλες παραμέτρους θ και μ και την εκτιμημένη ζήτηση, όπως προέκυψε από τις δύο αυτές διαδικασίες. Επίσης, το ποσοστό της πληροφόρησης

πραγματικού χρόνου είναι εύλογο (20%) καθώς είναι μικρότερο από 25%. Το όριο αυτό είναι, όπως έχει ξαναειπωθεί, αποτέλεσμα έρευνας και αναφέρεται στα αστικά μεταφορικά δίκτυα, στα οποία ένα τμήμα των χρηστών επεξεργάζεται πληροφορία πραγματικού χρόνου (δυναμική πληροφόρηση).

Από όλα τα διαγράμματα παρατηρείται ότι το πρότυπο συγκλίνει από τη δεύτερη μέρα και αργότερα. Η σύγκλιση του προτύπου υποδηλώνει ότι το μεταφορικό σύστημα έχει φθάσει σε μία ισορροπία προσφοράς και ζήτησης για τους χρήστες. Η ισορροπία αυτή είναι μία δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών του μεταφορικού συστήματος. Επίσης, από το διάγραμμα του συνολικού χρόνου μετακίνησης για το βαθμονομημένο πρότυπο, συμπεραίνεται ότι η απόδοση του συστήματος είναι καλύτερη από όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται στην παράγραφο 3.5 (Προσαρμογή παραμέτρων-αξιοπιστία).

Η γρηγορότερη αυτή σύγκλιση του βαθμονομημένου προτύπου και η βελτιωμένη απόδοση του συστήματος, που περιγράφει, σε σχέση με τις περιπτώσεις της παραγράφου 3.5 αποδίδεται στο γεγονός ότι η ημερήσια ζήτηση του βαθμονομημένου προτύπου είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή που χρησιμοποιείται στις άλλες περιπτώσεις παραμέτρων. Συμπερασματικά, η αρχική εκτίμηση της ζήτησης ήταν υπερβολική. Η μειωμένη (κατά 75% σε σχέση με την αρχική εκτίμηση) αυτή ημερήσια ζήτηση συνεπάγεται μικρότερη αλληλεπίδραση μεταξύ των οχημάτων και συνεπώς μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της συμφόρησης. Στην προκειμένη περίπτωση, λοιπόν, οι επιλογές των χρηστών σταθεροποιούνται, από μέρα σε μέρα, πιο γρήγορα, με αποτέλεσμα η δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών να επιτυγχάνεται γρηγορότερα (από τη δεύτερη κιόλας ημέρα). Επίσης, λόγω αυτής της μειωμένης αλληλεπίδρασης των μετακινούμενων, οι χρόνοι μετακίνησης είναι σχετικά μικροί και κατ' επέκταση ο συνολικός χρόνος μετακίνησης είναι μικρός. Να σημειωθεί, πάλι, ότι ο συνολικός χρόνος μετακίνησης συνιστά το άθροισμα των χρόνων μετακίνησης όλων των μετακινούμενων. Για το λόγο αυτό, ο συνολικός χρόνος μετακίνησης προκύπτει ως το άθροισμα των γινομένων όλων των φόρτων με τους αντίστοιχους χρόνους μετακίνησης και για τις δύο ομάδες.

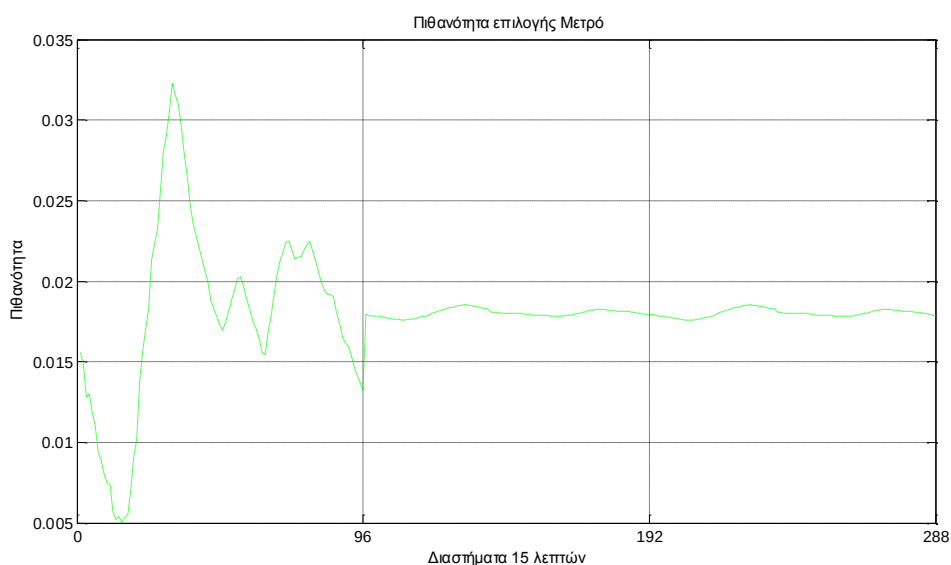
Τέλος, επειδή οι χρήστες της δεύτερης ομάδας έχουν μια πιο ακριβή αντίληψη των τρεχουσών κυκλοφοριακών συνθηκών σε σύγκριση με την πρώτη, καθώς επεξεργάζονται πληροφόρηση πραγματικού χρόνου, εμφανίζουν μικρότερη διασπορά στις εναλλακτικές διαδρομές, δηλαδή διαλέγουν πιο συχνά τις βέλτιστες διαδρομές. Για τους λόγους αυτούς, οι διαφορές μεταξύ των πιθανοτήτων των εναλλακτικών επιλογών ώρας αναχώρησης και διαδρομής σε κάθε δεκαπεντάλεπτο για την ομάδα Β είναι μεγαλύτερες σε σχέση με της ομάδας Α. Με άλλα λόγια, η ομάδα Β, γνωρίζοντας καλύτερα τις τρέχουσες κυκλοφοριακές συνθήκες, επιλέγει μαζικότερα και πιο συχνά τις βέλτιστες επιλογές ώρας αναχώρησης και διαδρομής σε σύγκριση με την ομάδα Α, με αποτέλεσμα οι πιθανότητες των εναλλακτικών επιλογών της δεύτερης ομάδας να διαφέρουν έντονα μεταξύ τους.

Ακολουθούν κάποια διαγράμματα σύγκρισης του οδικού δικτύου με το Μετρό:



Σχήμα 4.45: Πιθανότητα χρήσης του οδικού δικτύου

Η πιθανότητα χρήσης του οδικού δικτύου ταυτίζεται εδώ με τη πιθανότητα χρήσης του επιβατικού αυτοκινήτου (IX).

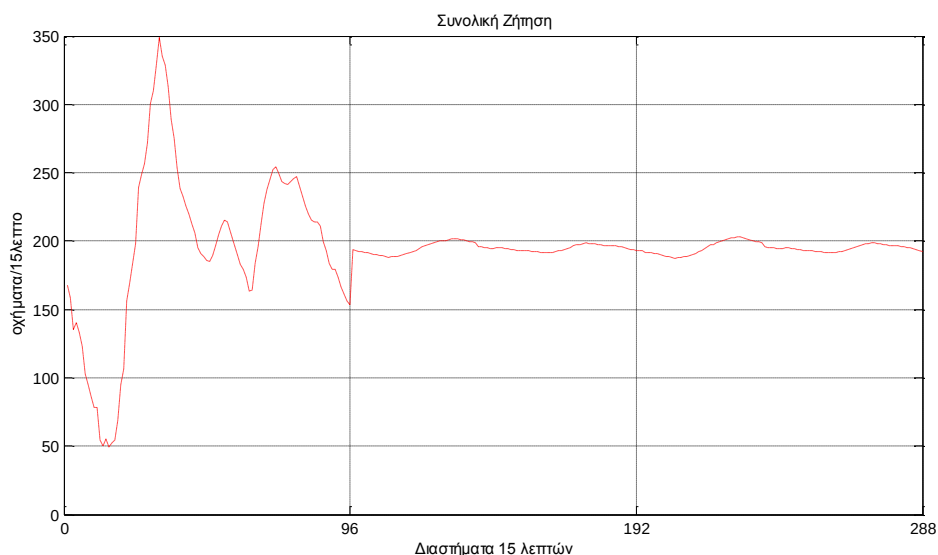


Σχήμα 4.46: Πιθανότητα χρήσης του Μετρό

Παρατηρείται μεγαλύτερη χρήση του επιβατικού αυτοκινήτου σε σύγκριση με το Μετρό. Η τάση αυτή χαρακτηρίζει τη σημερινή εποχή, καθώς τα πλεονεκτήματα του ΙΧ είναι σημαντικά. Στα πλεονεκτήματά του συγκαταλέγονται η ευελιξία στις διαδρομές και η δυνατότητα εξυπηρέτησης από πόρτα σε πόρτα. Και το Μετρό, ωστόσο, έχει σημαντικά πλεονεκτήματα (μεγάλη χωρητικότητα, μικρότερη κατανάλωση ενέργειας ανά μεταφερόμενο επιβάτη, πολύ πιο περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις) και γίνεται ολοένα και πιο ελκυστικό στη σημερινή εποχή. Σε αυτό συνέβαλλαν σε σημαντικό βαθμό οι αρνητικές

επιπτώσεις της υπερβολικής χρήσης του ΙΧ, οι οποίες είναι ο κορεσμός της κυκλοφορίας, σημαντικές καθυστερήσεις, ατμοσφαιρική και ηχητική ρύπανση, υποβάθμιση της ποιότητας ζωής.

Τέλος, παρατίθεται και το διάγραμμα της Συνολικής Ζήτησης για να τεκμηριωθεί η συσχέτιση ανάμεσα στη χρήση του Μετρό και στη συμμόρφωση του οδικού δικτύου.



Σχήμα 4.47: Εξέλιξη της Συνολικής Ζήτησης για τρεις ημέρες

Από τα διαγράμματα 4.20 και 4.21 παρατηρείται ότι το ποσοστό χρήσης του Μετρό στις περισσότερες συμφορημένες ώρες είναι μεγαλύτερο από ότι στις μη συμφορημένες. Στις περιόδους με αυξημένη μεταφορική ζήτηση υπάρχει μία στροφή προς το Μετρό, το οποίο, όπως προαναφέρθηκε, δεν επηρεάζεται από τη συμμόρφωση. Αυτό είναι εύλογο και αποδεικνύει την αξιοπιστία του συστήματος και του προτύπου.

4.8 Στοιχεία Προγραμματισμού

Παρακάτω, δίνονται και κάποια σημαντικά στοιχεία του προγραμματισμού:

- Το πρότυπο κωδικοποιήθηκε στην υπολογιστική πλατφόρμα MATLAB σε περίπου 600 γραμμές προγραμματισμού.
- Το πρόγραμμα τρέχει για δύο μέρες σε 2 sec και για δέκα μέρες σε περίπου 8min.
- Επεξεργαστής: Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU [T7250@2.00GHZ](#) 2.00GHZ
- Μνήμη RAM: 2046MB
- Τύπος συστήματος: Λειτουργικό σύστημα 32-bit

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Σύνοψη

Η απόδοση του προτύπου εξαρτάται από την ποιότητα των αποτελεσμάτων του προτύπου και την αξιοπιστία του. Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 4.5, ένα πρότυπο είναι αξιόπιστο όταν:

- αναπαράγει με ρεαλιστικό τρόπο τη δυναμική της κυκλοφορίας,
- συγκλίνει, εάν το φαινόμενο που περιγράφει ισορροπεί, όπως συμβαίνει στην προκειμένη περίπτωση,
- παρουσιάζει ευαισθησία στις μεταβολές των δεδομένων και των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το πρότυπο.

Αξιολόγηση της απόδοσης του προτύπου με κριτήριο την αναπαράσταση της δυναμικής της κυκλοφορίας.

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι που καθιστούν το πρότυπο αρκετά ρεαλιστικό. Οι λόγοι αυτοί παρουσιάζονται παρακάτω:

i. Το προτεινόμενο πρότυπο προβλέπει τη συμπεριφορά των χρηστών σχετικά με την επιλογή ώρας αναχώρησης σε συνδυασμό με την επιλογή μέσου και διαδρομής. Ο συνδυασμός αυτός των επιλογών είναι ιδιαίτερα χρήσιμος και καθιστά το πρότυπο πιο ρεαλιστικό. Είναι γνωστό ότι, στην πράξη, οι οδηγοί επιλέγουν εναλλακτικές διαδρομές και ώρες αναχώρησης ώστε να μειώσουν τους χρόνους μετακίνησης και να αποφύγουν τη συμφόρηση. Οι δύο αυτές επιλογές δεν είναι ανεξάρτητες, αλλά αντιθέτως αλληλοεξαρτώνται.

ii. Το πρότυπο εξετάζει δύο ομάδες χρηστών. Οι μετακινούμενοι κατηγοριοποιούνται σε δύο τάξεις/ομάδες ανάλογα με τα κοινωνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά τους. Το γεγονός αυτό καθιστά το πρότυπο πιο αναλυτικό και λεπτομερές, καθώς οι μετακινούμενοι έχουν σημαντικές διαφορές τόσο ως προς την αξία του χρόνου μετακίνησης (που εξαρτάται από την οικονομική κατάσταση των μετακινούμενων και το σκοπό της μετακίνησης) όσο και ως προς το είδος της πληροφόρησης την οποία λαμβάνουν. Στο συγκεκριμένο πρότυπο, συνεπώς, κάθε χρήστης/μετακινούμενος, ανάλογα με τα κοινωνικό-οικονομικά του χαρακτηριστικά, εντάσσεται σε μία από τις δύο ομάδες/τάξεις και μέσω της συμπεριφοράς της ομάδας του μελετάται και η ατομική του συμπεριφορά. Αξίζει να αναφερθεί ότι κάθε ομάδα έχει

ευδιάκριτα χαρακτηριστικά σε σχέση με τις άλλες ομάδες και παρουσιάζει ομοιογένεια εντός της ομάδας.

Υπάρχουν, ωστόσο, και κάποιοι λόγοι που μειώνουν τον ρεαλισμό του προτύπου. Οι λόγοι αυτοί παρουσιάζονται παρακάτω:

i. Παρόλο που εκτιμάται η μεταβολή της ζήτησης ως προς τον χρόνο (εδώ διαιρεμένος σε δεκαπεντάλεπτα), δεν υπάρχει ένα ρεαλιστικό και αναλυτικό κυκλοφοριακό πρότυπο. Για την εκτίμηση του χρόνου μετακίνησης κάθε συνδέσμου χρησιμοποιείται η *συνάρτηση BPR*, η οποία προσφέρει μία μη γραμμική προσέγγιση σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα πολύ ανώτερης τάξης. Με τη βοήθεια της συνάρτησης αυτής, υπολογίζεται ο μέσος χρόνος μετακίνησης για κάθε δεκαπεντάλεπτο. Συνεπώς, στην πραγματικότητα, οι χρόνοι μετακίνησης μπορεί να έχουν σημαντικές αποκλίσεις από αυτούς που χρησιμοποιούνται στο παρόν πρότυπο. Αυτό συνεπάγεται ότι το παρόν πρότυπο μπορεί να μην αναπαράγει με αρκετά ρεαλιστικό τρόπο τη δυναμική της κυκλοφορίας, από μέρα σε μέρα και εντός της ημέρας.

ii. Το παρόν πρότυπο αποτελεί ένα πολυωνυμικό πρότυπο Logit. Για το λόγο αυτό το προτεινόμενο πρότυπο έχει τους περιορισμούς που αντιστοιχούν στα πρότυπα Logit. Ειδικότερα, οι υποθέσεις της *ανεξαρτησίας* και της *όμοιας κατανομής των όρων των τυχαίων σφαλμάτων* έχει σαν συνέπεια να μην λαμβάνονται υπόψη οι συσχετίσεις μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών και την ίση διακύμανση στις εναλλακτικές επιλογές (ανεξάρτητα αν υπάρχουν σχετικές διαφορές στο συστηματικό όρο των χρησιμοτήτων που αντιστοιχούν σε αυτές). Οι υποθέσεις αυτές περιορίζουν την αξιοπιστία του προτύπου, καθώς στην πραγματικότητα, οι εναλλακτικές επιλογές έχουν συσχέτιση μεταξύ τους (πολλές εναλλακτικές διαδρομές έχουν κοινούς συνδέσμους) και διαφέρουν ως προς το ντετερμινιστικό τμήμα της συνάρτησης χρησιμότητας.

iii. Μια άλλη μη ρεαλιστική υπόθεση του συγκεκριμένου προτύπου είναι ότι οι μετακινούμενοι *δεν αναθεωρούν την επιλογή διαδρομής* κατά τη διάρκεια της μετακίνησής τους. Η παραδοχή αυτή συχνά δεν ικανοποιείται στην πραγματικότητα. Αυτό συμβαίνει γιατί, στην πράξη, οι χρήστες αντιλαμβάνονται τις κυκλοφοριακές συνθήκες που συναντούν ή ενημερώνονται για τις κυκλοφοριακές συνθήκες που θα συναντήσουν και πράττουν ανάλογα, τόσο κατά την αναχώρηση όσο και κατά τη διάρκεια της μετακίνησής τους (εκτροπή από την αρχική επιλεγμένη διαδρομή).

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι όσο πιο *δυναμικό* είναι ένα κυκλοφοριακό πρότυπο, τόσο πιο αναλυτικά και ρεαλιστικά αναπαράγει το ευρύ φάσμα της κυκλοφορίας. Για το λόγο αυτό, στην παράγραφο αυτή, θα σχολιασθεί το πόσο δυναμικό είναι το συγκεκριμένο πρότυπο. Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι το παρόν πρότυπο χαρακτηρίζεται ως ημιδυναμικό. Ο χαρακτηρισμός αυτός αιτιολογείται παρακάτω:

- i. Η περίοδος μελέτης είναι υποδιαιρεμένη σε ίσα μικρά χρονικά διαστήματα, δεκαπεντάλεπτα. Τα διάφορα κυκλοφοριακά μεγέθη εκτιμούνται για κάθε δεκαπεντάλεπτο. Εξετάζεται, δηλαδή, η μεταβολή των διαφόρων μεγεθών κατά τη διάρκεια του χρόνου (στην προκειμένη περίπτωση ο χρόνος είναι διακριτοποιημένος), γεγονός που εξηγεί τη δυναμικότητα του προτύπου.
- ii. Το πρότυπο περιγράφει τη δυναμική της κυκλοφορίας *βραχυπρόθεσμα* (εντός της ημέρας) και *μακροπρόθεσμα* (από μέρα σε μέρα), για αυτό και χαρακτηρίζεται ως ημιδυναμικό.
- iii. Επίσης, χρησιμοποιείται η συνάρτηση BPR, όπως έχει προαναφερθεί, με την οποία δεν επιτυγχάνεται ένας ακριβής υπολογισμός του χρόνου/κόστους μετακίνησης. Αυτός είναι ένας λόγος που μειώνει τη δυναμικότητα του προτύπου.
- iv. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται οι *στιγμιαίοι* χρόνοι μετακίνησης και όχι οι πραγματικοί. Γίνεται, συνεπώς, η παραδοχή ότι κατά τη διάρκεια του κάθε δεκαπενταλέπτου οι κυκλοφοριακές συνθήκες παραμένουν αμετάβλητες. Επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι κάθε μετακινούμενος αναχωρεί και φθάνει στον προορισμό του εντός του ίδιου δεκαπενταλέπτου. Οι παραδοχές αυτές μειώνουν τη δυναμικότητα του προτύπου και κατ' επέκταση τον ρεαλισμό του.
- v. Συνεχίζοντας, όπως έχει σχολιαστεί στο κεφάλαιο 2, στα δυναμικά πρότυπα, γίνεται η υπόθεση ότι ο πραγματικός χρόνος μετακίνησης σε ένα σύνδεσμο εξαρτάται από τον αριθμό των οχημάτων, το φόρτο εισόδου και εξόδου από το σύνδεσμο την χρονική στιγμή t . Όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος εισόδου είναι μεγαλύτερος από το φόρτο εξόδου, τότε το φαινόμενο της συμφόρησης εμφανίζεται και διαδίδεται προς τα ανάντη. Στο συγκεκριμένο πρότυπο, ένας μόνο φόρτος αντιστοιχεί σε κάθε σύνδεσμο, σύμφωνα με τον οποίο εκτιμάται ο χρόνος/κόστος μετακίνησης του κάθε συνδέσμου σε κάθε δεκαπεντάλεπτο. Συνεπώς, δεν ερευνάται άμεσα η δημιουργία και η διάδοση/εξέλιξη της συμφόρησης, καθώς δεν εξετάζεται αν ο κυκλοφοριακός φόρτος που υπολογίζεται από το πρότυπο μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον κάθε σύνδεσμο (με βάση την κυκλοφοριακή ικανότητα του συνδέσμου).

Αξιολόγηση της απόδοσης του προτύπου με κριτήριο τη σύγκλιση του προτύπου

Το παρόν (βαθμονομημένο) πρότυπο συγκλίνει από τη δεύτερη μέρα και αργότερα. Με άλλα λόγια αποδίδει μια προσέγγιση της δυναμικής στοχαστικής ισορροπίας των χρηστών του μεταφορικού συστήματος που περιγράφεται. Η σύγκλιση αυτή είναι εύλογη και αναμενόμενη. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη της σύγκλισης αιτιολογείται στην παράγραφο 3.3. Συνοπτικά οι λόγοι που εξηγούν τη σύγκλιση είναι οι εξής:

- i. Όλοι οι χρήστες διέπονται από ατομικιστικό ορθολογισμό,

- ii. Οι ίδιοι χρήστες χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο δίκτυο κάθε μέρα (σταθερή ημερήσια συνολική ζήτηση, σταθερή ζήτηση αφίξεως κάθε μέρα),
- iii. Οι χρήστες δεν έχουν όλοι πρόσβαση στην ίδια πληροφόρηση πραγματικού χρόνου,
- iv. Το ποσοστό πληροφόρησης πραγματικού χρόνου είναι εύλογο (μικρότερο του 25%),
- v. Η αντίληψη των τρεχουσών κυκλοφοριακών συνθηκών είναι αρκετά ακριβής από κάποιους χρήστες,
- vi. Οι χρήστες δεν είναι υπερβολικά ευάλωτοι στις αλλαγές των συνθηκών αυτών.

Όλοι αυτοί οι λόγοι εξηγούν την εξέλιξη του μεταφορικού συστήματος προς μια δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών. Στην κατάσταση αυτή της ισορροπίας, οι επιλογές των μετακινούμενων είναι βέλτιστες και σταθεροποιημένες από μέρα σε μέρα.

Αξιολόγηση της απόδοσης του προτύπου με κριτήριο την ευαισθησία των αποτελεσμάτων στις μεταβολές παραμέτρων.

Η ευαισθησία και η σταθερότητα είναι δύο έννοιες που σχετίζονται με τον τρόπο με τον οποίο η λύση ενός προβλήματος μεταβάλλεται, όταν αλλάζουν οι παράμετροι που το χαρακτηρίζουν. Στην περίπτωση των προτύπων δυναμικού στοχαστικού καταμερισμού της κυκλοφορίας, οι έννοιες αυτές χρησιμοποιούνται με ένα άτυπο τρόπο, για να περιγράψουν τις αναμενόμενες μεταβολές των αποτελεσμάτων, όταν το πρόβλημα αυτό καθεαυτό αλλάζει. Πρέπει να σημειωθεί ότι, εάν η επίλυση σε ένα τροποποιημένο πρότυπο παρουσιάζει μη αναμενόμενα χαρακτηριστικά, αυτό μπορεί να υποδηλώνει μία πτωχή προσέγγιση της ισορροπίας για το αυθεντικό ή το τροποποιημένο πρόβλημα ή και για τα δύο (Network Modeling Committee, TRB, 2010). Συνεπώς, οι μεταβολές των παραμέτρων του προτύπου και η παρατήρηση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων είναι πολύ σημαντικές για την αξιολόγηση του πρότυπου, όσον αφορά την αξιοπιστία του.

Οι μεταβολές των παραμέτρων και η αξιολόγηση των αντίστοιχων μεταβολών των αποτελεσμάτων έγινε στην παράγραφο 3.5 (ποιοτική ανάλυση). Από τη διαδικασία αυτή προέκυψε ότι οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι αναμενόμενες, συμφωνούν, δηλαδή, με τις συσχετίσεις των παραμέτρων που αναφέρονται στην παράγραφο 3.2.2. Οι συσχετίσεις αυτές ανήκουν στο θεωρητικό υπόβαθρο του προτύπου. Όταν, συνεπώς, τα αποτελέσματα του προτύπου είναι σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο αυτού, τότε αυτό είναι υπέρ της αξιοπιστίας του.

Οι μεταβολές των παραμέτρων και οι αναμενόμενες μεταβολές των αποτελεσμάτων που παρατηρήθηκαν παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- i. Η μείωση των παραμέτρων αντίληψης του κόστους, θ , συνεπάγεται τη γρηγορότερη σύγκλιση του προτύπου.

- ii. Η αύξηση του ποσοστού της πληροφόρησης πραγματικού χρόνου, **Bcl**, μέχρι ενός ορίου (συνήθως 25%), έχει σαν αποτέλεσμα τη γρηγορότερη σύγκλιση. Ειδικά όταν υπάρχει η εκτροπή από τη διαδρομή (αναθεώρηση της επιλογής διαδρομής) κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, το πολύ αυξημένο ποσοστό της πληροφόρησης πραγματικού χρόνου συνεπάγεται απομάκρυνση από την ισορροπία.
- iii. Με την αύξηση του ω , οι δύο όροι της συστηματικής χρησιμότητας δεν έχουν ίδια κλίμακα και η δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών επιτυγχάνεται αργότερα ή και καθόλου.
- iv. Όσο πιο γρήγορα επέρχεται η δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών, τόσο πιο γρήγορα βελτιώνεται η απόδοση του μεταφορικού συστήματος.
- v. Η μείωση της μεταφορικής ζήτησης συνεπάγεται μικρότερη αλληλεπίδραση μεταξύ των οχημάτων, με αποτέλεσμα η δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών να επιτυγχάνεται γρηγορότερα και η απόδοση του προτύπου να είναι βελτιωμένη.

Συμπερασματικά, η απόδοση του προτύπου είναι ικανοποιητική, καθώς οι μεταβολές των παραμέτρων δίδουν εύλογα αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, το πρότυπο βαθμονομήθηκε ώστε οι εκτιμήσεις του προτύπου να είναι παραπλήσιες με τις αντίστοιχες μετρήσεις. Επίσης, το πρότυπο αποδίδει μια ικανοποιητική προσέγγιση στη δυναμική στοχαστική ισορροπία των χρηστών (από τη δεύτερη, κιόλας, μέρα), η οποία θεωρείται αρκετά εύλογη, δεδομένων των υποθέσεων του προτύπου. Ωστόσο, το πρότυπο είναι περιοριστικό, σε ένα βαθμό, όσον αφορά στη δυναμικότητα στην αναπαράσταση της κυκλοφορίας. Για το λόγο αυτό χαρακτηρίζεται ως ημιδυναμικό. Στο σημείο αυτό, ωστόσο, πρέπει να ειπωθεί ότι η ανάπτυξη δυναμικών στοχαστικών προτύπων είναι επίκαιρο θέμα και αρκετά δύσκολο.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξηγεί τους λόγους και ενθαρρύνει τη δημιουργία δυναμικών στοχαστικών αναλυτικών προτύπων για την περίπτωση των αστικών διατροφικών μεταφορικών συστημάτων. Το προτεινόμενο πρότυπο, ωστόσο, αποτελεί ένα στοχαστικό, ημιδυναμικό, μεσοσκοπικό πρότυπο διακριτών επιλογών Logit. Επίσης, γίνεται αναφορά σε διάφορες εφαρμογές και προεκτάσεις του συγκεκριμένου προτύπου για την αποτελεσματικότερη διαχείριση της κυκλοφορίας, με σκοπό τα εξής: την ανακούφιση των αστικών δικτύων από τη συμφόρηση, τη μείωση του κόστους μετακίνησης, τη βελτίωση της ασφάλειας, τη μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων από τα οχήματα και της κατανάλωσης ενέργειας και την αύξηση της παραγωγικότητας των επενδύσεων των μεταφορών.

5.3.1 Προτάσεις για πιο δυναμικά πρότυπα

Η βελτίωση της δυναμικότητας των προτύπων που περιγράφουν τη λειτουργία των αστικών μεταφορικών συστημάτων μπορεί να επιτευχθεί λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω:

- i. τη σηματοδότηση,
- ii. τη διαδικασία αναζήτησης και τελικής στάθμευσης,
- iii. τον προγραμματισμό της δρομολόγησης των δικτύων MMM,
- iv. την αναθεώρηση της επιλογής διαδρομής κατά τη διάρκεια της μετακίνησης,
- v. περισσότερες επιλογές μετακίνησης από αυτές του προτεινόμενου προτύπου,
- vi. τους πραγματικούς και όχι τους στιγμιαίους χρόνους μετακίνησης
- vii. το συνδυασμό όσο το δυνατόν περισσότερων παραγόντων στην έννοια του γενικευμένου κόστους, ή στην αντίθετη έννοια της χρησιμότητας, που αντιστοιχεί σε κάθε εναλλακτική επιλογή,
- viii. τη χρήση μικροσκοπικών προτύπων
- ix. αναλυτικότερα πρότυπα κυκλοφορίας.

Παρακάτω αναλύονται συνοπτικά τα παραπάνω στοιχεία, τα οποία όταν λαμβάνονται υπόψη, καθιστούν τα πρότυπα μεταφορών πιο δυναμικά και πιο ρεαλιστικά.

Σηματοδότηση

Η σηματοδότηση, για τους παρακάτω λόγους, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τη δημιουργία πραγματικών προτύπων κυκλοφορίας, ιδίως όταν τα πρότυπα αναφέρονται σε αστικά δίκτυα. Η κυκλοφορία στο μεγαλύτερο ποσοστό των ισόπεδων κόμβων του κύριου αρτηριακού δικτύου μίας πόλης, ιδιαίτερα στην κεντρική της περιοχή, ρυθμίζεται με φωτεινή σηματοδότηση ή απλά σηματοδότηση (Φραντζεσκάκης και Γιαννόπουλος, 1986). Η σηματοδότηση ρυθμίζει σε σημαντικό βαθμό τον κυκλοφοριακό φόρτο της κυκλοφορίας, καθώς καθορίζει τη διάρκεια της περιόδου, τον αριθμό, την αλληλουχία και τη διάρκεια των φάσεων σε κάθε κόμβο, των χρονικών μετατοπίσεων από κόμβο σε κόμβο ενός συστήματος κ.λπ.

Στάθμευση

Επίσης, η στάθμευση πρέπει να εξετάζεται όταν πρόκειται για τη προτυποποίηση της κυκλοφορίας ή της συμπεριφοράς των μετακινούμενων. Η στάθμευση παρά την οδό είναι πολύ συχνό φαινόμενο στις αστικές περιοχές. Αυτό οφείλεται και στην υπερβολική χρήση του επιβατικού αυτοκινήτου σε σύγκριση με τα μέσα μαζικής μεταφοράς, παρόλο που στη σημερινή εποχή ενθαρρύνεται το αντίθετο. Πρέπει να σημειωθεί ότι η στάθμευση στην οδό,

επιτρεπτή ή παράνομη, μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση της κυκλοφοριακής ικανότητας των συνδέσμων και για το λόγο αυτό δεν πρέπει να παραλείπεται αυτός ο παράγοντας.

Επιπλέον, η διαδικασία αναζήτησης θέσης/χώρου στάθμευσης (είτε στον τελικό προορισμό του κάθε ταξιδιού είτε στα σημαία μετεπιβίβασης) αποτελεί επιπλέον φόρτιση του δικτύου αστικών μετακινήσεων, φαινόμενο το οποίο συχνά δεν λαμβάνεται υπόψη αναλυτικά στα δικτυακά πρότυπα (παρά μόνο ίσως στον συντελεστή του γενικευμένου κόστους μετακίνησης). Χρήσιμη επέκταση συνεπώς αναμένεται ότι είναι η εισαγωγή της λειτουργίας αυτής σε δυναμικά κυκλοφοριακά πρότυπα.

Αναθεώρηση της επιλογής διαδρομής κατά τη διάρκεια της μετακίνησης

Οι χρήστες των μεταφορικών δικτύων προσαρμόζονται στις εκάστοτε κυκλοφοριακές συνθήκες κάνοντας επιλογές ώρας αναχώρησης και διαδρομής. Στο παρόν πρότυπο, γίνεται η παραδοχή ότι οι χρήστες δεν αναθεωρούν την επιλογή διαδρομής μετά την αναχώρησή τους. Στην πράξη, όμως, η επιλογή διαδρομής συχνά αναθεωρείται κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, ανάλογα με τις συνθήκες τις οποίες συναντούν οι χρήστες κατά τη μετακίνησή τους ή την πληροφόρηση την οποία λαμβάνουν. Αυτό συμβαίνει πιο συχνά, όταν η διάρκεια της μετακίνησης υπερβαίνει το χρονικό διάστημα διακριτοποίησης της περιόδου μελέτης, π.χ. το δεκαπεντάλεπτο.

Περισσότερες επιλογές μετακίνησης

Όπως προαναφέρθηκε, στο πρότυπο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι επιλογές των χρηστών είναι δύο. Η επιλογή διαδρομής έπεται της επιλογής ώρας αναχώρησης. Πιο ρεαλιστικά πρότυπα θα μπορούσαν να συμπεριλάβουν και άλλες διαστάσεις της συμπεριφοράς των χρηστών, όπως η επιλογή για το αν θα μετακινηθούν, η επιλογή προορισμού και η προδιάθεση στην επιλογή μέσου. Όλες αυτές οι επιλογές, όταν συνδυαστούν και αναλυθούν ταυτόχρονα με τις επιδράσεις της συμφόρησης, αποδίδουν ένα αρκετά ρεαλιστικό μοτίβο της κυκλοφοριακής φόρτισης στο δίκτυο.

Πραγματικοί χρόνοι μετακίνησης

Στο πρότυπο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι χρόνοι μετακίνησης είναι στιγμιαίοι. Ωστόσο, οι πραγματικοί χρόνοι μετακίνησης προσδίδουν αυξημένη δυναμικότητα στα πρότυπα. Ο στιγμιαίος χρόνος μετακίνησης για μία διαδρομή υπολογίζεται ως το άθροισμα των χρόνων μετακίνησης των συνδέσμων που αποτελούν τη διαδρομή, οι οποίοι αντιστοιχούν

στην ίδια χρονική στιγμή (ή καλύτερα στο ίδιο δεκαπεντάλεπτο), το δεκαπεντάλεπτο αναχώρησης. Με τον τρόπο αυτό, δεν λαμβάνεται υπόψη η συμφόρηση που μπορεί να προκαλείται από τα οχήματα τα οποία αναχωρούν αργότερα (σε επόμενα δεκαπεντάλεπτα) και εισέρχονται σε κάποιο σύνδεσμο την ώρα που τα οχήματα, τα οποία προτυποποιούνται, τον διανύουν. Από την άλλη μεριά, ο πραγματικός χρόνος μετακίνησης για μία διαδρομή υπολογίζεται ως το άθροισμα των χρόνων μετακίνησης των συνδέσμων που την αποτελούν. Στην προκειμένη περίπτωση, όμως, ο χρόνος μετακίνησης του κάθε συνδέσμου αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή που τα οχήματα εισέρχονται σε αυτόν και όχι στο δεκαπεντάλεπτο αναχώρησης, όπως προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα, η συντομότερη διαδρομή, που βασίζεται στον πραγματικό χρόνο μετακίνησης, αποδίδει μία χρονικά μεταβαλλόμενη συντομότερη διαδρομή. Αυτό υποθέτει ότι οι μετακινούμενοι αναζητούν διαδρομές που ελαχιστοποιούν τους πραγματικούς χρόνους μετακίνησης, αντί των διαδρομών που φαίνονται να είναι οι βέλτιστες μόνο κατά την αναχώρηση. Συνεπώς όταν υπολογίζονται οι πραγματικοί χρόνοι μετακίνησης, η κατάσταση είναι πιο συμβατή με την πραγματικότητα.

Χρησιμότητα

Στα συστήματα μεταφορών ο μεγαλύτερος παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη είναι οι μετακινούμενοι, που χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες μεταφορών. Είναι προφανές ότι το επίπεδο των υπηρεσιών είναι πολυδιάστατο. Ωστόσο, για τους σκοπούς της ανάλυσης, συχνά περιορίζεται σε μία μεταβλητή, τη χρησιμότητα/ωφέλεια ή την αντίθετη έννοια αυτής, το γενικευμένο κόστος. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1.2.1, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων που επηρεάζουν τον τρόπο λήψης αποφάσεων από τους χρήστες του μεταφορικού δικτύου, οι οποίες εμπεριέχονται στην έννοια της χρησιμότητας που αντιστοιχεί σε κάθε συνδυασμένη επιλογή των χρηστών. Οι πιο σημαντικοί είναι ο χρόνος μετακίνησης, η απόσταση, το άμεσο κόστος (φόροι, διόδια, κατανάλωση καυσίμων, χρέωση στάθμευσης, κ.α.), η αξιοπιστία και η άνεση. Στο πρότυπο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι μεταβλητές που εμπεριέχονται στην έννοια της χρησιμότητας είναι το αντιληπτό κόστος μετακίνησης, η χρησιμότητα αφίξεως και το τυχαίο σφάλμα. Όσο πιο πολλοί παράγοντες ενσωματώνονται στην μονοδιάστατη μεταβλητή της χρησιμότητας, τόσο πιο ρεαλιστικά προτυποποιείται η συμπεριφορά των χρηστών.

Μικροσκοπικά πρότυπα

Η μικροσκοπική ανάλυση μπορεί να δώσει πιο σαφείς σχέσεις ανάμεσα στο κόστος συνδέσμου και τον κυκλοφοριακό φόρτο του συνδέσμου σε σύγκριση με τα μεσοσκοπικά και μακροσκοπικά πρότυπα κυκλοφορίας. Τα μικροσκοπικά πρότυπα της κυκλοφορίας εξετάζουν

την αλληλεπίδραση των μεμονωμένων οχημάτων, προσφέροντας έτσι λεπτομέρεια και ρεαλισμό στα φαινόμενα που περιγράφουν. Η μεσοσκοπική προσομοίωση της κυκλοφορίας είναι, ωστόσο, περισσότερο αποτελεσματική υπολογιστικά σε σύγκριση με τη μικροσκοπική, αλλά η τελευταία είναι πιο χρήσιμη στην περίπτωση σχετικά μικρών αστικών δικτύων όπου απαιτείται λεπτομέρεια και όσο το δυνατόν μικρότερη αφαιρετική απεικόνιση της πραγματικότητας.

Αναλυτικότερα πρότυπα κυκλοφορίας

Το συγκεκριμένο θέμα σχετίζεται με το προηγούμενο. Το παρόν πρότυπο δεν περιγράφει την κυκλοφορία με ικανοποιητική ακρίβεια. Ειδικότερα, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους, για την εκτίμηση του χρόνου μετακίνησης κάθε συνδέσμου χρησιμοποιείται η συνάρτηση BPR, η οποία προσφέρει μία μη γραμμική προσέγγιση σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα πολύ ανώτερης τάξης. Παρόλο που στη συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται ο πραγματικός κυκλοφοριακός φόρτος του κάθε συνδέσμου για κάθε δεκαπεντάλεπτο, υπολογίζεται, με τη βοήθεια αυτής, ο μέσος χρόνος μετακίνησης. Συνεπώς, στην πραγματικότητα, οι χρόνοι μετακίνησης μπορεί να έχουν σημαντικές αποκλίσεις από αυτούς που χρησιμοποιούνται στο παρόν πρότυπο. Συμπερασματικά, υπάρχει η ανάγκη για ακριβέστερο υπολογισμό του χρόνου/κόστους μετακίνησης.

5.3.2 Συστήματα πληροφόρησης και εκπαίδευση των μετακινούμενων

Στο πρότυπο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι χρήστες επεξεργάζονται πληροφόρηση ιστορικού και πραγματικού χρόνου. Εμφανής είναι η σημασία της παροχής σωστής πληροφόρησης στους χρήστες του δικτύου. Η σωστή πληροφόρηση συμβάλει στην εύρεση κατάλληλων εναλλακτικών λύσεων από τους χρήστες και κατ' επέκταση στη βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών. Η εξέλιξη και βελτίωση των συστημάτων πληροφόρησης των χρηστών συνιστούν αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.

Στη σημερινή εποχή, η πληροφόρηση γίνεται με οπτικά μέσα και ηλεκτρονικά συστήματα επικοινωνίας. Οι πληροφορίες δίνονται μέσω:

- ηλεκτρονικών πινάκων μεταβαλλόμενων μηνυμάτων (VMS-Variable Message Signs), τοποθετημένων στο άκρο της οδού ή σε ειδικά όργανα εντός του οχήματος (οπτικά),
- συστήματα ψηφιακών ραδιοφώνων εντός του οχήματος,
- Η/Υ

Κύριο θέμα όσον αφορά στην πληροφόρηση των χρηστών αποτελεί το τι είδους πληροφορίες θα δίνονται και κατά πόσο είναι εφικτή η συγκέντρωση και παροχή των πληροφοριών αυτών. Οι πληροφορίες που συνίσταται να δίνονται αφορούν τα εξής:

- εναλλακτικές λύσεις μετακίνησης (δρομολόγια μέσων μαζικής μεταφοράς, ομαδική χρήση επιβατικών αυτοκινήτων κλπ.),
- κυκλοφοριακή κατάσταση των οδών,
- διαθεσιμότητα θέσεων στάθμευσης και κόστος στάθμευσης,
- πρόβλεψη κυκλοφοριακών συνθηκών,
- περιοριστικά μέτρα (έργα σε κάποια οδικά τμήματα, ατυχήματα, περιοριστικά μέτρα λόγω ατμοσφαιρικής ρύπανσης κλπ.),
- καιρός,
- πληροφορίες για τους επισκέπτες της πόλης,
- προτεινόμενες λύσεις συνδυασμένης μετακίνησης (στάθμευση οχήματος σε ειδικό χώρο και μετεπιβίβαση σε μέσο μαζικής μεταφοράς, όπως προαστιακοί σιδηρόδρομοι, μετρό).

(Φραντζεσκάκης κ. α., 1997)

Ένα εξίσου σημαντικό θέμα αποτελεί η εκπαίδευση των οδηγών σε θέματα ‘κυκλοφοριακής αγωγής’, συμμόρφωσης των μετακινούμενων, στην ηλεκτρονική σήμανση που μεταβάλλεται ανάλογα με τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι για την πιο αποτελεσματική χρησιμοποίηση της υπάρχουσας συγκοινωνιακής υποδομής μίας πόλης από τα μεταφορικά μέσα, που είναι και ο κύριος στόχος της εφαρμογής μέτρων Διαχείρισης Συστημάτων Μεταφορών, απαιτείται κατάλληλη παιδεία και συνειδητοποίηση των μετακινούμενων.

5.3.3 Έξυπνα/Ευφυή συστήματα οχημάτων-οδών

Η παρούσα διπλωματική εργασία ενθαρρύνει την ανάπτυξη των ‘Έξυπνων Συστημάτων Μεταφορών’ (Intelligent Transportation Systems). Ο όρος αυτός αναφέρεται στα συστήματα μεταφορών τα οποία περιλαμβάνουν ολοκληρωμένες εφαρμογές παρακολούθησης, τηλεπικοινωνιών και διαδικασίες διαχείρισης και ελέγχου της κυκλοφορίας, με τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών ηλεκτρονικού εξοπλισμού και λογισμικού, τόσο μέσα στα οχήματα όσο και πάνω στην οδό.

Μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των συγκεκριμένων συστημάτων αποτελεί το γεγονός ότι μπορούν να εξασφαλίσουν ένα μηχανισμό διαχείρισης και ελέγχου των δικτύων σε πραγματικό χρόνο συμβάντων. Υπάρχουν στρατηγικές που επιτρέπουν τον έλεγχο, έως

κάποιο βαθμό, της ροής, όπως η αλλαγή ορίων ταχύτητας, η ρύθμιση εισόδου στο δίκτυο, η παροχή οδηγιών δρομολογίων μέσω μεταβαλλόμενων πινακίδων ή μέσω συσκευών προβολής μέσα στα αυτοκίνητα, η αλλαγή σηματοδοτών και ούτω καθεξής (Sussman, 2003).

Επιπρόσθετα, τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν και την επικοινωνία μεταξύ των χρηστών, των οχημάτων και των κέντρων διαχείρισης του συστήματος μεταφορών σε πραγματικό χρόνο. Η επικοινωνία αυτή απαιτεί συνεργασία μεταξύ του δημοσίου και του ιδιωτικού τομέα και μεταξύ των δημόσιων υπηρεσιών με στόχο τον ορθό σχεδιασμό, την ανάπτυξη, τη λειτουργία και τη συντήρηση των συστημάτων (Φραντζεσκάκης κ. α., 1997).

5.3.4 Το παρόν πρότυπο ως βάση για την εφαρμογή νέων στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας

Η ανάπτυξη των σύγχρονων συστημάτων πληροφόρησης, που επιτρέπουν στους μετακινούμενους να επεξεργάζονται πληροφορίες πραγματικού χρόνου σχετικά με την κυκλοφοριακή κατάσταση των μεταφορικών δικτύων, καθιστούν δυνατή την εφαρμογή νέων και αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας. Η επιτυχία αυτών των τακτικών εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το λεπτομερή σχεδιασμό αυτών (Dimitriou and Stathopoulos, 2008).

Το προτεινόμενο πρότυπο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μπορεί να αποτελέσει τη βάση/το υπόβαθρο για τη δημιουργία πιο σύνθετων προτύπων, τα οποία εκτός της πληροφόρησης των χρηστών να περιλαμβάνουν και κάποιες αρχές διαχείρισης. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, στρατηγικές διαχείρισης αποτελούν η ρύθμιση της σηματοδότησης, η διαχείριση στάθμευσης, η εισαγωγή διαχείρισης του χρόνου εκκίνησης της μετακίνησης (μεταβλητών ωραρίων κ.α.), η προαγωγή μετακινήσεων με ανθρώπινη ενέργεια, η επιβολή διοδίων, η τιμολόγηση της συμφόρησης και η εφαρμογή νέων τεχνολογιών (τηλε-εργασίας). Όλα αυτά αποτελούν ενδιαφέροντα θέματα, κάποια από τα οποία έχουν διερευνηθεί σε αρκετό βαθμό, άλλα, ωστόσο, χρειάζονται περαιτέρω έρευνα.

Ένα από τα πιο επίκαιρα θέματα σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης συνιστά η τιμολόγηση της συμφόρησης. Οι δύο σκοπιές των τακτικών της οδικής διατίμησης είναι η χρέωση της χρήσης των συνδέσμων του μεταφορικού δικτύου που παρουσιάζουν συμφόρηση και η αλλαγή της συμπεριφοράς των χρηστών που συμβάλλουν στη δημιουργία της συμφόρησης, με την προσθήκη του κόστους της συμφόρησης στο γενικευμένο κόστος. Εξετάζοντας τα δυναμικά αυτά πρότυπα με βάση τη θεωρία του βέλτιστου ελέγχου, μπορούν να σημειωθούν τα εξής: Καταρχήν, τα πρότυπα πρέπει να είναι δυναμικά, ώστε η χρέωση της χρήσης της οδικής υποδομής να μεταβάλλεται χρονικά με αποτελεσματικό και δίκαιο τρόπο, δηλαδή ανάλογα με τη χρονική και τη χωρική χρήση του μεταφορικού δικτύου από τον κάθε

χρήστη. Επιπρόσθετα, τα πρότυπα διαχείρισης της κυκλοφορίας θα μπορούσαν να έχουν μία δομή βέλτιστου ελέγχου, σύμφωνα με τον οποίο οι χρήστες ασκούν έλεγχο στις κυκλοφοριακές συνθήκες προσπαθώντας να βελτιστοποιούν τις επιλογές τους (σε κάθε χρονικό διάστημα ελέγχου), και οι αρχές διαχείρισης ασκούν και αυτές έλεγχο στις κυκλοφοριακές συνθήκες, επιβάλλοντας κόμιστρα. Ενδείκνυται η δημιουργία προτύπων τα οποία να μπορούν να περιγράψουν λεπτομερώς τις αλληλεπιδράσεις των χρηστών, του διαχειριστή του δικτύου και των κυκλοφοριακών συνθηκών.

5.3.5 Στροφή προς τον αλτρουιστικό ορθολογισμό-βέλτιστη λύση του συστήματος

Τέλος, ενθαρρύνεται η διερεύνηση προτύπων με την εισαγωγή προωθημένων στρατηγικών διαχείρισης, και ιδίως μέσω της οδικής διατίμησης, της διαχείρισης της υποδομής και της κατανομής στον χρόνο/χώρο των δραστηριοτήτων μιας περιοχής τα οποία να συντονίζουν, δηλαδή να βρίσκουν μία χρυσή τομή, στα κριτήρια επιλογής των χρηστών του μεταφορικού πεδίου. Τα κριτήρια αυτά των επιλογών των χρηστών είναι, όπως έχει προαναφερθεί, η βελτιστοποίηση του κόστους μετακίνησης για τον κάθε χρήστη και η βελτιστοποίηση του κόστους μετακίνησης για όλο το σύστημα. Επιδιώκεται ο συντονισμός των κριτηρίων, καθώς όταν πρόκειται για την χρησιμοποίηση των δημόσιων αγαθών, οι πολίτες δεν πρέπει να σκέφτονται μόνο ατομικιστικά, αλλά να ενθαρρύνονται (κατευθύνονται) και προς τη συλλογική δράση. Επίσης, είναι σαφές ότι όταν επιδιώκεται η βέλτιστη κατάσταση του συστήματος, η συνολική απόδοση αυτού είναι η καλύτερη (ακόμη και αν κατ' ανάγκη κάποιοι από τους χρήστες προσφέρουν περισσότερο στην κατεύθυνση αυτή από άλλους).

Ωστόσο, ο χρήστης, κατά τεκμήριο, της σημερινής εποχής διέπονται περισσότερο από ατομικιστικό ορθολογισμό και, συνεπώς, διαχειριστικά πρότυπα που αποκλίνουν από την ικανοποίηση του ατομικού συμφέροντος/επιδιώξεων δύσκολα γίνονται αποδεκτά. Παρόλο αυτά, τα ολοένα αυξανόμενα προβλήματα της σημερινής εποχής, (κυκλοφοριακή συμφόρηση, περιβαλλοντική ρύπανση, κ.α.) καθιστούν αναγκαία την δημιουργία και την εφαρμογή προτύπων που αποσκοπούν σε μία βέλτιστη κατάσταση για το σύνολο. Παρόλο που η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά και προσεγγίζει μία στοχαστική δυναμική ισορροπία των χρηστών, επεκτάσεις ή αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης θα μπορούσαν να συμβάλουν στην ενημέρωσή τους ώστε να ενθαρρυνθούν πολιτικές ή μέτρα που ξεπερνούν το στενό ατομικιστικό πνεύμα και να επιδιώκουν συνειδητά την τροπή της συμπεριφοράς τους στο συμφέρον του ευρύτερου συνόλου (κοινωνικό σύνολο, περιβάλλον, πολιτισμός). Με τη συνειδητοποίηση και την ενημέρωση των πολιτών και μετακινούμενων, μπορούν τέτοιες παρεμβάσεις να γίνουν αποδεκτές.

5.3.6 Εσωτερίκευση του εξωτερικού κόστους

Το γενικευμένο κόστος δεν περιλαμβάνει όλους τους συντελεστές του κόστους, τους οποίους επιβάλει κάθε μετακινούμενος στο ευρύτερο κοινωνικό σύνολο και τα οποία δεν αντιλαμβάνεται άμεσα σαν αποτέλεσμα της μετακίνησής του. Σε αυτά τα κόστη περιλαμβάνεται το κόστος της κατασκευής, της συντήρησης και τη λειτουργίας της οδικής υποδομής, το κόστος των ατυχημάτων, το περιβαλλοντικό κόστος (εκπομπές καυσαερίων, ηχορύπανση, οπτική ενόχληση) αλλά και το κόστος που επιβάλλεται στους άλλους χρήστες λόγω της συμφόρησης που προκαλείται (Σύλλογος Ελλήνων Συγκοινωνιολόγων, 2007).

Η εσωτερίκευση του εξωτερικού κόστους μετακίνησης αποτελεί μία νέα φιλοσοφία για τη διαχείριση των μεταφορικών συστημάτων. Σημαίνει ότι θα επωμίζεται ο μετακινούμενος το πραγματικό κόστος κάθε μετακίνησής του στο περιβάλλον και στην κοινωνία. Ελπίζεται ότι με την εφαρμογή αυτής της φιλοσοφίας, έμμεσα, οι χρήστες του ιδιωτικού αυτοκινήτου θα υποχρεωθούν να στραφούν σε πιο φιλικά προς το περιβάλλον μέσα μεταφοράς που θα γίνουν ελκυστικότερα ως προς το αυτοκίνητο. Στις αστικές περιοχές, η πολιτική αυτή μπορεί να ασκηθεί μέσω της εγκατάστασης διοδίων, που θα χρεώνουν τους οδηγούς των αυτοκινήτων για τη χρήση των συμφορημένων αστικών αρτηριών, της παροχής κινήτρων χρήσης εναλλακτικών μέσων, της παροχής πληροφόρησης κ.α.. Επίσης, η αξιοποίηση τεχνολογιών αιχμής, όπως της τηλεματικής, σύντομα θα καταστήσει την χρήση τέτοιων μέσων τεχνικά εφικτή (Βλαστός και Μπαρμπόπουλος).

5.3.7 Χρήση προτύπου για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μεταφορικών συστημάτων

Το προτεινόμενο πρότυπο καταμερισμού της κυκλοφορίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του μεταφορικού συστήματος που περιγράφει. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι το πρότυπο προβλέπει τους κυκλοφοριακούς φόρτους σε κάθε σύνδεσμο και διαδρομή για όλες τις ώρες αναχώρησης. Με βάση τους φόρτους αυτούς, μπορούν να εκτιμηθούν και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα οχήματα, όπως οι εκπομπές καυσαερίων και ο θόρυβος με στόχο την όσο το δυνατό μείωση τους.

Τέτοιες εκτιμήσεις αποσκοπούν στο να καταστήσουν τις μεταφορές περιβαλλοντικά βιώσιμες. Ας σημειωθεί ότι βιώσιμες μεταφορές είναι εκείνες που δε θέτουν σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία και τα οικοσυστήματα και παρέχουν δυνατότητες πρόσβασης σύμφωνα με την εκλογικευμένη (βιώσιμη) χρήση των ανανεώσιμων πόρων κάτω από ή στα όρια του ρυθμού ανανέωσής τους, και χρήση των μη ανανεώσιμων κάτω από ή στα όρια του ρυθμού ανάπτυξης υποκατάστατων (Πιτσιάβα-Λατινοπούλου κ. α.).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κατάλογος Ξενόγλωσσων Αναφορών

1. Akamatsu, (1996) *Cyclic flows, Markov processes and stochastic traffic assignment. Transportation Research B*, in press.
2. Beckman, M. J., McGuire, C. B. and Winston, C. B. (1956) *Studies in the Economics of Transportation* Cowles Commission Monograph, Yale University Press: New Haven, CN.
3. Bell M. and Iida Y., (1997), *Transportation Network Analysis*, John Wiley & Sons.
4. Bell, M. G. H. (1995) *Stochastic user equilibrium assignment in networks with queues. Transportation Research B*, **29B**, 125-137.
5. Bell, M. G. H. Lam, W. H. K., Ploss, G. and Inaudi, D. (1993) *Stochastic user equilibrium assignment and iterative balancing. In: Transportation and Traffic Theory (Ed. C. F. Daganzo)*, Elsevier: Amsterdam, pp 427-440.
6. Ben-Akiva M. and Lerman S.R. 1985. *Discrete Choice Analysis*, MIT Press, Cambridge.
7. Ben-Akiva, M. and Lerman, S. (1985) *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. MIT Press: Cambridge.
8. Bruynooghe, M., Gibert, A. and Sakarovitch, M. (1968) *Une methode d' affectation du trafic. Proceedings of the 4th International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow*, Karlsruhe.
9. Cascetta E. (2001) *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*. Kluwer Academic Publishers.
10. Dafermos, S.C., and Sparrow, F.T. (1969) *The traffic assignment problem for a generalized network*. Journal of Research, National Bureau of Standards, **72B**, 91-118.
11. Daganzo, C. F. (1982) *Unconstrained external formulation of some transportation equilibrium problems. Transportation Science*, **16**, 332-360.
12. Daganzo, C. F. and Sheffi, Y. (1977) *On stochastic models of traffic assignment. Transportation Science*, **11**, 253-274.
13. Dial, R. B. (1971) *A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates the need for path enumeration. Transportation Research*, **5**, 83-111.
14. Dimitriou, L. and Stathopoulos, A. (2008) *An Auction Theory Perception on Dynamic Congestion Pricing Strategies*, 10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation, Athens, Greece.

15. Dimitriou, L. and Stathopoulos, A. (2008) *Modeling Dynamic Urban Road Networks Performance under Congestion Pricing Strategies*. 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea.
16. Dimitriou, L. and Tsekeris, T. (2008) *Evolutionary game-theoretic model for dynamic congestion pricing in multi-class traffic networks*. Springer Science + Business media, LLC.
17. Dimitriou, L., Tsekeris, T., & Stathopoulos, A. (2007) *Evolutionary game-theoretic model for performance reliability assessment of road networks*. In *Proceedings of the 3rd international symposium on transportation network reliability*. The Hague, Netherlands.
18. Fisk, C. (1980) *Some developments in equilibrium traffic assignment*. *Transportation Research*, **14B**, 243-255.
19. Frank M. and Wolfe P. (1956) *An algorithm for Quadratic Programming*. *Naval Research Logistics Quarterly*, **3(1-2)**, 95-110.
20. Gartner, N. H. (1980) *Optimal traffic assignment with elastic demands: A review*. *Transportation Science*, **14**, 174-191.
21. Heydecker, B. G. (1986) *On the definition of traffic equilibrium*. *Transportation Research*, **20B**, 435-440.
22. Kimber, R. M. and Hollis, E. M. (1979), *Traffic queues and delays at road junctions*. TRRL Laboratory Report 909, Transport and Road Research Laboratory.
23. Lam, W. H. K., Zhang, N. and Lo, H.P. (1995) *Time varying stochastic traffic assignment model with simultaneous queues for multiple user classes*. Submitted to *Transportation Research B*.
24. Lay, M. G., (1992), *Ways of the World: A History of the World's Roads and of the Vehicles that Used Them*, New Brunswick, Nj: Rutgers University Press.
25. LeBlank L.J., Morlok E.K. and Pierskalla W.P. (1975) *An Efficient Approach to solving the Road Network Equilibrium Traffic Assignment Problem*. *Transportation Research*, **9**, 309-318.
26. Lighthill, M. J. and Whitham, G. B. (1955), *On Kinematic waves, II. A theory of traffic flow on roads*. *Proceedings of the Royal Society*, **229A**, 317-345.
27. Mahmassani, M.S. and Jayakrishan R. (1991) *System performance and user-response under real-time information in a congested traffic corridor*. *Transportation Research Part (A)*, **25 (5)**, pp. 293-307.
28. Mailath, G.J. and L. Samuelson (2006). *Repeated games and reputations. Long-run relationships*. Oxford University Press.
29. Manheim, M.L., (1979), *Fundamentals of Transportation System Analysis*, MA: The MIT Press.

30. Meneguzzer, C. (1995) *An equilibrium route choice model with explicit treatment of the effect of intersections*. *Transportation Research B*, **29B**, 329-356.
31. Merchant D.K. and Nemhauser G.L. (1978) *Optimality Conditions for a Dynamic Traffic Assignment Model*. *Transportation Science*, **12**, 200-207.
32. Network Modeling Committee, TRB (2010) *A primer for Dynamic Traffic Assignment*. The National Academies.
33. Papageorgiou M. (1999), *Automatic control methods in traffic and transportation*. In 'Operations Research and Decision Aid Methodologies in Traffic and Transportation Management', P. Toint, M. Labbe, K. Tanczos, G. Laporte. Springer-Verlag, 46-83.
34. Patriksson, M. (1994) *The Traffic Assignment Problem: Models and Methods*. VSP: Utrecht
35. Powell, W. and Sheffi, Y. (1982) *The convergence of equilibrium algorithms with pre-determined step sizes*. *Transportation Science*, **16**, 45-55.
36. Ran B., Boyce D. (1996) *Modeling Dynamic Transportation Networks. An intelligent Transportation System Oriented Approach*. Springer.
37. Sheffi Y. and Powell W.B. (1982) *An algorithm for the equilibrium Assignment Problem with Random Link Times*. *Networks*, **12**, 191-207.
38. Sheffi Y., (1985), *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice - Hall, Inc.
39. Smith, M. J. (1979) *The existence, uniqueness and stability of traffic equilibria*. *Transportation Research*, **13B**, 293-304.
40. Smith, M. J. (1982) *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
41. Sussman J., (2003), *Εισαγωγή στα συστήματα μεταφορών*, Α. Σταμούλης.
42. U.S. Department of Commerce (1964) *Bureau of Public Roads, Traffic Assignment manual*. Washington D.C.
43. Wardrop, J.G. (1952) *Some theoretical aspects of road traffic research*. Proc. Institution of Civil Engineers, Part II. **1(2)**, pp. 325-378.
44. Williams, H. C. W. L. (1977) *On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit*. *Environment and Planning*, **9A**, 285-344.

Κατάλογος Ελληνικών Αναφορών

45. Βλαστός Θ. και Ν. Μπαρμπόπουλος, (1998), *Διόδια στις πόλεις για την εφαρμογή της αρχής: «ο ρυπαίνων πληρώνει»*. Απόδοση δικαιοσύνης ή κοινωνική αδικία;. Τα διδάγματα από την Αθήνα. τεύχος 5, σελ 238-246.
46. Παπαγεωργίου Μ., (2004), *Δυναμικός Προγραμματισμός*.
47. Σταθόπουλος Α. και Μ. Καρλαύτης, (2008), *Σχεδιασμός Μεταφορικών Συστημάτων*, Παπασωτηρίου.
48. Σύλλογος Ελλήνων Συγκοινωνιολόγων, (2007), *Τιμολόγηση Χρήσης Οδικής Υποδομής*, τεύχος 155, σελ 1-2.
49. Φραντζεσκάκης Ι. και Γ. Γιαννόπουλος (1986), *Σχεδιασμός των Μεταφορών και Κυκλοφοριακή Τεχνική*, Παρατηρητής.
50. Φραντζεσκάκης Ι., (1997), Πιτσιάβα – Λατινοπούλου Μ., Τσαμπούλας Δ., *Διαχείριση Κυκλοφορίας*, Παπασωτηρίου.
51. Φραντζεσκάκης Ι., (2009), Γκόλιας Ι., Πιτσιάβα – Λατινοπούλου Μ., *Κυκλοφοριακή Τεχνική*, Παπασωτηρίου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

I. Δεδομένα προσαρμογής προτύπου

Αναφέρονται οι ωριαίοι φόρτοι μιας καθημερινής ημέρας για τους συνδέσμους 10 και 12 του δικτύου ανάλυσης:

Φόρτος συνδέσμου 10=[355 291 171 141 83 101 333 409 271 431 382 412
442 436 404 345 438 463 440 413 422 469 420 444]

Φόρτος συνδέσμου 12=[976 688 393 230 184 334 1124 1670 1734
1566 1494 1360 1391 1279 1491 1598 1495 1642
1677 1637 1543 1616 1467 1510]

II. Κωδικοποίηση στην υπολογιστική πλατφόρμα MATLAB

```
function c=experiment(x)
x=3

theta1=0.3375;
theta2=1.125;

VOTA=8; %Value of Travel Time of 1st class (€)
VOTB=9; %Value of Travel Time of 2nd class (€)
a=0.15; %Positive Constant
m=3.45; %Positive Constant
ka=240; %Jam density
w=1/3000; %Sensitive coefficient
d=0.25;

Acl=0.8; %1st class
Bcl=0.2; %2nd class

L(1)=1.1; %Link Length (km)
L(2)=0.6; %Link Length (km)
L(3)=0.9; %Link Length (km)
L(4)=0.3; %Link Length (km)
L(5)=0.6; %Link Length (km)
L(6)=0.7; %Link Length (km)
L(7)=1.7; %Link Length (km)
L(8)=1.6; %Link Length (km)
L(9)=0.3; %Link Length (km)
L(10)=0.9; %Link Length (km)
L(11)=0.6; %Link Length (km)
L(12)=0.5; %Link Length (km)
L(13)=0.4; %Link Length (km)

V(1)=50; %Link Free Flow Speed (km/hr)
V(2)=80; %Link Free Flow Speed (km/hr)
V(3)=50; %Link Free Flow Speed (km/hr)
V(4)=50; %Link Free Flow Speed (km/hr)
V(5)=50; %Link Free Flow Speed (km/hr)
```

```
V(6)=50;           %Link Free Flow Speed (km/hr)
V(7)=80;           %Link Free Flow Speed (km/hr)
V(8)=50;           %Link Free Flow Speed (km/hr)
V(9)=50;           %Link Free Flow Speed (km/hr)
V(10)=50;          %Link Free Flow Speed (km/hr)
V(11)=50;          %Link Free Flow Speed (km/hr)
V(12)=50;          %Link Free Flow Speed (km/hr)
V(13)=50;          %Link Free Flow Speed (km/hr)
```

```
ln(1)=3;           %Link lanes
ln(2)=5;           %Link lanes
ln(3)=3;           %Link lanes
ln(4)=2;           %Link lanes
ln(5)=2;           %Link lanes
ln(6)=2;           %Link lanes
ln(7)=5;           %Link lanes
ln(8)=3;           %Link lanes
ln(9)=2;           %Link lanes
ln(10)=3;          %Link lanes
ln(11)=2;          %Link lanes
ln(12)=4;          %Link lanes
ln(13)=4;          %Link lanes
```

```
%Free Flow Travel Time
```

```
ffTT=zeros(17);
```

```
for n=1:13
```

```
    ffTT(n)=60.*L(n)./V(n);
```

```
end
```

```
ffTT(14)=1;        %Free Flow Travel Time(min)
```

```
ffTT(15)=2;        %Free Flow Travel Time(min)
```

```
ffTT(16)=2;        %Free Flow Travel Time(min)
```

```
ffTT(17)=2;        %Free Flow Travel Time(min)
```

```
%Capacity
```

```
Cap=zeros(17);
```

```
for n=1:13
```

```
    Cap(n)=L(n).*ka.*ln(n);
```

```
end
```

```
Cap(14)=5000;
```

```
Cap(15)=5000;
```

```
Cap(16)=5000;
```

```
Cap(17)=5000;
```

```
intx1=[1;
```

```
    0;
```

```
    0;
```

```
    0;
```

```
    0;
```

```
    0;
```

```
    0;
```

```
    1;
```

```
    0;
```

```
    0;
```

```
0;
1;
1;
0;
0;
0;
0];

intx2=[1;
0;
1;
0;
0;
0;
1;
0;
0;
0;
0;
1;
1;
0;
0;
0;
0];

intx3=[0;
0;
0;
0;
0;
0;
0;
0;
0;
0;
0;
0;
0;
0;
1;
1;
1;
1];

intx4=[0;
1;
0;
0;
0;
0;
1;
0;
0;
0;
0;
1;
1;
0;
0;
0;
0];
```



```
intx5=[0;  
      1;  
      1;  
      0;  
      0;  
      0;  
      0;  
      1;  
      0;  
      0;  
      0;  
      1;  
      1;  
      0;  
      0;  
      0;  
      0];
```

```
intx6=[0;  
      1;  
      1;  
      0;  
      0;  
      0;  
      0;  
      0;  
      0;  
      0;  
      0;  
      0;  
      0;  
      0;  
      1;  
      1;  
      1;  
      0];
```

```
intx7=[0;  
      0;  
      0;  
      1;  
      1;  
      0;  
      1;  
      0;  
      0;  
      0;  
      0;  
      1;  
      1;  
      0;  
      0;  
      0;  
      0];
```

```
intx8=[0;  
      0;  
      0;  
      1;  
      0];
```

```
1;
0;
0;
0;
1;
1;
0;
1;
0;
0;
0;
0;
0];

intx9=[0;
0;
0;
1;
0;
1;
0;
0;
0;
0;
0;
0;
0;
0;
1;
1;
0;
0];

wx=x*96
dem_O1=zeros(1,wx);
dem_O2=zeros(1,wx);
dem_O3=zeros(1,wx);
dem_D4=zeros(1,wx);

%DAY 1

d1=[300 280 234 247 242 220 183 170 158 144 150 90 87 99 90 96 99 123
169 185 290 303 330 355 430 448 459 480 523 540 574 608 583 571 550
511 479 436 400 392 377 369 355 349 330 327 320 315 312 319 332 355
370 377 380 361 347 339 320 312 299 273 264 289 305 332 368 398 420
439 457 450 434 429 420 419 425 433 430 419 401 392 377 375 370 366
351 338 318 310 319 307 289 282 270 269];
d2=[280 266 228 239 231 215 176 158 138 121 120 87 76 85 74 75 78 100
153 177 264 286 307 334 416 429 441 454 514 530 567 605 570 560 522
469 454 416 394 386 379 371 363 348 333 322 326 329 332 340 352 358
362 365 352 344 335 311 303 299 295 284 299 352 379 416 435 443 447
454 449 439 435 431 434 438 439 435 409 394 386 379 380 381 384 376
348 341 326 320 317 309 300 294 289 281];
d3=[90 88 79 75 60 58 52 53 48 47 44 42 39 36 35 38 40 52 58 64 70 89
98 104 110 117 125 153 164 170 174 182 187 184 179 177 169 163 159
152 146 139 133 128 119 114 108 100 96 99 103 106 111 119 124 122 116
112 108 105 100 97 93 95 99 103 107 110 112 115 112 108 105 109 111
116 119 122 120 118 114 108 104 100 101 102 99 94 90 87 82 79 75 69
67 62];
```

```
d4=[659 630 540 537 519 497 450 400 366 322 310 250 213 239 259 279
300 359 430 498 561 644 734 848 953 1006 1079 1149 1206 1257 1316
1353 1383 1421 1387 1351 1306 1268 1215 1164 1118 1090 864 838 806
785 746 759 777 794 787 758 747 704 685 651 639 625 617 603 589 569
554 542 533 527 541 569 608 643 685 749 800 852 912 969 1012 1057
1080 1068 1042 1029 994 974 945 931 918 900 884 855 832 795 745 689
651 610];
```

```
sdem_O1=d.*sum(d1);
sdem_O2=d.*sum(d2);
sdem_O3=d.*sum(d3);
```

```
demA_1=d*Ac1.*d1;
demA_2=d*Ac1.*d2;
demA_3=d*Ac1.*d3;
demA_4=d*Ac1.*d4;
```

```
demB_1=d*Bc1.*d1;
demB_2=d*Bc1.*d2;
demB_3=d*Bc1.*d3;
demB_4=d*Bc1.*d4;
```

```
dem_O1=d.*d1;
dem_O2=d.*d2;
dem_O3=d.*d3;
dem_D4=d.*d4;
```

```
%Initial path cost (€)
```

```
PCA=zeros(9,wx);
PCB=zeros(9,wx);
for i=1:9
PCA(i,1)=2;
PCB(i,1)=2;
End
```

```
for z=1:x-1
for lp=1:x*96
if lp<=96
%Path Travel Time (min)
for i=1:9
PTTA(i,lp)=(PCA(i,lp)*60.)/VOTA;
PTTB(i,lp)=(PCB(i,lp)*60.)/VOTB;
```

```
%Arrival Time
```

```
ATA(i,lp)=(lp*15.)+PTTA(i,lp);
ATB(i,lp)=(lp*15.)+PTTB(i,lp);
```

```
%Utility
```

```
UA(i,lp)=demA_4(lp);
UB(i,lp)=demB_4(lp);
end
```

```
%Path Choice Probability
```

```
for i=1:9
L(i,lp)=exp(-theta2.*PCB(i,lp));
G(i,lp)=exp(w*UB(i,lp));
expnA(i,lp)=exp(-theta1.*PCA(i,lp)+w*UA(i,lp));
expnB(i,lp)=exp(-theta2.*PCB(i,lp)+w*UB(i,lp));
```

```
end

%sum(expn)
%O-D(1)
for i=1:3
sumA(1,lp)=expnA(1,lp)+expnA(2,lp)+expnA(3,lp);
sumB(1,lp)=expnB(1,lp)+expnB(2,lp)+expnB(3,lp);
PPA(i,lp)=expnA(i,lp)./sumA(1,lp);
PPB(i,lp)=expnB(i,lp)./sumB(1,lp);
end

%O-D(2)
for i=4:6
sumA(2,lp)=expnA(4,lp)+expnA(5,lp)+expnA(6,lp);
sumB(2,lp)=expnB(4,lp)+expnB(5,lp)+expnB(6,lp);
PPA(i,lp)=expnA(i,lp)./sumA(2,lp);
PPB(i,lp)=expnB(i,lp)./sumB(2,lp);
end

%O-D(3)
for i=7:9
sumA(3,lp)=expnA(7,lp)+expnA(8,lp)+expnA(9,lp);
sumB(3,lp)=expnB(7,lp)+expnB(8,lp)+expnB(9,lp);
PPA(i,lp)=expnA(i,lp)./sumA(3,lp);
PPB(i,lp)=expnB(i,lp)./sumB(3,lp);
end

%Path Flow
for i=1:3
PFA(i,lp)=PPA(i,lp).*demA_1(1,lp);
PFB(i,lp)=PPB(i,lp).*demB_1(1,lp);
end

for i=4:6
PFA(i,lp)=PPA(i,lp).*demA_2(1,lp);
PFB(i,lp)=PPB(i,lp).*demB_2(1,lp);
end

for i=7:9
PFA(i,lp)=PPA(i,lp).*demA_3(1,lp);
PFB(i,lp)=PPB(i,lp).*demB_3(1,lp);
end

%Link Flow
for i=1:17
LFA1(i,lp)=intx1(i).*demA_1(1,lp);
LFA2(i,lp)=intx2(i).*demA_1(1,lp);
LFA3(i,lp)=intx3(i).*demA_1(1,lp);
LFA4(i,lp)=intx4(i).*demA_2(1,lp);
LFA5(i,lp)=intx5(i).*demA_2(1,lp);
LFA6(i,lp)=intx6(i).*demA_2(1,lp);
LFA7(i,lp)=intx7(i).*demA_3(1,lp);
LFA8(i,lp)=intx8(i).*demA_3(1,lp);
LFA9(i,lp)=intx9(i).*demA_3(1,lp);
end

for i=1:17
LFB1(i,lp)=intx1(i).*demB_1(1,lp);
LFB2(i,lp)=intx2(i).*demB_1(1,lp);
LFB3(i,lp)=intx3(i).*demB_1(1,lp);
```

```
LFB4(i,lp)=intx4(i)*demB_2(1,lp);
LFB5(i,lp)=intx5(i)*demB_2(1,lp);
LFB6(i,lp)=intx6(i)*demB_2(1,lp);
LFB7(i,lp)=intx7(i)*demB_3(1,lp);
LFB8(i,lp)=intx8(i)*demB_3(1,lp);
LFB9(i,lp)=intx9(i)*demB_3(1,lp);
end

%Sum of Link Flows
LFA=LFA1+LFA2+LFA3+LFA4+LFA5+LFA6+LFA7+LFA8+LFA9;
LFB=LFB1+LFB2+LFB3+LFB4+LFB5+LFB6+LFB7+LFB8+LFB9;
LF=LFA+LFB;

%Link Travel Time

for i=1:13
    LTTA(i,lp)=ffTT(i).*(1+a.*(LFA(i,lp)/Cap(i))^m);
    LTTB(i,lp)=ffTT(i).*(1+a.*(LFB(i,lp)/Cap(i))^m);
end
for i=14:17
    LTTA(i,lp)=ffTT(i);
    LTTB(i,lp)=ffTT(i);
end

%Link Cost
for i=1:17
    LcstA(i,lp)=VOTA.*LTTA(i,lp)/60;
    LcstB(i,lp)=VOTB.*LTTB(i,lp)/60;
end

%New Path Cost
%Class A
PCA(1,lp)=LcstA(1,lp)+LcstA(8,lp)+LcstA(12,lp)+LcstA(13,lp);
PCA(2,lp)=LcstA(1,lp)+LcstA(3,lp)+LcstA(7,lp)+LcstA(12,lp)+LcstA(13,lp);
PCA(3,lp)=LcstA(17,lp)+LcstA(16,lp)+LcstA(15,lp)+LcstA(14,lp);
PCA(4,lp)=LcstA(2,lp)+LcstA(7,lp)+LcstA(12,lp)+LcstA(13,lp);
PCA(5,lp)=LcstA(2,lp)+LcstA(3,lp)+LcstA(8,lp)+LcstA(12,lp)+LcstA(13,lp);
PCA(6,lp)=LcstA(2,lp)+LcstA(3,lp)+LcstA(16,lp)+LcstA(15,lp)+LcstA(14,lp);
PCA(7,lp)=LcstA(4,lp)+LcstA(5,lp)+LcstA(7,lp)+LcstA(12,lp)+LcstA(13,lp);
PCA(8,lp)=LcstA(4,lp)+LcstA(6,lp)+LcstA(10,lp)+LcstA(11,lp)+LcstA(13,lp);
PCA(9,lp)=LcstA(4,lp)+LcstA(6,lp)+LcstA(15,lp)+LcstA(14,lp);

%Class B
PCB(1,lp)=LcstB(1,lp)+LcstB(8,lp)+LcstB(12,lp)+LcstB(13,lp);
PCB(2,lp)=LcstB(1,lp)+LcstB(3,lp)+LcstB(7,lp)+LcstB(12,lp)+LcstB(13,lp);
PCB(3,lp)=LcstB(17,lp)+LcstB(16,lp)+LcstB(15,lp)+LcstB(14,lp);
PCB(4,lp)=LcstB(2,lp)+LcstB(7,lp)+LcstB(12,lp)+LcstB(13,lp);
PCB(5,lp)=LcstB(2,lp)+LcstB(3,lp)+LcstB(8,lp)+LcstB(12,lp)+LcstB(13,lp);
PCB(6,lp)=LcstB(2,lp)+LcstB(3,lp)+LcstB(16,lp)+LcstB(15,lp)+LcstB(14,lp);
PCB(7,lp)=LcstB(4,lp)+LcstB(5,lp)+LcstB(7,lp)+LcstB(12,lp)+LcstB(13,lp);
```

```
PCB(8,lp)=LcstB(4,lp)+LcstB(6,lp)+LcstB(10,lp)+LcstB(11,lp)+LcstB(13,lp);
PCB(9,lp)=LcstB(4,lp)+LcstB(6,lp)+LcstB(15,lp)+LcstB(14,lp);

for i=1:3
pptA(i,lp)=PPA(i,lp)*demA_1(1,lp)/(Acl.*sdem_O1);
pptB(i,lp)=PPB(i,lp)*demB_1(1,lp)/(Bcl.*sdem_O1);
end
for i=4:6
pptA(i,lp)=PPA(i,lp)*demA_2(1,lp)/(Acl.*sdem_O2);
pptB(i,lp)=PPB(i,lp)*demB_2(1,lp)/(Bcl.*sdem_O2);
end

for i=7:9
pptA(i,lp)=PPA(i,lp)*demA_3(1,lp)/(Acl.*sdem_O3);
pptB(i,lp)=PPB(i,lp)*demB_3(1,lp)/(Bcl.*sdem_O3);
end

else

%DAY 2,3,4,...

g=z*96+1;
f=(z+1)*96;

for lp=g:f
%Utility
for i=1:9
UA(i,lp)=demA_4(lp-z*96);
end

%Path Choice probability
for i=1:9
expnA(i,lp)=exp(-theta1.*PCA(i,lp-96)+w*UA(i,lp));
end
end

A1=sum(expnA(1,g:1:f)+expnA(2,g:1:f)+expnA(3,g:1:f));
A2=sum(expnA(4,g:1:f)+expnA(5,g:1:f)+expnA(6,g:1:f));
A3=sum(expnA(7,g:1:f)+expnA(8,g:1:f)+expnA(9,g:1:f));

% Departure time and path choice probability
for lp=g:f
for i=1:3
pptA(i,lp)=expnA(i,lp)./A1;
end

for i=4:6
pptA(i,lp)=expnA(i,lp)./A2;
end

for i=7:9
pptA(i,lp)=expnA(i,lp)./A3;
end

%Path Flow(veh/min)
for i=1:3
PFA(i,lp)=pptA(i,lp).*Acl.*d.*sum(d1);
end
```

```
for i=4:6
PFA(i,lp)=pptA(i,lp).*Ac1.*sdem_O2;
end
for i=7:9
PFA(i,lp)=pptA(i,lp).*Ac1.*sdem_O3;
end

demA_1(1,lp)=sum(PFA(1:1:3,lp));
demA_2(1,lp)=sum(PFA(4:1:6,lp));
demA_3(1,lp)=sum(PFA(7:1:9,lp));

demB_1(1,lp)=Bc1/Ac1.*demA_1(1,lp);
demB_2(1,lp)=Bc1/Ac1.*demA_2(1,lp);
demB_3(1,lp)=Bc1/Ac1.*demA_3(1,lp);

dem_O1(1,lp)=demA_1(1,lp)+demB_1(1,lp);
dem_O2(1,lp)=demA_2(1,lp)+demB_2(1,lp);
dem_O3(1,lp)=demA_3(1,lp)+demB_3(1,lp);

%Link Flow
for i=1:17
LFA1(i,lp)=intx1(i)*demA_1(1,lp);
LFA2(i,lp)=intx2(i)*demA_1(1,lp);
LFA3(i,lp)=intx3(i)*demA_1(1,lp);
LFA4(i,lp)=intx4(i)*demA_2(1,lp);
LFA5(i,lp)=intx5(i)*demA_2(1,lp);
LFA6(i,lp)=intx6(i)*demA_2(1,lp);
LFA7(i,lp)=intx7(i)*demA_3(1,lp);
LFA8(i,lp)=intx8(i)*demA_3(1,lp);
LFA9(i,lp)=intx9(i)*demA_3(1,lp);
end

for i=1:17
LFB1(i,lp)=intx1(i)*demB_1(1,lp);
LFB2(i,lp)=intx2(i)*demB_1(1,lp);
LFB3(i,lp)=intx3(i)*demB_1(1,lp);
LFB4(i,lp)=intx4(i)*demB_2(1,lp);
LFB5(i,lp)=intx5(i)*demB_2(1,lp);
LFB6(i,lp)=intx6(i)*demB_2(1,lp);
LFB7(i,lp)=intx7(i)*demB_3(1,lp);
LFB8(i,lp)=intx8(i)*demB_3(1,lp);
LFB9(i,lp)=intx9(i)*demB_3(1,lp);
end

%Sum of Link Flows
LFA=LFA1+LFA2+LFA3+LFA4+LFA5+LFA6+LFA7+LFA8+LFA9;
LFB=LFB1+LFB2+LFB3+LFB4+LFB5+LFB6+LFB7+LFB8+LFB9;
LF=LFA+LFB;

%Link Travel Time

for i=1:13
LTTA(i,lp)=ffTT(i).*(1+a.*(LFA(i,lp)/Cap(i))^m);
LTTB(i,lp)=ffTT(i).*(1+a.*(LFB(i,lp)/Cap(i))^m);
end
for i=14:17
LTTA(i,lp)=ffTT(i);
LTTB(i,lp)=ffTT(i);
end
```

```
%Link Cost
```

```
for i=1:17  
LcstA(i,lp)=VOTA.*LTTA(i,lp)/60;  
LcstB(i,lp)=VOTB.*LTTB(i,lp)/60;  
end
```

```
%New Path Cost
```

```
%Class A
```

```
PCA(1,lp)=LcstA(1,lp)+LcstA(8,lp)+LcstA(12,lp)+LcstA(13,lp);  
PCA(2,lp)=LcstA(1,lp)+LcstA(3,lp)+LcstA(7,lp)+LcstA(12,lp)+LcstA(13,lp);  
PCA(3,lp)=LcstA(17,lp)+LcstA(16,lp)+LcstA(15,lp)+LcstA(14,lp);  
PCA(4,lp)=LcstA(2,lp)+LcstA(7,lp)+LcstA(12,lp)+LcstA(13,lp);  
PCA(5,lp)=LcstA(2,lp)+LcstA(3,lp)+LcstA(8,lp)+LcstA(12,lp)+LcstA(13,lp);  
PCA(6,lp)=LcstA(2,lp)+LcstA(3,lp)+LcstA(16,lp)+LcstA(15,lp)+LcstA(14,lp);  
PCA(7,lp)=LcstA(4,lp)+LcstA(5,lp)+LcstA(7,lp)+LcstA(12,lp)+LcstA(13,lp);  
PCA(8,lp)=LcstA(4,lp)+LcstA(6,lp)+LcstA(10,lp)+LcstA(11,lp)+LcstA(13,lp);  
PCA(9,lp)=LcstA(4,lp)+LcstA(6,lp)+LcstA(15,lp)+LcstA(14,lp);
```

```
%Class B
```

```
PCB(1,lp)=LcstB(1,lp)+LcstB(8,lp)+LcstB(12,lp)+LcstB(13,lp);  
PCB(2,lp)=LcstB(1,lp)+LcstB(3,lp)+LcstB(7,lp)+LcstB(12,lp)+LcstB(13,lp);  
PCB(3,lp)=LcstB(17,lp)+LcstB(16,lp)+LcstB(15,lp)+LcstB(14,lp);  
PCB(4,lp)=LcstB(2,lp)+LcstB(7,lp)+LcstB(12,lp)+LcstB(13,lp);  
PCB(5,lp)=LcstB(2,lp)+LcstB(3,lp)+LcstB(8,lp)+LcstB(12,lp)+LcstB(13,lp);  
PCB(6,lp)=LcstB(2,lp)+LcstB(3,lp)+LcstB(16,lp)+LcstB(15,lp)+LcstB(14,lp);  
PCB(7,lp)=LcstB(4,lp)+LcstB(5,lp)+LcstB(7,lp)+LcstB(12,lp)+LcstB(13,lp);  
PCB(8,lp)=LcstB(4,lp)+LcstB(6,lp)+LcstB(10,lp)+LcstB(11,lp)+LcstB(13,lp);  
PCB(9,lp)=LcstB(4,lp)+LcstB(6,lp)+LcstB(15,lp)+LcstB(14,lp);
```

```
% Path Travel Time (min)
```

```
for i=1:9  
PTTA(i,lp)=(PCA(i,lp-1)*60.)/VOTA;  
PTTB(i,lp)=(PCB(i,lp-1)*60.)/VOTB;  
end
```

```
%Arrival Time (min)
```

```
for i=1:9  
ATA(i,lp)=(lp*15.)+PTTA(i,lp);  
ATB(i,lp)=(lp*15.)+PTTB(i,lp);  
end  
end
```

```
% class B
```

```
%Utility Vt/ Utility of departure time
```



```
for lp=g:f
for i=1:9
UB(i,lp)=Bcl.*dem_D4(1,lp-z*96);
end

for i=1:9
expnB(i,lp)=exp(-theta2.*PCB(i,lp-1)+w.*UB(i,lp));
end
end

B1=sum(expnB(1,g:1:f)+expnB(2,g:1:f)+expnB(3,g:1:f));
B2=sum(expnB(4,g:1:f)+expnB(5,g:1:f)+expnB(6,g:1:f));
B3=sum(expnB(7,g:1:f)+expnB(8,g:1:f)+expnB(9,g:1:f));

% Departure time and path choice probability
for lp=g:f
for i=1:3
pptB(i,lp)=expnB(i,lp)./B1;
end
for i=4:6
pptB(i,lp)=expnB(i,lp)./B2;
end

for i=7:9
pptB(i,lp)=expnB(i,lp)./B3;
end

%Path Flow(veh/int)
for i=1:3
PFB(i,lp)=pptB(i,lp).*Bcl.*sdem_O1;
end
for i=4:6
PFB(i,lp)=pptB(i,lp).*Bcl.*sdem_O2;
end
for i=7:9
PFB(i,lp)=pptB(i,lp).*Bcl.*sdem_O3;
end
end
end
end

for lp=1:x*96
% Pmetro
Pmetro(lp)=pptA(3,lp)+pptA(6,lp)+pptA(9,lp)+pptB(3,lp)+pptB(6,lp)
+ppptB(9,lp);
PIX(lp)=1-Pmetro(lp);
end
% plot(Pmetro,'g-')
% grid
% plot(Pmetro,'k-')
% hold on
% plot(PIX,'r-')
% grid

%Path Flows (veh/int)
for lp=1:wx
for i=1:9
PF(i,lp)=PFA(i,lp)+PFB(i,lp);
end
```

```
end

for lp=1:wx
PF1(lp)=PF(1,lp);
PF2(lp)=PF(2,lp);
PF3(lp)=PF(3,lp);
PF4(lp)=PF(4,lp);
PF5(lp)=PF(5,lp);
PF6(lp)=PF(6,lp);
PF7(lp)=PF(7,lp);
PF8(lp)=PF(8,lp);
PF9(lp)=PF(9,lp);
end
% plot(PF1,'k-')
% hold on
% plot(PF2,'r-.')
% hold on
% plot(PF3,'g--')
% hold on
% plot(PF4,'b-')
% hold on
% plot(PF5,'m-')
% hold on
% plot(PF6,'y-')
% hold on
% plot(PF7,'c-')
% hold on
% plot(PF8,'k:')
% hold on
% plot(PF9,'r:')
% grid

%Total Travel Time (veh-min)
for lp=1:wx
for i=1:9
TPTA(i,lp)=PFA(i,lp).*PTTA(i,lp)/15;
TPTB(i,lp)=PFB(i,lp).*PTTB(i,lp)/15;
end

TTTA(1,lp)=sum(TPTA(1:1:9,lp));
TTTB(1,lp)=sum(TPTB(1:1:9,lp));
TTT(1,lp)=TTTA(1,lp)+TTTB(1,lp);
end
for lp=1:wx
TTTD(lp)=TTT(1,lp);
end
% plot(TTTD,'r-.')
% grid

%Demand D
for lp=1:wx-96
Ddem_O1(1,lp)=(dem_O1(1,lp)-dem_O1(1,lp+96));
Ddem_O2(1,lp)=(dem_O2(1,lp)-dem_O2(1,lp+96));
Ddem_O3(1,lp)=(dem_O3(1,lp)-dem_O3(1,lp+96));
end

% Path Flow D
for lp=1:wx-96
for i=1:9
DPF(i,lp)=(PF(i,lp)-PF(i,lp+96));
```

```
end  
end
```

```
for lp=1:wx  
LF_1(lp)=LF(1,lp);  
LF_2(lp)=LF(2,lp);  
LF_3(lp)=LF(3,lp);  
LF_4(lp)=LF(4,lp);  
LF_5(lp)=LF(5,lp);  
LF_6(lp)=LF(6,lp);  
LF_7(lp)=LF(7,lp);  
LF_8(lp)=LF(8,lp);  
LF_9(lp)=LF(9,lp);  
LF_10(lp)=LF(10,lp);  
LF_11(lp)=LF(11,lp);  
LF_12(lp)=LF(12,lp);  
LF_13(lp)=LF(13,lp);  
LF_14(lp)=LF(14,lp);  
LF_15(lp)=LF(15,lp);  
LF_16(lp)=LF(16,lp);  
LF_17(lp)=LF(17,lp);  
End
```

```
% figure(1)  
% plot(LF_1,'m-')  
% hold on  
% plot(LF_2,'y-')  
% hold on  
% plot(LF_3,'c-')  
% hold on  
% plot(LF_4,'r-')  
% hold on  
% plot(LF_5,'g-')  
% hold on  
% plot(LF_6,'b-')  
% hold on  
% plot(LF_7,'k-')  
% hold on  
% plot(LF_8,'m-.')  
% hold on  
% plot(LF_9,'y-.')  
% hold on  
% plot(LF_10,'c-.')  
% hold on  
% plot(LF_11,'r-.')  
% hold on  
% plot(LF_12,'g-.')  
% hold on  
% plot(LF_13,'b-.')  
% hold on  
% plot(LF_14,'k-.')  
% hold on  
% plot(LF_15,'m:')  
% hold on  
% plot(LF_16,'g:')  
% hold on  
% plot(LF_17)  
% grid
```

```
for lp=1:wx-96
D1(lp)=Ddem_O1(1,lp);
D2(lp)=Ddem_O2(1,lp);
D3(lp)=Ddem_O3(1,lp);
end
% plot(D1,'k-')
% hold on
% plot(D2,'r-.')
% hold on
% plot(D3,'g--')
% grid

for lp=1:wx
pptA1(lp)=pptA(1,lp);
pptA2(lp)=pptA(2,lp);
pptA3(lp)=pptA(3,lp);
pptA4(lp)=pptA(4,lp);
pptA5(lp)=pptA(5,lp);
pptA6(lp)=pptA(6,lp);
pptA7(lp)=pptA(7,lp);
pptA8(lp)=pptA(8,lp);
pptA9(lp)=pptA(9,lp);
end

% plot(pptA1,'k-')
% hold on
% plot(pptA2,'r-.')
% hold on
% plot(pptA3,'g--')
% hold on
% plot(pptA4,'b-')
% hold on
% plot(pptA5,'m-')
% hold on
% plot(pptA6,'y-')
% hold on
% plot(pptA7,'c-')
% hold on
% plot(pptA8,'k:')
% hold on
% plot(pptA9,'r:')
% grid

for lp=1:wx
pptB1(lp)=pptB(1,lp);
pptB2(lp)=pptB(2,lp);
pptB3(lp)=pptB(3,lp);
pptB4(lp)=pptB(4,lp);
pptB5(lp)=pptB(5,lp);
pptB6(lp)=pptB(6,lp);
pptB7(lp)=pptB(7,lp);
pptB8(lp)=pptB(8,lp);
pptB9(lp)=pptB(9,lp);
end

% plot(pptB1,'k-')
% hold on
% plot(pptB2,'r-.')
```

```
% hold on
% plot(pptB3,'g--')
% hold on
% plot(pptB4,'b-')
% hold on
% plot(pptB5,'m-')
% hold on
% plot(pptB6,'y-')
% hold on
% plot(pptB7,'c-')
% hold on
% plot(pptB8,'k:')
% hold on
% plot(pptB9,'r:')
% grid

% for lp=1:wx
% PFB1(lp)=PFB(1,lp);
% PFB2(lp)=PFB(2,lp);
% PFB3(lp)=PFB(3,lp);
% PFB4(lp)=PFB(4,lp);
% PFB5(lp)=PFB(5,lp);
% PFB6(lp)=PFB(6,lp);
% PFB7(lp)=PFB(7,lp);
% PFB8(lp)=PFB(8,lp);
% PFB9(lp)=PFB(9,lp);
% end
%
% plot(PFB1,'k-')
% hold on
% plot(PFB2,'r-.')
% hold on
% plot(PFB3,'g--')
% hold on
% plot(PFB4,'b-')
% hold on
% plot(PFB5,'m-')
% hold on
% plot(PFB6,'y-')
% hold on
% plot(PFB7,'c-')
% hold on
% plot(PFB8,'k:')
% hold on
% plot(PFB9,'r:')
% grid

for lp=1:wx-96
DPF1(lp)=DPF(1,lp);
DPF2(lp)=DPF(2,lp);
DPF3(lp)=DPF(3,lp);
DPF4(lp)=DPF(4,lp);
DPF5(lp)=DPF(5,lp);
DPF6(lp)=DPF(6,lp);
DPF7(lp)=DPF(7,lp);
DPF8(lp)=DPF(8,lp);
DPF9(lp)=DPF(9,lp);
end
```

```
% plot(DPF1,'k-')
% hold on
% plot(DPF2,'r-.')
% hold on
% plot(DPF3,'g--')
% hold on
% plot(DPF4,'b-')
% hold on
% plot(DPF5,'m-')
% hold on
% plot(DPF6,'y-')
% hold on
% plot(DPF7,'c-')
% hold on
% plot(DPF8,'k:')
% hold on
% plot(DPF9,'r:')
% grid

% for lp=1:wx-96
% DPFB1(lp)=DPFB(1,lp);
% DPFB2(lp)=DPFB(2,lp);
% DPFB3(lp)=DPFB(3,lp);
% DPFB4(lp)=DPFB(4,lp);
% DPFB5(lp)=DPFB(5,lp);
% DPFB6(lp)=DPFB(6,lp);
% DPFB7(lp)=DPFB(7,lp);
% DPFB8(lp)=DPFB(8,lp);
% DPFB9(lp)=DPFB(9,lp);
% end
% plot(DPFB1,'k-')
% hold on
% plot(DPFB2,'r-.')
% hold on
% plot(DPFB3,'g--')
% hold on
% plot(DPFB4,'b-')
% hold on
% plot(DPFB5,'m-')
% hold on
% plot(DPFB6,'y-')
% hold on
% plot(DPFB7,'c-')
% hold on
% plot(DPFB8,'k:')
% hold on
% plot(DPFB9,'r:')
% grid

for lp=1:96
dU4(lp)=sum(dem_D4(1:1:lp))
end
% plot(dU4,'g-')
% grid
% plot(dem_D4,'c-')
% grid

for lp=1:x*96
sumdem(lp)=dem_O1(lp)+dem_O2(lp)+dem_O3(lp);
end
% plot(sumdem,'r-.')
```

```
% grid

lp=1:wx
    plot(dem_01,'r-')
    hold on
    plot(dem_02,'g-')
    hold on
    plot(dem_03,'c-')
    grid

end
```