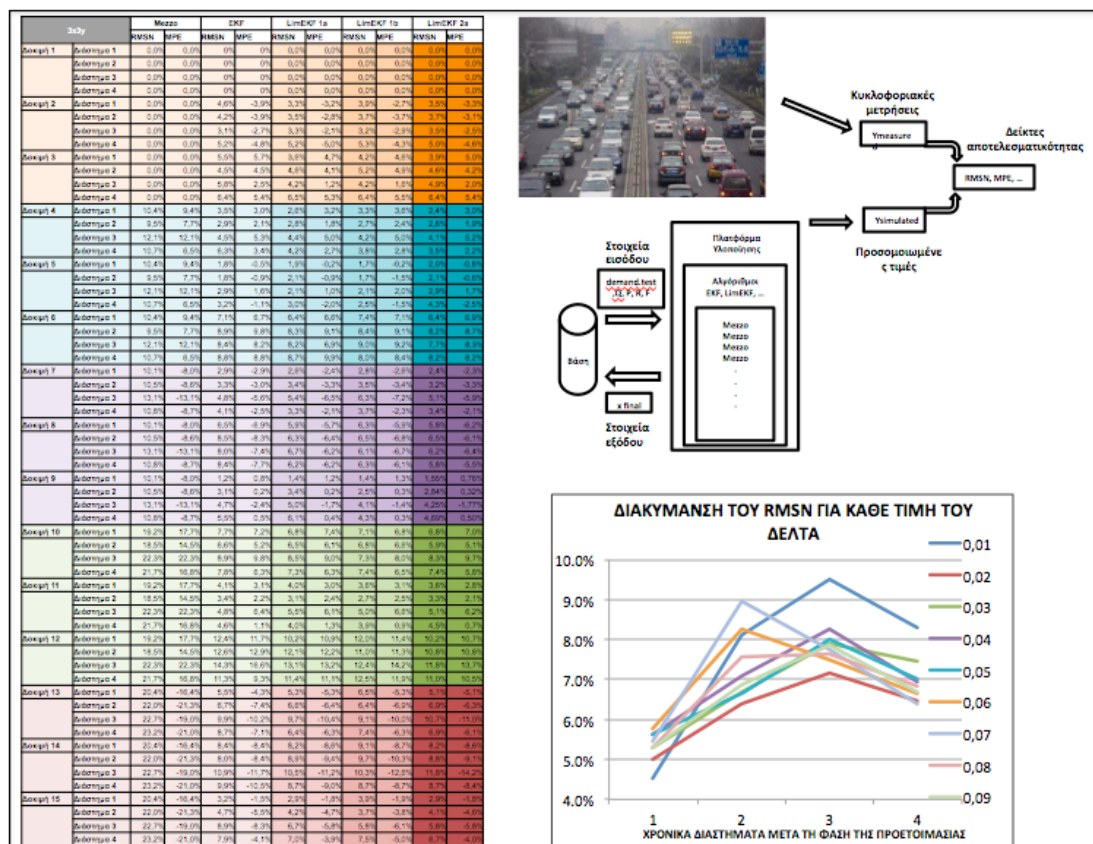




ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΗΤΡΩΩΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ - ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΥ



Επιβλέπων: Αντωνίου Κωνσταντίνος,
 Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Λυκογιάννη Γεωργία-Μαρία

Αθήνα, Ιούλιος 2012



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF RURAL & SURVEYING ENGINEERING
DEPARTMENT OF INFRASTRUCTURE & RURAL DEVELOPMENT
LABORATORY OF TRANSPORTATION ENGINEERING

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF DYNAMIC ESTIMATION METHODS OF ORIGIN- DESTINATION MATRICES

Supervisor: Antoniou Constantinos,
Assistant Professor, NTUA

Lykogianni Georgia-Maria

Athens, July 2012

Copyright © Λυκογιάννη Γεωργία-Μαρία, Ιούλιος 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα έργων υποδομής και αγροτικής ανάπτυξης στα πλαίσια της εμβάθυνσης της συγκοινωνιακής τεχνικής της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Επιβλέπων είναι ο κ. Κωνσταντίνος Αντωνίου, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ, ο οποίος μου ανέθεσε το συγκεκριμένο αντικείμενο μελέτης με σκοπό την επιμόρφωσή μου και την διενέργεια μελέτης πάνω στο ιδιαίτερα ενδιαφέρον για εμένα αντικείμενο των κυκλοφοριακών. Με αυτή την εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στην Σχολή των Αγρονόμων και Τοπογράφων μηχανικών και για την επίτευξη της περάτωσης της οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τους ανθρώπους που συνέβαλαν σε αυτό.

Πρώτον από όλους θέλω να ευχαριστήσω των επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Αντωνίου, ο οποίος προσπάθησε να προσαρμόσει το θέμα όσο καλύτερα γινόταν στα ενδιαφέροντά μου και έδειξε μεγάλο ενδιαφέρον κατά τη διάρκεια διενέργειας της διπλωματικής μου εργασίας.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω:

- Τον προγραμματιστή Δρ. Ηλία Γυφτοδήμο, για την βοήθεια και τις συμβουλές του σχετικά με τη χρήση της πλατφόρμας που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των αλγορίθμων.
- Την συγκοινωνιολόγο Δρ. Αλεξάνδρα Κονδύλη, η οποία με βοήθησε στην υλοποίηση των δικτύων εισαγωγής του προσομοιωτή και στην αντιμετώπιση των διαφόρων προβλημάτων που προέκυψαν.
- Τον Dr. Wilco Burghout, ο οποίος έχει υλοποιήσει τον προσομοιωτή Mezzo που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και ο οποίος ανταποκρίθηκε άμεσα σε διαφορές ερωτήσεις που τέθηκαν σχετικά με την εκτέλεση του λογισμικού.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου η οποία με στηρίζει σε όλες μου τις επιλογές και τις προσπάθειες τόσο στα μαθητικά όσο και στα φοιτητικά μου χρόνια, αλλά και τους κοντινούς μου φίλους οι οποίοι ήταν πρόθυμοι να με βοηθήσουν αλλά και να με στηρίξουν στις διάφορες δυσκολίες που αντιμετώπισα κατά την εκτέλεση της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται μεθοδολογίες εκτίμησης μητρώων Προέλευσης – Προορισμού, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί στην προσπάθεια επίλυσης αυτού του προβλήματος. Γίνεται αναφορά στις διάφορες μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί μέσα στις τελευταίες δεκαετίες και παρατίθενται τα χαρακτηριστικά τους.

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι εναλλακτικές προσεγγίσεις που έχουν διατυπωθεί και κατηγοριοποιούνται σε στατικές και δυναμικές μεθόδους ανάλογα με τον βαθμό στον οποίο εξαρτώνται από τον παράγοντα του χρόνου. Όσον αφορά τις δυναμικές προσεγγίσεις, υλοποιείται ένας επιπλέον διαχωρισμός ανάλογα με τον τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος που αυτές προτείνουν. Με τη διαδικασία αυτή, προκύπτει η διατύπωση του προβλήματος ως πρόβλημα βελτιστοποίησης και ως πρόβλημα χώρου κατάστασης (state-space).

Στη συνέχεια, μία από αυτές της μεθοδολογίες και πιο συγκεκριμένα οι αλγόριθμοι επίλυσης μοντέλων χώρου – κατάστασης επιλέγεται ως πιο ενδιαφέρουσα προς μελέτη λόγω των διαφόρων εναλλακτικών αλγορίθμων που έχουν διατυπωθεί για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων και της απλούστευσης που αυτοί επιφέρουν στην υπολογιστική διαδικασία. Ειδικότερα, επιλέγεται ο αλγόριθμος Εκτεταμένου Φίλτρου Κάλμαν (EKF), ο οποίος παράγει αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας όμως περιλαμβάνει απαιτητικούς υπολογισμούς για την υλοποίησή του καθώς και μια παραλλαγή αυτού, ο αλγόριθμος Περιορισμένου Εκτεταμένου Φίλτρου Κάλμαν (Limiting EKF) ο οποίος μέσω μιας απλούστευσης μειώνει την ακρίβεια υπολογισμού αλλά αυξάνει σημαντικά την ταχύτητα εκτέλεσης.

Έπειτα, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός μιας πλατφόρμας εκτέλεσης μέσω της οποίας πραγματοποιείται μεγάλος αριθμός διαδοχικών εκτελέσεων (πάνω από 120), τόσο των δυο αυτών αλγορίθμων όσο και του προσομοιωτή mezzo ο οποίος δημιουργήθηκε από το πανεπιστήμιο της Στοκχόλμης (KTH). Για τον προσεγγιστικό αλγόριθμο Περιορισμένου Εκτεταμένου Φίλτρου Κάλμαν υλοποιούνται τρεις παραλλαγές εκτελέσεων με στόχο τη διερεύνηση της ακρίβειάς του για διαφορετικά επίπεδα απλούστευσης. Οι εκτελέσεις αυτές αφορούν δύο συνθετικά δίκτυα καθώς και ένα πραγματικό δίκτυο της Στοκχόλμης, για το οποίο όμως αποτελέσματα δεν περιλαμβάνονται σε αυτή την εργασία.

Τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα αυτών των 120 εκτελέσεων και γίνεται σχολιασμός και σύγκρισή μεταξύ τους. Η σύγκριση αφορά τόσο την αποδοτικότητα των αλγορίθμων σε σχέση με τα αποτελέσματα μίας απλής εκτέλεσης του προσομοιωτή Mezzo, δηλαδή με μια κατάσταση με μηδενική διόρθωση, όσο και την αποδοτικότητα του απλούστερου από θέμα υπολογισμού και χρόνου εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF, με τον πιο απαιτητικό και ακριβή αλγόριθμο EKF.

ABSTRACT

The present thesis deals with the methods that have been developed during the past decades as a means to resolve the problem of Origin-Destination (O-D) matrices estimation. The study's focus is the main content and structure of these methods as well as their features and particularities that are being introduced and analyzed in detail.

More specifically, the alternative approaches that have been formulated through the years are being presented and categorized into static and dynamic methods, depending on the extent to which they rely on the time factor. With regard to the dynamic approaches, further distinction is being made based on the way they cope with the estimation problem. Thereby, the estimation problem is classified as either an optimization problem or as a state-space problem.

Subsequently, one of the aforementioned methods, namely, the state-space model, is being chosen due to the special interest it carries which is a result of the numerous alternative algorithms proposed for its solution. These algorithms are distinguished in "exact" algorithms, as well as others that aim at the simplification of the computation process that those algorithms need to accomplish. The algorithms that have been chosen for further analysis are the Extended Kalman Filter (EKF), that produces high detail results but also requires demanding calculations and a variation/approximation of it, the Limiting Extended Kalman Filter (Limiting EKF), that thanks to a computational simplification manages to drastically improve the execution speed, while at the same time not sacrificing estimation accuracy.

This is followed by a presentation of the design of a simulation platform, with which a great number of consecutive runs (more than 120) is carried out, including both the execution of the two algorithms mentioned above and of the mezzo simulator (that is being used for the function evaluations), that is a research product of the Royal Institute of Technology (KTH) of Stockholm, Sweden. For the Limiting EKF algorithm, three different runs are being materialized with the aim of exploring its accuracy at different simplification levels. These runs are concerned with two test networks and an actual network of the city of Stockholm (for which, however, no results have been included in this study).

Finally, a record of the results of all runs along with analysis and comparison between them has also been included. This comparison is concerned with the efficiency of the algorithms in relation to the results of a simple run of the mezzo simulator, which provides a state with no corrections, as well as the efficiency of the simpler, in a calculation and run time sense, Limiting EKF algorithm in comparison with that of the more demanding and accurate EKF algorithm.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ-ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΜΗΤΡΩΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ	
ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΥ	14
1.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	15
1.2.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΖΗΤΗΣΗΣ.....	15
1.2.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΦΟΡΑΣ	16
1.2.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΩΝ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	18
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	18
1.4 ΔΟΜΗ	19
2. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΡΟΩΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ-ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΥ.....	21
2.1 ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ	21
2.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ.....	21
2.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΦΑΝΕΙΑΣ	23
2.1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ	24
2.1.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΑΥΕΣΙΑΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ	25
2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ	25
2.2.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΩΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	26
2.2.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΩΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΧΩΡΟΥ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	28
2.2.3 ΑΛΛΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ	30
2.3 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ.....	34
2.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ	35
2.3.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	36
2.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....	37
3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΧΩΡΟΥ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	38
3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	38
3.1.1 ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΟ ΦΙΛΤΡΟ ΚΑΛΜΑΝ (ΕΚΦ)	39
3.1.2 ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΟ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΟ ΦΙΛΤΡΟ ΚΑΛΜΑΝ (ΙΕΚΦ)	40
3.1.3 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΟ ΦΙΛΤΡΟ ΚΑΛΜΑΝ (LIMITING ΕΚΦ)	41
3.1.4 UNSCENTED KALMAN FILTER	42
3.1.5 SP-EKF : ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΕΚΦ ΚΑΙ SP.....	43

3.2	ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ.....	45
4.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	52
4.1	ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ.....	52
4.1.1	ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	52
4.1.2	ΒΗΜΑΤΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ	54
4.2	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ.....	57
4.2.1	ΠΡΟΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....	57
4.2.2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	59
4.2.3	ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΑΡΧΕΙΑ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	64
4.3	Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ-MEZZO	66
4.4	ΔΙΚΤΥΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....	73
4.4.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΣΤΗΣΙΜΟ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	74
4.4.2	ΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	79
4.5	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	83
5.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	86
5.1	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ	86
5.1.1	ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΟΡΘΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	86
5.1.2	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΧΡΗΣΤΗ	87
5.1.3	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΝΤΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΙΤΙΕΣ	89
5.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΚF	90
5.2.1	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ Q, R.....	91
5.2.2	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΔΕΛΤΑ (Linear Delta Factor)	92
5.2.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΚF	95
5.3	ΕΦΑΡΜΟΓΗ LimΕΚF.....	102
5.3.1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ H	103
5.3.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ LimΕΚF.....	104
5.4	ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	114
5.5	SODERMALM	128
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	129
6.1	ΣΥΝΟΨΗ	129
6.2	ΕΠΟΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ	130

6.2.1	ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΙΔΙΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	130
6.2.2	ΑΛΛΕΣ ΛΥΣΕΙΣ	131
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	132

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα εφαρμογής (Antoniou et al. (2007)).	46
Πίνακας 4.1: Παραδείγματα μεταβλητών εκτέλεσης για τον αλγόριθμο Lim EKF του δικτύου $3 \times 3y$.	85
Πίνακας 5.1: Διερεύνηση των πινάκων διακύμανσης της ζήτησης.	92
Πίνακας 5.2: Διερεύνηση του παράγοντα δέλτα.	93
Πίνακας 5.3: Δεδομένα δοκιμών.	96
Πίνακας 5.4: Στοιχεία δοκιμών.	96
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοιωτή mezzo για το $3 \times 2y$.	98
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου EKF για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$.	99
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοιωτή mezzo για το $3 \times 3y$.	101
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου EKF για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$.	102
Πίνακας 5.9: Υπολογισμός του μέσου όρου των h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4) για τις δοκιμές με ζήτηση $\pm 10\%$ (Σενάριο 1a) για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$.	104
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF του σεναρίου 1a, για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$.	105
Πίνακας 5.11: Υπολογισμός του μέσου όρου των h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4) για τις δοκιμές με ζήτηση $\pm 20\%$ (Σενάριο 1b) για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$.	106
Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF του σεναρίου 1b, για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$.	107
Πίνακας 5.13: Υπολογισμός του μέσου όρου των h της δοκιμής 1a (Σενάριο 2a) για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$.	107
Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF του σεναρίου 2a, για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$.	108
Πίνακας 5.15: Υπολογισμός του μέσου όρου των h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4) για τις δοκιμές με ζήτηση $\pm 10\%$ (Σενάριο 1a) για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 3y$.	109
Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF του σεναρίου 1a, για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 3y$.	110

Πίνακας 5.17: Υπολογισμός του μέσου όρου των h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4) για τις δοκιμές με ζήτηση $\pm 20\%$ (Σενάριο 1b) για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 3y$	111
Πίνακας 5.18: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF του σεναρίου 1b, για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 3y$	112
Πίνακας 5.19: Υπολογισμός του μέσου όρου των h της δοκιμής 1a (Σενάριο 2a) για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 3y$	113
Πίνακας 5.20: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF του σεναρίου 2a, για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 3y$	114
Πίνακας 5.21: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$	115
Πίνακας 5.22: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$. (συνέχεια από 5.21)	116
Πίνακας 5.23: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμων με το Mezzo για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$	117
Πίνακας 5.24: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμων με το Mezzo για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$. (συνέχεια από 5.23).....	118
Πίνακας 5.25: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμου LimEKF με τα αποτελέσματα του EKF για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$	119
Πίνακας 5.26: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμου LimEKF με τα αποτελέσματα του EKF για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 2y$. (συνέχεια από 5.25)....	120
Πίνακας 5.27: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 3y$	121
Πίνακας 5.28: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 3y$. (συνέχεια από 5.27)	122
Πίνακας 5.29: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμων με το Mezzo για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 3y$	123
Πίνακας 5.30: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμων με το Mezzo για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 3y$. (συνέχεια από 5.29).....	124
Πίνακας 5.31: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμου LimEKF με τα αποτελέσματα του EKF για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 3y$	125
Πίνακας 5.32: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμου LimEKF με τα αποτελέσματα του EKF για το συνθετικό δίκτυο $3 \times 3y$. (συνέχεια από 5.31)....	126

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1: Αλγόριθμος EKF, Antoniou et al. (2005)	40
Εικόνα 4.1: Πίνακας H - Εξαγόμενο αποτέλεσμα του EKF και προαπαιτούμενο στοιχείο του αλγορίθμου Limiting EKF	57
Εικόνα 4.2: Στοιχεία εξόδου (φόρτος και ταχύτητα) από τον προσομοιωτή κυκλοφορίας Mezzo για το δίκτυο της Στοκχόλμης.	67
Εικόνα 4.3: Προσομοίωση του δικτύου της Κολονίας (Γερμανία) στο SUMO.	68
Εικόνα 4.4: Προσομοίωση του δικτύου της Ζυρίχης στο MATSim.	69
Εικόνα 4.5: Απεικόνιση μίας συγκεκριμένης περιοχής του πραγματικού δικτύου (Sodermalm).	70
Εικόνα 4.6: Απεικόνιση γενικής άποψης του πραγματικού δικτύου (Sodermalm).	71
Εικόνα 4.7: Επίβλεψη των στοιχείων κυκλοφορίας μίας περιοχής με τη βοήθεια του Mezzo.....	72
Εικόνα 4.8: Ορισμός δρόμων επίβλεψης μέσω του εργαλείου Mezzo Analyzer..	72
Εικόνα 4.9: Συνθετικό δίκτυο με ένα κεντροειδές προέλευσης και τρία κεντροειδή προορισμού στον Mezzo editor.	73
Εικόνα 4.10: Αρχείο εισαγωγής της ζήτησης demand.test - Συστατικό στοιχείο του προσομοιωτή Mezzo.....	77
Εικόνα 5.1: Τμήμα του δομικού αρχείου του Mezzo, parameters.test, που αναφέρεται στην χρονική διάρκεια των διαστημάτων (intervals).....	89

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1: Διάγραμμα διαχωρισμού των ζευγών Π-Π με βάση τις χρονικές δομές, Djukic et al. (2012).....	33
Διάγραμμα 4.1: Απεικόνιση διαδικασίας υλοποίησης αλγορίθμων.	53
Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα αρχικής ζήτησης συνθετικών δικτύων.	80
Διάγραμμα 4.3: Διορθωμένη ζήτηση λόγω υπέρβασης της χωρητικότητας των συνθετικών δικτύων.	81
Διάγραμμα 4.4: Εκτιμημένη ζήτηση συνθετικού δικτύου 3x3y.....	82

Διάγραμμα 5.1: Διάγραμμα διερεύνησης του παράγοντα δέλτα συναρτήσει της συνδιακύμανσης του δείκτη αποτελεσματικότητας RMSN.....	94
Διάγραμμα 5.2: Διάγραμμα διερεύνησης του παράγοντα δέλτα συναρτήσει της συνδιακύμανσης του δείκτη αποτελεσματικότητας MPE.....	94

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη περιγραφή του προβλήματος της εκτίμησης και πρόβλεψης των μελλοντικών κυκλοφοριακών δεδομένων, καθώς και αναφορά σε κάποιους από τους τρόπους συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων και στα προβλήματα αυτής της διαδικασίας. Περιγράφεται η δομή της παρούσας εργασίας, με αναφορά των θεμάτων που πραγματεύεται ανά κεφάλαιο και τέλος παρουσιάζεται ο σκοπός της εκπόνησής της.

1.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ- ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΜΗΤΡΩΩΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΥ

Το πρόβλημα της εκτίμησης και πρόβλεψης μελλοντικών κυκλοφοριακών δεδομένων είναι ένας τομέας που απασχολεί τον κλάδο των συγκοινωνιακών τις τελευταίες δεκαετίες. Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για την επίλυση του, τόσο δυναμικές όσο και στατικές. Κάποιες είναι πολύ ακριβείς στην πρόβλεψή τους, αλλά υπολογιστικά απαιτητικές και χρονοβόρες και άλλες πολύ πιο σύντομες αλλά και προσεγγιστικές.

Οι μελετητές ανά τα χρόνια προσπαθούν να κάνουν εκτίμηση και πρόβλεψη μίας μελλοντικής κατάστασης του δικτύου με δεδομένα είτε ιστορικά είτε προερχόμενα από μετρήσεις στο δίκτυο, π.χ. με τη βοήθεια αισθητήρων. Γίνεται προσπάθεια να δημιουργηθούν μοντέλα τα οποία θα αναπαριστούν καλύτερα την κυκλοφορική κατάσταση του δικτύου.

Αυτό το ζήτημα είναι πολύ σημαντικό αλλά και απαιτητικό καθώς, σε πολλές περιπτώσεις, θα πρέπει μια πραγματική και απολύτως μη γραμμική κατάσταση να περιγραφεί με ένα γραμμικό μοντέλο ώστε να είναι πιο εύκολοι οι υπολογισμοί. Το στάδιο της γραμμικοποίησης είναι το πιο χρονοβόρο από όλη την διαδικασία της εκτίμησης και της πρόβλεψης. Αυτός είναι και ο λόγος που έχουν σχεδιαστεί κάποιοι αλγόριθμοι που έχουν σαν κύριο χαρακτηριστικό την παράκαμψη ή την αντικατάσταση αυτού του βήματος από μία προσεγγιστική διαδικασία.

Οι παραπάνω τύποι αλγορίθμων αναλύονται εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια.

1.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Οι διάφορες διαδικασίες βαθμονόμησης στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ των αναλυτικά υπολογισμένων, μέσω των αλγορίθμων βελτιστοποίησης, στοιχείων του δικτύου και αυτών που έχουν μετρηθεί από τους ανιχνευτές. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται ποικίλες προσεγγίσεις από διάφορους ερευνητές για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.

1.2.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΖΗΤΗΣΗΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες, το πρόβλημα της εκτίμησης των ροών Π-Π έχει προσεγγιστεί μέσα από ποικίλες θεωρητικές μελέτες. Οι **Cascetta (1984)** και **Cascetta et al. (1993)** αναφέρουν μια στατική προσέγγιση της εκτίμησης Π-Π, βασιζόμενοι στη μέθοδο των γενικευμένων ελαχίστων τετραγώνων. Ωστόσο, οι δοκιμές που στηρίζονται σε αυτή την ιδέα πραγματοποιούνται αποκλειστικά σε γραμμικό δίκτυο χωρίς επιλογές διαδρομών ενώ ακόμη δεν παρέχονται οδηγίες αναφορικά με κάποιον τρόπο εκτίμησης των πινάκων συνδιακύμανσης του σφάλματος, η οποία αποτελεί κρίσιμη εκτίμηση δεδομένων εισόδου.

Οι **Ashok and Ben-Akiva (1993)** περιγράφουν μια εκτίμηση πραγματικού χρόνου των ροών Π-Π καθώς και μια πρόβλεψη του πλαισίου εργασίας βασιζόμενοι στον αλγόριθμο του φίλτρου Kalman. Ο αλγόριθμος αυτός μελετά τις αποκλίσεις των ροών Π-Π από τις ιστορικές τιμές τους. Η παραπάνω προσέγγιση είναι αρκετά ευέλικτη ώστε να επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό των σφαλμάτων του συνόλου της διαδικασίας καθώς και τη μορφή του πίνακα καταμερισμού στο δίκτυο (assignment matrix). Εντούτοις, η συνολική διαδικασία υλοποιήθηκε πάνω σε μικρής κλίμακας δίκτυα με ελάχιστο ή ακόμη και μηδενικό αριθμό επιλογών διαδρομής. Επιπλέον, η αρχικοποίηση του φίλτρου Κάλμαν απαιτεί την ύπαρξη ιστορικών ροών των πινάκων συνδιακύμανσης σφαλμάτων, καθώς και πινάκων αυτοπαλινδρόμησης οι οποίοι θα πρέπει να είναι ήδη γνωστοί κατά την εκκίνηση της διαδικασίας βαθμονόμησης.

Οι **Cascetta and Postorino (2001)** κατασκεύασαν διάφορους επαναληπτικούς αλγορίθμους, για την διαδικασία εκτίμησης του προβλήματος σταθερού σημείου Π-Π σε συμφορημένα δίκτυα. Παρ' όλα αυτά η συγκεκριμένη εργασία τους δεν εστιάζει στην βαθμονόμηση του μοντέλου ενώ η έκτασή αυτού είναι περιορισμένη στο στατικό πρόβλημα εκτίμησης Π-Π.

Η σημασία του συνδυασμού όλων των μοντέλων, τόσο αυτών της ζήτησης όσο και εκείνων της προσφοράς, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτίωσης του δυναμικού μοντέλου αναγνωρίζεται και τονίζεται από τους **Doan et al. (1999)**, δίχως όμως να προτείνεται οποιαδήποτε συγκεκριμένη προσέγγιση προς αυτή την κατεύθυνση.

Μέσω αυτού του συνδυασμού των μοντέλων και με την αλλαγή των διαφόρων παραμέτρων τους είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί ανίχνευση τυχόν αναντιστοιχιών μεταξύ προσομοιωμένων και μετρημένων στοιχείων της κυκλοφορίας. Επιπλέον, η βαθμονόμηση της εκτίμησης Π-Π ελαχιστοποιεί την απόκλιση μεταξύ των αναλυτικά υπολογισμένων χρόνων διαδρομής και αυτών που έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας ταχύτητες προερχόμενες από τους ανιχνευτές.

1.2.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΦΟΡΑΣ

Οι **Van Arem and Van der Vlist (1992)**, υλοποίησαν μία μέθοδο για τη δυναμική εκτίμηση της χωρητικότητας των οδικών τμημάτων, η οποία στηρίζεται σε δύο υποθέσεις. Η πρώτη από αυτές απαιτεί την ύπαρξη ενός τρέχοντος βασικού διαγράμματος το οποίο θα εξαρτάται άμεσα από τις επικρατούσες συνθήκες ενώ η δεύτερη ζητά η εκτίμηση της χωρητικότητας να πραγματοποιείται με τη χρήση του θεμελιώδους διαγράμματος και του προσδιορισμού της μέγιστης πληρότητας.

Σύμφωνα με τους Tavana and Mahmassani (2000), οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμώνται με τη βοήθεια των ιστορικών τιμών των δεδομένων ταχύτητας – πυκνότητας. Οι μελετητές, δεν κάνουν κάποια υπόθεση προκαθορισμένης παραμέτρου ή μορφής του μοντέλου, πραγματοποιείται όμως μία εκτίμηση ταχύτητας και στη συνέχεια γίνεται πρόβλεψη της τιμής αυτής για τα μελλοντικά χρονικά διαστήματα.

Βασιζόμενοι στην εργασία των **Tavana and Mahmassani (2000)**, οι **Huynh et al. (2000)**, υλοποίησαν την ενσωμάτωση του μοντέλου της λειτουργίας μετάβασης σε ένα πλαίσιο δυναμικής κατανομής της κυκλοφορίας (Dynamic Traffic Assignment), το οποίο βασίζεται στην προσομοίωση. Πέραν αυτού, πραγματοποιήθηκε ακόμη μια εκτίμηση των ταχυτήτων με τη βοήθεια του μοντέλου μετάβασης το οποίο προσαρμόζεται ανάλογα, στην περίπτωση που οι παράμετροι του μοντέλου ανανεώνονται δυναμικά (on-line), με βάση τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες. Τέλος, μια διαδικασία μη γραμμικής βελτιστοποίησης ελαχίστων τετραγώνων ενσωματώνεται στο σύστημα DTA με σκοπό να καταστεί δυνατή η εκτίμηση του μοντέλου μετάβασης παραμέτρων μέσω δυναμικών μετρήσεων.

Οι Qin and Mahmassani (2004), αξιολόγησαν το ίδιο μοντέλο με πραγματικά δεδομένα αισθητήρων από διάφορους συνδέσμους ενός δικτύου της πόλης Irvine (CA).

Οι Wang and Papageorgiou (2004), υποστηρίζουν ότι αν και το Εκτεταμένο Φίλτρο Κάλμαν (Extended Kalman Filter-EKF) κατά την εκτίμηση και των τριών παραμέτρων (ταχύτητα ελεύθερης ροής, κρίσιμη πυκνότητα, εκθέτης) οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα, η διαδικασία εκτίμησης δύο εκ των τριών παραμέτρων και

η διατήρηση της μίας από αυτές στην αρχική της τιμή, δεν δημιουργεί σημαντική μείωση των επιδόσεων.

Οι Antoniou et al. (2005), εξέφρασαν την εξίσωση μετάβασης του σταθερού διανύσματος σε μία γενική μορφή μίας διαδικασίας αυτοπαλινδρόμησης. Το πρόβλημα όμως είναι υποκαθορισμένο καθώς η διάσταση του σταθερού διανύσματος (δηλαδή οι παράμετροι του μοντέλου) έχει μεγαλύτερη τιμή από τον αριθμό των εξισώσεων (μετρήσεις ταχύτητας). Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα καθώς και για την εισαγωγή συμπληρωματικής πληροφορίας στη σχέση, είναι δυνατή η αύξηση του αριθμού των παραμέτρων της σχέσης πυκνότητας - ταχύτητας με δύο επιπλέον ομάδες εξισώσεων μέτρησης. Οι πρώτες, βαθμονομημένες στατικές τιμές των παραμέτρων της σχέσης ταχύτητας-πυκνότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εκ των προτέρων εκτιμήσεις των πραγματικών τιμών των παραμέτρων.

Επίσης οι μετρήσεις των στοιχείων της κυκλοφορίας, οι οποίες μπορεί να προήλθαν εμμέσως από την κατάληψη (occupancy) που μετρήθηκε μέσω αισθητήρων, ενσωματώνονται άμεσα ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τη σειρά τους, σαν εκ των προτέρων εκτιμήσεις του διανύσματος κατάστασης (state vector) π.χ. της πυκνότητας. Το πρόβλημα της δυναμικής βαθμονόμησης της σχέσης πυκνότητας-ταχύτητας, μορφοποιήθηκε, ως ένα ευέλικτο μοντέλο χώρου-κατάστασης (state-space) και προτάθηκαν εφαρμόσιμες προσεγγίσεις λύσεων. Για τρεις από αυτές τις προσεγγίσεις, το Extended Kalman Filter (EKF), το Iterated EKF και το Unscented Kalman Filter, υλοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν εφαρμογές της μεθοδολογίας τους με δεδομένα από αισθητήρα αυτοκινητόδρομου σε δύο δίκτυα της Ευρώπης και των Η.Π.Α.

Ο **Van der Zijpp (1997)**, συνδύασε μετρήσεις με πληροφορία τροχιάς, οι οποίες προέκυψαν από αυτοματοποιημένες έρευνες αναγνώρισης πινακίδων κυκλοφορίας για την εκτίμηση των ροών Π-Π. Για την εκτίμηση της μελλοντικής κατάστασης, ορίζεται μία εξίσωση μέτρησης με μετρήσεις τροχιών και εκτιμώνται διάφορες πιθανότητες συνδυασμού ροών συνδέσμων και μετρήσεων τροχιών.

Στην διδακτορική εργασία του **Antoniou (2004)** αναπτύχθηκε μία προσέγγιση η οποία προσομοιώνει το δυναμικό πρόβλημα της βελτιστοποίησης σαν ένα μοντέλο χώρου-κατάστασης (state-space) το οποίο αποτελείται από εξισώσεις μετάβασης και μέτρησης. Οι εκ των προτέρων τιμές αποτελούν απευθείας μετρήσεις των άγνωστων παραμέτρων, όπως είναι οι ροές Π-Π, η κατάληψη του δικτύου ανά τμήματα και οι παράμετροι των κυκλοφοριακών δυναμικών μοντέλων, ενώ τα κυκλοφοριακά δεδομένα, όπως οι μετρήσεις συνδέσμων, οι ταχύτητες και οι πυκνότητες ενσωματώνονται σε έμμεσες εξισώσεις μέτρησης. Το διάνυσμα κατάστασης (state vector), καθορίζεται βάσει των αποκλίσεων των παραμέτρων βαθμονόμησης καθώς και μέσω δεδομένων από διαθέσιμες εκτιμήσεις. Στην εργασία των **Antoniou et al. (2007)** παρουσιάζονται και συγκρίνονται κάποιοι εφαρμόσιμοι αλγόριθμοι επίλυσης.

1.2.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΩΝ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται οι κυριότερες διαδικασίες συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων από το δίκτυο. Υπάρχουν δύο τύποι δεδομένων, τα δεδομένα πραγματικού χρόνου και τα ιστορικά δεδομένα.

Τα δεδομένα δικτύου πραγματικού χρόνου μπορεί να συλλέγονται με παράλληλους βρόγχους ανίχνευσης, κάμερες και μετρητές διοδίων και επεξεργάζονται μέσω ενός συστήματος εκτίμησης και πρόβλεψης. Αρχικά λοιπόν υλοποιείται μία εκτίμηση κατάστασης και η οποία δίνει μία προσέγγιση του δικτύου. Μετά γίνεται μια πρόβλεψη της κατάστασης του δικτύου και η οποία δείχνει σημαντικά βελτιωμένα Normalized Root Mean Square Error (RMSN) σε εναλλακτικά συστήματα πρόβλεψης τα οποία δεν χρησιμοποιούν πληροφορία πραγματικού χρόνου ώστε να διορθώσουν τον εαυτό τους.

Τα συστήματα πρόβλεψης δυσκολεύονται θα ανταποκριθούν στην ποικιλότητα της πληροφορίας που παρέχουν οι μοντέρνοι αισθητήρες κυκλοφορίας. Αυτό συμβαίνει καθώς οι αισθητήρες μπορούν να αντλήσουν πληροφορία από δίκτυα με ανομοιόμορφα χαρακτηριστικά όπως άνιση πυκνότητα μέσα στο δίκτυο, ετερογένεια, υψηλά συσχετισμένα δεδομένα, ανομοιόμορφα αποτελέσματα αλλά και από δίκτυα με διαφορετικές συχνότητες.

Αυτού του είδους τα συστήματα εκτίμησης και πρόβλεψης κυκλοφοριακών συνθηκών, δέχονται τρεις τύπους δεδομένων, την πληροφορία της κυκλοφορίας, δηλαδή δεδομένα αισθητήρων πραγματικού χρόνου, προερχόμενα από ποικίλες πηγές, τις εκ των προτέρων τιμές οι οποίες καθορίστηκαν κατά την αρχικοποίηση του συστήματος (default values) και τέλος την αναπαράσταση του δικτύου και τα ιστορικά δεδομένα τα οποία είναι ειδικά χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος, αισθητήρες, ζήτηση Προέλευσης-Προορισμού, χρόνος διαδρομής, ρυθμός ροής και οικονομικοκοινωνικά κριτήρια.

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το κομμάτι της προσομοίωσης της προαναφερθείσας διαδικασίας. Κύριο τμήμα της είναι η διερεύνηση της απόδοσης των μεθοδολογιών δυναμικής εκτίμησης μητρώων προέλευσης – προορισμού. Για να επιτευχθεί όμως αυτό πραγματοποιείται αρχικά μια αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθοδολογιών που έχουν δημιουργηθεί για την εκτίμηση των μητρώων Προέλευσης – Προορισμού.

Παρουσιάζονται λοιπόν οι διάφοροι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης της πρόβλεψης της ζήτησης που αφορά στο δίκτυο. Οι αλγόριθμοι αυτοί κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τύπο της πληροφορίας που απαιτούν ως στατικοί ή δυναμικοί, ανάλογα με το βαθμό της προσέγγισης που χρειάζονται ως πολύ ή λιγότερο προσεγγιστικοί, ανάλογα με τον τύπο των παραμέτρων που χρησιμοποιούν σε προσφοράς ή ζήτησης, αλλά και ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας ως πρόβλημα βελτιστοποίησης ή χώρου-κατάστασης. Οι αλγόριθμοι αυτοί συγκρίνονται θεωρητικά μεταξύ τους ως προς την αποτελεσματικότητα και την ταχύτητα εξαγωγής αποτελέσματος.

Επιλέγεται σαν ενδιαφέρουσα προς μελέτη η μεθοδολογία εκτίμησης μοντέλων χώρου – κατάστασης και πιο συγκεκριμένα οι αλγόριθμοι του Εκτεταμένου Φίλτρου Κάλμαν (Extended Kalman Filter) και του Περιορισμένου Εκτεταμένου Φίλτρου Κάλμαν (Limiting Extended Kalman Filter). Για αυτούς τους δύο αλγορίθμους πραγματοποιείται πρακτική εφαρμογή μέσω μίας πλατφόρμας υλοποίησης με σκοπό τη διερεύνηση της αποδοτικότητας τους. Επίσης, γίνεται σύγκριση μεταξύ των δύο αλγορίθμων ως προς την ακρίβεια, αλλά και τους απαιτητικούς υπολογισμούς που περιλαμβάνουν, με τη βοήθεια δύο συνθετικών δικτύων, ενώ υλοποιείται και η προετοιμασία εφαρμογής ενός πραγματικού δικτύου της Στοκχόλμης.

Κύριο στοιχείο αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου LimEKF ο οποίος αποτελεί απλούστερη παραλλαγή του αλγορίθμου EKF. Γι' αυτό το λόγο γίνονται διάφορες υποθέσεις ως προς τα στοιχεία εισαγωγής του Lim EKF με σκοπό τη διερεύνηση των επιπτώσεων της απλούστευσης στα αποτελέσματα που αυτός παράγει.

1.4 ΔΟΜΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία αποβλέπει να δώσει στον αναγνώστη μία καθολική άποψη για τις μεθοδολογίες εκτίμησης μητρώων Π-Π. Για το σκοπό αυτό αναλύονται ανά κεφάλαιο διάφοροι τρόποι προσέγγισης του προβλήματος.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή και έχει ως στόχο να καταστήσει κατανοητό στον αναγνώστη το πρόβλημα εκτίμησης μητρώων Προέλευσης – Προορισμού. Δίνεται επίσης το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίχθηκε η εργασία, παρατίθεται ένα μικρό απόσπασμα της διαδικασίας συλλογής των απαραίτητων κυκλοφοριακών δεδομένων και περιγράφεται ο σκοπός εκτέλεσης της παρούσας εργασίας. Τέλος αναλύεται η δομή αυτής έτσι ώστε να προετοιμαστεί ο αναγνώστης για τα θέματα που θα πραγματευθούν στη συνέχεια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο οι πιο σύγχρονες μέθοδοι κατηγοριοποιούνται με βάση την εξάρτησή τους από τον χρόνο. Έτσι, υπάρχουν οι στατικές μέθοδοι εκτίμησης, οι

οποίες δεν λαμβάνουν υπόψη την διακύμανση της ζήτησης μέσα στη μέρα, αλλά και οι δυναμικές, και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες πλέον λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας, οι οποίες είναι ικανές να αναπαριστούν την χρονική διακύμανση της ζήτησης μέσα στη μέρα. Κατά τη δυναμική εκτίμηση, το πρόβλημα ορίζεται από κάποιες μεθόδους σαν πρόβλημα χώρου – κατάστασης (state-space), ενώ από άλλες σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στους αλγόριθμους εκτίμησης χώρου – κατάστασης οι οποίοι μαζί με τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης είναι πλέον και οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι στην προσπάθεια επίλυσης προβλημάτων εκτίμησης μητρώων Π-Π. Οι αλγόριθμοι εκτίμησης μητρώων προέλευσης προορισμού χώρου-κατάστασης, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των διαφορετικών παραλλαγών που υπάρχουν για την επίλυσή τους και γι' αυτό επιλέγονται για διερεύνηση.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, όσον αναφορά τόσο τον προσομοιωτή mezzo στον οποίο στηρίχθηκαν οι δοκιμές όσο και την πλατφόρμα υλοποίησης μέσω της οποίας εκτελέστηκαν οι αλγόριθμοι. Παρατίθενται κάποια βοηθητικά στοιχεία για την πιθανή εκτέλεση κάποιων από τους αλγόριθμους στην ίδια πλατφόρμα υλοποίησης και περιγράφονται τα χρησιμοποιούμενα δίκτυα ως προς τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους και τον τρόπο δημιουργίας τους. Επίσης δίνεται το πλαίσιο των εκτελέσεων που θα ακολουθήσουν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, το οποίο αποτελεί και το κυριότερο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρατίθενται τρόποι επιβεβαίωσης της σωστής λειτουργίας της πλατφόρμας υλοποίησης από τον χρήστη, συμβουλές για την αντιμετώπιση των πιο συχνών προβλημάτων που εντοπίζονται κατά την χρήση της πλατφόρμας, καθώς και κάποιες προοπτικές βελτίωσης και προτροπές για επιπρόσθετη εργασία. Τέλος, γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων όλων των εκτελέσεων και σχολιασμός τους. Συγκρίνονται οι δείκτες αποτελεσματικότητας των επιμέρους αλγόριθμων με αυτούς του προσομοιωτή κυκλοφορίας Mezzo, δηλαδή με μια κατάσταση με μηδενική διόρθωση, καθώς επίσης και οι δείκτες αποτελεσματικότητας του απλουστευμένου αλγόριθμου Lim EKF με αυτούς του ακριβέστερου αλγόριθμου EKF.

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα των παραπάνω συγκρίσεων και γίνεται αιτιολόγησή τους βάσει του τρόπου λειτουργίας των επιμέρους αλγόριθμων. Τέλος προτείνονται διάφορα θέματα προς περαιτέρω διερεύνηση τα οποία μπορούν να υλοποιηθούν είτε αν βασιστεί κανείς στο υπάρχον υλικό, είτε αν πραγματοποιηθούν κάποιες επεκτάσεις στην πλατφόρμα υλοποίησης.

2. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΡΟΩΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ-ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΥ

Οι πίνακες εκτιμήσεων Π-Π μπορεί να είναι είτε στατικοί είτε δυναμικοί και αυτό εξαρτάται από τον σκοπό της μελέτης. Ένας στατικός πίνακας αντιπροσωπεύει την μέση κυκλοφοριακή ζήτηση για μία μέρα ενώ ο δυναμικός αναπαριστά την χρονική διακύμανση της κυκλοφοριακής ζήτησης μέσα στη μέρα.

2.1 ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

Οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την στατική εκτίμηση είναι η μέθοδος της *μεγιστοποίησης της εντροπίας* [entropy maximization or information minimization], η *εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας* [maximum likelihood estimation], τα *ελάχιστα τετράγωνα* [generalized least squares] και η *εκτίμηση Bayes (Bayesian)*.

2.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ

Οι Van Zuylen and Willumsen (1980) πρότειναν το μοντέλο της **μεγιστοποίησης της εντροπίας (entropy maximization)**. Για την περιγραφή αυτού του μοντέλου γίνεται υπόθεση ενός δικτύου με πολλές αφετηρίες και προορισμούς οι οποίες συνδέονται με πολλούς συνδέσμους. Η περίοδος μελέτης κατηγοριοποιείται σε χρονικά διαστήματα $T=1, 2, \dots, T_d$. Έστω ότι ο πίνακας Π-Π έχει διαστάσεις $d \times d$, με $d_{(i,j,t)}$ όπου οι διαδρομές ξεκινάνε από την αφετηρία $i \in I$ και καταλήγουν στον προορισμό $j \in J$ κατά τα χρονικά διαστήματα T . Το κάθε στοιχείο καταμερισμού στο δίκτυο $d_{(i,j,t)}$ του πίνακα Π-Π που αφορά στους συνδέσμους του δικτύου, ακολουθεί έναν πίνακα ποσοστού ροής συνδέσμων $p_{i,j,t}^{l,t}$ ο οποίος δίνει ποσοστά της ζήτησης Π-Π για ζευγάρια Π-Π d_{ij} που ξεκινάνε τις διαδρομές κατά το διάστημα αναχώρησης τα, τα οποία χρησιμοποιούν l συνδέσμους κατά τη διάρκεια του διαστήματος παρατήρησης t .

Ο πίνακας καταμερισμού στο δίκτυο (assignment matrix) Π-Π, ορίζει τις εκτιμημένες ροές $\hat{c}_{(l,t)}$ στους συνδέσμους στο δίκτυο. Οι σύνδεσμοι μέτρησης $c_{(l,t)}$ είναι διαθέσιμοι για το σύνδεσμο $l \in L$ κατά τη διάρκεια του διαστήματος παρατήρησης $t=1, 2, \dots, T_d$. Το διάστημα $t \geq \tau$ μπορεί να περιλαμβάνει κάθε διάστημα στο οποίο ο φόρτος $c_{(l,t)}$ ελέγχεται κατά την περίοδο μελέτης T_d .

Με βάση τον χρόνο διαδρομής μεταξύ των ζευγαριών Π-Π και το μέγεθος των χρονικών διαστημάτων τ , οι μετρήσεις των συνδέσμων στο χρονικό διάστημα t αποτελούνται από ροές Π-Π που προέρχονται από διαφορετικούς αριθμούς προηγούμενων διαστημάτων που περιλαμβάνουν το τρέχον διάστημα.

Επομένως, ο μέγιστος αριθμός χρονικών διαστημάτων που χρειάζεται να κάνουν τη διαδρομή μεταξύ κάθε αφετηρίας i και κάθε προορισμού j είναι q . Οι πίνακες καταμερισμού στο δίκτυο, $p_{i,j,\tau}^{l,t}$, απεικονίζουν τρεις πλευρές των συστημάτων μεταφορών: την τοπολογία του κάθε δικτύου, το μοντέλο επιλογής διαδρομής και το χρόνο διαδρομής μέσω του δικτύου.

Σε μία ιδανική κατάσταση ο $d_{(i,j,\tau)}^*$ αναπαριστά ένα πίνακα Π-Π ο οποίος είναι πολύ κοντά στον πραγματικό, με το σκεπτικό ότι έχει παρόμοια δομή όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις όπως η διανομή των διαδρομών στους διάφορους προορισμούς καθώς και το μέγεθος της διαδρομής διανομής. Πρακτικά βέβαια διαφέρει από τους πραγματικούς πίνακες Π-Π καθώς διαφέρει η τυπολογία κάθε διαδρομής αλλά και η τυπολογία διαδρομών μέσα στη μέρα.

Οι πίνακες αυτοί μπορεί να περιέχουν **σφάλματα**. Για αυτά υπάρχουν τρία **σενάρια**:

1. Κλιμακωτό (συνολικό) σενάριο διακύμανσης της ζήτησης, το οποίο δείχνει το κατά πόσο η διακύμανση των ροών ζήτησης στην ακολουθία των διαστημάτων προορισμού μπορούν να επηρεάσουν την εκτίμηση των αποτελεσμάτων χωρίς να προκύψουν αλλαγές στην τυπολογία του πίνακα Π-Π.
2. Το σενάριο τυχαίας διακύμανσης της ζήτησης, το οποίο βασίζεται στην υπόθεση ότι ο αρχικός πίνακας Π-Π είναι η καλύτερη εκτίμηση του μέσου όρου των δυναμικών πινάκων.
3. Το συστηματικό σενάριο διακύμανσης της ζήτησης, στο οποίο αντιμετωπίζονται καταστάσεις όπου ο πρωτεύον πίνακας Π-Π της ζήτησης μπορεί να περιέχει άλλα δομικά σφάλματα εκτός από τις τυχαίες αποκλίσεις μέσα στη μέρα.

Η μέθοδος της μέγιστης εντροπίας είναι ευαίσθητη σε μεγαλύτερες ποσότητες της ζήτησης Π-Π και σε αυξημένα σφάλματα μετρήσεων στους συνδέσμους. Σε περίπτωση σύγκρισης της ευαισθησίας της μεθόδου εντροπίας με το μήκος διαδρομής και το μέγεθος της ζήτησης Π-Π, συμπεραίνεται ότι η μέθοδος της εντροπίας είναι πιο ευαίσθητη στο επίπεδο της ζήτησης σε σχέση με το μήκος της διαδρομής όσον αφορά στα αυξημένα σφάλματα των μετρήσεων.

Για την καλύτερη και πιο ισάξια αξιολόγηση μεταξύ των μεθόδων εκτίμησης Π-Π γίνεται υπόθεση τυχαίων μεταβολών των κυκλοφοριακών μετρήσεων χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικούς τρόπους ανίχνευσης.

1. Την μέγιστη κάλυψη όλων των συνδέσμων του δικτύου: σε αυτή την ιδανική κατάσταση θέλουμε να έχουμε τα αποτελέσματα αξιολόγησης σε σύγκριση με εκτιμήσεις Π-Π από διατάξεις άλλων ανιχνευτών.
2. Την τυχαία κάλυψη των συνδέσμων του δικτύου: στην οποία η διάταξη του ανιχνευτή προσδιορίζεται τυχαία απομακρύνοντας τους ανιχνευτές από τους συνδέσμους ώστε να έχουμε σενάρια με 80%, 60%, 40% και 20% κάλυψη του συνολικού αριθμού συνδέσμων του δικτύου.

Υπάρχουν δύο κριτήρια για να καταλάβουμε αν οι εκτιμημένοι πίνακες Π-Π οι οποίοι προέρχονται από την μέθοδο της εντροπίας είναι ισάξιοι με την πραγματική τιμή ή δίνουν μια μικρή διακύμανση γύρω από αυτή την τιμή. Το **πρώτο** κριτήριο είναι αυτό της ευαισθησίας της συνολικής εκτίμησης της ζήτησης σε διαφορετικά σενάρια τα οποία υπολογίζουν σφάλματα, καθώς και σφάλματα του αρχικού πίνακα Π-Π. Το **δεύτερο** κριτήριο είναι ο έλεγχος της ευαισθησίας συγκεκριμένων ζευγών Π-Π και του μήκους διαδρομής για τα ίδια σενάρια λάθους.

2.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΦΑΝΕΙΑΣ

Η διαδικασία εκτίμησης της μέγιστης πιθανοφάνειας προτείνεται για περιπτώσεις μοντέλου επιλογής διαδρομής και βασίζεται κυρίως στην διαθεσιμότητα ακριβής έρευνας ή δεδομένων ανίχνευσης για τις επιλογές διαδρομής των οδηγών.

Με αυτή τη μέθοδο ασχολήθηκε ο Spiess (1987). Οι εκτιμητές της μέγιστης πιθανοφάνειας προκύπτουν από τη μεγιστοποίηση της πιθανότητας παρατήρησης της εκ των προτέρων πληροφορίας και των μετρήσεων των αισθητήρων. Με την λογική υπόθεση ότι αυτές οι δύο πιθανότητες είναι ανεξάρτητες, ο εκτιμητής της μέγιστης πιθανοφάνειας μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\hat{x}_{ML} = \arg \max_{x \in S} [\ln L(x^H/x) + \ln L(y/x)] \quad (2.1)$$

όπου:

x είναι το διάνυσμα της κυκλοφοριακής ζήτησης που πρέπει να εκτιμηθεί

x^H είναι η εκ των προτέρων κυκλοφορία που αφορά στην κυκλοφοριακή ζήτηση και μπορεί να αποκτηθεί από έρευνες δειγματοληψίας ή παλιότερες μελέτες.

y είναι το διάνυσμα των κυκλοφοριακών μετρήσεων του δικτύου

$\ln L(x^H/x)$ είναι η λογαριθμική συνάρτηση πιθανοφάνειας της εκ των προτέρων πληροφορίας πάνω στην κυκλοφοριακή ζήτηση, για παράδειγμα ο λογάριθμος της πιθανότητας παρατήρησης της εκ των προτέρων ζήτησης x^H είναι η πραγματική κυκλοφοριακή ζήτηση x

$\ln L(y/x)$ είναι η λογαριθμική συνάρτηση των κυκλοφοριακών μετρήσεων, για παράδειγμα ο λογάριθμος της πιθανότητας παρατήρησης των κυκλοφοριακών ροών y αν x είναι η πραγματική κυκλοφοριακή ζήτηση

S είναι το σύνολο σκοπιμότητας της πραγματικής κυκλοφοριακής ζήτησης και συνήθως συμπίπτει με το μη αρνητικό ‘τεταρτημόριο’ στο χώρο - orthant, για παράδειγμα $S = x: x \geq 0$

Οι λογαριθμικές συναρτήσεις πιθανοφάνειας της εξίσωσης (2.1) μπορούν να μορφοποιηθούν μετά από υποθέσεις που γίνονται για τις πιθανές κατανομές των x^H , των y και υπό όρους των x .

2.1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ

Τα ελάχιστα τετράγωνα είναι ένας άλλος εκτιμητής που βασίζεται στην κλασική στατιστική. Σύμφωνα με τους Cascetta (1984), McNeil et al. (1985), Bell (1995), ο εκτιμητής αυτός προκύπτει από το σύστημα των γραμμικών στοχαστικών μεταβλητών (2.2) και (2.3).

$$y = Ax + \epsilon \quad (2.2)$$

$$x^H = x + \eta \quad (2.3)$$

όπου x^H είναι η εκ των προτέρων κυκλοφορία που αφορά στην κυκλοφοριακή ζήτηση και μπορεί να αποκτηθεί από έρευνες δειγματοληψίας ή παλιότερες μελέτες προγραμματισμού, με τις ακόλουθες συμπληρωματικές υποθέσεις:

$$E(\epsilon) = 0, Var(\epsilon) = V$$

$$E(\eta) = 0, Var(\eta) = W$$

A είναι ο πίνακας καταμερισμού στο δίκτυο (assignment matrix) . Αυτός ο πίνακας ουσιαστικά αποτελεί την απεικόνιση των κυκλοφοριακών μετρήσεων και των ροών Π-Π. Ο εκτιμητής ελαχίστων τετραγώνων ο οποίος είναι ο καλύτερος γραμμικός αμερόληπτος εκτιμητής μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\hat{x}_{GLS} = \arg \min_{x \in S} [(y - Ax)' V^{-1} (y - Ax) + (x^H - x)' W^{-1} (x^H - x)] \quad (2.4)$$

2.1.4 ΜΕΘΟΔΟΣ BAYESIAN ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος εκτίμησης ο Mayer (1983) συνδύασε πληροφορία προερχόμενη από δειγματοληψία, με προγενέστερη ή υποκειμενική πληροφορία. Ως υποκειμενική πληροφορία ορίζεται μια αρχική, αλλά όχι τυχαία, εκτίμηση του χρήστη ώστε να αρχίσει η διαδικασία και να γίνει ένα φιλτράρισμα-βελτίωση των τιμών. Ο εκτιμητής Bayesian επιτυγχάνει την ανανέωση των ροών Π-Π, οι οποίες είχαν προκύψει εκ των προτέρων με στοιχεία από κυκλοφοριακές μετρήσεις.

Ο εκτιμητής προκύπτει από την εκ των υστέρων κατανομή $h(x/y, x^H)$ των ροών Π-Π που εξαρτώνται από την εκ των προτέρων πληροφορία και τις κυκλοφοριακές μετρήσεις. Σύμφωνα με τη θεωρία του Bayes η προηγούμενη πιθανότητα είναι ανάλογη με το προϊόν της εκ των προτέρων κατανομής πιθανότητας των ροών Π-Π $g(x/x^H)$ και η πιθανότητα της παρατήρησης των κυκλοφοριακών ροών εξαρτάται από τις άγνωστες ροές Π-Π $L(y/x)$.

Όπως και στην περίπτωση του εκτιμητή της μέγιστης πιθανοφάνειας, ο προσδιορισμός του εκτιμητή Bayesian εξαρτάται από τις υποθέσεις που γίνονται για τις κατανομές πιθανότητας $g(x/x^H)$ και $L(y/x)$.

2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

Ένα μειονέκτημα της στατικής εκτίμησης Π-Π είναι ότι αντιπροσωπεύουν μόνο τις μέσες κυκλοφοριακές συνθήκες μιας ημέρας. Δεν είναι δυνατό να αναπαραστήσουν την χρονική διακύμανση μέσα στη μέρα και γι' αυτό το λόγο δεν είναι χρήσιμες για εφαρμογές σε πρακτικό επίπεδο. Έτσι μελετάται και το πρόβλημα της δυναμικής εκτίμησης Π-Π.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι δυναμικής εκτίμησης Π-Π από τις οποίες πολλές περιορίζονται σε διασταυρώσεις, κόμβους ή μικρά τμήματα του δικτύου και έτσι δεν είναι εφαρμόσιμα ευρέως στα δίκτυα. Ο Ashok (1996) έχει ασχοληθεί με τις μεθόδους εκτίμησης αυτών των δικτύων και με περιβάλλοντα στα οποία είναι εφαρμόσιμα. Βέβαια οι προσεγγίσεις των *ελάχιστων τετράγωνων (GLS)* και του *φίλτρου Κάλμαν (Kalman filter)* μπορούν να εφαρμοστούν ευρέως στα δίκτυα. Οι Ashok (1996) και Balakrishna (2002) έχουν ασχοληθεί με αυτές τις δύο προσεγγίσεις.

2.2.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΩΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Οι Cascetta et al. (1993), επέκτειναν την προσέγγιση εκτίμησης των ελαχίστων τετραγώνων στη δυναμική κατάσταση. Ο κλασικός εκτιμητής γενικευμένων ελαχίστων τετραγώνων (generalized least squares, GLS) ελαχιστοποιεί τη διαφορά μεταξύ ροών Π-Π και των προεκτιμημένων ροών (a priori), ενώ παράλληλα διασφαλίζει ότι οι μετρημένες ροές των συνδέσμων είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις ροές συνδέσμων που έχουν προκύψει τελευταίες (δηλαδή τους συνδέσμους που προέκυψαν κατανέμοντας τις τελευταία εκτιμημένες ροές Π-Π στο δίκτυο).

Για την εφαρμογή της μεθόδου η συνολική περίοδος H διαιρέθηκε σε T διαστήματα, τα οποία θεωρούνται ίσου μήκους χωρίς να υπάρχει κίνδυνος απώλειας λόγω γενίκευσης. Έστω n_l ο αριθμός των αισθητήρων στο δίκτυο και n_{OD} ο αριθμός των ζευγαριών Π-Π. x_h είναι το διάνυσμα στήλης ($n_{OD} \times 1$) της κυκλοφοριακής ζήτησης όλων των ζευγαριών Π-Π κατά το διάστημα h και x_h^H είναι το διάνυσμα των εκ των προτέρων ροών Π-Π για το διάστημα h . Ομοίως ο y_h είναι η αντίστοιχη διανυσματική στήλη ($n_l \times 1$) των μετρημένων κυκλοφοριακών μετρήσεων από όλους τους αισθητήρες κατά το διάστημα h .

Οι γραμμικές πιθανολογικές εξισώσεις στη δυναμική περίπτωση (2.5), (2.6) είναι παρόμοιες με τις εξισώσεις (2.2) και (2.3):

$$y = Ax + \epsilon \quad (2.2)$$

$$x^H = x + \eta \quad (2.3)$$

Οι έμμεσες μετρήσεις προσαρμόζονται αρχικά για ροές συνδέσμων που προκύπτουν από προηγούμενα διαστήματα.

$$y_h = \sum_{p=h-p'}^h A_p^h x_p + v_h \quad (2.5)$$

Οι άμεσες εξισώσεις μετρήσεων παραμένουν ως έχουν:

$$x_h^H = x_h + u_h \quad (2.6)$$

όπου p' είναι ο μέγιστος αριθμός διαστημάτων που απαιτούνται από το όχημα ώστε να ολοκληρώσει τη διαδρομή του, A_p^h είναι ο πίνακας καταμερισμού στο δίκτυο, ο οποίος συνδέει τις ροές που αναχωρούν στο διάστημα p με αυτές τις μετρήσεις που παρατηρούνται στο διάστημα h . v_h και u_h είναι τα διανύσματα των τυχαίων

σφαλμάτων. Οι πίνακες μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των v_h και w_h είναι τα V_h και W_h αντίστοιχα.

Τα σφάλματα συνδιακύμανσης V_h και W_h που σχετίζονται με τις άμεσες και έμμεσες μετρήσεις μπορούν να αναπαρασταθούν από έναν πίνακα συνδιακύμανσης:

$$\Omega_h = \begin{bmatrix} V_h & 0 \\ 0 & W_h \end{bmatrix}$$

Η παραπάνω δομή υποθέτει ότι τα σφάλματα των μετρήσεων που συνδέονται με τις έμμεσες και άμεσες μετρήσεις, δεν συσχετίζονται μεταξύ τους. Αυτή μπορεί να αποτελεί μια δικαιολογημένη υπόθεση στις περισσότερες περιπτώσεις, όταν δύο τύποι μετρήσεων επικρατούν από δύο εντελώς διαφορετικές διαδικασίες μέτρησης.

Ο Ω_h^{-1} μπορεί να θεωρηθεί πίνακας βαρών. Τα βάρη για κάθε μέτρηση (έμμεση ή άμεση) αντικατοπτρίζουν την εμπιστοσύνη στη διαδικασία μέτρησης. Για παράδειγμα, είναι δυνατό να μειωθεί η πληροφορία που περιλαμβάνεται στις εκ των προτέρων ροές Π-Π καθώς αυτές προέρχονται από μια στατική σχεδιαστική μελέτη. Η αντίστοιχη υψηλή διακύμανση στα σφάλματα των άμεσων μετρήσεων μπορούν να αναπαρασταθούν από μικρό βάρος. Από την άλλη πλευρά, μπορεί επίσης να, καταγραφεί η επίδραση των σφαλμάτων μέτρησης, στις μετρήσεις που καταγράφονται από τους αισθητήρες κίνησης. Ένας καλός αισθητήρας επομένως μπορεί να συσχετιστεί με μια χαμηλότερη διακύμανση σφάλματος, με συνέπεια να έχει μεγαλύτερο βάρος. Η διακύμανση των σφαλμάτων μπορεί να απεικονιστεί από τον πίνακα συνδιακύμανσης Ω_h .

Προτείνονται δύο διαδικασίες εκτίμησης, η *ταυτόχρονη* και η *διαδοχική*.

Στην προσέγγιση της *ταυτόχρονης* εκτίμησης, οι ροές Π-Π για όλα τα διαστήματα εκτιμώνται σε ένα βήμα χρησιμοποιώντας τις κυκλοφοριακές μετρήσεις από όλα τα διαστήματα.

Στην προσέγγιση της *διαδοχικής* εκτίμησης οι ροές Π-Π για όλα τα διαστήματα εκτιμώνται μία φορά. Όταν εκτιμώνται οι ροές Π-Π για το διάστημα h , οι εκτιμήσεις ροών Π-Π για τα παλαιότερα διαστήματα μένουν σταθερές. Έτσι οι μετρήσεις της περιόδου h είναι γραμμικές συναρτήσεις της άγνωστης ζήτησης της ίδιας περιόδου.

Η ταυτόχρονη εκτίμηση δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, αλλά απαιτεί την επίλυση ενός πολύ περίπλοκου προβλήματος βελτιστοποίησης. Ως εκ τούτου σε πρακτικές καταστάσεις όπου οι υπολογιστικές εκτιμήσεις είναι σημαντικές, μπορεί να εφαρμοστεί η διαδοχική εκτίμηση.

2.2.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΩΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΧΩΡΟΥ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η προσέγγιση του φίλτρου Κάλμαν σύμφωνα με τον Balakrishna (2002) αντιμετωπίζει το πρόβλημα εκτίμησης Π-Π σαν ένα μοντέλο χώρου-κατάστασης (state-space). Ένα τέτοιο μοντέλο περιγράφει τη διαδικασία ενός συστήματος χρησιμοποιώντας δύο γραμμικές πιθανολογικές εξισώσεις, τις εξισώσεις μέτρησης και τις εξισώσεις μετάβασης. Η εξίσωση μέτρησης (2.7) συνδέει την άγνωστη κατάσταση του συστήματος με τα δεδομένα που έχουν παρατηρηθεί και η εξίσωση μετάβασης (2.8) περιγράφει την εξέλιξη του συστήματος στο χρόνο.

$$y_h = A_h x_h + v_h \quad (2.7)$$

$$x_{h+1} = \phi_h x_h + w_h \quad (2.8)$$

Η εξίσωση μετάβασης βασίζεται σε μία διαδικασία αυτοπαλινδρόμησης. Οι στατικές μεταβλητές x_h , οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παραπάνω διατύπωση αντιστοιχούν προσέγγιση της κατάστασης του συστήματος που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των ταυτόχρονων αλλά και των διαδοχικών εκτιμητών, ενώ παράλληλα μειώνει τον μεγάλο όγκο υπολογισμών που σχετίζονται με την ταυτόχρονη εκτίμηση. Ο όρος A_h είναι ένας κατάλληλα κατασκευασμένος πίνακας καταμερισμού στο δίκτυο.

Υποθέτοντας ότι η αρχική κατάσταση του συστήματος (state) είναι γνωστή, τα βήματα του αλγορίθμου είναι:

1. N
α παράγει την επόμενη εκτίμηση και τον πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας της με τη βοήθεια εξισώσεων μετάβασης.
2. O
υπολογισμός του πίνακα κατεύθυνσης Κάλμαν.
3. H
παραγωγή της ελεγμένης εκτίμησης και του αντίστοιχου πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας χρησιμοποιώντας εξίσωση μέτρησης.
4. H
προσαύξηση του h , δηλαδή της μεταβλητής μέτρησης και επαναφορά στο βήμα 1.

Η μέθοδος του φίλτρου Κάλμαν εφαρμόζεται στις δυναμικές μεθόδους όπου είναι απαραίτητη η πρόβλεψη των κυκλοφοριακών συνθηκών.

ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΦΙΛΤΡΟΥ KALMAN ΚΑΙ GLS

Το φίλτρο Kalman σύμφωνα με τον **Balakrishna (2002)**, αποδίδει μια πρακτική διαδοχική μεθοδολογία για να αναβαθμίσει την εκτίμηση των ροών Π-Π και τους πίνακες διακύμανσης σφαλμάτων, με δεδομένα από διαδοχικές χρονικές επαναλήψεις. Η εξίσωση μετάβασης ενσωματώνει ένα βήμα πρόβλεψης που βασίζεται σε μια διαδικασία αυτοπαλινδρόμησης.

Μολονότι τα πλεονεκτήματα είναι πολλά, το φίλτρο Κάλμαν υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς στη διαδικασία της βαθμονόμησης. Οι εισαγωγές στον αλγόριθμο του φίλτρου Κάλμαν περιλαμβάνουν, μια ιστορική βάση δεδομένων από ροές Π-Π, συνδιακυμάνσεις των αρχικών ροών, πίνακες συνδιακύμανσης σφάλματος και πίνακες αυτοπαλινδρόμησης. Πολλές από αυτές τις παραμέτρους εισαγωγής είναι πιθανό να μην είναι διαθέσιμες στα αρχικά στάδια της εφαρμογής της βαθμονόμησης. Γι' αυτό το λόγο χρειαζόμαστε εναλλακτικούς τρόπους αρχικοποίησης του φίλτρου Κάλμαν ώστε να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν επιτόπου.

Επιπλέον, η διαδικασία υπολογισμού του φίλτρου Κάλμαν περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενους υπολογισμούς μεταξύ πινάκων πολύ μεγάλων διαστάσεων, που μπορούν πιθανά να προσφέρουν ένα επαναληπτικό στάδιο βαθμονόμησης, χρονοβόρο στον υπολογισμό. Μια πρακτική λύση στο παραπάνω πρόβλημα έχει προταθεί από τον **Ashok (1996)** και η οποία παρουσιάζει μία προέλευση του αλγορίθμου του φίλτρου Κάλμαν από την προσέγγιση GLS και εγκαθιδρύει την ισοδυναμία των δύο μεθόδων για διακριτές στοχαστικές γραμμικές διαδικασίες.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το φίλτρο Κάλμαν και τα ελάχιστα τετράγωνα παρατηρείται ότι το μέσο ποσοστό σφάλματος (RMSN) στην εκτίμηση πινάκων Π-Π κατά τη χρήση της δεύτερης μεθόδου, είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό που προκύπτει κατά τη χρήσης της δεύτερης μεθόδου. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων αποτελεί μια σταδιακή διαδικασία η οποία αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων, ενώ από την άλλη το φίλτρο Kalman επιχειρεί να πετύχει το ίδιο αποτέλεσμα με έμμεσο όμοιο τρόπο.

2.2.3 ΑΛΛΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται και κάποιες άλλες προσεγγίσεις που έχουν προταθεί από μελετητές για την επίλυση του προβλήματος εκτίμησης μητρώων Π-Π.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ (LHC)

Μια από τις μεθόδους αξιολόγησης προσεγγίσεων εκτίμησης των ροών Π-Π είναι η μέθοδος Latin Hypercube [LHC]. Αυτή η μέθοδος, η οποία είναι ένας από τους σημαντικότερους συντελεστές της μεθόδου Monte Carlo, προτάθηκε από τους Djukic et al. (2011).

Ο LHC είναι μια στρωματική δειγματοληπτική μέθοδος (stratified sampling technique) που χρησιμοποιείται συνήθως για την εκτίμηση πολυδιάστατων ολοκληρωμάτων για τα οποία μία λύση κλειστού τύπου (closed form solution) είτε είναι πολύ δύσκολο να παραχθεί είτε δεν υφίσταται όπως συμβαίνει και σε πολλές συναρτήσεις πολυμεταβλητών πυκνότητας πιθανότητας που προκύπτουν από την προσομοίωση των φυσικών διαδικασιών. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί στην επιστήμη των κυκλοφοριακών για την εκτίμηση του μεικτού μοντέλου Logit από τους Hess et al. (2006), καθώς και στην βαθμονόμηση του λογισμικού προσομοιωτή μικροσκοπικής κυκλοφορίας από τους Park και Schneeberger (2003).

Κεντρικό ρόλο σε αυτό το πλαίσιο συγκριτικής αξιολόγησης κατέχει μία πολύ γνωστή τεχνική στρωματικής δειγματοληψίας η οποία βασίζεται σε μια προσομοίωση που επιτρέπει την αξιολόγηση της ευαισθησίας, χωρίς όμως την ανάγκη εκτέλεσης ενός εξαιρετικά μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων. Η μέθοδος LHC παρέχει αυτή τη μέθοδο δειγματοληψίας με στόχο να καλύπτει αποτελεσματικά όλο το φάσμα της αβεβαιότητας που ορίζεται στα σενάρια. Εφαρμογή αυτής της μεθόδου στο πρόβλημα της εκτίμησης Π-Π δεν έχει πραγματοποιηθεί ενώ έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε μια εφικτή προσέγγιση υπολογισμού των ευαισθησιών με την εκτέλεση ενός περιορισμένου αριθμού προσομοιώσεων.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΙΑΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ (MaC)

Οι εκτιμήσεις των πινάκων Π-Π βασίζονται σε φόρτους που προσεγγίζονται με γραμμικές συναρτήσεις οι οποίες περιγράφονται με τη βοήθεια των πινάκων καταμερισμού δικτύου (assignment matrices), των αντίστοιχων με εκείνους των τρεχουσών εκτιμήσεων των ροών Π-Π. Οι Frederix et al. (2011) πρότειναν τη χρήση μιας διαφορετικής γραμμικής προσέγγισης, η οποία όμως λαμβάνει υπ' όψιν ότι οι φόρτοι δεν είναι ανεξάρτητοι. Η μέθοδος αυτή, η οποία ονομάζεται MaC (Marginal Computation), είναι μια πολύ αποδοτική υπολογιστική μέθοδος που υλοποιεί μια

ανάλυση μεταβολής (perturbation analysis), χρησιμοποιώντας τις αρχές της κινηματικής για να παράγει τη σχέση. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μεθόδου θεωρούνται καλύτερα σε σχέση με εκείνα που προκύπτουν από τις παραδοσιακές προσεγγίσεις Π-Π.

Η ευαισθησία των ροών Π-Π υπολογίζεται με προσομοιώσεις MaC, ο οποίος επιπλέον υλοποιεί προσεγγίσεις δυναμικής φόρτισης δικτύου (Dynamic Network Loading model, DNL) ώστε να μειώσει τον υπολογιστικό χρόνο. Η βασική ιδέα είναι ότι μια μικρή αύξηση της μονής μεταβλητής έχει πιθανότατα μία τοπική μόνο επίδραση. Για παράδειγμα, αν μια ροή Π-Π μεταβληθεί τότε οι φόρτοι της αντίθετης από αυτήν ροής επηρεάζονται ελάχιστα. Το ίδιο συμβαίνει για όλες τις προσομοιωμένες ροές Π-Π που αναχωρούν από την αφετηρία κατά τα χρονικά διαστήματα που ακολουθούν το υπό εξέταση διάστημα.

Αρχικά εφαρμόζεται ένας βασικός προσομοιωτής με ένα πρότυπο μοντέλο DNL. Ο αλγόριθμος MaC από το αποτέλεσμα αυτού του προσομοιωτή επαναυπολογίζει τους φόρτους που είναι κοντά στους επηρεαζόμενους δρόμους, ενώ δεν αλλάζει τις άλλες μεταβλητές. Αν και ο αλγόριθμος αυτός μειώνει ουσιαστικά τον υπολογιστικό χρόνο λόγω του πίνακα των μερικών παραγώγων (Jacobian matrix), η προσπάθεια υπολογισμού παραμένει και μπορεί να χρειαστεί δυναμική εκτίμηση Π-Π. Η προτεινόμενη μέθοδος είναι ως εκ τούτου κατάλληλη για σκοπούς στατικής εκτίμησης Π-Π.

Η επίλυση επιτυγχάνεται μέσω τοπικών (προσεγγιστικών) σχέσεων με τις οποίες προσεγγίζεται η λύση. Ωστόσο, πρέπει να είναι σίγουρο ότι αυτή η τοπική σχέση αναφέρεται στη σωστή κατεύθυνση, καθώς υπάρχει κίνδυνος να γίνει σύγκλιση σε ένα τοπικό βέλτιστο το οποίο αποκλίνει σημαντικά από την πραγματική λύση. Για την αποφυγή παρόμοιων καταστάσεων, σε συμφορημένα δίκτυα, είναι σημαντικό να υπάρχει ένας αρχικός πίνακας Π-Π, ο οποίος παράγει πρότυπα κυκλοφορίας που έχουν την ίδια κατάσταση συμφόρησης με αυτά που έχουν παρατηρηθεί στο πεδίο μετρήσεων. Για την απόκτηση όμως αυτών των σωστών προτύπων κυκλοφορίας, είναι απαραίτητη κάποια επιπλέον πληροφορία, όπως για παράδειγμα ταχύτητες ή πυκνότητες συνδέσμων, ώστε να προσδιοριστεί με σαφήνεια η κατάσταση του δικτύου.

Ο MaC κάνει προσέγγιση DNL με σκοπό να μειώσει τον υπολογιστικό χρόνο. Αυτοί οι προσομοιωτές προσέγγισης DNL χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν την ευαισθησία μέσω πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η συνδυαστική μεθοδολογία είναι επιτυχώς δοκιμασμένη σε δίκτυο μελέτης και σε πραγματικό δίκτυο. Ωστόσο, ο υπολογιστικός χρόνος παραμένει ένα σημαντικό πρόβλημα προς αντιμετώπιση.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΥΡΙΑΡΧΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ-PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS

Σε αυτή τη μέθοδο, εφαρμογή της οποίας στο συγκεκριμένο πρόβλημα έγινε από τους Djukic et al. (2012), γίνεται προσπάθεια να μειωθούν οι συντελεστές που απαιτούνται για τον προσδιορισμό ενός πίνακα Π-Π. Αυτό αποτελεί μία πολύ σημαντική απλούστευση της υπολογιστικής διαδικασίας γιατί ακόμη και αν ο τεράστιος αριθμός των παρατηρήσεων που χρειάζονται ήταν διαθέσιμος, το οποίο κάποιες φορές είναι δυνατό να συμβεί, υπάρχουν πολλά μεθοδολογικά προβλήματα στην προσπάθεια εύρεσης των βέλτιστων λύσεων σε έναν πίνακα Ν διαστάσεων, πέρα από τις υπολογιστικές διαδικασίες και τις μεγάλες απαιτήσεις σε μνήμη που απαιτεί μία τέτοια διαδικασία με εκατομμύρια παρατηρήσεις.

Στη μέθοδο αυτή λοιπόν υποστηρίζεται ότι μπορούν να μειωθούν κατά πολύ οι συντελεστές και το υπολογιστικό κόστος, έτσι ώστε να διατηρούνται τα δομικά πρότυπα χωρίς όμως μεγάλες απώλειες της ακρίβειας. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί από δομές των δεδομένων αυτούς τους συντελεστές οι οποίοι αντιπροσωπεύουν καλύτερα τη διακύμανση. Σε μια μεγαλύτερη χρονική κλίμακα, από μέρες σε εβδομάδες, η δομή των πινάκων ζήτησης Π-Π μπορεί να αναπαρασταθεί χρησιμοποιώντας μόνο τρεις διαστάσεις. Οι κύριοι συντελεστές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις ουσιαστικές κατηγορίες τάσεων. Αυτές που περιλαμβάνουν μια διαρθρωτική δομή (structural pattern) που αναπαριστάται με την συνήθη μορφή, μια μεγάλη διαρθρωτική δομή απόκλισης (Large structural deviation pattern), που καταγράφει τις βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις και ένα πιθανολογικό πρότυπο (Stochastic trend), που απεικονίζει τις τυχαίες διακυμάνσεις.

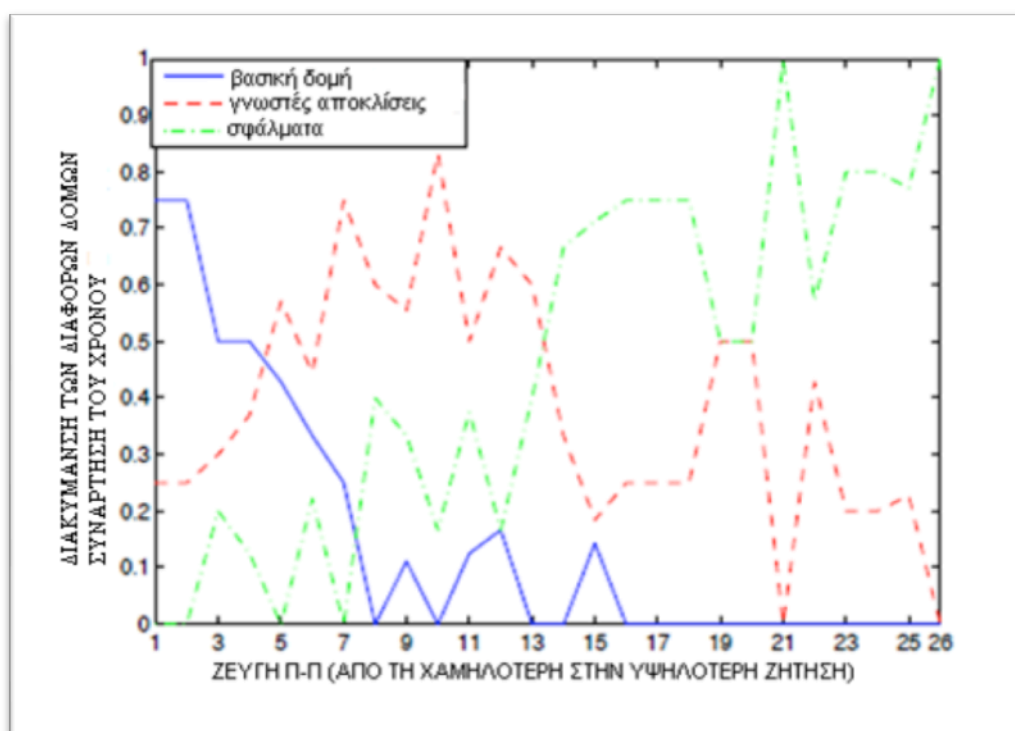
Η διαρθρωτική δομή (Structural pattern) απεικονίζει τις συνήθειες των οδηγών δηλαδή πρωινές ώρες αιχμής και ώρες έντονης δραστηριότητας κατά τις απογευματινές ώρες τα σαββατοκύριακα. Η περιοδικότητα που παρατηρείται αναπαριστά καθαρά τις μέσες συνήθειες καθημερινές δραστηριότητες των οδηγών.

Η δομή απόκλισης (Large structural deviation pattern) είναι μια χρονική μεταβλητή η οποία αναπαριστά τις αποκλίσεις από τη μέση δομή και η οποία είναι γνωστή στο μελετητή. Αυτός ο συντελεστής απόκλισης απεικονίζει τα γεγονότα που προκαλούν προβλεπόμενες αποκλίσεις από τη μέση δομή. Τέτοια γεγονότα μπορεί να είναι μεγάλα αθλητικά γεγονότα αλλά και ακραίες καιρικές συνθήκες.

Τα σφάλματα (Stochastic trend) αποτελούνται από χρονικούς συντελεστές που περιγράφουν τις αποκλίσεις από το μέσο πρότυπο οι οποίες όμως δεν είναι δυνατό να είναι γνωστές. Αυτοί αναπαριστούν την εναπομένουσα τυχαία διακύμανση της ζήτησης Π-Π.

Η βασική ιδέα του PCA είναι να εντοπίσει την πιο σημαντική πληροφορία από το σύνολο των δεδομένων και να εκφράσει την πληροφορία του σαν ένα σύνολο καινούργιων ασυσχέτιστων μεταβλητών που ονομάζονται κυρίαρχοι συντελεστές [principal components]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τα ιδιοδιανύσματα και τις ιδιοτιμές του πίνακα συνδιασποράς.

Ενώ άλλες μέθοδοι εστιάζουν στην περιγραφή των χαρακτηριστικών της ζήτησης για την μοντελοποίηση των μεθόδων πρόβλεψης της ζήτησης Π-Π, αυτή η μέθοδος και τα αποτελέσματά της δείχνουν ότι η ποικιλότητα της ζήτησης μπορεί να παρασταθεί επαρκώς από τα δεδομένα χωρίς υποθέσεις μοντελοποίησης.



Διάγραμμα 2.1: Διάγραμμα διαχωρισμού των ζευγών Π-Π με βάση τις χρονικές δομές, Djukic et al. (2012).

Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 2.1, τα ζευγάρια υψηλής έντασης της ζήτησης [high volume] απεικονίζονται με την διαρθρωτική δομή [Structural pattern]. Καθώς η ένταση της ζήτησης μειώνεται, η σχετική συμβολή της διαρθρωτικής δομής ξεκινά και αυτή να μειώνεται συναρτήσει του χρόνου ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η συμβολή της γνωστής δομής απόκλισης [Large structural deviation pattern] και των τυχαίων σφαλμάτων [Stochastic trend].

Η μείωση του αριθμού των παραγόντων του μοντέλου, περιορίζει σημαντικά το μέγεθος του διανύσματος κατάστασης και με τον τρόπο αυτό βελτιώνει την αποδοτικότητα του υπολογιστικού χρόνου.

Εφαρμογή του PCA για την προ-διεργασία των δεδομένων του ιστορικού πίνακα ζήτησης Π-Π είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μέσω των παρακάτω βημάτων:

1. Βήμα αναγνώρισης: σε αυτό το βήμα εξερευνάται η τρέχουσα ποικιλότητα δομών του ιστορικού πίνακα ζήτησης Π-Π και εν συνεχεία κατατάσσεται σε μία από τις τρεις γνωστές μορφές. Σε αυτό το βήμα είναι δυνατό να βρεθούν οι κυρίαρχοι συντελεστές που απεικονίζουν το προκαθορισμένο πρότυπο.
2. Βήμα μείωσης: σε αυτό το βήμα επιλέγονται μόνο τα ζευγάρια Π-Π τα οποία ακολουθούν μία συγκεκριμένη δομή.
3. Βήμα πρόβλεψης: οι μέθοδοι πρόβλεψης εφαρμόζονται σε ένα μειωμένο σύνολο ζευγαριών Π-Π με σκοπό την πρόβλεψη της ζήτησης για τα μελλοντικά χρονικά διαστήματα.

2.3 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

Το πρόβλημα της έλλειψης καθοριστικότητας εντοπίζεται κυρίως στην ύπαρξη πολλών συνδυασμών προτύπων ζήτησης με αποτελέσματα στις ίδιες τιμές φόρτων. Βέβαια στα συμφορημένα δίκτυα η έλλειψη καθοριστικότητας των προτύπων δεν είναι η μόνη αιτία για τις αποκλίσεις που εμφανίζονται μεταξύ εκτιμημένων και πραγματικών πινάκων Π-Π. Η συμφόρηση μετασχηματίζει την σχέση μεταξύ φόρτων και ροών Π-Π σε μη γραμμική, κυρίως λόγω χωρικής και χρονικής δυναμικής των ουρών και των καθυστερήσεων. Αυτή η μη γραμμικότητα είναι πιθανό να οδηγήσει σε ένα τοπικό ελάχιστο το οποίο δεν είναι καθόλου αντιπροσωπευτικό των πραγματικών προτύπων ζήτησης.

Πολλοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι για την αποφυγή των τοπικών ελαχίστων είναι απαραίτητο να υπάρχει ένας σωστός αρχικός πίνακας ο οποίος δεν θα αποκλίνει σημαντικά από τον πραγματικό πίνακα Π-Π. Ωστόσο οι Frederix et al. (2010), υποστηρίζουν ότι ακόμη και η ύπαρξη αυτού του πίνακα δεν αποτελεί ικανοποιητική συνθήκη για να προκύψει ένας καλά προσαρμοσμένος πίνακας.

Οι Frederix et al. (2010) υλοποίησαν μια θεωρητική ανάλυση της δυναμικής εκτίμησης Π-Π σε συμφορημένα δίκτυα. Αυτή η ανάλυση θέτει δύο συνθήκες για την αμερόληπτη (unbiased) εκτίμηση Π-Π.

Η πρώτη από τις δύο συνθήκες είναι ο αρχικός πίνακας να παράγει κυκλοφοριακά πρότυπα με την ίδια κατάσταση συμφόρησης που παρατηρείται και στην πραγματικότητα. Η δεύτερη συνθήκη αφορά τη σχέση μεταξύ φόρτων των συνδέσμων και ροών Π-Π για την οποία δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη φόρμα και

ως συνέπεια είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μια εκτίμησή της. Η δεύτερη αυτή συνθήκη υποστηρίζει ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση θα πρέπει να περιλαμβάνει την ευαισθησία του πίνακα καταμερισμού στις ροές Π-Π έτσι ώστε να διατηρηθεί ο χρόνος υπολογισμού σε λογικές τιμές.

2.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ

Η μέθοδος των διαδοχικών μέσων (method of successive averages, MSA), που αποτελεί εξέλιξη των επαναληπτικών αλγορίθμων από τους Cascetta and Postorino (2001), είναι ένας εναλλακτικός τρόπος για τον προσδιορισμό των βαρών των αποτελεσμάτων κάθε επανάληψης. Η εξίσωση της μεθόδου είναι η:

$$t^k = \frac{1}{k}x^k + \frac{k-1}{k}t^{k-1} \quad (2.9)$$

όπου, οι «φιλτραρισμένες» ροές t_k ιεραρχούνται με βάση το βάρος των τελευταία εκτιμημένων x_k και των «φιλτραρισμένων» ροών από την προηγούμενη επανάληψη. Επιπλέον, ο δείκτης των επαναλήψεων, που συμβολίζεται με k , χρησιμοποιείται για να παράγει βάρη. Καθώς αυτή η μέθοδος έχει ως χαρακτηριστικό τη χρήση των εκτιμήσεων από όλες τις επαναλήψεις, ένα πιθανό μειονέκτημα είναι ότι οι εκτιμήσεις δεν θα κατανέμουν ποτέ μεγαλύτερα βάρη από αυτά των προηγούμενων εκτιμήσεων. Στην παραπάνω εξίσωση αυτό φαίνεται από τη σχέση μεταξύ του αριθμού επαναλήψεων και του βάρους της κάθε εκτίμησης καθώς όταν αυξάνεται το k προκύπτει μείωση του βάρους.

Συνεπώς, οι αρχικά «κακές» εκτιμήσεις είναι εν τέλει δυνατό να έχουν μεγαλύτερο βάρος, και ως εκ τούτου να μειώνουν την ταχύτητα σύγκλισης. Η μέθοδος MSA με μειωμένες αρχικοποιήσεις, ή ακόμη η μέθοδος MSADR, είναι παραλλαγές του αλγορίθμου MSA η οποία επαναρχικοποιεί τη μνήμη του αλγορίθμου, με μία συχνότητα που μειώνεται με τον αριθμό των επαναλήψεων. Αυτή η επαναρχικοποίηση, η οποία αποτελεί βήμα επιτάχυνσης, αναγκάζει τον αλγόριθμο να παραλείψει ενδιάμεσες τιμές και εστιάζει κυρίως στις τελευταίες επαναλήψεις οι οποίες βρίσκονται και πιο κοντά στη λύση.

2.3.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Ανά τα χρόνια έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι για την επίλυση του δυναμικού προβλήματος εκτίμησης Π-Π, αλλά είναι επιπλέον αναγκαία και η προσπάθεια αξιολόγησης και σύγκρισης αυτών των μεθόδων κάτω από διαφορετικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα σε ανόμοια από άποψη δομής δίκτυα ή με τη χρήση διαφορετικών ομάδων δεδομένων τα οποία θα είναι διαθέσιμα σε ποικίλες ποσότητες. Η διαδικασία αυτή υλοποιήθηκε από τους Djukic et al. (2011).

Ένας λόγος που είναι δύσκολη η σύγκριση μεταξύ των μεθόδων εκτίμησης Π-Π είναι ότι αυτές οι μέθοδοι διαφέρουν σε πολλά σημεία, όπως είναι:

- Η διάσταση του χρόνου εκτίμησης η οποία μπορεί να είναι είτε στατική είτε δυναμική. Δυναμική μπορεί να θεωρηθεί μια μέθοδος η οποία λαμβάνει δεδομένα μιας περιόδου κάποιων ωρών αλλά και μία μέθοδος με περίοδο δεκαπεντάλεπτου.
- Οι διαφορετικοί τρόποι καταγραφής της κυκλοφοριακής ζήτησης στους συνδέσμους του δικτύου. Τέτοιοι μπορεί να είναι οι προσεγγίσεις συστημάτων εκτίμησης και πρόβλεψης κυκλοφοριακών συνθηκών (DTA) που στηρίζονται στην προσομοίωση, ή ακόμη οι αναλυτικές προσεγγίσεις και οι μη DTA προσεγγίσεις.
- Η απεικόνιση των ροών και του πίνακα Π-Π που μπορεί να γίνει είτε ξεχωριστά (δι-επίπεδες προσεγγίσεις), είτε ταυτόχρονα.
- Οι διάφορες αντικειμενικές συναρτήσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση, όπως, μεταξύ άλλων, τα ελάχιστα τετράγωνα (GLS), η μέγιστη εντροπία / μέθοδοι ελάχιστης πληροφορίας, η μέγιστη πιθανοφάνεια, καθώς και το φίλτρο Kalman.
- Ο τύπος του δικτύου που χρησιμοποιείται στην εκτίμηση (με ή χωρίς επιλογή δρόμου), οι μέθοδοι που μπορεί να χρησιμοποιηθούν ή τα διάφορα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται (μετρητές ροών, προηγμένα δεδομένα ανίχνευσης οχημάτων, προγενέστερους πίνακες Π-Π).

Οι πίνακες Π-Π χρησιμοποιούν πληροφορίες της κυκλοφορίας για την αξιολόγηση και τον προσδιορισμό της ζήτησης του οδικού δικτύου. Βέβαια, η αξιολόγηση της ποιότητας μίας μεθόδου εκτίμησης Π-Π είναι μια απαιτητική διαδικασία. Ένας εναλλακτικός τρόπος πραγματοποίησης τέτοιου είδους αξιολόγησης είναι αυτός της ανάλυσης της ευαισθησίας σε τυχαίες μεταβολές των δεδομένων εισαγωγής καθώς και σε διαφορετικές δομές δικτύων όπως για παράδειγμα σε δεδομένα από αισθητήρες ή από πρωτογενείς πίνακες Π-Π σε τυπικά δοκιμαστικά δίκτυα.

Έναν επιπλέον παράγοντα αξιολόγησης της καταλληλότητας μίας μεθόδου αποτελεί το περιθώριο λάθους που αυτή παρέχει για την παραγωγή σωστών αποτελεσμάτων. Μέσω της εκτίμησης αυτού, κάποιες μέθοδοι είναι δυνατό να κριθούν εξ αρχής ακατάλληλοι όσον αφορά την αξιόπιστη εκτίμηση δικτύων συγκεκριμένων τοπολογιών.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά την υλοποίηση της διαδικασίας της εκτίμησης των ροών Π-Π είναι εκείνο της ύπαρξης μεγάλου αριθμού ζευγών Π-Π σε σχέση με τον αριθμό των συνδέσμων για τους οποίους είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις από τους αισθητήρες. Η εκ των προτέρων πληροφορία των ροών Π-Π είναι γνωστή ως άμεσες μετρήσεις ενώ οι μετρήσεις κυκλοφορίας είναι γνωστές σαν έμμεσες μετρήσεις.

2.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της εκτίμησης και της πρόβλεψης μητρώων Π-Π έχουν κατασκευαστεί ποικίλες μέθοδοι, ένα χαρακτηριστικό δείγμα των οποίων αναφέρθηκαν παραπάνω. Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται λεπτομερέστερα διάφορες δυναμικές μέθοδοι και πιο συγκεκριμένα οι αλγόριθμοι εκτίμησης μοντέλων χώρου κατάστασης και μοντέλων βελτιστοποίησης. Για τους πρώτους θα πραγματοποιηθεί επιπλέον μία πρακτική εφαρμογή μέσω συγκεκριμένης πλατφόρμας υλοποίησης. Αυτός ο τύπος αλγορίθμων εκτίμησης επιλέχθηκε για πρακτική εφαρμογή λόγω του ενδιαφέροντος που παρουσίασε ο αλγόριθμος Εκτεταμένου Φίλτρου Κάλμαν (EKF) καθώς και οι διάφοροι εναλλακτικοί αλγόριθμοι που βασίζονται σε αυτόν.

3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΧΩΡΟΥ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στα επόμενα θα γίνει αναφορά στους αλγορίθμους επίλυσης μοντέλων χώρου κατάστασης. Αρχικά πραγματοποιείται ανάλυση του θεωρητικού τους υπόβαθρου και στη συνέχεια ακολουθεί η αξιολόγησή τους.

3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Το φίλτρο Κάλμαν είναι ο βέλτιστος ελάχιστος μέσος εκτιμητής τετραγωνικού σφάλματος (Minimum Mean Square Error - MMSE - estimator) για γραμμικά μοντέλα χώρου-κατάστασης, Kalman (1960). Όσον αφορά τη μη γραμμικότητα και καθώς πολλά προβλήματα εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία, έχουν αναζητηθεί λύσεις για μη γραμμικά μοντέλα, οι οποίες να οδηγούν στην δημιουργία τροποποιημένων μεθοδολογιών του φίλτρου Κάλμαν. Για τα μη γραμμικά αυτά μοντέλα αποδεικνύεται η βελτίωση της εκτίμησης και πρόβλεψης των στοιχείων της κυκλοφορίας εξαιτίας της δυναμικής (on-line) βαθμονόμησης, μέσω της σύγκρισης με αυτά που προέρχονται από την σχέση της στατικής (off-line) βαθμονόμησης. Η πιο άμεση επέκταση είναι το Extended Kalman Filter (EKF), στο οποίο προσεγγίζονται βέλτιστες ποσότητες μέσω της γραμμικοποίησης των κατάλληλων εξισώσεων με την επέκταση της πρώτης τάξης της σειράς Taylor. Το EKF παρέχει την πιο άμεση επίλυση του προβλήματος και επιφέρει επιπλέον σημαντικές βελτιώσεις στην ακρίβεια της εκτίμησης και της πρόβλεψης. Παράλληλα, η μέθοδος του Iterated EKF (IEKF) επιχειρεί να βελτιώσει την EKF χρησιμοποιώντας την τρέχουσα εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης ώστε να γραμμικοποιήσει την εξίσωση μέτρησης μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Επίσης, η προσέγγιση του Limiting EKF επιτυγχάνει την εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου καθώς δεν πραγματοποιείται υπολογισμός της αριθμητικής παραγώγου για την γραμμικοποίηση και γίνεται χρήση έτοιμου πίνακα κλίσεων Kalman (Gh). Παρουσιάζεται τέλος, μια καινοτόμος τεχνική λύσης, η επονομαζόμενη UKF. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει έναν αριθμό από μεμονομένα σημεία απαραίτητα για τους υπολογισμούς και διαθέτει συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την EKF, καθώς δεν περιλαμβάνει καμία υπόθεση αναλυτικής απεικόνισης του μοντέλου και δεν απαιτεί τον διεξοδικό υπολογισμό των παραγώγων.

3.1.1 ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΟ ΦΙΛΤΡΟ ΚΑΛΜΑΝ (ΕΚΦ)

Η μέθοδος του **Εκτεταμένου Φίλτρου Κάλμαν (Extended Kalman Filter, EKF)** όπως αυτή παρουσιάζεται από τους Antoniou et al. (2005), είναι ένας υπολογιστικά απαιτητικός αλγόριθμος ο οποίος όμως παρέχει πολύ ακριβή αποτελέσματα εκτίμησης και πρόβλεψης των κυκλοφοριακών στοιχείων. Έχει σαν ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ένα υπολογιστικά απαιτητικό βήμα με σκοπό τον προσδιορισμό της μελλοντικής κατάστασης. Για τον προσδιορισμό αυτό το Extended Kalman Filter καταφεύγει στη χρήση μιας γραμμικοποίησης, με ένα ανάπτυγμα Taylor πρώτου βαθμού (εξίσωση 3.5), της μη γραμμικής σχέσης των στοιχείων της κυκλοφορίας για την προσέγγιση της εξίσωσης μέτρησης.

Κατά το στάδιο της χρονικής ανανέωσης γίνεται μία πρόβλεψη κατάστασης (εξίσωση 3.7) καθώς και μία πρόβλεψη του πίνακα συµµεταβλητοτητάς (συνάρτηση 3.8) για το χρονικό διάστημα που ακολουθεί.

Η φάση της ανανέωσης των μετρήσεων ενσωματώνει τις καινούργιες πληροφορίες που αφορούν τη μετρηµένη µεταβλήτη Y_h και τις χρησιμοποιεί με σκοπό να διορθώσει την πρόβλεψη της υπόθεσης που έγινε κατά το προηγούμενο στάδιο της χρονικής ανανέωσης. Ο πίνακας μετρήσεων H_h προκύπτει μέσω του ενδιαμέσου σταδίου γραμμικοποίησης που προαναφέρθηκε.

Η αλληλουχία εξισώσεων που συνθέτουν τον αλγόριθμο EKF παρατίθενται παρακάτω.

Initialization	
$X_{0 0} = X_0$	(3.1)
$P_{0 0} = P_0$	(3.2)
for h = 1 to N do	
Time update	
$X_{h h-1} = F_{h-1}X_{h-1 h-1}$	(3.3)
$P_{h h-1} = F_{h-1}P_{h-1 h-1}F_{h-1}^T + Q_h$	(3.4)
Linearization	
$H_h = \left. \frac{\partial h(x^*)}{\partial x^*} \right _{x^*=X_{h h-1}}$	(3.5)
Measurement update	
$G_h = P_{h h-1}H_h^T (H_hP_{h h-1}H_h^T + R_h)^{-1}$	(3.6)
$X_{h h} = X_{h h-1} + G_h [Y_h - h(X_{h h-1})]$	(3.7)
$P_{h h} = P_{h h-1} - G_h H_h P_{h h-1}$	(3.8)
end for	

Εικόνα 3.1: Αλγόριθμος EKF, Antoniou et al. (2005)

3.1.2 ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΟ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΟ ΦΙΛΤΡΟ ΚΑΛΜΑΝ (IEKF)

Σύμφωνα με τους Αντωνίου et al. (2005), το **Επαναληπτικό Εκτεταμένο Φίλτρο Κάλμαν (Iterated Extended Kalman Filter, IEKF)**, αποτελεί επέκταση του EKF και προσπάθεια βελτίωσης αυτού μέσω της χρήσης της τρέχουσας εκτίμησης της τιμής της σταθερής μεταβλητής για την επίτευξη της γραμμικοποίησης της εξίσωσης μέτρησης κατά την επαναληπτική λειτουργία. Συνήθως, το στάδιο της γραμμικοποίησης του υπολογισμού της κλίσης έχει καθοριστικό ρόλο στην υπολογιστική απόδοση των αλγορίθμων αυτών. Στο στάδιο της χρονικής ανανέωσης του EKF περιλαμβάνεται η γραμμικοποίηση της εξίσωσης μέτρησης με σκοπό την καλύτερη εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης X_h , π.χ. $X_{h|h-1}$. Μέσω του σταδίου αυτού προκύπτει μια ακριβέστερη εκτίμηση του $X_{h|h}$ η οποία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τη γραμμικοποίηση της εξίσωσης μέτρησης (εξίσωση 3.5). Με τον τρόπο αυτό υλοποιείται η επανάληψη του σταδίου της ανανέωσης (εξισώσεις 3.6 - 3.8).

$$\mathbf{H}_h = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*} \right|_{\mathbf{x}^* = \mathbf{X}_{h|h-1}} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{G}_h = \mathbf{P}_{h|h-1} \mathbf{H}_h^T (\mathbf{H}_h \mathbf{P}_{h|h-1} \mathbf{H}_h^T + \mathbf{R}_h)^{-1} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{X}_{h|h} = \mathbf{X}_{h|h-1} + \mathbf{G}_h [\mathbf{Y}_h - \mathbf{h}(\mathbf{X}_{h|h-1})] \quad (3.7)$$

$$\mathbf{P}_{h|h} = \mathbf{P}_{h|h-1} - \mathbf{G}_h \mathbf{H}_h \mathbf{P}_{h|h-1} \quad (3.8)$$

Εικόνα 3.2: Αλγόριθμος IEKF, Antoniou et al. (2005)

Μετά το πέρας αυτής της επανάληψης προκύπτει μια ακόμη καλύτερη εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην γραμμικοποίηση της εξίσωσης μέτρησης.

Οι επαναλήψεις μπορούν να πραγματοποιηθούν όσες φορές κρίνεται απαραίτητο. Αυτές οι επαναλήψεις υλοποιούνται για τις εξισώσεις 3.5-3.8.

3.1.3 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΟ ΦΙΛΤΡΟ KALMAN (LIMITING EKF)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το πιο απαιτητικό, από την άποψη της πολυπλοκότητας των υπολογισμών, βήμα του αλγορίθμου EKF είναι αυτό της γραμμικοποίησης της εξίσωσης μέτρησης καθώς για την ολοκλήρωσή του απαιτείται η χρήση διάφορων αριθμητικών παραγώγων. Χρονοβόρο επίσης είναι το κομμάτι του υπολογισμού του μητρώου των κλίσεων του Κάλμαν.

Προς αντιμετώπιση του παραπάνω και για την εξοικονόμηση υπολογισμών σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, είναι δυνατό αντί για τον υπολογισμό του πίνακα $\mathbf{H}$ μέσω της απαιτητικής από άποψη υπολογισμών διαδικασίας της γραμμικοποίησης χρησιμοποιηθεί ένας σταθερός πίνακας $\mathbf{H}$. Αυτή η παραλλαγή στον υπολογισμό αποτελεί ουσιαστικά μια ξεχωριστή μέθοδο υπολογισμού που ονομάζεται **Περιορισμένο Εκτεταμένο Φίλτρο Κάλμαν (Limiting EKF)**, Antoniou (2004).

Οι διαφορές αυτού του αλγορίθμου από τον αρχικό EKF είναι α) ότι δεν υπολογίζεται η αριθμητική παράγωγος στην δυναμική διαδικασία για το βήμα της γραμμικοποίησης και άρα με αυτόν τον τρόπο μειώνεται κατά πολύ η υπολογιστική διαδικασία και β) ότι χρησιμοποιείται σε κάθε επανάληψη, χωρίς εκ νέου υπολογισμό, η σταθερή κλίση Kalman.

Όσον αφορά στον πίνακα H , αυτός μπορεί να υπολογιστεί στατικά. Ο πιο εύκολος τρόπος είναι να εκφραστεί σαν ο μέσος όρος των διαθέσιμων πινάκων H .

Επίσης έχουν προταθεί πολλοί τρόποι ώστε να βελτιωθεί ο περιορισμένος (Limiting) πίνακας H . Ένας από αυτούς είναι η παραγωγή νέου πίνακα H_n από εκτέλεση του EKF στατικά. Αυτοί οι πίνακες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αναβάθμιση του περιορισμένου (limiting) πίνακα H . Ένας άλλος τρόπος είναι να λάβουμε υπόψη μόνο τους πιο πρόσφατους πίνακες σαν πιο αντιπροσωπευτικούς. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι διάφοροι πίνακες με διαφορετικά βάρη ανάλογα με το πόσο αντιπροσωπευτικοί είναι.

3.1.4 UNSCENTED KALMAN FILTER

Το **Unscented Kalman Filter** (UKF) είναι ένας αλγόριθμος που σε αντίθεση με τον EKF δεν περιλαμβάνει το στάδιο της γραμμικοποίησης κατά τον υπολογισμό του. Ωστόσο αυτό το στάδιο δεν το παραλείπει εντελώς όπως άλλοι αλγόριθμοι και δεν έχει σαν δεδομένα εισαγωγής κάποιες έτοιμες ιστορικές τιμές. Στο EKF η κατανομή προσεγγίζεται μέσω μίας τυχαίας μεταβλητής, που πολλαπλασιάζεται αναλυτικά μέσω της γραμμικοποίησης πρώτης τάξης του μη γραμμικού συστήματος. Ωστόσο σε ιδιαίτερα μη γραμμικές λειτουργίες αυτή η προσέγγιση μπορεί να είναι πολύ ανακριβής. Ο UKF, από την άλλη, χρησιμοποιεί μια ντετερμινιστική προσέγγιση της δειγματοληψίας (Unscented Transformation, UT) ώστε να ξεπεράσει αυτό το πρόβλημα. Η κατανομή της κατάστασης προσεγγίζεται ξανά μέσω μιας τυχαίας μεταβλητής και αντιπροσωπεύεται χρησιμοποιώντας ένα (μικρό) αριθμό καθοριστικά επιλεγμένων σημείων δειγμάτων, τα οποία ονομάζονται σημεία σίγμα (sigma points), και τα οποία έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να περιγράφουν καλά τον χώρο. Ο αριθμός αυτών των σημείων θα είναι $2n+1$ όπου n είναι η διάσταση του προβλήματος. Από αυτά τα σημεία μπορεί να προκύψει μία μέση τιμή καθώς και οι αποκλίσεις-σφάλματα των αποτελεσμάτων.

Τα προτερήματα αυτού του αλγορίθμου έναντι του EKF είναι ότι δεν περιλαμβάνει στάδιο γραμμικοποίησης και άρα γίνεται εξοικονόμηση υπολογισμών και χρόνου. Η σύγκριση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων δεν είναι μία διαδικασία ισάξια και για τους δύο αλγορίθμους καθώς η εξίσωση μετάβασης που χρησιμοποιείται είναι μία γραμμική συνάρτηση και έτσι ο EKF έχει πλεονέκτημα έναντι του UKF. Αν ωστόσο υπήρχε εξίσωση μετάβασης και για μη γραμμικές συναρτήσεις η ακρίβεια του UKF θα ήταν σίγουρα πολύ καλύτερη καθώς δεν περιλαμβάνει κανένα στάδιο προσέγγισης.

Το μεγάλο μειονέκτημα του UKF είναι το ότι δεν έχει καμία πιο απλή υπολογιστικά προσέγγιση όπως το Limiting EKF του αλγορίθμου EKF.

3.1.5 SP-EKF : ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ EKF ΚΑΙ SP

Ένα βασικό βήμα του EKF και του IEKF είναι η γραμμικοποίηση δηλαδή ο υπολογισμός της κλίσης. Σε περιπτώσεις όπου οι εξισώσεις μέτρησης δεν μπορούν να αναπαρασταθούν αναλυτικά (π.χ. 3.9, 3.10) απαιτούνται εναλλακτικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των αριθμητικών παραγώγων. Οι μέθοδοι προσέγγισης κλίσης έχουν ανοχή ως προς κάποια σφάλματα. Αυτό τις καθιστά ικανές στην αντιμετώπιση μεγάλης κλίμακας προβλημάτων.

$$\mathbf{X}_{h+1} = \mathbf{F}_h \mathbf{X}_h + \mathbf{w}_h \quad (3.9)$$

$$\mathbf{Y}_h = \mathbf{h}(\mathbf{X}_h) + \mathbf{u}_h \quad (3.10)$$

Η προσεγγιστική μέθοδος των **Στοχαστικών Διαφορών, Finite Difference Stochastic (FDSA)**, σχετίζεται με σημαντική υπολογιστική πολυπλοκότητα : κάθε υπολογισμός κλίσης περιλαμβάνει τουλάχιστον $n+1$ συναρτήσεις αξιολόγησης, όπου το n είναι ο αριθμός των παραμέτρων που πρέπει να βαθμονομηθούν. Μια αντικειμενική συνάρτηση βασίζεται στη στοχαστική προσέγγιση της κλίσης.

Ο αλγόριθμος **Ταυτόχρονης Αλλαγής και Στοχαστικής Προσέγγισης, Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA)**, χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το φίλτρο Κάλμαν παρέχει μια επαναληπτική λύση στο πρόβλημα του βέλτιστου γραμμικού αλγορίθμου επίλυσης το οποίο έχει οριστεί από τις ακόλουθες εξισώσεις.

$$\mathbf{X}_{h+1} = \mathbf{F}_h \mathbf{X}_h + \mathbf{w}_h \quad (3.11)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{u} \quad (3.12)$$

Ο SPSA παρέχει σημαντική υπολογιστική βελτίωση σε σχέση με τον FDSA αλλάζοντας τις τιμές όλων των μεταβλητών ταυτόχρονα. Ο SPSA απαιτεί μόνο δύο υπολογισμούς της αντικειμενικής συνάρτησης σε μια δεδομένη επανάληψη για την εκτίμηση της μεταβλητής κλίσης, ανεξάρτητα από τον αριθμό n των παραμέτρων που πρέπει να βαθμονομηθούν. Αν και ο FDSA αναμένεται να δώσει μια πιο ακριβή και αξιόπιστη εκτίμηση της μεταβλητής κλίσης σε κάθε επανάληψη, το σχετικό υπολογιστικό κόστος είναι υψηλό. Μελέτες έχουν δείξει ότι ο SPSA και ο FDSA απαιτούν ένα συγκρίσιμο αριθμό επαναλήψεων ώστε να φτάσουν στην καθολικά βέλτιστη λύση. Ανά επανάληψη η υπολογιστική εξοικονόμηση του SPSA έχει ως αποτέλεσμα έναν πιο αποδοτικό αλγόριθμο για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.

Η μέθοδος FDSA (Finite Difference Stochastic approximation) υπολογίζει την κατεύθυνση που αναζητείται αλλάζοντας την τιμή κάθε παραμέτρου της συνάρτησης ξεχωριστά. Αυτή η μέθοδος έχει πολύ καλά αποτελέσματα, ωστόσο αποτελεί μία

πολύ δύσκολη υπολογιστική διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα κάθε υπολογισμός της κλίσης απαιτεί τουλάχιστον $n+1$ μεταβολές των τιμών των παραμέτρων, όπου n είναι ο αριθμός των παραμέτρων που πρέπει να βαθμονομηθούν.

Ο αλγόριθμος SP-EKF προτείνεται σαν ένα εναλλακτικό βήμα γραμμικοποίησης του EKF. Ο αλγόριθμος SPSA εκτελεί επαναλήψεις από μία αρχική υπόθεση για το βέλτιστο θ , χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση κλίσης η οποία εξαρτάται από μια εξαιρετικά αποδοτική «ταυτόχρονη αλλαγή» (SP). Η προσέγγιση ταυτόχρονης αλλαγής σε μια άγνωστη κλίση $g(\theta)$ προκύπτει από την:

$$\hat{g}(\hat{\theta}) = \frac{y(\hat{\theta} + c \Delta) - y(\hat{\theta} - c \Delta)}{2c} \begin{bmatrix} \Delta_1^{-1} \\ \Delta_2^{-1} \\ \vdots \\ \Delta_p^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

όπου $y(\dots)$ είναι οι μετρήσεις της συνάρτησης απώλειας που βασίζονται:

- Στην αλλαγή γύρω από το τρέχων $\hat{\theta}$.
- Στον κοινό αριθμητή όλων των n μεταβλητών του $g(\theta)$ που αντιπροσωπεύουν αυτή την ταυτόχρονη αυτή αλλαγή όλων των μεταβλητών στο τρέχων σημείο $\hat{\theta}$.

Συμπερασματικά, στον προτεινόμενο αλγόριθμο το βήμα γραμμικοποίησης του EKF η εξίσωση (3.14) μπορεί να αντικατασταθεί από την (3.13).

$$H_h = \left. \frac{\partial h(x^*)}{\partial x^*} \right|_{x^* = X_{h|h-1}} \quad (3.14)$$

Κατά την εφαρμογή αυτού του αλγορίθμου και για να προκύψουν πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα χρησιμοποιούνται διαστήματα για την στατική και δυναμική βαθμονόμηση με σκοπό την εκτίμηση της ταχύτητας. Η εκ των προτέρων εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων προκύπτει από την προσαρμογή της σχέσης ταχύτητας-πυκνότητας σε ένα αρχικό σύνολο στοιχείων π.χ. τριών ημερών, χρησιμοποιώντας μη γραμμικά ελάχιστα τετράγωνα τα οποία παραμένουν σταθερά για μια ολόκληρη χρονική περίοδο.

Κατά την εφαρμογή αυτή, τα αποτελέσματα δεν βασίζονται σε μια και μοναδική στατική σχέση βαθμονόμησης, αλλά το μοντέλο των παραμέτρων επανεκτιμάται δυναμικά σε κάθε χρονική επανάληψη έτσι ώστε τα αποτελέσματα του μοντέλου να ταιριάζουν καλύτερα με τις επικρατέστερες κυκλοφοριακές συνθήκες.

3.2 ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ - (Antoniou et al., 2007)

Η επικρατέστερη εξίσωση μέτρησης και μετάβασης είναι της μορφής:

$$\mathbf{X}_{h|h-1} = \mathbf{F}_{h-1} \mathbf{X}_{h-1|h-1} \quad (3.16)$$

Η σχέση ταχύτητας-πυκνότητας παρέχει μια (πιθανώς μη γραμμική) εξίσωση μέτρησης. Ωστόσο, το πρόβλημα είναι υποκαθορισμένο, καθώς η διάσταση της σταθερής μεταβλητής (πυκνότητες και οι παράμετροι του μοντέλου) είναι μεγαλύτερη από τον αριθμό των εξισώσεων. Για την πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης χρησιμοποιούνται δύο συμπληρωματικά κομμάτια εξισώσεων μέτρησης. Πρώτον, στατικά βαθμονομημένες τιμές των παραμέτρων της σχέσης πυκνότητας-ταχύτητας οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εκ των προτέρων εκτιμήσεις των πραγματικών τιμών των παραμέτρων. Επιπλέον, οι μετρήσεις πυκνότητας (που προκύπτουν για παράδειγμα έμμεσα από την κατάληψη που αναφέρεται από τους αισθητήρες) και οι οποίες μπορούν να ενσωματωθούν άμεσα.

- 1) Εξισώσεις μέτρησης : οι στατικά βαθμονομημένες τιμές των παραμέτρων της σχέσης πυκνότητας-ταχύτητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εκ των προτέρων εκτιμήσεις των πραγματικών τιμών των παραμέτρων
- 2) Εξισώσεις μετάβασης : για τις παραμέτρους οι εξισώσεις μετάβασης μπορούν να αναπαρασταθούν με την επαναλαμβανόμενη διαδικασία. Οι μετρήσεις πυκνότητας είναι συχνά διαθέσιμες σε διαστήματα ακριβέστερα από τα διαστήματα εκτίμησης.

Τα δεδομένα της επόμενης μέρας (τα οποία δεν χρησιμοποιούνται στην στατική βαθμονόμηση) χρησιμοποιούνται στο επόμενο στάδιο για την δυναμική βαθμονόμηση των παραμέτρων της σχέσης ταχύτητας-πυκνότητας για κάθε σύνολο δεδομένων, που χρησιμοποιούν το Extended Kalman Filter. Η απόδοση του κάθε αλγορίθμου αξιολογείται χρησιμοποιώντας το κανονικοποιημένο σφάλμα μέσης τετραγωνικής τιμής (RMSN) των τιμών:

$$RMSN = \frac{\sqrt{N \sum_N (u - \hat{u})^2}}{\sum_N u} \quad (3.17)$$

όπου το N είναι ο αριθμός μετρήσεων, το $\hat{u}$ υποδηλώνει τις κατ' εκτίμηση (αντίστοιχα προβλεφθείσες) τιμές, ενώ το u τις σωστές τιμές κάθε μεταβλητής.

Συμπερασματικά ο FD-EKF διαφοροποιεί την διαδικασία επίλυσης του EKF, καθώς η μέθοδος πεπερασμένης διαφοροποίησης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της

κλίσης στο βήμα γραμμικοποίησης. Αντίστοιχα ο SP-EKF, χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ταυτόχρονης διαταραχής για την εκτέλεση της ίδιας διαδικασίας.

Το Iterated EKF μπορεί να εφαρμοστεί και στις δύο υπολογιστικές προσεγγίσεις. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.1, όλα τα σύνολα παραμέτρων των δυναμικών βαθμονομήσεων οδηγούν σε σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με τη στατική περίπτωση. Όπως ήταν αναμενόμενο, η χρήση των αποτελεσμάτων του FD οδηγεί σε μεγαλύτερες βελτιώσεις από τη χρήση του SP για το βήμα προσέγγισης κλίσης όσον αφορά στις εκτιμημένες τιμές. Η προσέγγιση κλίσης SP με αποτελέσματα αλγορίθμου EKF έχει μικρότερη ακρίβεια από τον FD-EKF και περίπου ισοδύναμη ακρίβεια με τον FD-IEKF.

	Est	1Pred	2Pred
Offline	0.0709	0.0733	0.0755
FD-EKF	0.0588 (17%)	0.0712 (3%)	0.0713 (6%)
SP-EKF	0.0611 (14%)	0.0669 (9%)	0.0676 (10%)
FD-IEKF	0.0573 (19%)	0.0675 (8%)	0.0688 (9%)
SP-IEKF	0.0574 (19%)	0.0671 (8%)	0.0680 (10%)

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα εφαρμογής (Antoniou et al. (2007)).

Ο παραπάνω πίνακας, παρουσιάζει μία σύγκριση των επιμέρους σφαλμάτων υπολογισμού για τέσσερις μεθόδους που αποτελούν συνδυασμό των πιο πάνω μεθόδων που έχουν αναφερθεί.

Η ταυτόχρονη μεταβολή (SP) προτείνεται για τον υπολογισμό της κλίσης καθώς αποτελεί έναν πολύ πιο αποδοτικό τρόπο σε σχέση με τις συνηθισμένες αριθμητικές παραγώγους. Η χρήση της SP προσέγγισης κλίσης παρέχει συγκρίσιμα αποτελέσματα με αυτά που προκύπτουν από τον πιο απαιτητικό λόγω υπολογισμών αλγόριθμο FD. Μετά από τέσσερις επαναλήψεις του Iterated EKF αλγορίθμου, ο SP αλγόριθμος προσέγγισης κλίσης παρέχει ισοδύναμα αποτελέσματα με αυτά που έχουν προκύψει με την προσέγγιση κλίσης FD (μετά από τον ίδιο αριθμό επαναλήψεων).

ΤΡΟΠΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Σε αυτό το στάδιο αντιμετωπίζεται το πρόβλημα του καθορισμού κάποιων παραμέτρων οι οποίες είναι απαραίτητες για την δυναμική βαθμονόμηση αλλά δεν είναι διαθέσιμες. Αυτές οι μεταβλητές γίνονται απαραίτητες από το στάδιο που το

δίκτυο, προετοιμάζεται ώστε να αρχίσει ο υπολογισμός της ζήτησης. Τα αποτελέσματα αυτού του σταδίου χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των παραμέτρων που απαιτούνται για να χρησιμοποιηθούν σαν δεδομένα εισόδου στη δεύτερη φάση.

Στην δυναμική βαθμονόμηση υπάρχουν τρεις τύποι πληροφορίας:

- Η ιστορική πληροφορία που περιγράφει το κυκλοφοριακό σύστημα
- Τα δεδομένα της κυκλοφορίας που αναπαριστούν τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες
- Οι εκ των προτέρων τιμές των παραμέτρων και των δεδομένων εισόδου του μοντέλου.

$$\Delta\pi_{h+1} = \sum_{q=h-p}^h \mathcal{F}_q^{h+1} \cdot \Delta\pi_q + \eta_h \quad (3.18)$$

Στον παραπάνω τύπο η εκτίμηση του διανύσματος σφάλματος η_h καθώς και των συντελεστών αυτοπαλινδρόμησης $\mathcal{F}_q^{h+1}$ είναι δυνατή μόνο αν είναι διαθέσιμες χρόνο-εξαρτώμενες εκτιμήσεις του διανύσματος κατάστασης (state vector). Βέβαια για κάποιες παραμέτρους μπορεί να υπάρχουν μόνο στατικές τιμές. Για να μην δημιουργηθούν σημαντικά σφάλματα και καθώς δεν υπάρχουν παράμετροι επανυπολογισμού εξαρτώμενοι από το χρόνο, δεν μπορούν να εκτιμηθούν οι αντίστοιχοι παράγοντες αυτοπαλινδρόμησης καθώς και οι συμμεταβλητότητες των σφαλμάτων.

Η ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ

Γίνεται η υπόθεση για χρονικά εξαρτημένες παραμέτρους προσφοράς (supply) και επομένως η αδυναμία εκτίμησης των συντελεστών αυτοπαλινδρόμησης περιορίζει την εξίσωση μετάβασης όσον αφορά αυτές τις παραμέτρους, στην απλούστερη δυνατή διαδικασία. Αυτή η διαδικασία αυτοπαλινδρόμησης μπορεί να αναφερθεί και σαν τυχαία διαδρομή (random walks). Αυτή η διαδικασία παράγει αποτελέσματα χρονικά εξαρτημένης ζήτησης και παραμέτρων προσφοράς (supply). Κατά συνέπεια όλες οι απαιτούμενες μεταβλητές εισαγωγής για την επόμενη φάση είναι διαθέσιμες. Η εξίσωση εκτίμησης μπορεί να αντικατασταθεί από τις ακόλουθες δύο εξισώσεις:

$$\Delta \mathbf{x}_{h+1} = \sum_{q=h-p}^h \mathcal{F}_q^{h+1} \cdot \Delta \mathbf{x}_q + \boldsymbol{\eta}_h^x \quad (3.19)$$

$$\Delta \boldsymbol{\gamma}_{h+1} = \Delta \boldsymbol{\gamma}_h + \boldsymbol{\eta}_h^y \quad (3.20)$$

όπου $\Delta \mathbf{x}_h$ είναι το διάνυσμα των αποκλίσεων των ροών Π-Π κατά το διάστημα h από τις διαθέσιμες εκτιμήσεις. $\Delta \boldsymbol{\gamma}_h$ είναι το διάνυσμα των αποκλίσεων των παραμέτρων προσφοράς (supply) από τις διαθέσιμες εκτιμήσεις. $\boldsymbol{\eta}_h^x$ είναι το διάνυσμα των όρων σφαλμάτων που σχετίζονται με τις ροές Π-Π και $\boldsymbol{\eta}_h^y$ είναι το διάνυσμα των όρων σφάλματος που σχετίζεται με τις παραμέτρους προσφοράς (supply). Ο πίνακας συμεταβλητότητας του διανύσματος των όρων σφάλματος $\boldsymbol{\eta}_h^y$ (που σχετίζεται με τις παραμέτρους supply) είναι και αυτός άγνωστος αφού σε αυτό το στάδιο είναι διαθέσιμες μόνο οι εκτιμημένες μέσες τιμές των παραμέτρων. Η άμεση εξίσωση μέτρησης μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\Delta \mathbf{x}_h^a = \Delta \mathbf{x}_h + \mathbf{v}_h^x \quad (3.21)$$

$$\Delta \boldsymbol{\gamma}_h^a = \Delta \boldsymbol{\gamma}_h + \mathbf{v}_h^y \quad (3.22)$$

Ο πίνακας συμεταβλητότητας του διανύσματος $\mathbf{v}_h^y$ είναι άγνωστος καθώς έχουν υποτεθεί μόνο στατικές εκτιμήσεις των παραμέτρων προσφοράς (supply). Πρέπει επίσης να γίνει υπόθεση για τις αρχικές τιμές του πίνακα συμεταβλητότητας.

Το μοντέλο χώρου-κατάστασης (state-space) για τη φάση της προετοιμασίας του συστήματος περιλαμβάνει τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}_{h+1} &= \sum_{q=h-p}^h \mathcal{F}_q^{h+1} \cdot \Delta \mathbf{x}_q + \boldsymbol{\eta}_h^x \\ \Delta \boldsymbol{\gamma}_{h+1} &= \Delta \boldsymbol{\gamma}_h + \boldsymbol{\eta}_h^y \\ \Delta \mathbf{x}_h^a &= \Delta \mathbf{x}_h + \mathbf{v}_h^x \\ \Delta \boldsymbol{\gamma}_h^a &= \Delta \boldsymbol{\gamma}_h + \mathbf{v}_h^y \\ \Delta \mathbf{M}_h &= \mathcal{S}(\boldsymbol{\pi}_h^H + \Delta \boldsymbol{\pi}_h) - \mathbf{M}_h^H + \mathbf{u}_h \end{aligned} \quad (3.23)$$

Από τη φάση της προετοιμασίας προκύπτει μια χρόνο-εξαρτώμενη ζήτηση και παράμετροι προσφοράς (supply). Απομένει όμως ένα ακόμη στάδιο για την εφαρμογή του ολοκληρωμένου μοντέλου. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει τους παράγοντες αυτοπαλινδρόμησης και τους πίνακες συμεταβλητότητας για τα διανύσματα σφαλμάτων $\boldsymbol{\eta}_h^y$ και $\mathbf{v}_h^y$. Παρακάτω παρουσιάζονται μέθοδοι για την εκτίμησή τους.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΑΥΤΟΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Έστω ότι ο πίνακας $F_q^{r,h+1}$ αναπαριστά την επίδραση των αποκλίσεων στις παραμέτρους προσφοράς στο χρονικό διάστημα q στις αντίστοιχες αποκλίσεις του διαστήματος $h+1$. Τα στοιχεία του πίνακα δηλαδή το $f_{r,q}^{r,h+1}$, απεικονίζουν την επίδραση της απόκλισης στην παράμετρο προσφοράς κατά το διάστημα q στην απόκλιση της r παραμέτρου κατά το διάστημα $h+1$. Η εκτίμηση του πίνακα γίνεται σημείο προς σημείο για κάθε διάστημα. Ο παράγοντας $f_{r,q}^{r,h+1}$ εκτιμάται μέσω μίας παλινδρόμησης της μορφής:

$$\Delta\gamma_{r,h+1} = \sum_{q=h+1-p'}^h \left(f_{1,q}^{r,h+1} \Delta\gamma_{1,q} + \dots + f_{n_\gamma,q}^{r,h+1} \Delta\gamma_{n_\gamma,q} \right) + \omega'_{r,h+1} \quad (3.24)$$

όπου n_γ είναι ο αριθμός των παραμέτρων, p' είναι ο βαθμός της αυτοπαλινδρομητικής διαδικασίας και αναπαριστά τον αριθμό των διαστημάτων καθυστέρησης των οποίων οι αποκλίσεις των supply παραμέτρων συμβάλουν στις αντίστοιχες αποκλίσεις για το διάστημα $h+1$ και $\omega'_{r,h+1}$ είναι όρος σφάλματος. Θα χρειαστούν n_γ τέτοιες αυτοπαλινδρομήσεις ώστε να προκύψει ολόκληρος ο πίνακας $F_q^{r,h+1}$. Κάθε μέρα εκτίμησης παραμέτρων προσφοράς παράγει μία μόνο παρατήρηση. Έτσι απαιτείται ένας μεγάλος όγκος δεδομένων για να καλυφθεί επαρκώς η φάση της προετοιμασίας.

Μπορούν βέβαια τα δεδομένα αυτά να είναι λιγότερα, καθώς είναι λογική η υπόθεση ότι η δομή της αυτοπαλινδρόμησης δεν ποικίλει ανάλογα με το χρονικό διάστημα h . Έτσι τα στοιχεία του πίνακα θα εξαρτώνται μόνο από την διαφορά $h-q$ και όχι ξεχωριστά από τα στοιχεία h και q . Ένας καλός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η δημιουργία εξισώσεων όπως η 3.24 για κάθε διάστημα μέσα στη μέρα. Με αυτόν το τρόπο έχουμε αρκετές παρατηρήσεις για να εκτιμήσουμε τα στοιχεία του πίνακα ακόμη και με στοιχεία μίας μόνο μέρας.

Βέβαια το πρόβλημα μπορεί να απλουστευθεί περισσότερο υποθέτοντας ότι οι αποκλίσεις στις τιμές της r παραμέτρου μπορούν να επηρεαστούν και από προηγούμενες εκτιμήσεις της ίδιας παραμέτρου.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΜΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Ο πίνακας Q_h^y μπορεί να προκύψει από παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων στην εξίσωση 3.24. Το στοιχείο (i, j) του πίνακα αυτού μπορεί να προσδιοριστεί από την εξίσωση:

$$Q_{i,j,h}^y = e'_{i,h} e_{j,h} / n \quad (3.25)$$

Όπου e είναι το διάνυσμα των υπολειπόμενων ελαχίστων τετραγώνων και n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων δειγματοληψίας. Η εξίσωση 3.25 υποθέτει ανεξαρτησία στο χρονικό διάστημα h . Αυτό επιτυγχάνεται με την υπόθεση ότι η δομή της αυτοπαλινδρόμησης παραμένει σταθερή. Σε αυτή την περίπτωση ο πίνακας $Q_{i,j,h}^y$ μεταπίπτει στον $Q_{i,j}^y$.

Ομοίως ο πίνακας συμμεταβλητότητας μπορεί να προκύψει από τα υπόλοιπα της εξίσωσης έμμεσων μετρήσεων 3.22. Αυτά τα υπόλοιπα προκύπτουν από τον υπολογισμό των διαφορών:

$$d_h = \Delta \gamma_h^a - \Delta \gamma_h \quad (3.26)$$

Κάθε μέρα παράγεται μία τιμή για κάθε διάνυσμα υπολοίπου d_h .

Μπορούν να γίνουν και άλλες απλουστεύσεις στη διαδικασία υποθέτοντας επιπλέον ότι ο πίνακας συμμεταβλητότητας R_h^y είναι χρονικά αμετάβλητος. Μία άλλη λογική προσέγγιση είναι η διάσπαση των χρονικών περιόδων σε μικρότερες χρονικά ομάδες, κατά τις οποίες ο πίνακας συμμεταβλητότητας θα είναι αμετάβλητος, και συνδυάζοντας τις παρατηρήσεις για κάθε ομάδα να γίνεται η εκτίμηση για κάθε πίνακα.

Επίσης αν είναι διαθέσιμες μόνο μέσες εκτιμήσεις για τις ροές Π-Π μπορεί να τροποποιηθεί η εξίσωση μετάβασης για κάθε μία από τις ροές αυτές. Η εφαρμογή της φάσης της προετοιμασίας μπορεί να παράγει χρονικά εξαρτώμενες ροές Π-Π, από τις οποίες υπολογίζονται οι παράγοντες αυτοπαλινδρόμησης και οι πίνακες συμμεταβλητότητας.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ

Για το πρόβλημα της βελτίωσης του χρόνου εκτέλεσης υπάρχουν τριών διαφορετικών τύπων προσεγγίσεις. Οι προσεγγίσεις διάσπασης, οι οποίες μειώνουν το μέγεθος του προβλήματος που πρέπει να λυθεί με τη χρήση υπολογιστικά απαιτητικών αλγορίθμων που βασίζονται στην προσομοίωση, οι προσεγγίσεις παραλληλοποίησης οι οποίες μειώνουν τον συνολικό χρόνο εκτέλεσης διανέμοντας το υπολογιστικό φορτίο σε επιπλέον πηγές και τέλος ο αλγόριθμος προσέγγισης ο οποίος εξαλείφει εντελώς την ανάγκη για δυναμικές λειτουργίες αξιολόγησης, βασιζόμενος σε πληροφορίες που αποκτήθηκαν κατά την στατική εκτίμηση.

Ιδιαίτερα στην περίπτωση του EKF είναι απαραίτητη η χρήση αριθμητικών παραγώγων. Αν χρησιμοποιηθούν κεντρικές αριθμητικές παράγωγοι, ο αριθμός των λειτουργιών αξιολόγησης θα είναι $2n$ όπου n είναι η διάσταση του διανύσματος κατάστασης. Ομοίως και το UKF απαιτεί $2n+1$ λειτουργίες αξιολόγησης.

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

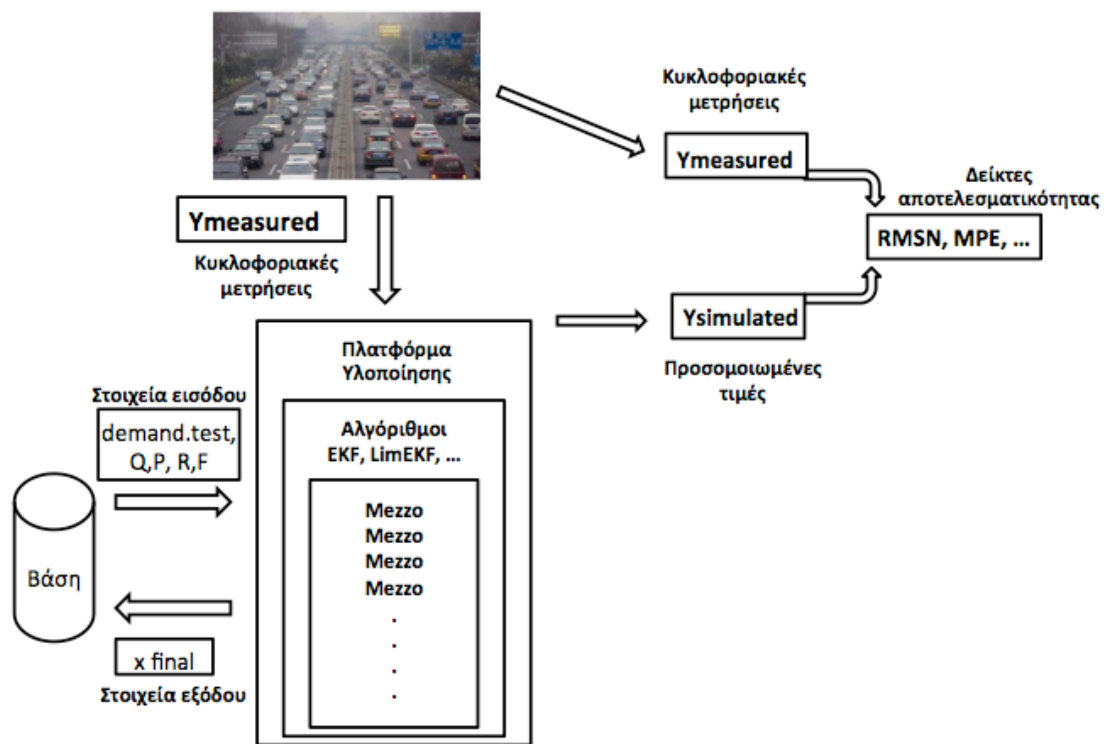
Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η εφαρμογή που υλοποιήθηκε με σκοπό την εκτέλεση των αλγορίθμων για το πρόβλημα της εκτίμησης μητρώων Προέλευσης – Προορισμού. Αρχικά, περιγράφεται η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας υλοποίησης και τα βήματα εκτέλεσής της, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της υλοποίησής της.

4.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

Σε αυτή την ενότητα, δίνεται η γενική αρχιτεκτονική της πλατφόρμας υλοποίησης που σχεδιάστηκε και περιγράφεται γραφικά η διαδικασία που εκτελείται όσον αφορά, τόσο την εφαρμογή αλλά και τα δεδομένα εισόδου και εξόδου. Στη συνέχεια αναλύονται τα βήματα εκτέλεσης της εφαρμογής με τη σειρά που πραγματοποιούνται από την πλατφόρμα υλοποίησης.

4.1.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε με σκοπό την διερεύνηση της απόδοσης των μεθοδολογιών εκτίμησης ροών Προέλευσης – Προορισμού.



Διάγραμμα 4.1: Απεικόνιση διαδικασίας υλοποίησης αλγορίθμων.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται ολοκληρωμένα η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση των αλγορίθμων και την παραγωγή αποτελεσμάτων.

Ο βασικός συντελεστής αυτής της διαδικασίας είναι η πλατφόρμα υλοποίησης. Πρόκειται για ένα πολύ ευέλικτο εργαλείο που επιτρέπει την εκτέλεση διαφόρων τύπων εφαρμογών χωρίς την ανάγκη σημαντικών αλλαγών από το χρήστη. Σχεδιάστηκε έτσι ώστε να επιτρέπει την υλοποίηση διαφόρων αλγορίθμων (EKF, LimEKF), αλλά και άλλων εφαρμογών όπως ο προσομοιωτής Mezzo.

Υπάρχουν δύο πηγές δεδομένων εισαγωγής προς την πλατφόρμα υλοποίησης. Η μία αφορά τα κυκλοφοριακά δεδομένα τα οποία στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι μετρήσεις από αισθητήρες. Η δεύτερη πηγή, είναι δεδομένα τα οποία προέρχονται από μία βάση και αφορούν τόσο την ζήτηση που εισάγεται στο δίκτυο, όσο και πίνακες που δίνουν την συνδυακύμανση των μετρήσεων και της ζήτησης, καθώς και των σφαλμάτων των δύο παραπάνω. Οι συνδυακυμάνσεις των σφαλμάτων της ζήτησης και των μετρήσεων δίνουν την δυνατότητα στο χρήστη να προσδιορίσει το κατά πόσο «εμπιστεύεται» αυτά τα δύο δεδομένα.

Τα περιεχόμενα της βάσης είναι δυνατό να τροποποιηθούν από τον χρήστη κατά βούληση, ανάλογα με τα σενάρια που θέλει να εφαρμόσει κατά την εκτέλεση των αλγορίθμων.

Η ζήτηση είναι ένα δεδομένο το οποίο καθορίζεται υποθετικά από τον χρήστη, ο οποίος προσπαθεί να του δώσει την κατάλληλη τιμή ώστε το παράγωγο της πλατφόρμας υλοποίησης, δηλαδή οι προσομοιωμένοι φόρτοι να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στους εκτιμημένους φόρτους.

Η επίτευξη ή όχι του παραπάνω στόχου φαίνεται από τους δείκτες RMSN και MPE, οι οποίοι και συγκρίνουν τους προσομοιωμένους φόρτους με τους εκτιμημένους φόρτους.

Τελευταίο παράγωγο της πλατφόρμας είναι η τελική εκτιμηθείσα ζήτηση το οποίο σε σύγκριση με το αρχικό x του αρχείου demand.test, δείχνει το κατά πόσο η εφαρμογή κατάφερε να διορθώσει τα πιθανώς λάθος δεδομένα εισαγωγής. Αυτή της η λειτουργία είναι βεβαία πιο εύκολα να επιτευχθεί αν τα δεδομένα εισόδου που αφορούν την κυκλοφορία είναι σωστά και αποκλίνει μόνο η εισαγόμενη ζήτηση.

4.1.2 ΒΗΜΑΤΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει αναφορά στον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η εφαρμογή. Θα περιγραφεί η αλληλουχία των πράξεων της εφαρμογής τόσο για τα αρχεία τα οποία καλεί ή διαβάζει όσο και για το ποια μεθοδολογία ακολουθεί. Αυτή η διαδικασία είναι εύκολο να παρατηρηθεί στο αρχείο log κάθε εκτέλεσης.

Η παρακάτω περιγραφή αναφέρεται στο συνθετικό δίκτυο 3x3y που περιέχει 2 ζεύγη Π-Π και πληροφορία από τρεις συνδέσμους και το οποίο παρουσιάζεται στην ενότητα 4.4. Αντίστοιχη είναι και η διαδικασία για άλλα δίκτυα με τη διαφορά ότι όσο αυξάνονται τα ζεύγη Π-Π, αυξάνονται κατά πολύ και οι υπολογισμοί που αφορούν, κυρίως, στην γραμμικοποίηση.

Αρχικά προετοιμάζεται ο προσομοιωτής mezzo και διαβάζεται το αρχείο test.mezzo που περιέχει τα βασικά δεδομένα του προσομοιωτή καθώς και το αρχείο demand.test που δίνει πληροφορία στο δίκτυο σχετικά με το πόση ζήτηση και κάθε πότε θα εισαχθεί στο δίκτυο. Επίσης ο mezzo διαβάζει από το demand.test το πλήθος των ζευγών Π-Π, το scale για το κάθε διάστημα εκτέλεσης (interval) και τη χρονική στιγμή κατά την οποία φορτώνεται το κάθε ένα από αυτά τα χρονικά διαστήματα.

Στη συνέχεια, διαβάζονται από την εφαρμογή, το αρχείο ymeasured4 και οι πίνακες Q, R, ενώ δίνεται και η εντολή να τρέχει η εφαρμογή για 4 χρονικά διαστήματα

(intervals). Σε αυτό το σημείο εκτελείται ένα εσωτερικό βήμα του αλγορίθμου το οποίο ονομάζεται ανανέωση των παραμέτρων και αφορά στις παραμέτρους x .

ENTER: EKFAAlgorithm.updateSimParametersFromX

LEAVE: EKFAAlgorithm.updateSimParametersFromX

Κατά τον υπολογισμό του EKF εισάγονται τα στοιχεία του x , έπειτα δίνεται η εντολή για την έναρξη του υπολογισμού και τέλος, υλοποιείται το πρώτο βήμα της γραμμικοποίησης κατά το οποίο παράγονται οι αριθμοί $\pm$ δέλτα (linear delta factor).

EKFLinearizerImpl.expandPlusDMinusD(EKFLinearizerImpl.java:40) - EXIT:
expandPlusDMinusD

Στο επόμενο βήμα καλείται η εντολή `spawn` (`MezzoParameters.spawn`) για τη δημιουργία των καινούργιων αρχείων του `mezzo`, `mezzo directories`. Δημιουργούνται δηλαδή αρχεία που περιλαμβάνουν τις παραμέτρους του `mezzo` με συγκεκριμένη κατάληξη η οποία ορίζεται από το πρόγραμμα (π.χ. 258392323) όπως το `test.258392323.mezzo`. Αυτό το αρχείο εισάγεται στην εφαρμογή μαζί με την πληροφορία ότι θα γίνει υπολογισμός για την τιμή του x που βρίσκεται μετά το τέταρτο διάστημα (`slice`), δηλαδή έξω από τη φάση της προετοιμασίας (`warm up`) και παίρνει σαν δεδομένη την τιμή του x από το τέταρτο διάστημα (`interval`) `xValueSlice = 4`, δηλαδή από το 5ο διάστημα. Φορτώνεται επίσης το αντίστοιχο αρχείο της ζήτησης, από το οποίο διαβάζει τα δεδομένα του πέμπτου διαστήματος (`interval`).

Η ασυμφωνία ανάμεσα στην αρίθμηση του αρχείου `demand.test` και του αρχείου `log` υπάρχει καθώς όπως ορίζεται στο αρχείο `demand.test`, το πρώτο τμήμα της εκτέλεσης (`slice`) θεωρείται ως το βασικό (`base`) και με αυτόν τον τρόπο απομένουν άλλα 3 τμήματα προετοιμασίας (`warm up`). Οπότε, όποιο διάστημα αναφέρεται από το `log` σαν το n διάστημα και αν δεν ληφθεί υπόψη το 1^ο βασικό, θα είναι αντ' αυτού, το $n+1$ διάστημα σε αρίθμηση παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιεί το `main.config`.

Η ίδια ακριβώς διαδικασία, με αρχή την παραγωγή αρχείων συγκεκριμένης κωδικοποίησης, μέχρι το τελευταίο βήμα που αναφέρθηκε πιο πάνω, επαναλαμβάνεται 6 φορές, όσο είναι δηλαδή και το πλήθος των υπολογισμών που αφορούν στην γραμμικοποίηση με $\pm$ δέλτα.

Στη συνέχεια, ξεκινά η διαδικασία της **γραμμικοποίησης**. Αρχικά, ο αλγόριθμος καλεί τον προσομοιωτή για τον υπολογισμό των τιμών $x+\delta$ (linear delta factor) και δίνει στην μεταβλητή i την τιμή 0. Έπειτα, πηγαίνει στο σημείο που βρίσκονται τα αρχεία του `mezzo`, διαβάζει από το αρχείο στο οποίο βρίσκονται οι σωστές μετρήσεις των αισθητήρων (`yMeasured4`) και επιστρέφει αποτελέσματα στο αρχείο το οποίο περιλαμβάνει τα αντίγραφα των αποτελεσμάτων (`output_clone`), με την κωδικοποίηση που προαναφέρθηκε για κάθε αρχείο (π.χ. 258392323). Τέλος,

δηλώνεται ότι η φάση προετοιμασίας (warm up) αποτελείται από 4 διαστήματα (intervals) και ότι το διάστημα που εκτελείται τώρα είναι το 0.

Ακριβώς η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τον υπολογισμό των τιμών x -δέλτα. Μετά από το πέρας αυτού του βήματος, υπολογίζεται το dx που θα δώσει την τελική τιμή του x και οι μεταβλητές για την κάθε μία από τις τρεις τιμές της ζήτησης x που φορτώνονται στο δίκτυο αν προστεθεί και αν αφαιρεθεί το ποσοστό της ζήτησης που ορίζει το δέλτα. Οπότε, συνολικά, πραγματοποιούνται επτά υπολογισμοί, δύο για το κάθε ζεύγος Π-Π (3 ζεύγη) και ένας για τον προσδιορισμό του σωστού x .

Σε αυτό το σημείο έχει ολοκληρωθεί η επανάληψη του συγκεκριμένου διαστήματος (interval) του EKF.

Σε αυτό το σημείο, η εφαρμογή δηλώνει ότι έχει εφαρμοστεί ένα βήμα του αλγορίθμου EKF, δηλαδή αυτό που αφορά το πρώτο διάστημα (interval), εκτός από τη φάση της προετοιμασίας (warm-up). Παρουσιάζονται τα δεδομένα των πινάκων P , G , H που παράχθηκαν, τα διορθωμένα αποτελέσματα για τη μεταβλητή x που ορίζει τη ζήτηση σε κάθε ζεύγος Π-Π, τα διορθωμένα αποτελέσματα των μετρήσεων των αισθητήρων (y simulated) για κάθε διάστημα (interval) καθώς και τον δείκτη σφάλματος RMSN ο οποίος δηλώνει κατά πόσο τα διορθωμένα αποτελέσματα των μετρήσεων των αισθητήρων (y simulated), διαφέρουν από τα σωστά (y measured⁴). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για 4 χρονικές περιόδους (intervals).

Τελικά παράγωγα της διαδικασίας αυτής είναι οι καινούργιες διορθωμένες τιμές της ζήτησης x για κάθε ζεύγος Π-Π, οι διορθωμένες μετρήσεις (y simulated) και ο δείκτης σφάλματος RMSN, όλα για κάθε χρονικό διάστημα (interval) εκτέλεσης της εφαρμογής.

Για καλύτερα και πιο ακριβή αποτελέσματα του προγράμματος, γίνεται χρήση των πληροφοριών του αμέσως προηγούμενου τμήματος που εκτελέστηκε, για κάθε τμήμα το οποίο είναι έτοιμο να υλοποιηθεί. Αυτό γίνεται με την υπόθεση ότι το αμέσως προηγούμενο τμήμα, είναι το πιο πρόσφατο και άρα το πιο σωστό.

Για την εκτέλεση του αλγορίθμου Lim EKF απαραίτητο στοιχείο εισόδου είναι ο πίνακας H , ο οποίος αντικαθιστά τη διαδικασία της γραμμικοποίησης. Κάθε χρονικό διάστημα έχει τον δικό του πίνακα εισόδου H , για παράδειγμα αν ο αλγόριθμος εκτελεστεί για 4 διαστήματα εκτίμησης μετά τη φάση της προετοιμασίας θα χρειαστούν 4 πίνακες H σαν στοιχεία εισόδου. Αυτός ο πίνακας έχει τόσες γραμμές όσοι και οι σύνδεσμοι του δικτύου και τόσες στήλες όσα και τα ζεύγη Π-Π.

Παράδειγμα πίνακα h για συνθετικό δίκτυο 2×5 και για εκτέλεση τεσσάρων χρονικών διαστημάτων (intervals) δίνεται παρακάτω.

1	interval:		
2	0.98	0.96	
3	0.33	0.32	
4	0.40	-0.24	
5	0.20	0.28	
6	0.84	0.00	
7			
8			
9	interval:		
10	0.98	0.96	
11	0.40	0.44	
12	0.51	0.00	
13	0.27	0.36	
14	0.87	-0.08	
15			
16	interval:		
17	0.98	0.96	
18	0.40	0.56	
19	0.42	0.00	
20	0.13	0.32	
21	0.84	-0.04	
22			
23			
24			
25	interval:		
26	0.96	0.96	
27	0.42	0.48	
28	0.47	0.00	
29	0.27	0.32	
30	0.89	-0.04	
31			

Εικόνα 4.1: Πίνακας Η - Εξαγόμενο αποτέλεσμα του ΕΚF και προαπαιτούμενο στοιχείο του αλγορίθμου Limiting ΕΚF

4.2 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται τα προαπαιτούμενα στοιχεία και οι παράμετροι ρύθμισης για την εκτέλεση της εφαρμογής καθώς και πληροφορίες για διάφορα βοηθητικά αρχεία των οποίων γίνεται χρήση.

4.2.1 ΠΡΟΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Παρουσιάζονται στη συνέχεια μερικά απλά βήματα, απαραίτητα για την εκτέλεση των δικτύων καθώς και για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της κάθε εκτέλεσης. Η εφαρμογή είναι υλοποιημένη σε περιβάλλον Java.

Για την υλοποίηση της εκτέλεσης είναι απαραίτητες οι εφαρμογές Java, Mezzo (<http://www.infra.kth.se/ctr/mezzo.php>) και Notepad++.

Αρχικά, και αναφερόμενοι σε ελληνική έκδοση του λογισμικού των Windows ο χρήστης μεταβαίνει διαδοχικά στις ιδιότητες του ‘Ο Υπολογιστής μου’ > ‘Για προχωρημένους’ > ‘Μεταβλητές περιβάλλοντος’ > ‘Μεταβλητές συστήματος’ > ‘path’ (όπου γίνεται έλεγχος αν στην κατάληξη του path υπάρχει ο Mezzo και αν όχι:) > ; (ο χρήστης συμπληρώνει το path – θα αναφέρεται πλέον ως ‘διεύθυνση’ – στην οποία βρίσκεται ο Mezzo)

Με τον ίδιο τρόπο ο χρήστης μεταβαίνει στις ιδιότητες του ‘Ο Υπολογιστής μου’ > ‘Για προχωρημένους’ > ‘Μεταβλητές περιβάλλοντος’ > ‘Μεταβλητές συστήματος’ > ‘Δημιουργία’ > ‘Όνομα μεταβλητής’ (CLASSPATH) , ‘Τιμή μεταβλητής’ (.) > ‘OK’.

Τα αρχεία του PEBE, δηλαδή το αρχείο της java καθώς και τα βοηθητικά αρχεία για την υλοποίηση της εφαρμογής, προτείνεται να τοποθετηθούν στη διεύθυνση D:\PEBE μετά από τη δημιουργία αντίστοιχου φακέλου. Από αυτό το σημείο, όλες οι διευθύνσεις μέσα στο εγχειρίδιο θα περιλαμβάνουν αυτήν την προϋπόθεση.

Ξεκινώντας, για κάθε δίκτυο είναι απαραίτητο να προσαρμοστούν δύο συγκεκριμένες διευθύνσεις. Αυτό πραγματοποιείται μετά από επεξεργασία των αντίστοιχων αρχείων του κάθε συνθετικού (μικρού) δικτύου με την ονομασία main.config, και του αρχείου sodermalm.config για το πραγματικό (μεγάλο) δίκτυο. Ανοίγοντάς τα με το πρόγραμμα Notepad++ ο χρήστης στη συνέχεια ορίζει τις διευθύνσεις τόσο του ‘base path’ όσο και του ‘experiment output’. Στο πρώτο συμπληρώνεται η διεύθυνση στην οποία βρίσκεται το συγκεκριμένο δίκτυο και στο δεύτερο ο χώρος όπου επιθυμείται να αποθηκεύονται τα αποτελέσματα των εκτελέσεων σε αυτό. Για παράδειγμα, για το συνθετικό δίκτυο με την ονομασία toy_2x5y το ‘base path’ θα είναι D:\PEBE\data\toy_2x5y\ και το ‘experiment output’ D:\PEBE\data\toy_2x5y\results.

Ο χρήστης ανοίγει το περιβάλλον του terminal το οποίο στην ελληνική έκδοση των Windows βρίσκεται στην ‘έναρξη’ > ‘Όλα τα προγράμματα’ > ‘Βοηθήματα’ > ‘Γραμμή εντολών’. Έπειτα, ο χρήστης πηγαίνει μέσω της γραμμής εντολών στη διεύθυνση D:\PEBE, όπου είναι αποθηκευμένο το αρχείο .jar της εφαρμογής με τον εξής τρόπο: πληκτρολογεί ‘d:’ και στη συνέχεια το πλήκτρο ‘enter’ και στη νέα γραμμή ‘cd pebe’ και πάλι ‘enter’. Τέλος, για την εκτέλεση της εφαρμογής πληκτρολογεί java -jar emp_pebe.R10.jar ./data/toy_2x5y/main.config > ‘enter’. Τα κενά της κάθε εντολής είναι απαραίτητο να διατηρηθούν ως έχουν.

Με την παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται η εκτέλεση του δικτύου και ακολούθως παράγονται τα αποτελέσματα των πινάκων P, G και H. Επίσης προκύπτουν ο διορθωμένος πίνακας X που αφορά στη ζήτηση μετά τις διορθώσεις της εφαρμογής, ο πίνακας Y των μετρήσεων που παράγονται από την προσομοίωση

και ο δείκτης σφάλματος RMSN στα οποία θα γίνει αναφορά παρακάτω. Για να φανούν τα περιεχόμενα του κάθε πίνακα αρκεί κάθε ένα από τα αρχεία να συρθεί από τον φάκελο όπου βρίσκεται μέσα στο Notepad++.

Όσον αφορά τον χρόνο που χρειάζεται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, για τα μικρά δίκτυα είναι κατά μέσο όρο ένα λεπτό, ενώ για το μεγάλο δίκτυο sodermalm, απαιτούνται περίπου επτά ώρες.

4.2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Ακολουθεί αναλυτική ερμηνεία, σειρά προς σειρά, των περιεχομένων του αρχείου main.config.

- # simulator identifier. Implemented: mezzo, dummy, abk

Η πρώτη σειρά αποτελεί σχόλιο - ζητάει από τον χρήστη να ορίσει τον προσομοιωτή με τον οποίο θέλει να δουλέψει.

- simulator = mezzo

Γίνεται ορισμός του προσομοιωτή από τον χρήστη μέσω πληκτρολόγησης.

- # algorithm identifier. Implemented: ekf, limekf

Αυτή η σειρά αποτελεί και πάλι σχόλιο – ο αλγόριθμος, αυτή τη φορά, ζητάει από τον χρήστη να ορίσει με ποιόν αλγόριθμο επιθυμεί να δουλέψει.

- algorithm = ekf

Ο χρήστης ορίζει με ποιον αλγόριθμο επιθυμεί να δουλέψει πληκτρολογώντας το όνομά του.

- # base directory for other files (optional)
- # if base_path exists, it is concatenated at the front of algorithm and simulator specific
- # parameter values referring to files
- base_path = C:/PEBE/data/toy_2x5y/

Εδώ ο χρήστης καθορίζει τη διεύθυνση από την οποία η εφαρμογή θα βρίσκει τα δεδομένα που της είναι απαραίτητα για να εκτελεστεί σωστά.

- # log4j level (ALL > TRACE > DEBUG > INFO > WARN > ERROR > FATAL > OFF)
- # Higher level means more details are logged
- log_level = DEBUG

Ζητείται από τον χρήστη να καθορίσει το πλήθος της πληροφορίας που επιθυμεί να εμφανίζεται στο αρχείο εκτέλεσης log.

- # experiment output directory name

Το πρόγραμμα ζητά από τον χρήστη να προσδιορίσει τη διεύθυνση στην οποία επιθυμεί να αποθηκεύονται τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου.

- experiment_output = C:/PEBE/data/toy_2x5y/results

Σε συνέχεια του προηγούμενου, ο χρήστης εισάγει τη διεύθυνση του φακέλου αποθήκευσης των δεδομένων.

- # Parameters specific for MEZZO simulator:

Σχόλιο του προγραμματιστή προς τον χρήστη ότι στη συνέχεια θα ζητηθούν συγκεκριμένες παράμετροι του mezzo.

- # mezzo output directory name

Ζητείται μια νέα διεύθυνση που αφορά, αυτή τη φορά, την αποθήκευση των αποτελεσμάτων του mezzo.

- output_directory = output

Ο χρήστης εισάγει τη διεύθυνση του φακέλου για το παραπάνω.

- # main file for simulator

Αίτηση προσδιορισμού του βασικού αρχείου εκτέλεσης του mezzo.

- sim_config = mezzo/test.mezzo

Ο χρήστης εισάγει το όνομα του βασικού αρχείου εκτέλεσης του mezzo.

- # number of warm-up intervals

Σχόλιο το οποίο ζητά τον καθορισμό του αριθμού των διαστημάτων του σταδίου προετοιμασίας που ο χρήστης επιθυμεί να υλοποιηθούν.

- `warm_up = 4`

Εισάγεται από τον χρήστη ο αριθμός των διαστημάτων προετοιμασίας που επιθυμεί να υλοποιηθούν.

- `# Parameters specific for EKF algorithm:`

Ο χρήστης ενημερώνεται ότι στη συνέχεια θα ζητηθούν διάφορες παράμετροι του αλγορίθμου EKF.

- `# seed for randomisation passed on as argument to mezzo_s call`

Σχόλιο προς τον χρήστη που τον ενημερώνει ότι θα πρέπει να οριστεί μία παράμετρος η οποία θα καθορίζει τη στοχαστικότητα.

- `seed = 1`

Εισάγεται από τον χρήστη ο τυχαίος αριθμός της παραμέτρου της στοχαστικότητας για την εκκίνηση του προγράμματος.

- `# measurements of vector y`

Αυτή τη φορά, ζητείται από τον χρήστη να προσδιορίσει το όνομα του αρχείου στο οποίο βρίσκεται το διάνυσμα των μετρημένων y .

- `measurements = measurements/ymeasured4.dat`

Ο χρήστης εισάγει τη διεύθυνση του αρχείου στην οποία βρίσκεται το διάνυσμα των μετρημένων y .

- `# matrix files for EKF`

Σχόλιο που ενημερώνει ότι θα ακολουθήσει απαίτηση για εισαγωγή των πινάκων που χρειάζονται για την υλοποίηση του EKF.

- `fmatrix = matrices/fmatrix.dat`

Ο χρήστης καλείται να εισάγει τη διεύθυνση του αρχείου που περιέχει τον πίνακα f .

- `pmatrix = matrices/pmatrix.dat`

Ο χρήστης καλείται να εισάγει τη διεύθυνση του αρχείου που περιέχει τον πίνακα p .

- `qmatrix = matrices/qmatrix.dat`

Ο χρήστης καλείται να εισάγει τη διεύθυνση του αρχείου που περιέχει τον πίνακα q .

- `rmatrix = matrices/rmatrix.dat`

Ο χρήστης καλείται να εισάγει τη διεύθυνση του αρχείου που περιέχει τον πίνακα `r`.

- `# martix format: Full/Diagonal/Identity. Default is Full.`

Σχόλιο προς τον χρήστη που τον ενημερώνει ότι θα ακολουθήσει απαίτηση χαρακτηρισμού των πινάκων.

- `# Full: complete text input file with rows and columns`

Με το σχόλιο αυτό δίνεται ένας ορισμός του τύπου του πίνακα `Full`.

- `# Diagonal: input text file contains one value per row, corresponding to the respective diagonal element`

Δίνεται το ίδιο για τον τύπο του πίνακα `Diagonal`.

- `# Identity: no input file needed; respective parameter in the main config file is the matrix dimension`

Και ακόμη μία φορά, τώρα για τον πίνακα `Identity`.

- `fmatrix_type = I`

Ο χρήστης εισάγει τον τύπο του πίνακα `f`.

- `pmatrix_type = I`

Ο χρήστης εισάγει τον τύπο του πίνακα `p`.

- `qmatrix_type = F`

Ο χρήστης εισάγει τον τύπο του πίνακα `q`.

- `rmatrix_type = F`

Ο χρήστης εισάγει τον τύπο του πίνακα `r`.

- `# delta for EKF linearization`

Σχόλιο το οποίο ζητά από τον χρήστη να ορίσει το ποσοστό της ζήτησης που θα χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία της γραμμικοποίησης.

- `linearizer_delta_factor = 0.05`

Συμπληρώνεται σύμφωνα με το προηγούμενο σχόλιο.

- # Number of intervals to run EKF for

Σχόλιο το οποία ζητά από τον χρήστη να ορίσει τον αριθμό των διαστημάτων, εκτός από αυτά της προετοιμασίας, για τα οποία θα εκτελεστεί η εφαρμογή.

- intervals = 1

Ο χρήστης εισάγει το παραπάνω σύμφωνα με το σχόλιο.

Ανάλυση στοιχείων του main.config

Κατά τον ορισμό του προβλήματος στο main.config και με σκοπό να είναι μερικώς καθορισμένο το πρόγραμμά μας και η τυχαιότητα-στοχαστικότητα του, εισάγεται ένας τυχαίος αριθμός ο οποίος ονομάζεται *seed*. Ο αριθμός αυτός καθορίζει την τιμή από την οποία ξεκινάει η τυχαιότητα του κάθε τρεξίματος και με αυτόν τον τρόπο γίνονται πιο εμφανείς οι διαφορές οι οποίες οφείλονται σε αλλαγές παραμέτρων από τον χρήστη, ανάμεσα στα διαφορετικά τρεξίματα.

Linear delta factor: η μεταβλητή αυτή δηλώνει πόσο ποσοστό της ζήτησης θα είναι το $\pm \delta$, κάτι το οποίο χρησιμοποιείται στην διαδικασία γραμμικοποίησης του H_h .

$$H_h = \left. \frac{\partial h(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*} \right|_{\mathbf{x}^* = \mathbf{X}_{h|h-1}} \quad (4.17)$$

Με τη σειρά του το H_h χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του G_h . Για παράδειγμα, για ζήτηση 1800 και Linear delta factor=0.1% το δ θα είναι ± 18 .

Προσοχή! Οποιοσδήποτε αλλαγές αφορούν στην εκτιμημένη ζήτηση πρέπει να γίνονται από το χρήστη εκτός της φάσης της προετοιμασίας της εφαρμογής για την εκτέλεση, καθώς αυτή έχει καθοριστεί έτσι ώστε να είναι σταθερή. Επίσης, στα μικρά δίκτυα 1x και 2x, δηλαδή στα δίκτυα που αποτελούνται από ένα και δύο ζεύγη Π-Π αντίστοιχα, οι αλλαγές που πραγματοποιούνται, έστω στην τελευταία φάση της προετοιμασίας, αντιπροσωπεύουν την ζήτηση η οποία διήλθε μία ώρα πριν και έχει πλέον αποδεσμεύσει το δίκτυο. Γι' αυτόν τον λόγο η όποια αλλαγή της ζήτησης κατά τη φάση της προετοιμασίας δεν επιδρά στα αποτελέσματα των διαστημάτων εκτίμησης. Αντίθετα, σε ένα πραγματικό δίκτυο όπως το Soderholm, είναι πιθανό η εκτιμημένη ζήτηση που έχει εισαχθεί στο δίκτυο να μην έχει διαφύγει ολόκληρη στη χρονική διάρκεια της μίας ώρας και επομένως να επηρεάσει τα αποτελέσματα των διαστημάτων εκτίμησης.

Μέσα στο `main.config` ορίζονται, τέλος, τα χρονικά διαστήματα πέραν της φάσης της προετοιμασίας για τα οποία θα εκτελεστεί η εφαρμογή. Έτσι, για κάθε εκτέλεση της εφαρμογής θα δημιουργούνται τόσοι φάκελοι σε πλήθος όσα και τα χρονικά διαστήματα που έχουν οριστεί στο `main.config` και αναφέρονται αναλυτικά στο αρχείο `demand.test`.

4.2.3 ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΑΡΧΕΙΑ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Αναλυτικά, παρουσιάζεται παρακάτω το σύνολο των συστατικών στοιχείων της εφαρμογής. Όλα τα αρχεία που αναφέρονται παρακάτω είναι τα βοηθητικά αρχεία απαραίτητα για την εκτέλεση της εφαρμογής. Σε επόμενη ενότητα θα γίνει αναφορά στον τρόπο υλοποίησής τους από το χρήστη.

Η εφαρμογή χρειάζεται δύο βασικά στοιχεία για να ξεκινήσει την εκτέλεσή της, τη ζήτηση και τις μετρήσεις που προέρχονται από τους αισθητήρες. Η ζήτηση καθορίζεται στο αρχείο `demand.test` όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το μέγεθος της ζήτησης που επιθυμεί να εισάγεται στο δίκτυο για διακριτά χρονικά διαστήματα.

Η ζήτηση, δηλαδή το διάνυμα των X , φορτώνεται στο πρόγραμμα από το αρχείο `demand.test` στο οποίο ορίζεται πόση ζήτηση θα φορτώνεται στο πρόγραμμά μας σε κάθε τμήμα της εκτέλεσης (slice) και σε κάθε σύνδεσμο ξεχωριστά.

Στο αρχείο `demand.test` οι αριθμοί, για παράδειγμα, 0 5 1800, δείχνουν ότι από το κεντροειδές 0 έως το κεντροειδές 5 η ζήτηση είναι 1800. Εκτενέστερη αναφορά στο αρχείο αυτό παρέχεται σε επόμενη ενότητα.

Οι μετρήσεις που προέρχονται από τους αισθητήρες είναι αποτέλεσμα εκτέλεσης του προσομοιωτή `mezzo` και καταγράφονται στο αρχείου αυτού με την ονομασία `outflows`. Από εκεί επιλέγονται και εξάγονται από τον χρήστη ο οποίος μπορεί να τις χρησιμοποιήσει ως σωστές μετρήσεις στο αρχείο `yMeasured4`.

Το κύριο στοιχείο που παράγεται από την εκτέλεση της εφαρμογής είναι η εκτίμηση του προσομοιωτή για τις μετρήσεις των αισθητήρων η οποία καταγράφεται στον πίνακα `ySimulated`.

Στόχος της εφαρμογής είναι να δημιουργηθεί ένα μοντέλο προσομοίωσης το οποίο με εισαγωγή της ζήτησης (`demand.test`) και των μετρήσεων των αισθητήρων (`yMeasured4`) να παράγει εκτίμηση των μετρήσεων (`ySimulated`) όσο γίνεται πιο κοντά στις σωστές μετρήσεις των αισθητήρων (`yMeasured4`).

Για κάθε εκτέλεση δημιουργείται ένας αριθμός φάκελων στο αρχείο αποτελεσμάτων `output_clone`. Οι φάκελοι αυτοί αντιστοιχούν σε υπολογισμούς που αφορούν στα ζεύγη ροών Π-Π για το κάθε ένα από τα οποία υλοποιείται ένας υπολογισμός του x με $+δ$ και ένας με $-δ$. Επιπλέον, ανάλογα με το πόσα διαστήματα εκτελέσεων έχουν οριστεί στο βασικό αρχείο της εφαρμογής (`main.config`) να υλοποιηθούν μετά τη φάση προετοιμασίας του δικτύου, επί τόσες φορές θα γίνει ο παραπάνω υπολογισμός. Για κάθε έναν από τους παραπάνω υπολογισμούς δημιουργείται και ένας πίνακας στο αρχείο αποτελεσμάτων `output_clone`.

Για να υλοποιηθεί η εκτέλεση της εφαρμογής είναι απαραίτητοι κάποιοι πίνακες που συνδέονται με τη ζήτηση και τις μετρήσεις των αισθητήρων.

Αναλυτικά:

Ο πίνακας G δίνει τη διακύμανση των μετρήσεων από τους αισθητήρες Y (`ymeasured4`) (ποικίλα στοιχεία του δικτύου που μπορούν να μετρηθούν), ενώ ο πίνακας R τη διακύμανση των σφαλμάτων των μετρήσεων. Η ζήτηση που εκτιμάται, X (`demand.test`), έχει διακύμανση που φαίνεται στον πίνακα P , ενώ τα σφάλματα της εκτίμησης της ζήτησης ορίζονται στον πίνακα Q .

Ο πίνακας F είναι τύπου $I : Identical$ και διαστάσεως δύο. Αυτό ισχύει γιατί στην συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν δύο ζευγάρια OD των οποίων η διακύμανση των σφαλμάτων θα είναι 2×2 . Ο πίνακας είναι τύπου $Identical$ καθώς δεν έχουμε πληροφορία για τις διακυμάνσεις. Οι συνδιακυμάνσεις είναι μηδέν όχι λόγω ανεξαρτησίας των δεδομένων αλλά για την απλούστευση του προβλήματος καθώς δεν υπάρχει ακριβής πληροφορία.

Ο πίνακας H μας δίνει την κλίση και χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο Limiting EKF με σκοπό να παραλειφθεί το στάδιο της γραμμικοποίησης.

Αρχικά γίνεται η θεώρηση ότι δεν υπάρχει εμπιστοσύνη ως προς τη ζήτηση x ενώ το αντίθετο ισχύει για τα `ysimulated` και γι' αυτό ο πίνακας των y έχει μικρές διακυμάνσεις και άρα μεγάλα βάρη. Επίσης, η σχέση $x+y$ είναι αλληλένδετη καθώς όταν υπάρχει εμπιστοσύνη ως προς το ένα στοιχείο δεν υπάρχει ως προς το άλλο.

Ο τελικός έλεγχος κάθε εκτέλεσης, ώστε να βγει συμπέρασμα σχετικά με το αν και κατά πόσο οι αλλαγές ήταν βοηθητικές, είναι να πραγματοποιηθεί σύγκριση του μετρημένου από τους αισθητήρες y (`ymeasured4`), που είναι το δεδομένο, με το αποτέλεσμα της εκτέλεσης που αφορά στις προσομοιωμένες τιμές των μετρήσεων (`yfinal/simulated`).

4.3 Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ-MEZZO

Επιλογή του κατάλληλου προσομοιωτή κυκλοφορίας (Mezzo-Sumo-Matsim)

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης διερευνήθηκαν διαθέσιμα πακέτα προσομοίωσης προκειμένου να υλοποιηθούν οι επιλεγμένοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης. Η επιλογή του προσομοιωτή έγινε με βάση τα εξής κριτήρια:

- Άμεση διαθεσιμότητα προγράμματος ή πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα (open source) και υποστήριξη από τους προγραμματιστές
- Δυνατότητα προσομοίωσης δικτύων μεγάλης κλίμακας (μεσοσκοπικό μοντέλο)
- Προσιτή μεταχείριση των δεδομένων εισόδου και εξόδου του προσομοιωτή
- Βαθμονόμηση αλγόριθμων των μοντέλων του προσομοιωτή
- Διαθεσιμότητα βαθμονομημένου δικτύου μεγάλης κλίμακας με δεδομένα πραγματικών συνθηκών
- Δυνατότητα εκτέλεσης του προσομοιωτή προγραμματικά (μέσω API ή εκτέλεση από γραμμή εντολών/batch)
- Δυνατότητα αλλαγής των παραμέτρων και πρόσβασης των αποτελεσμάτων του συστήματος προγραμματικά (μέσω API ή επεξεργασία ενδιάμεσων αρχείων εισόδου/εξόδου)

Πραγματοποιήθηκε μια ευρεία αναζήτηση για το κατάλληλο λογισμικό, η οποία οδήγησε στη δημιουργία μια μικρής λίστας των πιθανά ενδεδειγμένων λογισμικών για περαιτέρω ανάλυση. Τα προγράμματα προσομοίωσης που διερευνήθηκαν πιο αναλυτικά είναι τα:

1. MEZZO
2. SUMO
3. MATSIM

Οι επόμενες ενότητες παρουσιάζουν τα βασικά χαρακτηριστικά των προσομοιωτών προς εξέταση.

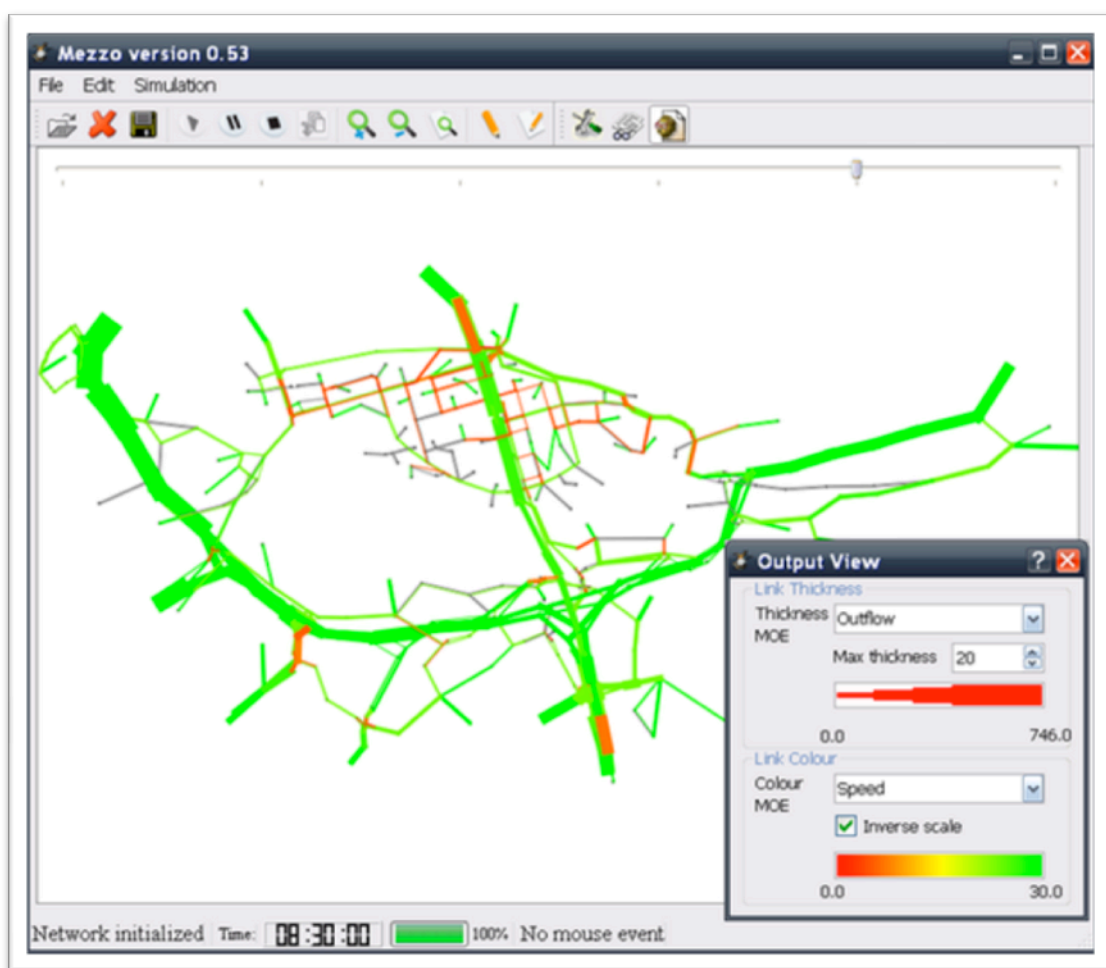
MEZZO

Ο mezzo είναι ένας προσομοιωτής που δημιουργήθηκε από το Royal Institute of Technology (KTH) της Στοκχόλμης και αποτελεί λογισμικό ελεύθερης χρήσης. Κάθε χρήστης μπορεί να το εγκαταστήσει δωρεάν και, ακολουθώντας τις σαφείς οδηγίες που παρέχονται στην αντίστοιχη ιστοσελίδα του πανεπιστημίου (<http://www.ctr.kth.se/mezzo.php>), να το χρησιμοποιήσει χωρίς να αντιμετωπίσει

ιδιαίτερη δυσκολία. Οι αλλαγές στο λογισμικό είναι επιτρεπτές υπό προϋποθέσεις που αναφέρονται στον συγκεκριμένο ιστότοπο.

Η λειτουργία του προσομοιωτή mezzo είναι εξαρτώμενη από τα γεγονότα, κάτι που σημαίνει πως ο χρήστης δεν έχει τη δυνατότητα της διακοπής αυτής πριν το πέρας της προσομοίωσης και συνεπώς, ούτε και την μετέπειτα επανεκκίνησή της από το ίδιο σημείο. Ο mezzo μπορεί να προσομοιώνει την κίνηση στους δρόμους ενός επιλεγμένου δικτύου τόσο για μεμονωμένα οχήματα όσο και για τη γενική κατάσταση που επικρατεί σε αυτούς. Έχει σχεδιαστεί με τέτοιον τρόπο ώστε να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην προσομοίωση μεγάλων και πολύπλοκων δικτύων καθώς περιλαμβάνει ένα μικροσκοπικό (microscopic) επίπεδο για τις μεμονωμένες κινήσεις και αποφάσεις των οδηγών σε μια συγκεκριμένη περιοχή, αλλά και ένα μεσοσκοπικό (mesoscopic) επίπεδο που ασχολείται με την συνολική συμπεριφορά του δικτύου.

Σημειώνεται ότι στο πρόγραμμα Mezzo έχουν προσομοιωθεί και βαθμονομηθεί πλήρως δύο δίκτυα της πόλης της Στοκχόλμης (μεσαίο και μεγάλο δίκτυο). Η Εικόνα 4.2 παρουσιάζει τα στοιχεία εξόδου φόρτου και ταχύτητας που αφορούν το (μεσαίο) δίκτυο της Στοκχόλμης.



Εικόνα 4.2: Στοιχεία εξόδου (φόρτος και ταχύτητα) από τον προσομοιωτή κυκλοφορίας Mezzo για το δίκτυο της Στοκχόλμης.

SUMO

Το πρόγραμμα SUMO (Simulation for Urban MObility) είναι επίσης ένα πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα (open source) το οποίο δημιουργήθηκε από το Institute of Transportation Systems του German Aerospace Center (<http://sumo.sourceforge.net/>). Η ανάπτυξη του προγράμματος αυτού ξεκίνησε το 2000. Το SUMO είναι ένα αρκετά ευέλικτο πρόγραμμα μικροσκοπικής προσομοίωσης, σχεδιασμένο να διαχειρίζεται μεγάλα οδικά δίκτυα. Το πρόγραμμα επιτρέπει την προσομοίωση μιας συγκεκριμένης κυκλοφοριακής ζήτησης η οποία αποτελείται από ξεχωριστά οχήματα που κινούνται εντός ενός δικτύου. Η κίνηση κάθε οχήματος διαμορφώνεται ρητά, ακολουθεί συγκεκριμένη διαδρομή και κινείται μεμονωμένα στο δίκτυο. Αν και το πρόγραμμα αυτό θεωρείται ότι έχει σχεδιαστεί να διαχειρίζεται μεγάλα δίκτυα, λόγω του μικροσκοπικού του χαρακτήρα, ενδέχεται να απαιτείται αρκετά αυξημένος υπολογιστικός χρόνος.

Η Εικόνα 4.3 παρουσιάζει το δίκτυο της Κολονίας όπως έχει προσομοιωθεί στο πρόγραμμα SUMO.



Εικόνα 4.3: Προσομοίωση του δικτύου της Κολονίας (Γερμανία) στο SUMO.

MATSim

Το MATSim παρέχει ένα σύνολο εργαλείων για την υλοποίηση προσομοιώσεων μεγάλης κλίμακας, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία πρακτόρων (agents). Το

MATSim είναι και αυτό ένα πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα, το οποίο δημιουργήθηκε μέσα από τη συνεργασία του Πανεπιστημίου ETH Ζυρίχης, και του Πολυτεχνείου του Βερολίνου (TU Berlin). Αν και η προσομοίωση της πλευράς της ζήτησης στο πρόγραμμα αυτό είναι πολύ αναλυτική, ο προσομοιωτής κυκλοφορίας που έχει υλοποιηθεί έχει σημαντικά μικρότερη λεπτομέρεια.

Η Εικόνα 4.4 παρουσιάζει προσομοίωση του δικτύου της πόλης της Ζυρίχης στο MATSim.



Εικόνα 4.4: Προσομοίωση του δικτύου της Ζυρίχης στο MATSim.

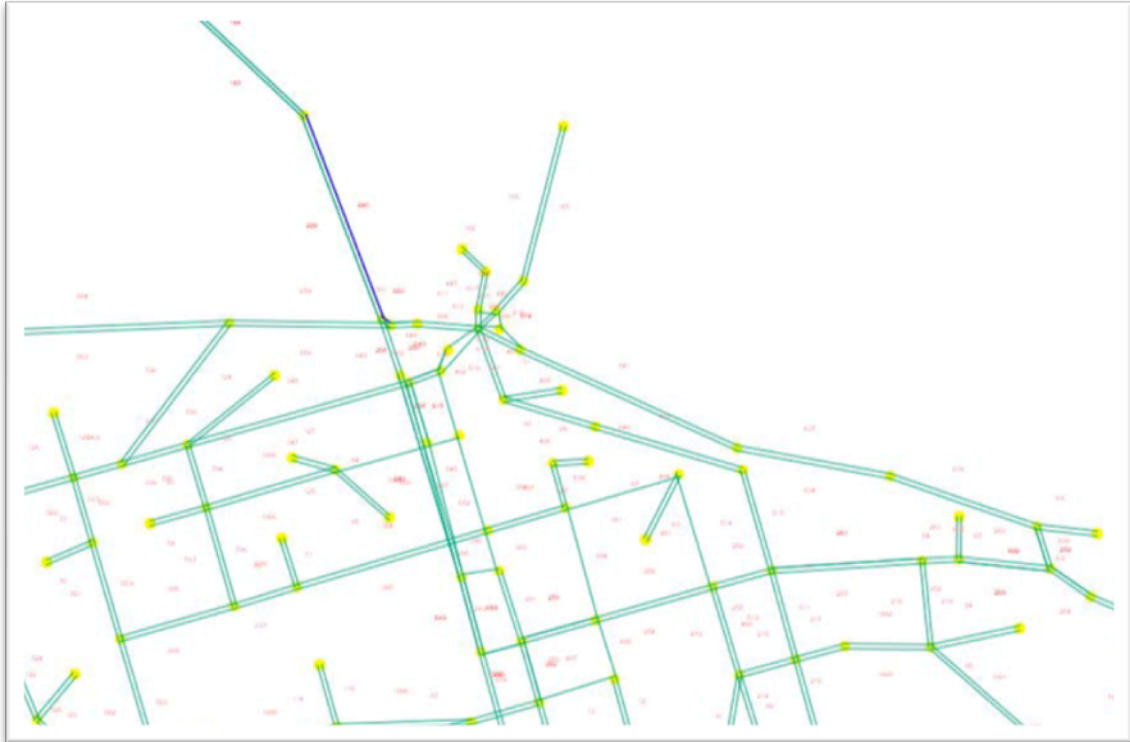
Και τα τρία προγράμματα προσομοίωσης που παρουσιάστηκαν στην ενότητα αυτή ικανοποιούν τα κριτήρια για την υλοποίηση των επιλεγμένων αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Τελικά επιλέχθηκε το Mezzo, κυρίως για τεχνικούς λόγους, ενώ συνυπολογίστηκε και το γεγονός ότι είναι δυνατή η στενή συνεργασία του τομέα συγκοινωνιακών του ΕΜΠ με τους προγραμματιστές του λογισμικού στο ΚΤΗ. Με αυτό τον τρόπο για κάθε δυσκολία, για πιθανές διορθώσεις ή διευκρινίσεις ήταν εύκολη η επικοινωνία.

Μια δυσκολία που παρουσιάζει η επιλογή και χρήση του Mezzo, η οποία συνυπολογίστηκε, είναι το γεγονός ότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα δεν υποστηρίζει τη διακοπή λειτουργίας και επανεκκίνηση από το σημείο διακοπής.

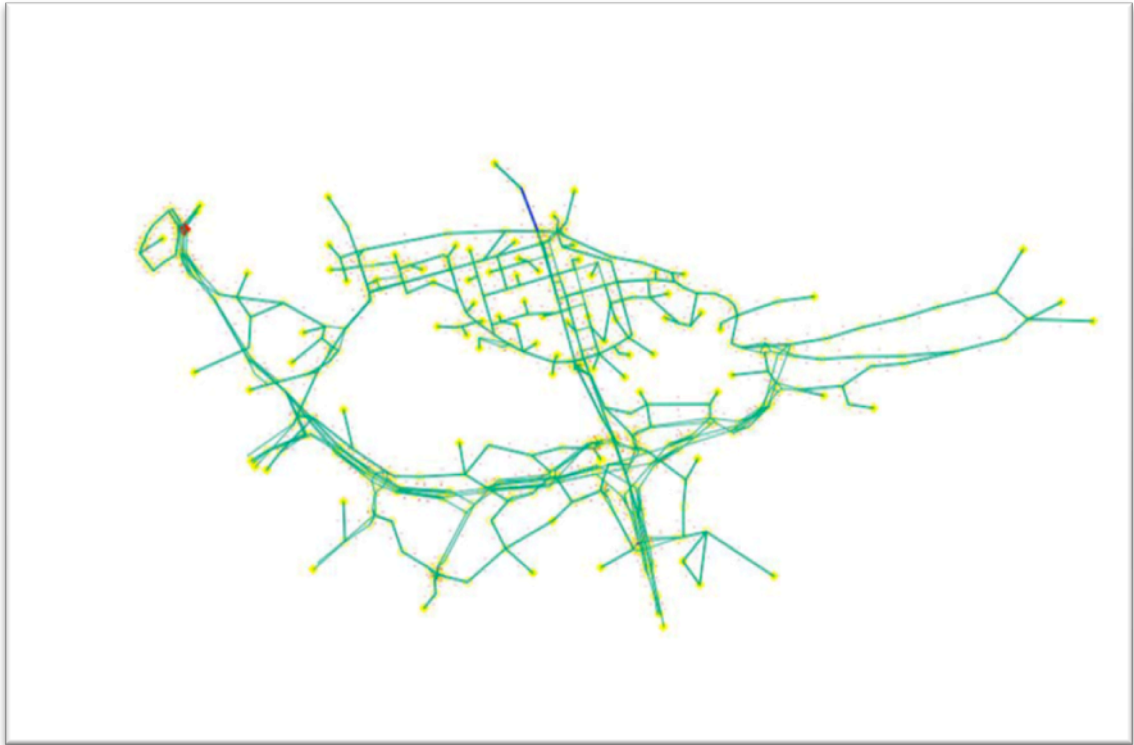
Ο προσομοιωτής Mezzo και ο τρόπος λειτουργίας του

Ειδικότερα για τον προσομοιωτή κυκλοφορίας Mezzo θα γίνει αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά του, καθώς και στον τρόπο λειτουργίας του.

Ο προσομοιωτής επιτρέπει στον χρήστη να επεξεργαστεί τα δίκτυα στα οποία δουλεύει με διάφορους τρόπους, ένας από τους οποίους είναι η χρωματική και σχηματική προσαρμογή κάποιων στοιχείων αυτών όπως συνδέσμων, σημείων Προέλευσης και Προορισμού (σημεία Π-Π) και περιοχών συμφόρησης που τυχόν δημιουργούνται, ώστε αυτά να είναι περισσότερο ορατά. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού του είδους της επεξεργασίας αποτελεί η Εικόνα 4.5. Σε αυτήν, οι σύνδεσμοι παρατηρούνται με πράσινες γραμμές, τα σημεία Π-Π με κίτρινους κύκλους ενώ τα σημεία συμφόρησης με κόκκινα τετράγωνα.

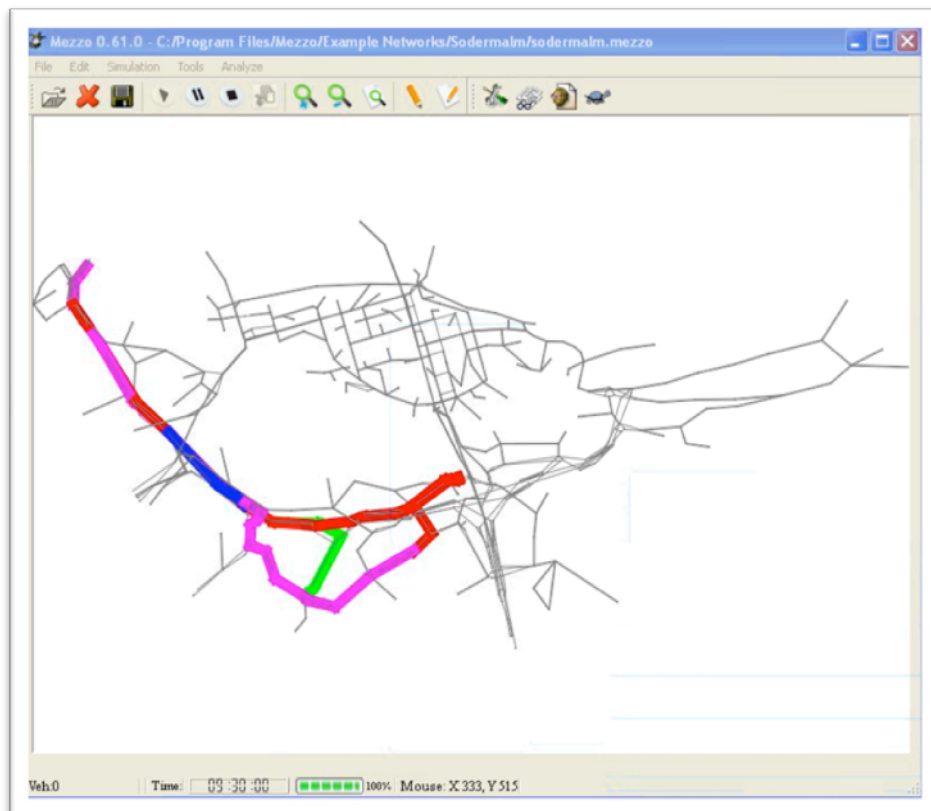


Εικόνα 4.5: Απεικόνιση μίας συγκεκριμένης περιοχής του πραγματικού δικτύου (Sodermalm).

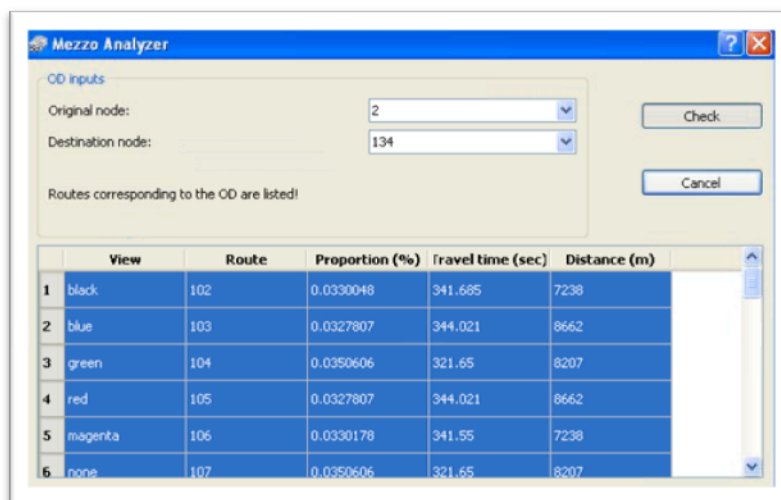


Εικόνα 4.6: Απεικόνιση γενικής άποψης του πραγματικού δικτύου (Sodermalm).

Ο προσομοιωτής δίνει ακόμη την ελευθερία στον χρήστη να κάνει επίβλεψη μιας συγκεκριμένης περιοχής ενός δικτύου, επιτρέποντάς του να χρωματίσει τους δρόμους που τον ενδιαφέρουν ώστε αυτοί να είναι πιο διακριτοί. Για κάθε δρόμο ξεχωριστά παρέχονται πληροφορίες όπως το ποσοστό της ζήτησης που εξυπηρετεί, ο χρόνος που χρειάζεται ο οδηγός για να τον διανύσει καθώς και το μήκος του. Παράδειγμα αυτής της λειτουργίας του Mezzo δίνεται στην Εικόνα 4.7.



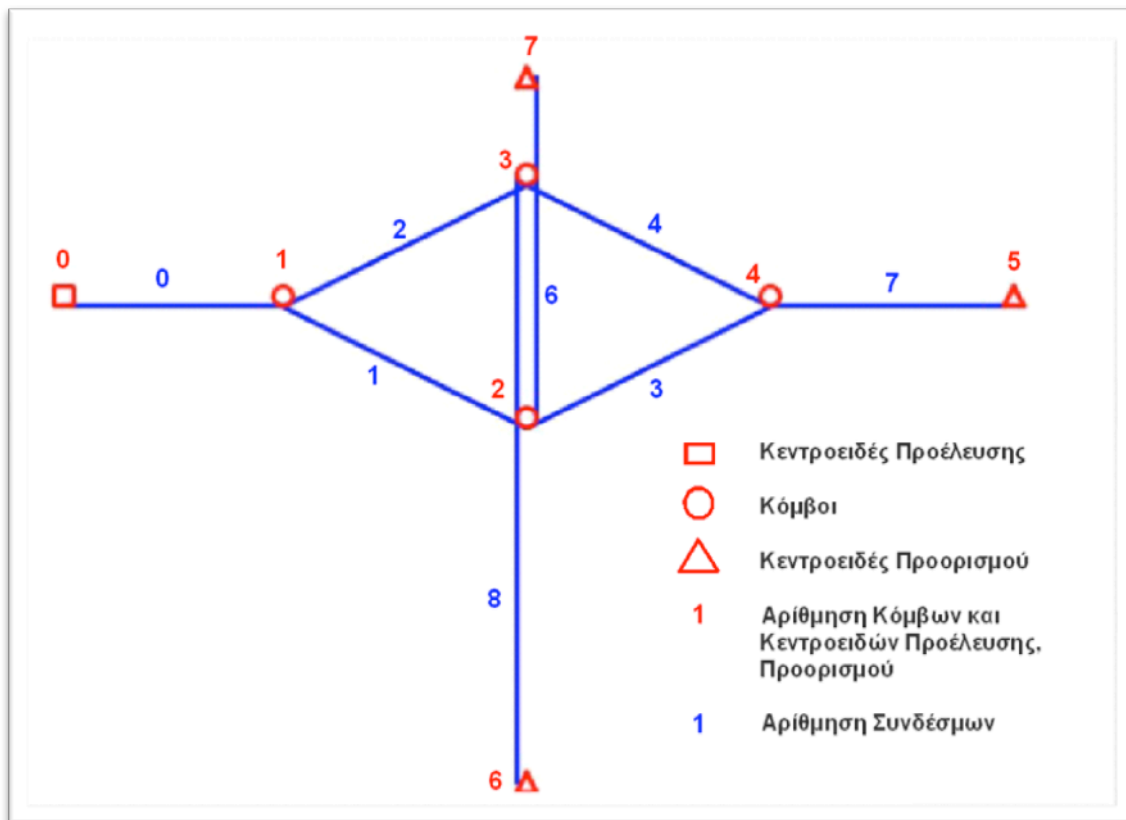
Εικόνα 4.7: Επίβλεψη των στοιχείων κυκλοφορίας μίας περιοχής με τη βοήθεια του Mezzo.



Εικόνα 4.8: Ορισμός δρόμων επίβλεψης μέσω του εργαλείου Mezzo Analyzer.

Μέσω του προγράμματος mezzo editor, το οποίο εγκαθίσταται αυτόματα μαζί με τον προσομοιωτή, ο χρήστης μπορεί επιπλέον να δημιουργήσει καινούργια δίκτυα, εισάγοντας σε αυτά, όλα εκείνα τα στοιχεία τα οποία επιθυμεί να μελετήσει. Η σχεδίαση ενός νέου δικτύου υλοποιείται με τον συνδυασμό και την τοποθέτηση σημείων Π-Π, συνδέσμων και απλών σημείων σύνδεσης σε ένα επίπεδο. Ένα πολύ απλό παράδειγμα δικτύου δημιουργημένου με τη βοήθεια του mezzo editor φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 4.9). Το δίκτυο αυτό διαθέτει ένα κεντροειδές προέλευσης, που

συμβολίζεται με τετράγωνο, τρία κεντροειδή προορισμού, που συμβολίζονται με τρίγωνα, και τέσσερα σημεία κόμβων, που συμβολίζονται με κύκλους.



Εικόνα 4.9: Συνθετικό δίκτυο με ένα κεντροειδές προέλευσης και τρία κεντροειδή προορισμού στον Mezzo editor.

Για περισσότερες πληροφορίες που αφορούν τον προσομοιωτή και την εγκατάστασή του οι χρήστες μπορούν να ανατρέξουν στην ιστοσελίδα που παρατέθηκε στην αρχή της παρούσας ενότητας.

4.4 ΔΙΚΤΥΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Στις επόμενες παραγράφους θα γίνει η παρουσίαση των δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή των αλγορίθμων EKF και Limiting EKF. Για τα δίκτυα αυτά έγινε πρόβλεψη και εκτίμηση μητρώων Π-Π μέσω μίας εφαρμογής, υλοποιημένης σε java, για την οποία θα γίνει αναφορά παρακάτω και η οποία χρησιμοποιεί τους αλγορίθμους EKF και LimEKF με στόχο την βελτιστοποίηση της πρόβλεψης. Επιπλέον, εκτελέστηκαν και αποκλειστικά μέσω του mezzo, ο οποίος κατά την λειτουργία του δεν υλοποιεί κάποιου είδους διόρθωση. Οι δύο προαναφερθείς διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού επιστρατεύθηκαν αφενός με σκοπό να πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων τους και, τελικά, εξαγωγή

συμπερασμάτων από αυτήν και, αφετέρου, για να γίνει εμφανές το αν κατά πόσο αυτοί βοηθούν στην βελτίωση της πρόβλεψης των ροών Π-Π.

4.4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΣΤΗΣΙΜΟ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Περιγραφή των δικτύων

Τα δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν για αυτήν την εφαρμογή είναι, κατά πρώτον, διάφορα συνθετικά δίκτυα και κατά δεύτερον το πραγματικό δίκτυο της Στοκχόλμης. Τα πρώτα είναι δίκτυα που αποτελούνται από περιορισμένο αριθμό σημείων προέλευσης και προορισμού. Στη συγκεκριμένη περιγραφή θα χρησιμοποιηθεί δίκτυο που διαθέτει ένα μόνο σημείο προέλευσης και δύο έως πέντε σημεία προορισμού.

Η δομή αυτών των συνθετικών δικτύων καθίστα εύκολη την κατανόηση του πραγματικού δικτύου, καθώς είναι δυνατή η τροποποίηση και η επεξεργασία των πρώτων με τη βοήθεια του mezzo editor (το οποίο όπως αναφέρθηκε πιο πάνω είναι συμπληρωματικό λογισμικό του mezzo), μέσω της εισαγωγής επιπλέον κόμβων, σημείων προέλευσης ή προορισμού αλλά και συνδέσμων.

Επίσης, φορτώνοντας κάθε φορά την επιθυμητή ζήτηση στο καθορισμένο αρχείο του mezzo (demand.test), παράγονται, τόσο από τον mezzo, όσο και από την εφαρμογή που χρησιμοποιεί τους αλγορίθμους, τα αντίστοιχα αποτελέσματα μετρήσεων για κάθε σύνδεσμο του δικτύου.

Με αυτόν τον τρόπο, αλλαγές στη ζήτηση είναι πιθανόν να προκαλέσουν αλλαγές στις μετρήσεις των αισθητήρων του προσομοιωτή αλλά και στις εκτιμημένες-διορθωμένες τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή των αλγορίθμων. Οι μετρήσεις των αισθητήρων αφορούν τους συνδέσμους από τους οποίους λαμβάνει δεδομένα το κάθε δίκτυο, για παράδειγμα τα **συνθετικά δίκτυα** $3 \times 3y$ και $3 \times 2y$ γραφικά αποτελούν το ίδιο δίκτυο στον mezzo editor (Εικόνα 4.9), όμως το δίκτυο $3 \times 3y$ θα πάρει σαν δεδομένα μετρήσεις από τρεις αισθητήρες συνδέσμων για την διαδικασία της εκτίμησης και πρόβλεψης μέσω των αλγορίθμων, ενώ το $3 \times 2y$ θα χρησιμοποιήσει μόνο δύο μετρήσεις από αισθητήρες.

Βεβαίως, η επιλογή του πλήθους των σημείων προέλευσης και προορισμού δεν έγινε τυχαία. Έγινε προσπάθεια, τα συνθετικά δίκτυα, αν και μικρά, να αντικατοπτρίζουν το υποκαθορισμένο πρόβλημα της εκτίμησης και πρόβλεψης των στοιχείων της κυκλοφορίας. Αυτός ήταν και ο λόγος που επιλέχθηκε να δημιουργηθεί δίκτυο με λιγότερους συνδέσμους από ότι ζεύγη Π-Π, καθώς με αυτό τον τρόπο ο υπολογισμός γίνεται αισθητά πιο δύσκολος από τη στιγμή που το πλήθος των ζητούμενων ξεπερνά το πλήθος των δεδομένων.

Ωστόσο, υλοποιήθηκαν και εκτελέστηκαν επιπλέον, συνθετικά δίκτυα με μεγαλύτερο πλήθος ζευγών Π-Π από το πλήθος των μετρήσεων των συνδέσμων, με σκοπό να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν καθώς, θεωρητικά, έχοντας περισσότερα δεδομένα από ζητούμενα, τα αποτελέσματα θα είναι πιο ακριβή εφόσον αυτά δεν προκύπτουν προσεγγιστικά λόγω έλλειψης δεδομένων.

Επιπλέον, μέσω των συνθετικών δικτύων αναζητούνται οι διακυμάνσεις ζήτησης και μετρήσεων οι οποίες δεν θα παράγουν μεγάλες αποκλίσεις των πραγματικών μετρήσεων των συνδέσμων από τις προβλεπόμενες μετρήσεις των συνδέσμων που προκύπτουν από την εκτέλεση της εφαρμογής. Αυτή η διαδικασία δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο για το πραγματικό δίκτυο, πέρα από τα συνθετικά, καθώς ακόμη και αν τροποποιηθούν τα ποσοστά των διακυμάνσεων ζήτησης και μετρήσεων από αισθητήρες και υπολογιστούν οι αποκλίσεις από τις πραγματικές μετρήσεις δεν θα ήταν εφικτό ο χρήστης να εξάγει συμπεράσματα λόγω του πλήθους των δεδομένων. Εδώ έγκειται και το βασικό πλεονέκτημα των συνθετικών δικτύων.

Το **πραγματικό δίκτυο** ονομάζεται Soderholm και αποτελεί τμήμα δικτύου της Στοκχόλμης ενώ το όνομά του προέρχεται από την περιοχή του κέντρου της Στοκχόλμης από την οποία έχει εξαχθεί. Η περιοχή αυτή, στην οποία βρίσκεται το συγκεκριμένο δίκτυο αποτελεί ένα από τα πολλά νησιά που απαρτίζουν την πρωτεύουσα της Σουηδίας και συγκαταλέγεται στις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές της Σκανδιναβικής Χερσονήσου ενώ συνδέεται με τις γύρω περιοχές με διάφορες γέφυρες. Αν και νησί, τα νερά που το πλαισιώνουν δεν κινούνται ελεύθερα αλλά περνάνε μέσα από μηχανισμούς ελέγχου στάθμης (locks).

Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 462 ροές προέλευσης-προορισμού (Εικόνα 4.6), περιλαμβάνει τις γειτονιές του Soderholm και την αρτηρία ταχείας κυκλοφορίας Sodra lanken η οποία έχει τη μορφή ημικυκλίου και βρίσκεται στη νότια πλευρά του νησιού. Η αρτηρία Sodra lanken και ο αυτοκινητόδρομος E4 με τον οποίο συνδέεται, έχουν πολύ μεγάλη κυκλοφοριακή συμφόρηση κατά την πρωινή και απογευματινή ώρα αιχμής καθώς είναι οι κύριες εισοδοί και έξοδοι (γέφυρες) για το δίκτυο του Soderholm.

Κατά την εκτέλεση του παραπάνω δικτύου από τον προσομοιωτή mezzo είναι δυνατό να παρατηρηθούν από τον χρήστη χαρακτηριστικά του, όπως τα σημεία συμφόρησης και οι ταχύτητες που αναπτύσσονται σε συγκεκριμένα σημεία. Αντίστοιχα κατά την εκτέλεση της εφαρμογής που περιλαμβάνει τους αλγόριθμους για το πραγματικό δίκτυο, ο χρήστης μπορεί να αντιληφθεί τη διαφορά στο χρόνο εκτέλεσης που απαιτεί ο κάθε αλγόριθμος καθώς σε αυτό το δίκτυο ο χρόνος εκτέλεσης για τον EKF πλησιάζει τις επτά ώρες.

Το αρνητικό χαρακτηριστικό αυτού του δικτύου είναι ότι λόγω του μεγάλου πλήθους πληροφοριών που περιέχει δεν είναι δυνατό από τον χρήστη να επέμβει δραστικά σε

αλλαγή δεδομένων αλλά ακόμη και αν διαθέσει τον χρόνο για αυτό είναι πολύ δύσκολος ο εντοπισμός τυχών σφαλμάτων κατά την εκτέλεση. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο ο χρήστης καλείται να δημιουργήσει νέα, μικρότερα, συνθετικά προγράμματα και να καταπιαστεί με αυτά με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών ατελειών ή ακόμη και προβλημάτων μη συμβατότητας ανάμεσα στα λογισμικά που χρησιμοποιούνται (java-mezzo), τα οποία δυστυχώς προκύπτουν συχνά.

Στήσιμο των συνθετικών δικτύων

Το στήσιμο των δικτύων αποτελείται από πολλά στάδια: την γραφική απεικόνιση του δικτύου μέσω του mezzo editor, τον ορισμό των δεδομένων εισόδου για τον προσομοιωτή mezzo, τον ορισμό των δεδομένων εισόδου για την εφαρμογή, καθώς και την δημιουργία των απαραίτητων φακέλων και αρχείων για την κατάλληλη εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Για την γραφική απεικόνιση του δικτύου χρησιμοποιείται το λογισμικό mezzo editor το οποίο επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει ένα σκαρίφημα του δικτύου. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια αυτού, ο χρήστης μπορεί να ορίσει σημεία προέλευσης, προορισμού και συνδέσμους δικτύου και να αποδώσει σε κάθε ένα στοιχείο την αριθμητική ονομασία που επιθυμεί. Υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα, για την δημιουργία πραγματικών δικτύων, της εισαγωγής υποβάθρου με σκοπό την προσαρμογή του δικτύου υπό κλίμακα κάτι που έχει ως αποτέλεσμα το δίκτυο να εμφανίζεται άκρως ρεαλιστικό.

Αρχικά, για την υλοποίηση του mezzo ανά δίκτυο πρέπει να δημιουργήσουμε τα αρχεία που χρειάζεται ο προσομοιωτής για την εκτέλεσή του. Τα θεμελιώδη αυτά αρχεία δίνονται από τον προγραμματιστή του προσομοιωτή και στη συνέχεια ο χρήστης πραγματοποιεί οποιαδήποτε αυξομείωση θεωρεί αυτός αναγκαία. Οι αλλαγές που κάνει ο χρήστης μπορεί να αφορούν τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης την οποία προσπαθεί να υλοποιήσει, όπως για παράδειγμα ποιό επιθυμεί να είναι το μέγεθος του κάθε χρονικού διαστήματος (interval) αυτής, ή ακόμη, πόσο επιθυμεί να διαρκέσει στο σύνολό της η προσομοίωση. Ακόμη, αλλαγές μπορούν να γίνουν στους φόρτους τους οποίους επιθυμεί να φορτώνει ο χρήστης στο δίκτυο ανά χρονικό διάστημα ή ανά ζεύγος προέλευσης-προορισμού.

Παραδείγματος χάριν, σε ένα δίκτυο όπως το συνθετικό 3x3y, η αλλαγή που θα γίνει στο demand.test είναι κάθε τμήμα (slice) της εκτέλεσης να περιλαμβάνει τρεις σειρές που να ορίζουν, για το κάθε ζεύγος Π-Π, το σύνολο της ζήτησης που φορτώνεται. Αυτή η ζήτηση μπορεί να διαφέρει από τμήμα σε τμήμα ενώ ανάλογα με τα ζεύγη Π-Π πρέπει να εισάγεται και ο αντίστοιχος αριθμός σειρών.

```

22 od_pairs: 3
23 scale: 1.0
24 loadtime: 2700
25 { 0 5 1800 }
26 { 0 6 1000 }
27 { 0 7 800 }
28
29 od_pairs: 3
30 scale: 0.9
31 loadtime: 3600
32 { 0 5 1600 }
33 { 0 6 800 }
34 { 0 7 600 }
35

```

Εικόνα 4.10: Αρχείο εισαγωγής της ζήτησης demand.test - Συστατικό στοιχείο του προσομοιωτή Mezzo.

Στο παραπάνω απόσπασμα του demand.test φαίνονται δύο τμήματα (slices) της εκτέλεσης. Στο πρώτο δίνεται η εντολή κατά τη χρονική στιγμή 2700 sec να εισέλθει από το κεντροειδές 0 με κατεύθυνση το κεντροειδές 5, ζήτηση (μεγέθους) 1800. Αντίστοιχα εισάγεται ζήτηση 1000 με κατεύθυνση το σημείο προορισμού 6 και ζήτηση 800 με κατεύθυνση το σημείο προορισμού 7. Στις πρώτες γραμμές του κάθε τμήματος ορίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του όπως από πόσα ζεύγη Π-Π θα αποτελείται καθώς και την κλίμακα με την οποία θα διαβαστεί η ζήτηση που δίνεται στο κυρίως μέρος του.

Όπως φαίνεται στο δεύτερο τμήμα φόρτωσης ο χρήστης επιλέγει να φορτώσει τη ζήτηση με κλίμακα 0.9. Αυτό σημαίνει ότι κάθε ποσό της ζήτησης θα πολλαπλασιαστεί με αυτόν τον αριθμό για να προκύψει τελικά η ζήτηση η οποία θα περάσει από το δίκτυο.

Επιπλέον, έχουν οριστεί από τον προγραμματιστή τέσσερα τμήματα (slices) των 900 sec που αποτελούν τη φάση της προετοιμασίας του τρεξίματος. Συνολικά δηλαδή αυτή η φάση είναι 3600 sec. Από κει και πέρα, ο χρήστης εισάγει όσα επιπλέον τμήματα εκείνος επιθυμεί. Μέσα στο main.config ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει πόσα τμήματα θέλει να εκτελεστούν, ανεξάρτητα με το πόσα είναι γραμμένα στο παραπάνω αρχείο. Για παράδειγμα για slices=5 θα τρέξουν τα 4 της προετοιμασίας και τα 5 επιπλέον τμήματα που πρέπει όμως απαραίτητα να υπάρχουν στο demand.test.

Προσοχή! Ανάμεσα στα τμήματα αυτά της εκτέλεσης αφήνουμε μία κενή γραμμή. Η συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ευαίσθητη στις κενές γραμμές και όχι τόσο στα κενά.

Κατά τον ορισμό του κάθε τμήματος ορίζεται επιπλέον μία κλίμακα (scale), η οποία αφορά το συγκεκριμένο τμήμα. Προτιμάται η τιμή scale=1 για ευκολότερη

κατανόηση από τους χρήστες. Ωστόσο, ο ορισμός της κλίμακας βοηθά ώστε να αλλάξουν μαζικά, κατά ένα ποσοστό, τα δεδομένα του κάθε τμήματος, δηλαδή αν ο χρήστης επιθυμεί να τα διπλασιάσει τότε θα ορίσει $scale=2$ για να πετύχει πιο γρήγορη και τυποποιημένη διαδικασία.

Βέβαια στο αρχείο του mezzo, `test.mezzo`, ορίζεται μέχρι ποιά χρονική στιγμή θα εκτελείται ο mezzo και άρα μέχρι ποιο σημείο θα συνεχίζονται οι υπολογισμοί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για παράδειγμα, έχει οριστεί σαν χρόνος τερματισμού (stop-time) τα 7200 sec και άρα ακόμη και αν υπάρχουν τμήματα εκτέλεσης πέρα από την τιμή 7200 sec, το πρόγραμμα θα σταματήσει εκεί. Σε κάθε περίπτωση, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει οποιαδήποτε τροποποίηση επιθυμεί μέσα από την επεξεργασία του αρχείου `test.mezzo`.

Στο αρχείο `output` του mezzo, το οποίο βρίσκεται στον φάκελο `results` για κάθε διαφορετικό τρέξιμο, ο χρήστης μπορεί να δει αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα κάθε τρεξίματος του προγράμματος mezzo όπως πυκνότητα, φόρτοι των συνδέσμων (link flows), ώρα εισαγωγής, ώρα εξαγωγής, μήκος ουράς.

Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα ο mezzo είναι απαραίτητο να έχει έναν φάκελο με την ονομασία `output` (όπως αυτός ορίζεται μέσα στο `test.mezzo`), έτσι ώστε να μπορεί να παράγει αποτελέσματα και να μην τερματιστεί η λειτουργία του.

Με τις παραπάνω αλλαγές, ο mezzo είναι ικανός να παράγει τα κατάλληλα αποτελέσματα. Για την εκτέλεση της εφαρμογής βεβαίως, είναι αναγκαία η δημιουργία ορισμένων αρχείων τύπου `text`. Αυτά τα αρχεία αρχικά αφορούν τους πίνακες που θα διαβάσει η εφαρμογή. Αναλυτικά αυτοί οι πίνακες στο παράδειγμα του συνθετικού δικτύου $3 \times 2 \times 2$ θα έχουν τη μορφή:

- `Fmatrix`: είναι τύπου `identical` και έχει την τιμή 3 δηλαδή όσα τα ζεύγη Π-Π.
- `Pmatrix`: είναι τύπου `identical` και έχει την τιμή 3 δηλαδή όσα τα ζεύγη Π-Π.
- `Rmatrix`: είναι τύπου πλήρης (full) και έχει διαστάσεις 2×2 δηλαδή όσοι οι σύνδεσμοι στους οποίους έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες.
- `Qmatrix`: είναι τύπου πλήρης (full) και έχει διαστάσεις 3×3 δηλαδή όσα τα ζεύγη Π-Π.
- `Hmatrix`: ο πίνακας αυτός περιλαμβάνει δεδομένα που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο Limiting EKF ο οποίος παρακάμπτει το στάδιο της γραμμικοποίησης και αντ' αυτού διαβάζει τα στοιχεία του συγκεκριμένου πίνακα. Περιέχει όσα χρονικά διαστήματα υλοποιούνται εκτός της φάσης της προετοιμασίας και αποτελείται από στήλες που είναι σε πλήθος ίσες με το πλήθος των ζευγών ροών Π-Π (δηλαδή στην περίπτωση του $3 \times 2 \times 2$ θα υπάρχουν τρεις στήλες). Οι γραμμές του πίνακα είναι σε πλήθος όσες και οι μετρήσεις των αισθητήρων (άρα στη συγκεκριμένη περίπτωση, δύο).

Επίσης, στοιχεία εισαγωγής στην εφαρμογή αποτελούν και οι μετρήσεις των αισθητήρων, οι οποίες για το παράδειγμα που εξετάζεται θα είναι 16. Για κάθε σύνδεσμο εισάγονται 8 από αυτές, δηλαδή όσα είναι τα χρονικά διαστήματα (intervals) που επιθυμείται να υλοποιηθούν. Για την υπό ανάλυση περίπτωση τα διαστήματα στα οποία εκτελείται η προετοιμασία του δικτύου (warm-up) είναι 4, ενώ σε 4 διαστήματα υλοποιείται και η κανονική εκτέλεση. Μία πρόταση προς τον χρήστη ώστε να ξεκινήσει με σωστές τιμές είναι να πάρει τα δεδομένα για τις μετρήσεις των αισθητήρων (y_{measured4}) από το αρχείο των μετρήσεων των συνδέσμων του mezzo (outflows). Πρέπει βέβαια κανείς να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός καθώς ο mezzo παρέχει δεδομένα για όλους τους αισθητήρες του δικτύου.

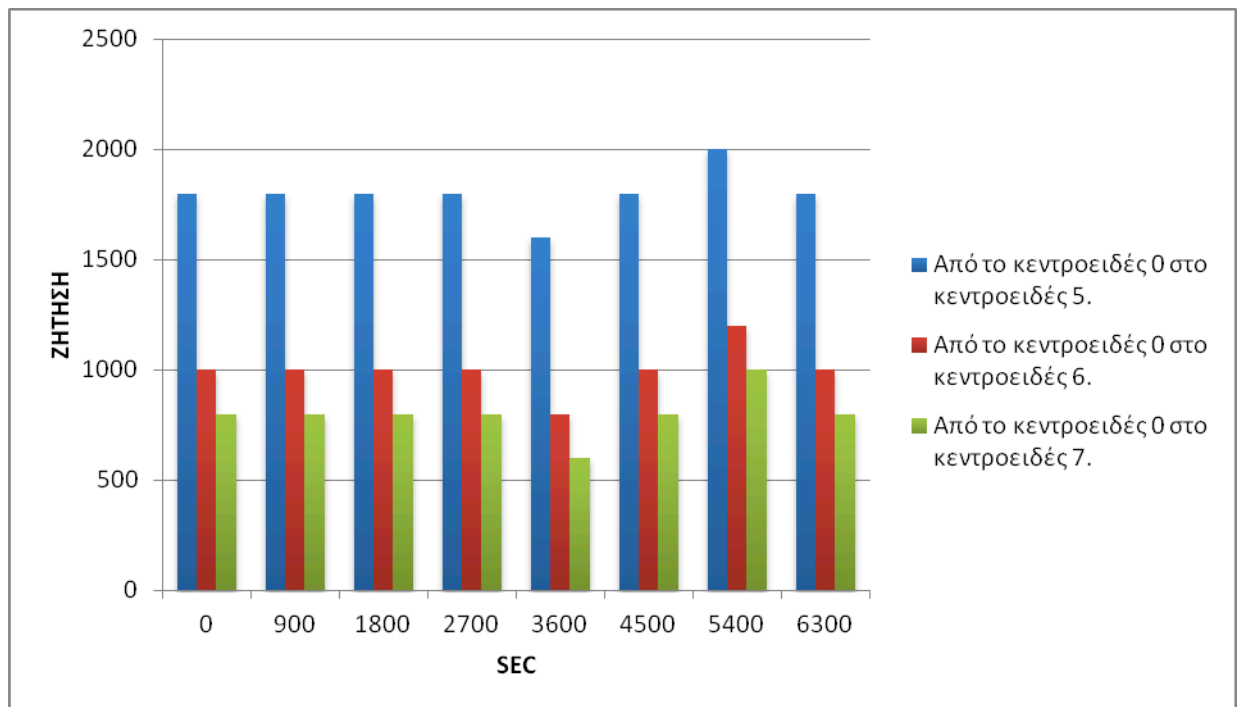
Είναι λογικό ότι όλοι οι φάκελοι και τα αρχεία που αναφέρονται στο main.config πρέπει ασφαλώς να βρίσκοντας στις θέσεις τους έτσι ώστε η εφαρμογή να εκτελεστεί χωρίς πρόβλημα και να παράγει σωστά αποτελέσματα. Ένας από αυτούς τους φακέλους είναι αυτός των αποτελεσμάτων ο οποίος ορίζεται από το main.config ως results.

Όσον αφορά στο main.config ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει οποιαδήποτε αλλαγή θεωρεί αναγκαία, τόσο σχετικά με την μετονομασία αρχείων όσο και με την προσαρμογή παραμέτρων. Αναλυτική περιγραφή του αρχείου αυτού γίνεται σε επόμενη ενότητα.

4.4.2 ΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Κατά την εκτέλεση της εφαρμογής έγιναν κάποιες υποθέσεις που αφορούν στη ζήτηση και στις μετρήσεις των αισθητήρων και είχαν ως σκοπό την όσο το δυνατόν πιο άρτια εκτέλεση της εφαρμογής. Οι δοκιμές αυτές εκτελέστηκαν αρχικά για ποσοστό ζήτησης που περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα (διάγραμμα 4.2).

Σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται για τα τέσσερα πρώτα χρονικά διαστήματα εισέρχεται στο δίκτυο ζήτηση ίδιου ποσού. Αυτό συμβαίνει καθώς το δίκτυο προετοιμάζεται για την εκτέλεση και αυτή η διαδικασία έχει οριστεί να διαρκεί τέσσερα χρονικά διαστήματα των 900sec. Κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας ο χρήστης δεν είναι ουσιαστικό να πειραματιστεί με τη ζήτηση καθώς, επειδή τα συνθετικά δίκτυα είναι αρκετά μικρά, η όποια αλλαγή δεν είναι ορατή από το πέμπτο διάστημα που είναι προς μελέτη καθώς η ζήτηση θα έχει απελευθερώσει το δίκτυο μέσα στα 900 sec που μεσολαβούν.



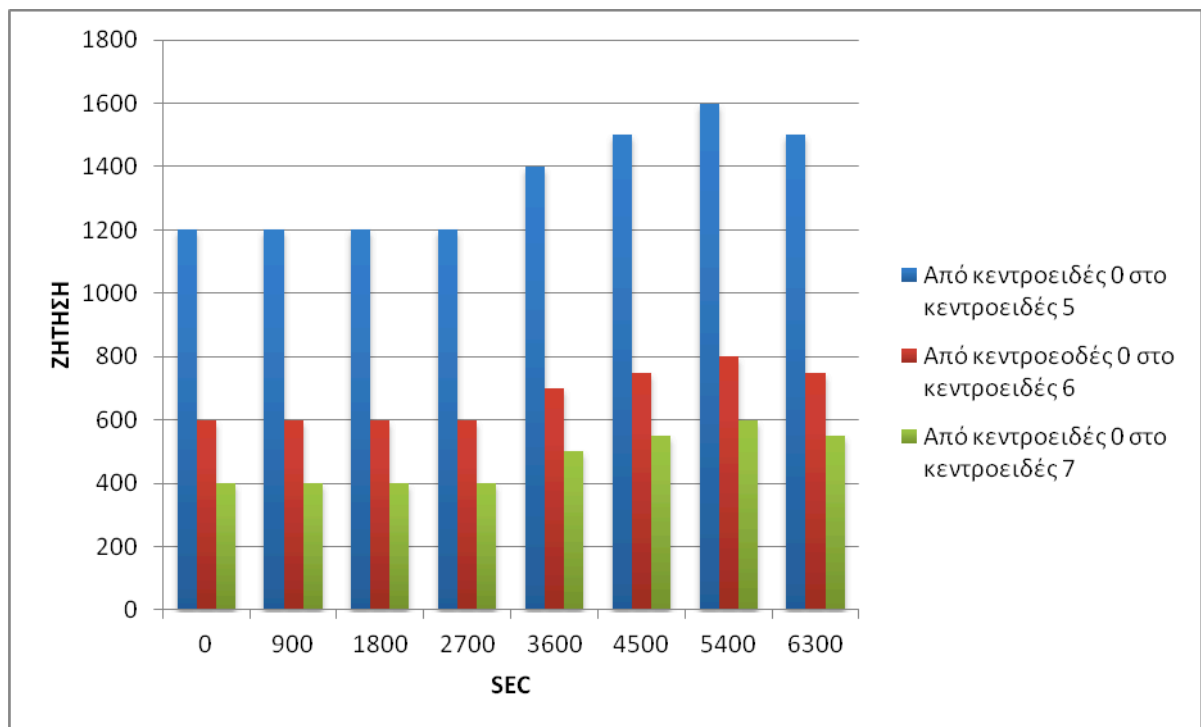
Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα αρχικής ζήτησης συνθετικών δικτύων.

Σε δοκιμή παρατηρήθηκε ότι σε τυχόν μείωση της ζήτησης κατά 10% και με εκτέλεση μόνο του mezzo δεν προέκυπταν μετρήσεις αισθητήρων μειωμένες κατά το ίδιο ποσοστό. Αυτό δεν είναι δυνατό να συμβαίνει καθώς ο προσομοιωτής δεν εφαρμόζει κάποιου είδους διαδικασία διόρθωσης κατά την εκτέλεσή του και οι μετρήσεις των αισθητήρων θα έπρεπε να έχουν άμεση επίδραση έπειτα από μια αλλαγή της ζήτησης.

Επίσης, το άθροισμα της ζήτησης που εισαγόταν κάθε χρονική στιγμή στο δίκτυο ήταν αρκετά μεγαλύτερο στις περισσότερες των περιπτώσεων από τις μετρήσεις ανά σύνδεσμο (outflows).

Τα δύο παραπάνω στοιχεία οδήγησαν στην υπόθεση της υπέρβασης της χωρητικότητας του δικτύου. Για επαλήθευση της υπόθεσης η ζήτηση μειώθηκε κατά ένα μεγάλο ποσοστό τόσο στην φάση της προετοιμασίας όσο και εκτός αυτής. Διατηρήθηκε ωστόσο σε κάποιο χρονικό διάστημα μετά την σταδιακή αύξηση της ζήτησης ένα βήμα μείωσής της κατά ένα ποσοστό για να είναι βέβαιο ότι η εφαρμογή θα μπορέσει να ανταποκριθεί με σωστά αποτελέσματα σε μια τέτοια διακύμανση της ζήτησης του δικτύου που φυσικά αποτελεί καθημερινό φαινόμενο.

Το νέο διάγραμμα της ζήτησης φαίνεται στο Διάγραμμα 4.3.

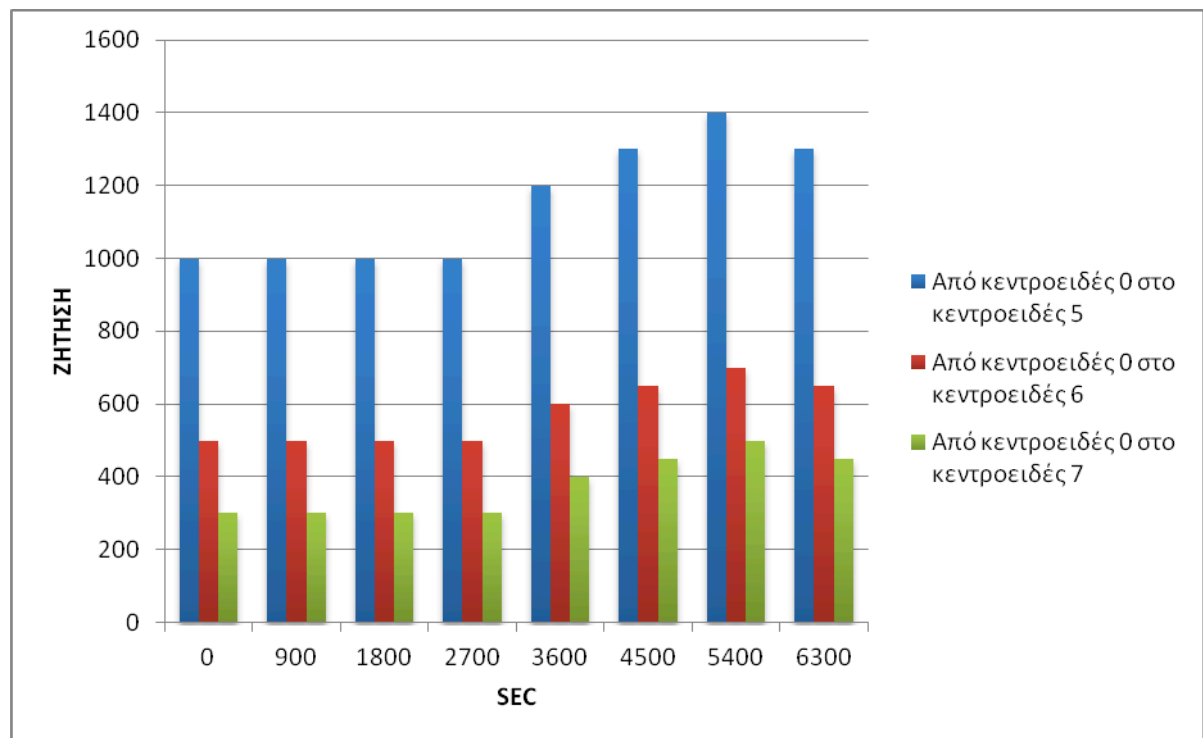


Διάγραμμα 4.3: Διορθωμένη ζήτηση λόγω υπέρβασης της χωρητικότητας των συνθετικών δικτύων.

Ωστόσο μετά την εκτέλεση των προβλεπόμενων δοκιμών για το δίκτυο 3x2y παρατηρήθηκαν και πάλι μία μικρή απόκλιση στα αποτελέσματα του προσομοιωτή Mezzo. Γι αυτό το λόγο θεωρήθηκε σωστό να μειωθεί για άλλη μία φορά η εκτιμημένη ζήτηση. Έτσι η ζήτηση που εισέρχεται στο δίκτυο 3x3y περιγράφεται από το παρακάτω διάγραμμα.

Η ζήτηση, όπως προαναφέρθηκε, είναι ένα δεδομένο εισαγωγής για την εφαρμογή αλλά ταυτόχρονα, αποτελεί και παράγωγο στοιχείο του προσομοιωτή mezzo. Αρχικά, για τις πρώτες δοκιμαστικές εκτελέσεις της εφαρμογής, εισήχθησαν στο αντίστοιχο αρχείο (ymeasured4), τυχαίες τιμές ως μετρήσεις από τους αισθητήρες. Αυτές οι τιμές όμως, όπως ήταν λογικό, δεν ανταποκρίνονταν ικανοποιητικά σε συνδυασμό με την ζήτηση, η οποία ήταν και αυτή δεδομένο, καθώς αποτελούσαν δύο τυχαία και ανεξάρτητα ορισμένα μεγέθη.

Στην πραγματικότητα όμως, η ζήτηση που εισάγεται ανά χρονικά διαστήματα στο δίκτυο και οι μετρήσεις των αισθητήρων είναι αλληλένδετα μεγέθη αφού το δεύτερο εξαρτάται από το πρώτο. Για τη βελτίωση λοιπόν της εφαρμογής και για να γίνει αυτή πιο ρεαλιστική, εκτελέστηκε μία φορά ο προσομοιωτής με την επιθυμητή ζήτηση και τα αποτελέσματα που παρήγαγε σαν μετρήσεις των αισθητήρων θεωρήθηκαν σαν δεδομένα για την εφαρμογή.



Διάγραμμα 4.4: Εκτιμημένη ζήτηση συνθετικού δικτύου 3x3γ.

4.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για την σωστή εκτέλεση των αλγορίθμων και την απόκτηση συγκρίσιμων αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε ένα πλαίσιο που περιελάμβανε τις δοκιμές που είναι απαραίτητο να γίνουν σε κάθε αλγόριθμο και τους συντελεστές των οποίων οι τιμές πρέπει να διερευνηθούν για την αποδοτικότερη εκτέλεση των αλγορίθμων.

Παρακάτω γίνεται αναφορά σε όλες τις μεταβλητές των εκτελέσεων της πλατφόρμας υλοποίησης.

ΔΙΚΤΥΑ :

- Συνθετικό δίκτυο, $3 \times 2y$.
- Συνθετικό δίκτυο, $3 \times 3y$.
- Πραγματικό δίκτυο της Στοκχόλμης, Sodermalm.

ΕΚΤΙΜΗΜΕΝΗ ΖΗΤΗΣΗ:

- Σωστή ζήτηση.
- Αυξημένη ζήτηση κατά 10%.
- Μειωμένη ζήτηση κατά 10%.
- Αυξημένη ζήτηση κατά 20%.
- Μειωμένη ζήτηση κατά 20%.

ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ:

- Σωστές κυκλοφοριακές μετρήσεις.
- Αυξημένες κυκλοφοριακές μετρήσεις κατά 10%.
- Μειωμένες κυκλοφοριακές μετρήσεις κατά 10%.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ:

- Extended Kalman Filter (EKF).
- Limiting Extended Kalman Filter (Lim EKF).
 - Πίνακας H που προέρχεται από τις εκτελέσεις του EKF για εκτιμημένη ζήτηση $\pm 10\%$, μέσος όρος **ανά διάστημα** εκτός της φάσης της προετοιμασίας (4 διαστήματα).
 - Πίνακας H που προέρχεται από τις εκτελέσεις του EKF για εκτιμημένη ζήτηση $\pm 20\%$, μέσος όρος **ανά διάστημα** εκτός της φάσης της προετοιμασίας (4 διαστήματα).
 - Πίνακας H που προέρχεται από τις εκτελέσεις του EKF για εκτιμημένη ζήτηση $\pm 10\%$, μέσος **όρος όλων των διαστημάτων** εκτός της φάσης της προετοιμασίας (4 διαστήματα).

ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΔΕΛΤΑ (LINEAR DELTA FACTOR):

- $\delta=0.01, 0.02, 0.03, \dots, 0.09$
 - Επιλέχθηκε για τις δοκιμές η τιμή 0.02.

ΠΙΝΑΚΕΣ ΣΥΝΔΥΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΕΚΤΙΜΗΜΕΝΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ:

- R= Διαγώνιος με τιμές 1, 2, ...,100.
 - Επιλέχθηκε R= Διαγώνιος με τιμή 1
- Q= Διαγώνιος με τιμές 1, 2, ...,100.
 - Επιλέχθηκε Q= Διαγώνιος με τιμή 1

Επιλέχθηκε δηλαδή να γίνουν 15 εκτελέσεις για κάθε αλγόριθμο, για κάθε ένα από τα συνθετικά δίκτυα. Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι αλγορίθμων, άρα θα υλοποιηθούν 60 εκτελέσεις για κάθε δίκτυο, άρα 120 εκτελέσεις για τα δύο συνθετικά δίκτυα.

Όσον αφορά το πραγματικό δίκτυο Soderholm υλοποιήθηκαν κάποιες δοκιμαστικές εκτελέσεις, όμως λόγω των 7 ωρών που απαιτεί για την κάθε εκτέλεση δεν ήταν δυνατή η παρουσίαση αποτελεσμάτων στην παρούσα εργασία.

3x3y - Lim EKF/ 2a				
ΔΟΚΙΜΕΣ	ΖΗΤΗΣΗ/ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	ΔΕΛΤΑ	ΠΙΝΑΚΑΣ Q	ΠΙΝΑΚΑΣ R
Δοκιμή 1	(+0%d)+0%m	0.02	1	1
Δοκιμή 2	(+0%d)+10%m	0.02	1	1
Δοκιμή 3	(+0%d)-10%m	0.02	1	1
Δοκιμή 4	(+10%d)+0%m	0.02	1	1
Δοκιμή 5	(+10%d)+10%m	0.02	1	1
Δοκιμή 6	(+10%d)-10%m	0.02	1	1
Δοκιμή 7	(-10%d)+0%m	0.02	1	1
Δοκιμή 8	(-10%d)+10%m	0.02	1	1
Δοκιμή 9	(-10%d)-10%m	0.02	1	1
Δοκιμή 10	(+20%d)+0%m	0.02	1	1
Δοκιμή 11	(+20%d)+10%m	0.02	1	1
Δοκιμή 12	(+20%d)-10%m	0.02	1	1
Δοκιμή 13	(-20%d)+0%m	0.02	1	1
Δοκιμή 14	(-20%d)+10%m	0.02	1	1
Δοκιμή 15	(-20%d)-10%m	0.02	1	1

Πίνακας 4.1: Παραδείγματα μεταβλητών εκτέλεσης για τον αλγόριθμο Lim EKF του δικτύου 3x3y.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εκτενής παρουσίαση της διαδικασίας εφαρμογής των αλγορίθμων EKF και LimEKF. Αρχικά δίνονται στον χρήστη κάποιες χρήσιμες οδηγίες για την εφαρμογή της πλατφόρμας υλοποίησης, όπως τρόποι για να ελέγξει την λειτουργία της, αλλά και πιθανές λύσεις σε τυχόν προβλήματα που θα αντιμετωπίσει. Τέλος γίνεται εφαρμογή των δύο αλγορίθμων και συγκρίνονται ως προς την αποδοτικότητά τους συναρτήσει της υπολογιστικής διαδικασίας που απαιτούν.

5.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

Σε αυτή την ενότητα προτείνονται στον χρήστη κάποιοι τρόποι αξιολόγησης της σωστής λειτουργίας της πλατφόρμας υλοποίησης, καθώς και τρόποι επίλυσης σε μερικά πιθανά προβλήματα που εμφανίζονται κατά τις εκτελέσεις. Επίσης για κάποια από τα προβλήματα παρατίθενται οι πιθανές αιτίες εμφάνισής τους, ώστε να είναι πιο εύκολο από το χρήστη να τα αντιμετωπίσει.

5.1.1 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΟΡΘΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, σκοπός του προγράμματος μας είναι να πλησιάσουν τα y_{final} τα $y_{measured}$. Σε αυτή την προσπάθεια γίνονται διάφορες μετατροπές στα δεδομένα. Αρχικά, τρέχουμε μία φορά αυτόνομα τον mezzo με τη ζήτηση σταθερή (στα 1800 και 1000). Τα αποτελέσματα που παράγει ο mezzo, αν ακολουθηθεί η αποθήκευση που έχει προταθεί, αποθηκεύονται στο φάκελο του αντίστοιχου δικτύου στο `results>output>outflows`.

Από τα outflows χρειαζόμαστε, για το αρχικό μας πείραμα, μόνο τα αποτελέσματα του πρώτου χρονικού διαστήματος (interval) που ακολουθεί τη φάση της προετοιμασίας του δικτύου. Ακόμη, στην εφαρμογή συμμετέχουν μόνο οι σειρές με τις μετρήσεις από τους αισθητήρες των οποίων η ταυτότητα (link ID) αναφέρεται στο αρχείο `ymeasured4`.

Οπότε εν συνεχεία, αφού εκτελεστεί η παραπάνω διαδικασία, γίνεται αντιγραφή των αποτελεσμάτων του mezzo σε έναν φάκελο, π.χ. example, (τον οποίο και ορίζουμε στο main.config ως measurements=measurements/example.dat), ώστε η εφαρμογή να διαβάσει από εκεί τα δεδομένα και όχι από το ymeasured4.

Στο επόμενο βήμα τρέχουμε την εφαρμογή με σταθερή ζήτηση, δηλαδή από το κεντροειδές 0 έως το 5 με τιμή 1800 και από το κεντροειδές 0 έως το 6 με τιμή 1000. Οι τιμές που θα παραχθούν από τον προσομοιωτή Mezzo και οι οποίες αποτελούν μετρήσεις του δικτύου για την συγκεκριμένη ζήτηση αντιγράφονται κατάλληλα στο αρχείο y measured. Με τα παραπάνω δεδομένα γίνεται μία εκτέλεση της εφαρμογής.

Αν η εφαρμογή είναι άρτια, τότε θα πρέπει η ζήτηση να μην μεταβληθεί καθόλου, δηλαδή ο x_{matrix} θα πρέπει να έχει τις αρχικές τιμές της ζήτησης, 1800 και 1000. Επίσης, οι πίνακες ymeasured και yfinal θα πρέπει να έχουν τις ίδιες τιμές. Σε αυτή την περίπτωση, το x_{final} δεν διαφέρει από το x που ορίζεται στο demand.test. Αυτό συμβαίνει καθώς τα y simulated είναι σχεδόν ίδια με τα y measured και άρα δεν είναι απαραίτητη κάποια διόρθωση στα x, η οποία σε άλλες περιπτώσεις, όπως θα φανεί και παρακάτω, γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα.

Σε αυτό το σημείο θα γίνει μία δοκιμή με μείωση της ζήτησης κατά 30%, δηλαδή 1260 και 700. Σε αυτή την περίπτωση το yfinal μειώνεται κατά περίπου 30%, ενώ το x αυξάνεται στο μισό περίπου της διαφοράς, μεταξύ 1260 και 1800 και 700 και 1000. Αυτό μας δείχνει ότι το πρόγραμμά μας συμπεριφέρεται σωστά. Σε περίπτωση, δηλαδή, που εισαχθεί χονδροειδώς λανθασμένη ζήτηση, το πρόγραμμα το αντιλαμβάνεται και επιδιώκει να το διορθώσει.

Σε επόμενο βήμα θα γίνει προσπάθεια, με τη βοήθεια των πινάκων Q και R οι οποίοι δίνουν τη διακύμανση των σφαλμάτων της ζήτησης και των μετρήσεων αντίστοιχα, να κατευθυνθεί το x προς τη σωστή κατεύθυνση, δηλαδή οι προσομοιωμένες μετρήσεις αισθητήρων (ysimulated) να πλησιάσουν τις πραγματικές μετρήσεις του δικτύου (ymeasured).

5.1.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΧΡΗΣΤΗ

Ο προσομοιωτής mezzo, ως πρόγραμμα, παρουσιάζει διάφορες διαφοροποιήσεις από τη μία έκδοση στην άλλη και κάποιες από τις παραμέτρους, ανάλογα με την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη έκδοση, πρέπει κάθε φορά να τροποποιηθούν. Η συγκεκριμένη εφαρμογή και η παραγωγή των αποτελεσμάτων που παρατίθενται, έγινε με τη χρήση του mezzo 0.61. Όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για να τρέξει βρίσκονται στο αρχείο parameters.test, στον φάκελο mezzo.

Η βασική απαίτηση του mezzo για να λειτουργεί ορθώς, χωρίς να παράγει σφάλμα, είναι να υπάρχει μέσα στον φάκελο mezzo ένας κενός φάκελος με το όνομα output. Αυτό συμβαίνει διότι, το αρχείο του mezzo το οποίο καλείται test.mezzo και έχει ως λειτουργία τον καθορισμό των ονομάτων όλων των αρχείων που απαιτεί ο mezzo για να λειτουργήσει, ορίζει ανάμεσα σε όλα τα άλλα και ένα αρχείο στο οποίο θα αποθηκεύονται τα αποτελέσματα κάθε τρεξίματος, το οποίο ονομάζεται outflows. Σε αυτό το τμήμα του test.mezzo ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μετονομάσει το συγκεκριμένο αρχείο, ή βέβαια και όποιο άλλο αυτός επιθυμεί, ακριβώς όπως γίνεται και στο main.config του προγράμματος, το οποίο κάνει χρήση των αλγορίθμων που αναφέρθηκε παραπάνω.

Αυτό που πρέπει επίσης να προσέξουμε είναι να ορίσουμε σωστά τα χρονικά διαστήματα στα οποία επιθυμούμε να φορτώνεται η ζήτηση. Η συγκεκριμένη διαδικασία, πέρα από το αρχείο demand.test στο οποίο ορίζουμε επιπλέον τη ζήτηση που θέλουμε να περνάει από κάθε σημείο, αναφέρεται επίσης και στο αρχείο parameters.test. Είναι λοιπόν αναγκαίο να γίνει και σε αυτό το δεύτερο αρχείο η κατάλληλη προσαρμογή καθώς αυτό το αρχείο είναι που ουσιαστικά ορίζει την χρονική διάρκεια του κάθε διαστήματος (interval), τόσο της φάσης της προετοιμασίας όσο και των μετέπειτα. Παρακάτω φαίνεται το τμήμα του parameters.test το οποίο θα πρέπει να τροποποιείται με βάση τη χρονική διάρκεια που επιθυμούμε να έχουν τα διαστήματα (intervals). Επαναλαμβάνεται εδώ πως η συνολική χρονική διάρκεια για την οποία θα εκτελείται το πρόγραμμα, ορίζεται, όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα, μέσα στο αρχείο test.mezzo. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η καινούργια ζήτηση φορτώνεται κάθε 900 sec και το συνολικό χρονικό διάστημα για το οποίο θα εκτελείται το πρόγραμμα είναι 7200 sec.

Για να επιβεβαιωθεί ότι το πρόγραμμα εκτελείται σωστά, ένα τρόπος είναι να γίνει έλεγχος του αρχείου outflows του κάθε διαφορετικού output. Σε αυτά τα αρχεία μπορεί κανείς να διαπιστώσει τον συνολικό αριθμό των διαστημάτων (intervals) για τα οποία εκτελέστηκε η εφαρμογή.

```

27 #moe_parameters
28     moe_speed_update= 900.0
29     moe_inflow_update= 900.0
30     moe_outflow_update= 900.0
31     moe_queue_update= 900.0
32     moe_density_update= 900.0
33     linktime_alpha= 0.6
34 #assignment_matrix_parameters
35     use_ass_matrix= 0
36     ass_link_period= 900.0
37     ass_od_period= 900.0

```

Εικόνα 5.1: Τμήμα του δομικού αρχείου του Mezzo, parameters.test, που αναφέρεται στην χρονική διάρκεια των διαστημάτων (intervals).

5.1.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΝΤΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΙΤΙΕΣ

Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούν μερικά από τα πιο κοινά προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την εκτέλεση της συγκεκριμένης εφαρμογής και θα δοθούν συστάσεις για την αντιμετώπισή τους.

Main.config

Στο συγκεκριμένο αρχείο, όπως έχει αναφερθεί, ορίζεται η διεύθυνση (path) των δεδομένων του προγράμματος αλλά και των αποτελεσμάτων που παράγει. Αν για οποιονδήποτε λόγο έχουν τροποποιηθεί τα ονόματα κάποιων εκ των αρχείων που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα, τότε αυτό είτε δεν θα μπορέσει να εκτελεστεί καθόλου, είτε θα εκτελεστεί αλλά θα παράγει λανθασμένα αποτελέσματα. Στην πρώτη περίπτωση ο χρήστης μπορεί εύκολα να αντιληφθεί ότι κάτι δεν υλοποιείται σωστά ενώ στην δεύτερη είναι, δυστυχώς, πολύ πιθανό να συνεχίσει την εκτέλεση και ως αποτέλεσμα να λάβει αποτελέσματα που αποκλίνουν σημαντικά από τα ορθά. Στο αρχείο αυτό γίνεται ακόμη ο ορισμός των τύπων των πινάκων που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα και ο χρήστης καλείται να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός κατά τη συμπλήρωσή τους.

Πίνακες-Matrices

Οι πίνακες που βρίσκονται σε αυτό το αρχείο χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα κατά το στάδιο της εκτέλεσης. Αν από έναν πίνακα λείπουν κάποιες γραμμές ή στήλες λόγω λάθους εισαγωγής του χρήστη είναι πολύ πιθανό, το πρόγραμμα να

αντικαταστήσει αυτές τις σειρές ή στήλες με μηδενικά και να παράγει για αυτόν τον λόγο λανθασμένα αποτελέσματα.

Μετρήσεις αισθητήρων-Measurements

Στον φάκελο αυτό είναι τοποθετημένο το αρχείο ymeasured4 στο οποίο περιλαμβάνονται οι μετρήσεις ανά σύνδεσμο όπως αυτές έχουν μετρηθεί υποθετικά από τους αισθητήρες. Το αρχείο αυτό είναι απαραίτητο να αποτελείται από τόσες σειρές όσοι είναι και οι αισθητήρες. Στην περίπτωση που εξετάζεται και σύμφωνα με τις υποθέσεις που έχουν γίνει για αυτήν, οι στήλες θα πρέπει να είναι 8 όσα δηλαδή και τα διαστήματα (intervals) που θα υλοποιηθούν. Σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί οποιοδήποτε λάθος κατά την διαδικασία εισαγωγής των στοιχείων, η εφαρμογή, ακολουθώντας, θα παράγει σφάλμα κατά την εκτέλεσή της.

5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΚΦ

Ο αλγόριθμος ΕΚΦ όπως έχει προαναφερθεί, απαιτεί για την εφαρμογή του μία δύσκολη και χρονοβόρα υπολογιστική διαδικασία. Το κύριο στοιχείο αυτής της διαδικασίας είναι το βήμα της γραμμικοποίησης μέσω της οποίας το πρόβλημα της εκτίμησης-πρόβλεψης μητρώων Π-Π από πραγματικό - μη γραμμικό, μετασχηματίζεται σε γραμμικό για καταστεί δυνατή η επίλυσή του.

Για την διερεύνηση της απόδοσης του αλγορίθμου μια ενδιαφέρουσα πρακτική είναι η αλλαγή των τιμών των παραμέτρων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της εκτέλεσης. Αυτές οι παράμετροι είναι δύο ειδών, κυκλοφοριακές παράμετροι και παράμετροι καθορισμού κάποιων συντελεστών της διαδικασίας πρόβλεψης. Οι κυκλοφοριακές παράμετροι που αποτελούν στοιχεία εισόδου αυτού του αλγορίθμου είναι η ζήτηση που εισάγεται στο υπό εξέταση δίκτυο ανά σταθερά χρονικά διαστήματα, καθώς και οι κυκλοφοριακές μετρήσεις που προέρχονται από μετρήσεις αισθητήρων.

Οι παράμετροι καθορισμού συντελεστών της διαδικασίας πρόβλεψης είναι οι πίνακες διακύμανσης των σφαλμάτων και ο παράγοντας δέλτα. Οι πίνακες διακύμανσης των σφαλμάτων αφορούν τα σφάλματα εκτίμησης της ζήτησης που εισάγεται στο δίκτυο (πίνακας Q) και τα σφάλματα εκτίμησης των κυκλοφοριακών μετρήσεων (πίνακας R). Ο παράγοντας δέλτα είναι βασικός συντελεστής της διαδικασίας της γραμμικοποίησης και ορίζει το ποσοστό της ζήτησης το οποίο θα προσθαφαιρείται στις τιμές της ζήτησης για τον προσδιορισμό της σωστής τιμής (Αναλυτικότερα παράγραφος 4.2.2).

Η εκτέλεση του αλγορίθμου για διάφορες τιμές αυτών των παραμέτρων παρέχει στον χρήστη μία αντιπροσωπευτική εικόνα της συμπεριφοράς του αλγορίθμου συναρτήσει αυτών των τιμών. Για παράδειγμα η ζήτηση μπορεί να αυξηθεί και να μειωθεί κατά ποσοστά λογικών κυκλοφοριακών διακυμάνσεων δηλαδή $\pm 10\%$ και $\pm 20\%$. Το ίδιο συμβαίνει και με τις τιμές των κυκλοφοριακών μετρήσεων.

Η διερεύνηση του παράγοντα δέλτα μπορεί να υλοποιηθεί για τις δέκα λογικές τιμές που μπορεί να πάρει η παράμετρος, δεδομένου ότι ένα μικρό ποσοστό της ζήτησης προσθαφαιρείται για να γίνει ομαλή προσέγγιση της σωστής τιμής. Οι δέκα τιμές αυτές είναι $\delta = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10$. Η εκτέλεση του αλγορίθμου για κάθε μία από αυτές τις τιμές βοηθάει το χρήστη να επιλέξει τη σωστή τιμή της παραμέτρου για την ταχύτερη και ακριβέστερη σύγκλιση του αλγορίθμου.

Όσον αφορά στους πίνακες σφαλμάτων, μπορούν να μετασχηματιστούν αλλάζοντας τις τιμές των στοιχείων τους ανάλογα με την εμπιστοσύνη του χρήστη σε κάθε παράμετρο (ζήτηση ή κυκλοφοριακές μετρήσεις). Αυτό γίνεται δίνοντας πιο πολύ βάρος σε ένα από τους δύο αυτούς παράγοντες δηλαδή βάζοντας στους αντίστοιχους πίνακες μικρότερες τιμές. Επίσης όσο αυξάνεται η εμπιστοσύνη για τη μία παράμετρο μειώνεται για την άλλη.

Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί τιμών των συντελεστών οι οποίοι μπορούν να υλοποιηθούν για την κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του. Προτιμήθηκε λοιπόν να γίνει ανεξάρτητη αξιολόγηση για τις τιμές του παράγοντα δέλτα, καθώς και για τους πίνακες Q, R. Με τις τιμές που θα προκύψουν από αυτή τη διαδικασία θα υλοποιηθεί μία σειρά από δοκιμές για τον αλγόριθμο EKF για τις διάφορες τιμές της ζήτησης και των κυκλοφοριακών μετρήσεων.

5.2.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ Q, R

Για την επιλογή της καταλληλότερης τιμής των πινάκων σφαλμάτων μετρήσεων και ζήτησης έγιναν κάποιες δοκιμές για διάφορες τιμές. Αρχικά επιλέχθηκε το συνθετικό δίκτυο 3x3y. Το δίκτυο αυτό είναι αρκετά απλό αλλά είναι ιδανικό για να απεικονίσει το κατά πόσο ένας παράγοντας εισαγωγής είναι έμπιστος ή όχι για την εκτέλεση του αλγορίθμου.

Για τον παράγοντα δέλτα δοκιμάστηκαν κάποιες τιμές αντιπροσωπευτικές του φάσματός του, δηλαδή 0,02 0,05 0,07. Αυτές οι τιμές επιλέχθηκαν ώστε να μην γίνει δοκιμή για όλες τις πιθανές τιμές του παράγοντα δέλτα. Η ζήτηση κυμάνθηκε από -10% έως -50%, ώστε να γίνει ορατή η συμπεριφορά του αλγορίθμου συναρτήσει των πινάκων διακύμανσης του σφάλματος, τόσο σε φυσιολογικές διακυμάνσεις της

ζήτησης, όσο και σε πιο έντονες όπως η μείωσή της κατά 50%. Οι κυκλοφοριακές μετρήσεις προερχόμενες από τους αισθητήρες κυμάνθηκαν σε πιο ήπιες τιμές, από σωστές έως +20%.

ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ (3x3y)						
	ΔΕΛΤΑ	ΖΗΤΗΣΗ	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	ΠΙΝΑΚΕΣ	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ	RMSN
δοκιμή 1	0,05	-10	ΣΩΣΤΕΣ	q100r1	EKF	1%
δοκιμή 2	0,05	-10	ΣΩΣΤΕΣ	q1r100	EKF	10%
δοκιμή 3	0,05	-10	ΣΩΣΤΕΣ	q1r1	EKF	3-4.5%
δοκιμή 4	0,02	-10	ΣΩΣΤΕΣ	q1r1	EKF	2.5-4%
δοκιμή 5	0,07	-10	ΣΩΣΤΕΣ	q1r1	EKF	2.9-3.7%
δοκιμή 6	0,05	-10	(+10)	q1r1	EKF	6.4-6.8%
δοκιμή 7	0,05	-10	-10	q1r1	EKF	0.6-4%
δοκιμή 8	0,05	-20	-10	q1r1	EKF	3.4-5.1%
δοκιμή 9	0,05	-20	-10	q1r1	LimEKF	3.4-5.1%
δοκιμή 10	0,05	-30	-10	q1r1	LimEKF	6.3-8.6%
δοκιμή 11	0,05	-50	-10	q1r1	LimEKF	14.3-18.4%
δοκιμή 12	0,05	-20	(+20)	q1r1	LimEKF	10.9-14.8%
δοκιμή 13	0,05	-20	(+20)	q1r1	EKF	10.9-16.3%

Πίνακας 5.1:Διερεύνηση των πινάκων διακύμανσης της ζήτησης

Όπως είναι λογικό, τα αποτελέσματα εμφανίζουν μεγάλη ευαισθησία στις διάφορες τιμές των πινάκων R, Q. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία θεωρείται ιδανικό να εξετάσουμε αμερόληπτα τους παράγοντες ζήτηση και κυκλοφοριακές μετρήσεις καθώς στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι γνώστες ποιες είναι οι σωστές τιμές και δεν είναι επιθυμητή η διευκόλυνση του προγράμματος. Γι αυτό το λόγο επιλέγονται για την συνέχεια των δοκιμών πίνακες R, Q τύπου Identical.

Σε πιο πραγματικές εφαρμογές είναι λογικό να προσδίδεται περισσότεροι βάρος σε κάποιο από τα δεδομένα για την διαπίστωση της αξιοπιστίας του.

5.2.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΔΕΛΤΑ (Linear Delta Factor)

Για τη διερεύνηση του παράγοντα δέλτα επιλέχθηκε ένα δίκτυο και σταθερές τιμές για τους πίνακες Q, R, την ζήτηση και τις κυκλοφοριακές μετρήσεις. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε το συνθετικό δίκτυο 3x2y, ως πιο αντιπροσωπευτικό των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν στα δίκτυα, καθώς η εκτίμηση και πρόβλεψη

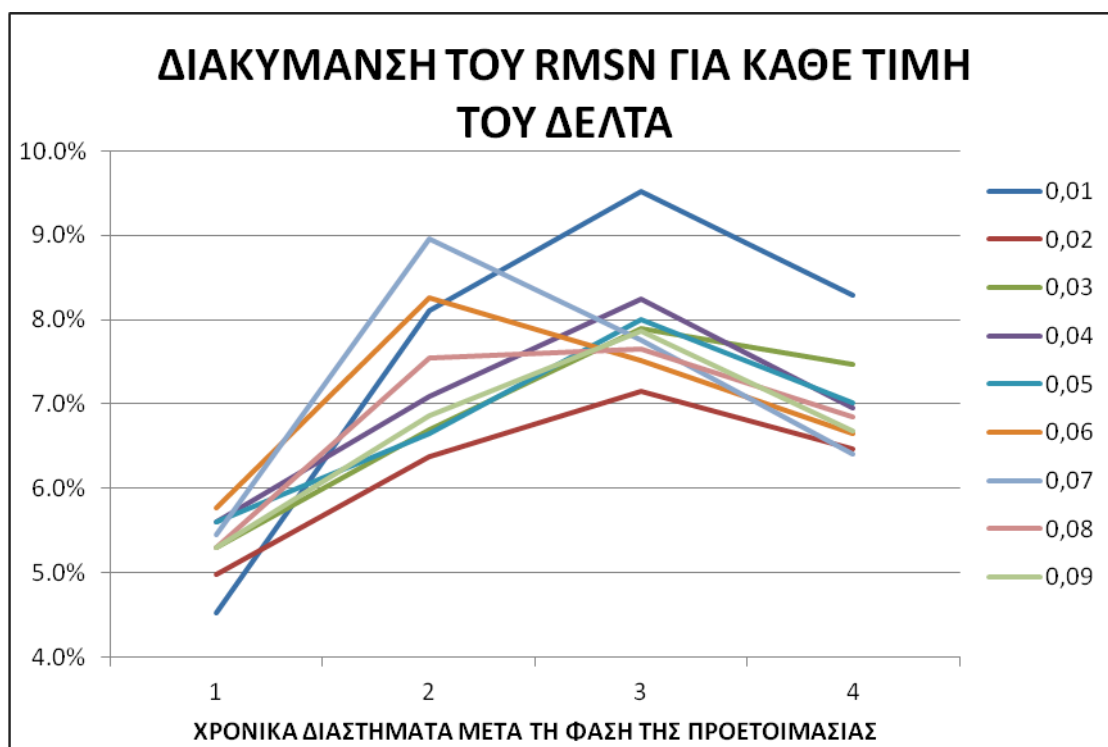
των τιμών των μητρώων Π-Π που το αφορούν, αποτελούν ένα υποκαθορισμένο πρόβλημα με λιγότερα δεδομένα από ότι ζητούμενα.

Οι πίνακες Q, R θεωρήθηκαν τύπου Identical με σκοπό να είναι αμερόληπτοι ως προς τις κυκλοφοριακές μετρήσεις και τη ζήτηση. Για τη ζήτηση θεωρήθηκε μια λογική μείωση της τάξης του 20% από την αρχική τιμή, ενώ οι κυκλοφοριακές μετρήσεις θα έχουν τη σωστή τιμή τους.

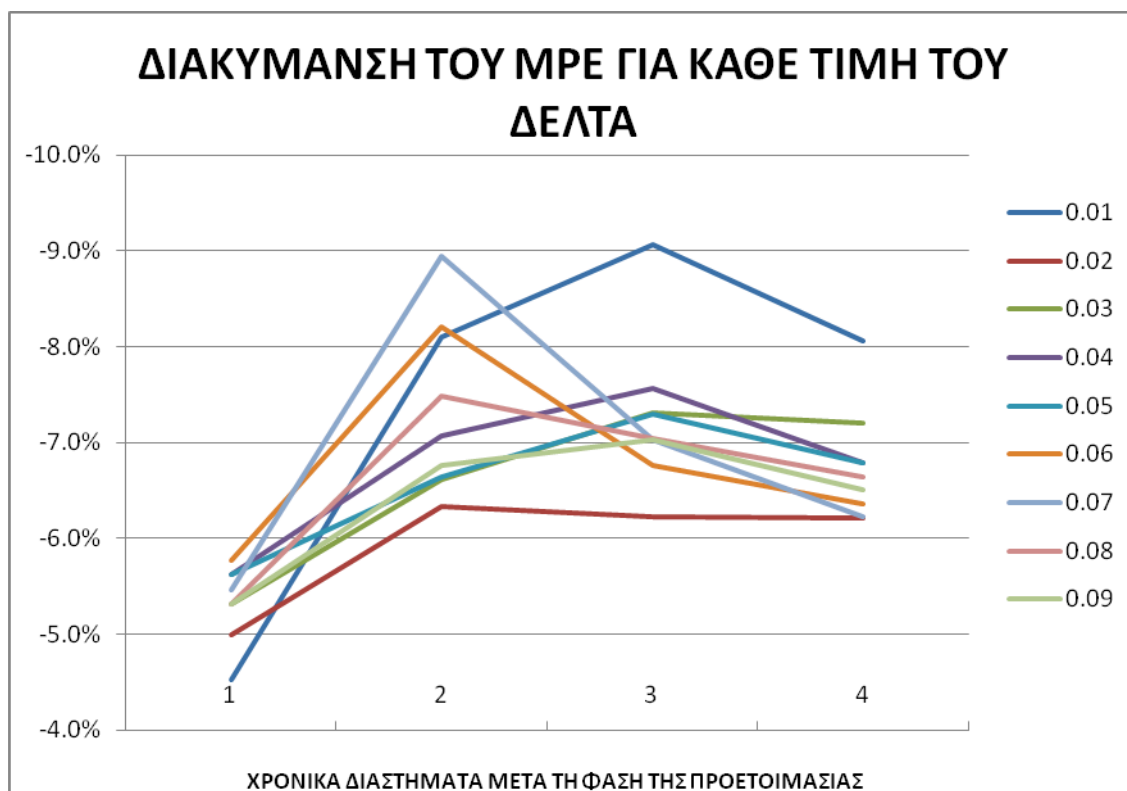
Οι δοκιμές έγιναν για δέκα πιθανές τιμές του παράγοντα δέλτα και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.2.

ΔΙΚΤΥΟ 3x2y			1		2		3		4	
			Διάστημα		Διάστημα		Διάστημα		Διάστημα	
ΖΗΤΗΣΗ	ΔΕΛΤΑ	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
-20%	0,01	0%	4,5%	-4,5%	8,1%	-8,1%	9,5%	-9,1%	8,3%	-8,1%
-20%	0,02	0%	5,0%	-5,0%	6,4%	-6,3%	7,1%	-6,2%	6,5%	-6,2%
-20%	0,03	0%	5,3%	-5,3%	6,7%	-6,6%	7,9%	-7,3%	7,5%	-7,2%
-20%	0,04	0%	5,6%	-5,6%	7,1%	-7,1%	8,3%	-7,6%	7,0%	-6,8%
-20%	0,05	0%	5,6%	-5,6%	6,6%	-6,6%	8,0%	-7,3%	7,0%	-6,8%
-20%	0,06	0%	5,8%	-5,8%	8,3%	-8,2%	7,5%	-6,8%	6,6%	-6,4%
-20%	0,07	0%	5,5%	-5,5%	9,0%	-8,9%	7,8%	-7,0%	6,4%	-6,2%
-20%	0,08	0%	5,3%	-5,3%	7,6%	-7,5%	7,7%	-7,0%	6,8%	-6,6%
-20%	0,09	0%	5,3%	-5,3%	6,9%	-6,8%	7,9%	-7,0%	6,7%	-6,5%

Πίνακας 5.2: Διερεύνηση του παράγοντα δέλτα.



Διάγραμμα 5.1: Διάγραμμα διερεύνησης του παράγοντα δέλτα συναρτήσει της συνδιακύμανσης του δείκτη αποτελεσματικότητας RMSN.



Διάγραμμα 5.2: Διάγραμμα διερεύνησης του παράγοντα δέλτα συναρτήσει της συνδιακύμανσης του δείκτη αποτελεσματικότητας ΜΡΕ.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 5.1, για τις διάφορες τιμές του δέλτα αυξομειώνονται οι δείκτες αποτελεσματικότητας $rmsn$ και mpe . Για τις τιμές του δέλτα 0,04 - 0,07 οι δείκτες αποτελεσματικότητας παρουσιάζουν μία γενικότερη αύξηση σε όλα τα διαστήματα. Για τις υπόλοιπες τιμές του δέλτα οι δείκτες σφάλματος έχουν περίπου την ίδια συμπεριφορά.

Ωστόσο στα δύο διαγράμματα 5.1 και 5.2, όπου γίνεται διερεύνηση του παράγοντα δέλτα συναρτήσει των δύο δεικτών αποτελεσματικότητας $RMSN$ και MPE αντίστοιχα, είναι φανερό ότι παρόλο που και για άλλες τιμές του δέλτα οι τιμές των $RMSN$ και MPE μειώνονται, για την τιμή του δέλτα 0.02 οι δείκτες βρίσκονται στην χαμηλότερη τιμή τους.

Για τις περαιτέρω δοκιμές συμπεριφοράς του αλγορίθμου επιλέγεται επομένως η τιμή δέλτα 0.02.

5.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ EKF

Ο αλγόριθμος EKF είναι ένας από τους πιο αποδοτικούς αλγορίθμους εκτίμησης μοντέλων χώρου – κατάστασης από θέμα ακρίβειας. Ωστόσο το κύριο μειονέκτημά του είναι το βήμα της γραμμικοποίησης που περιλαμβάνει και το οποίο απαιτεί δύσκολους και χρονοβόρους υπολογισμούς.

Στην παρούσα ενότητα θα αναφερθούν αναλυτικά τα αποτελέσματα εκτελέσεων του EKF για συγκεκριμένες τιμές των συντελεστών του αλγορίθμου. Αυτοί οι συντελεστές είναι, όπως έχει προαναφερθεί, η εκτιμημένη ζήτηση, οι κυκλοφοριακές μετρήσεις που προέρχονται από αισθητήρες, ο παράγοντας της γραμμικοποίησης δέλτα και οι πίνακες συνδυακύμανσης των σφαλμάτων της ζήτησης και των μετρήσεων Q , R .

Από τις δοκιμές των δύο πιο πάνω ενοτήτων συμπεραίνεται η χρήση Identical πινάκων συνδυακύμανσης σφάλματος ζήτησης και μετρήσεων, δηλαδή Q και R αντίστοιχα. Επίσης η τιμή του παράγοντα δέλτα (linear delta factor) θα έχει την τιμή 0.02 για τους λόγους που προαναφέρθηκαν.

Όσον αφορά τις διάφορες τιμές της εκτιμημένης ζήτησης και των μετρήσεων από τους αισθητήρες θα γίνουν οι παρακάτω δοκιμές (Πίνακας 5.3). Αυτές οι δοκιμές αντιπροσωπεύουν λογικές διακυμάνσεις των κυκλοφοριακών συνθηκών. Επίσης οι συνδυασμοί αυτοί έχουν επιλεγεί ώστε να είναι αντιπροσωπευτικοί όλων των πιθανών συνδυασμών διακύμανσης της ζήτησης και των μετρήσεων, με σκοπό την καλύτερη αξιολόγηση του αλγορίθμου.

ΑΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΑΡΧΙΚΗ ΖΗΤΗΣΗ	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟΧΟΣ
δοκιμή 1	(+0%d)+0%m	Ακριβής	Ακριβείς
δοκιμή 2	(+0%d)+10%m	Ακριβής	10% υπερεκτίμηση
δοκιμή 3	(+0%d)-10%m	Ακριβής	10% υποεκτίμηση
δοκιμή 4	(+10%d)+0%m	10% υπερεκτίμηση	Ακριβείς
δοκιμή 5	(+10%d)+10%m	10% υπερεκτίμηση	10% υπερεκτίμηση
δοκιμή 6	(+10%d)-10%m	10% υπερεκτίμηση	10% υποεκτίμηση
δοκιμή 7	(-10%d)+0%m	10% υποεκτίμηση	Ακριβείς
δοκιμή 8	(-10%d)+10%m	10% υποεκτίμηση	10% υπερεκτίμηση
δοκιμή 9	(-10%d)-10%m	10% υποεκτίμηση	10% υποεκτίμηση
δοκιμή 10	(+20%d)+0%m	20% υπερεκτίμηση	Ακριβείς
δοκιμή 11	(+20%d)+10%m	20% υπερεκτίμηση	10% υπερεκτίμηση
δοκιμή 12	(+20%d)-10%m	20% υπερεκτίμηση	10% υποεκτίμηση
δοκιμή 13	(-20%d)+0%m	20% υποεκτίμηση	Ακριβείς
δοκιμή 14	(-20%d)+10%m	20% υποεκτίμηση	10% υπερεκτίμηση
δοκιμή 15	(-20%d)-10%m	20% υποεκτίμηση	10% υποεκτίμηση

Πίνακας 5.3: Δεδομένα δοκιμών.

Για κάθε μία από αυτές τις δοκιμές υπολογίζονται τα παρακάτω στοιχεία. (Πίνακας 5.4)

1 interval		2 interval		3 interval		4 interval	
RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE

Πίνακας 5.4: Στοιχεία δοκιμών.

Τα στοιχεία αυτά είναι τα αποτελέσματα του αλγορίθμου εκφρασμένα σε δείκτες αποτελεσματικότητας, για τα χρονικά διαστήματα εκτός της φάσης προετοιμασίας της εκτέλεσης (warm up).

Οι δείκτες αποτελεσματικότητας έχουν τους παρακάτω τύπους υπολογισμού.

$$RMSN = \frac{\sqrt{N \sum_{n=1}^N (Y_n^s - Y_n^o)^2}}{\sum_{n=1}^N Y_n^o} \quad (5.1)$$

$$MPE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\frac{Y_n^s - Y_n^o}{Y_n^o} \right] \quad (5.2)$$

Όπου:

N : το πλήθος των μετρήσεων

Y_n^s : οι προσομοιωμένες μετρήσεις

Y_n^o : οι κυκλοφοριακές μετρήσεις

Έχουν χρησιμοποιηθεί δύο διαφορετικοί δείκτες με σκοπό να έχουμε πλήρη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων καθώς ο κάθε δείκτης έχει τον δικό του τρόπο υπολογισμού και εστιάζει σε διαφορετικά χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων για τον υπολογισμό της απόκλισης από τη σωστή τιμή.

Ο δείκτης αποτελεσματικότητας Κανονικοποιημένης ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, RMSN, ποσοτικοποιεί τη συνολική απόκλιση του υπολογισμού. Αυτός ο τρόπος υπολογισμού απεικονίζει πιο έντονα τα μεγαλύτερα σφάλματα από ότι τα μικρά.

Ο δείκτης αποτελεσματικότητας Μέσο ποσοστιαίο σφάλμα, MPE, απεικονίζει πιο έντονα την ύπαρξη συστηματικών σφαλμάτων τόσο υπερεκτίμησης όσο και υποεκτίμησης των μετρημένων τιμών από τις προσομοιωμένες. Γενικά οι ποσοστιαίοι δείκτες σφάλματος εκφράζουν το μέγεθος των σφαλμάτων σχετικά με το μέσο όρο των μετρήσεων.

Οι παραπάνω δοκιμές του πίνακα 5.3 έγιναν για δύο συνθετικά δίκτυα, για το 3x2y και για το 3x3y.

Όσον αφορά το 3x2y αρχικά εκτελέστηκε ο προσομοιωτής mezzo για τις τέσσερις διαφορετικές τιμές της ζήτησης που προαναφέρθηκαν. Αυτά τα αποτελέσματα είναι ένας εύκολος τρόπος ελέγχου της αποδοτικότητας των αλγορίθμων, καθώς φαίνεται κατά πόσο οι αλγόριθμοι επιτυγχάνουν να διορθώσουν τα λανθασμένα στοιχεία εισόδου. Ο προσομοιωτής mezzo δεν παρέχει καμία διόρθωση και απλά απεικονίζει τη συμπεριφορά του δικτύου στις διαφορετικές τιμές εισαγωγής.

3x2γ	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ (Outflows)				
ΖΗΤΗΣΗ	Κωδικός αισθητήρα	1ο διάστημα εκτίμησης	2ο διάστημα εκτίμησης	3ο διάστημα εκτίμησης	4ο διάστημα εκτίμησης
Σωστή	1	1348	1428	1448	1432
	2	1220	1344	1532	1388
10%	1	1444	1536	1552	1580
	2	1352	1520	1704	1532
	rmsn	9,0%	10,5%	9,5%	10,4%
	mpe	9,0%	10,3%	9,2%	10,4%
-10%	1	1220	1296	1352	1268
	2	1112	1196	1332	1268
	rmsn	9,2%	10,1%	10,5%	10,2%
	mpe	-9,2%	-10,1%	-9,8%	-10,0%
20%	1	1532	1640	1620	1724
	2	1476	1652	1784	1676
	rmsn	17%	19%	14%	21%
	mpe	17%	19%	14%	21%
-20%	1	1092	1144	1196	1112
	2	996	1088	1184	1144
	rmsn	19%	20%	20%	20%
	mpe	-18,7%	-19,5%	-20,1%	-20,0%

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοιωτή mezzo για το 3x2γ.

Στο συγκεκριμένο δίκτυο η ζήτηση που εισάγονταν ανά 900 sec είναι αυτή που περιγράφεται στο διάγραμμα 4.3, δηλαδή κατά τη φάση της προετοιμασίας του δικτύου η μέγιστη ζήτηση ήταν 1200, ενώ εκτός αυτής ήταν 1400.

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του EKF φαίνονται στον πίνακα 5.6.

3x2y - EKF		1 interval		2 interval		3 interval		4 interval	
ΔΟΚΙΜΕΣ	ΖΗΤΗΣΗ/ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
δοκιμή 1	(+0%d)+0%m	0	0	0	0	0	0	0	0
δοκιμή 2	(+0%d)+10%m	2,8%	-2,5%	3,4%	-2,7%	3,6%	-3,5%	3,0%	-2,8%
δοκιμή 3	(+0%d)-10%m	2,9%	2,9%	3,4%	3,4%	4,1%	3,9%	3,9%	3,9%
δοκιμή 4	(+10%d)+0%m	3,1%	3,0%	4,0%	3,9%	2,7%	2,7%	3,4%	3,1%
δοκιμή 5	(+10%d)+10%m	1,6%	-0,7%	2,6%	-0,5%	1,7%	-0,4%	0,2%	0,2%
δοκιμή 6	(+10%d)-10%m	6,9%	6,9%	8,6%	8,5%	8,6%	8,6%	8,0%	8,0%
δοκιμή 7	(-10%d)+0%m	2,8%	-2,8%	3,6%	-3,6%	4,1%	-3,9%	4,9%	-4,8%
δοκιμή 8	(-10%d)+10%m	5,5%	-5,4%	6,6%	-6,3%	6,0%	-5,9%	5,9%	-5,9%
δοκιμή 9	(-10%d)-10%m	0,7%	0,3%	0,5%	0,0%	3,8%	0,9%	1,9%	0,0%
δοκιμή 10	(+20%d)+0%m	5,6%	5,5%	15,0%	14,7%	11,3%	11,2%	20,1%	20,0%
δοκιμή 11	(+20%d)+10%m	2,7%	1,9%	9,1%	8,4%	3,1%	1,9%	4,4%	3,9%
δοκιμή 12	(+20%d)-10%m	9,5%	9,6%	28,2%	28,2%	31,9%	31,6%	40,8%	40,8%
δοκιμή 13	(-20%d)+0%m	5,0%	-5,0%	6,2%	-6,2%	8,5%	-7,8%	8,9%	-8,8%
δοκιμή 14	(-20%d)+10%m	7,0%	-7,0%	9,1%	-8,9%	9,4%	-9,3%	10,5%	-10,5%
δοκιμή 15	(-20%d)-10%m	2,5%	-2,5%	4,4%	-4,3%	5,6%	-3,8%	5,1%	-4,3%

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου EKF για το συνθετικό δίκτυο 3x2y.

Η αξία εκτέλεσης της δοκιμής 1 είναι η επιβεβαίωση ότι η πλατφόρμα υλοποίησης δεν διορθώνει τα ήδη σωστά αποτελέσματα. Συμπεραίνουμε δηλαδή ότι δουλεύει σωστά.

Στα αποτελέσματα του πίνακα φαίνεται ότι ο δείκτης αποτελεσματικότητας MPE παρουσιάζει ομόρροπη συμπεριφορά στις αλλαγές της ζήτησης και αντίρροπη στις αλλαγές των μετρήσεων. Για να γίνει κατανοητή αυτή η λειτουργία του δείκτη αποτελεσματικότητας θα γίνει σχολιασμός δύο εκ των παραπάνω δοκιμών.

Στην δοκιμή 4 εισάγεται στο δίκτυο ζήτηση επαυξημένη κατά το 10% της τιμής της, ενώ οι κυκλοφοριακές μετρήσεις έχουν την αρχική τιμή τους. Κατά την διαδικασία υπολογισμού γίνεται μία προσομοίωση των μετρήσεων με μία αύξηση της τάξης του 10% αλλά και μία διόρθωσή τους από τον αλγόριθμο ο οποίος μειώνει λίγο την τιμή τους δεδομένων των σωστών κυκλοφοριακών μετρήσεων. Γι αυτό το λόγο κατά τον υπολογισμό του MPE ισχύει: (προσομοιωμένες μετρήσεις- σωστές μετρήσεις) > 0 /σωστές μετρήσεις από το οποίο προκύπτει θετικός αριθμός.

Στην δοκιμή 2 εισάγεται στο δίκτυο ζήτηση στην σωστή της τιμή, ενώ οι μετρήσεις είναι επανυξημένες κατά το 10% της τιμής τους. Ο προσομοιωτής με τη σωστή ζήτηση θα αφήσει τις μετρήσεις στη σωστή τους τιμή ενώ ο αλγόριθμος θα τις διορθώσει ώστε να πλησιάσουν την τάση της αύξησης κατά 10%. Συνεπώς κατά τον υπολογισμό του δείκτη αποτελεσματικότητας MPE προκύπτει: (προσομοιωμένες μετρήσεις-σωστές μετρήσεις) < 0 /σωστές μετρήσεις από το οποίο προκύπτει αρνητικός αριθμός.

Μια γενική παρατήρηση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι στις δοκιμές με ομόρροπες τάσεις μεταξύ ζήτησης και μετρήσεων παράγονται καλύτεροι δείκτες αποτελεσματικότητας από ότι στις δοκιμές με αντίρροπες τάσεις. Αυτό συμβαίνει καθώς στις αντίρροπες αλλαγές όπως στην δοκιμή 12, η οποία παρουσιάζει και τα χειρότερα αποτελέσματα του αλγορίθμου για αυτό το δίκτυο, η μείωση της ζήτησης δίνει μία τάση για μείωση των μετρήσεων μέσω της διόρθωσης του αλγορίθμου. Όμως σε αυτή την δοκιμή οι μετρήσεις υποθέτονται με μία αύξηση κατά 10%. Αποτέλεσμα αυτών των δύο ροπών είναι μία αρκετά μεγάλη απόκλιση μεταξύ μετρημένων και προσομοιωμένων κυκλοφοριακών μετρήσεων.

Όπως είναι λογικό η υπερβολικά μεγάλη απόκλιση που εμφανίζεται στο 4^ο διάστημα αυτής της δοκιμής δεν απεικονίζει προβληματική συμπεριφορά του συγκεκριμένου διαστήματος, αλλά αποτελεί φαινόμενο επιπρόσθετου σφάλματος που προέρχεται από τα προηγούμενα διαστήματα. Αυτό συμβαίνει καθώς το κάθε διάστημα χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα του προηγούμενου για την εκτέλεση των υπολογισμών του.

Η παραπάνω έντονη απόκλιση δεν εμφανίζεται στην περίπτωση της δοκιμής 15. Σε αυτή την δοκιμή αν και υπάρχουν οι ίδιες τιμές απόκλισης της ζήτησης και των μετρήσεων από τις πραγματικές τιμές, οι δείκτες αποδοτικότητας είναι πολύ χαμηλότεροι. Αυτό συμβαίνει καθώς η απόκλιση της μίας τιμής (ζήτηση) οδηγεί τον αλγόριθμο προς τη σωστή κατεύθυνση υπολογισμού της τιμής της δεύτερης ομόρροπης απόκλισης. Πιο αναλυτικά, η μείωση της ζήτησης κατά 20% απεικονίζεται από τον προσομοιωτή σαν μία μείωση περίπου της τάξης του 20% για τις κυκλοφοριακές μετρήσεις, ενώ αυτές διορθώνονται από τον αλγόριθμο σε μία μείωση μικρότερη του 20% για τις μετρήσεις. Έτσι οι τελικές προσομοιωμένες τιμές των κυκλοφοριακών μετρήσεων θα είναι αρκετά κοντά στις κυκλοφοριακές μετρήσεις που είναι μειωμένες κατά 10%.

Οι παραπάνω δοκιμές επαναλήφθηκαν για ένα ακόμη συνθετικό δίκτυο, το 3x3y, με μόνη διαφορά την εκτιμημένη ζήτηση. Αυτή η αλλαγή πραγματοποιήθηκε καθώς όπως φαίνεται στον πίνακα 5.5 ο προσομοιωτής mezzo δεν ανταποκρινόταν σωστά κατά το διάστημα 3, δηλαδή δεν παρήγαγε αύξηση της τάξης του 20% που αναμενόταν. Αυτό όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οφείλεται σε υπέρβασή της χωρητικότητας του δικτύου με την τοπική αύξηση της ζήτησης κατά 20%.

Για την αποφυγή τέτοιου φαινομένου, το οποίο είναι πιθανό να επηρεάζει και τα αποτελέσματα των αλγορίθμων, υποτέθηκε μία περαιτέρω μείωση της ζήτησης ή οποία φαίνεται στο διάγραμμα 4.4. Αυτή η μη συμβατότητα στη ζήτηση των δύο συνθετικών δικτύων εμφανίζει το μειονέκτημα της αδυναμίας για την απόλυτη σύγκρισή τους, ωστόσο δεν θεωρείται τόσο σημαντικό όσο η πιθανή υπέρβαση της χωρητικότητας του δικτύου και σε αυτή την περίπτωση.

Τα αποτελέσματα του προσομοιωτή mezzo για αυτό το δίκτυο φαίνονται στον πίνακα 5.7.

3x3y	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ (Outflows)				
ΖΗΤΗΣΗ	Κωδικός συνδέσμων	1ο διάστημα εκτίμησης	2ο διάστημα εκτίμησης	3ο διάστημα εκτίμησης	4ο διάστημα εκτίμησης
Σωστή	1	980	1128	1124	1116
	2	1196	1260	1448	1304
	4	324	384	384	440
10%	1	1092	1244	1224	1272
	2	1292	1356	1616	1388
	4	352	404	452	436
	rmsn	10,4%	9,5%	12,1%	10,7%
	mpe	9,4%	7,7%	12,1%	6,5%
-10%	1	872	996	1052	956
	2	1100	1160	1252	1232
	4	308	360	304	412
	rmsn	10,1%	10,5%	13,1%	10,8%
	mpe	-8,0%	-8,6%	-13,1%	-8,7%
20%	1	1184	1344	1324	1384
	2	1376	1460	1748	1540
	4	380	416	508	476
	rmsn	19%	19%	22%	22%
	mpe	18%	14%	22%	17%
-20%	1	788	848	952	776
	2	976	1068	1112	1152
	4	288	292	300	348
	rmsn	20%	22%	23%	23%
	mpe	-16,4%	-21,3%	-19,0%	-21,0%

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοιωτή mezzo για το 3x3y.

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του EKF για το 3x3y φαίνονται στον πίνακα 5.8.

3x3y - EKF		1ο Διάστημα		2ο Διάστημα		3ο Διάστημα		4ο Διάστημα	
ΔΟΚΙΜΕΣ	ΖΗΤΗΣΗ/ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	(+0%d)+0%m	0	0	0	0	0	0	0	0
Δοκιμή 2	(+0%d)+10%m	4,6%	-3,9%	4,2%	-3,9%	3,1%	-2,7%	5,2%	-4,8%
Δοκιμή 3	(+0%d)-10%m	5,5%	5,7%	4,5%	4,5%	5,8%	2,5%	6,4%	5,4%
Δοκιμή 4	(+10%d)+0%m	3,5%	3,0%	2,9%	2,1%	4,5%	5,3%	6,3%	3,4%
Δοκιμή 5	(+10%d)+10%m	1,8%	-0,5%	1,8%	-0,9%	2,9%	1,6%	3,2%	-1,1%
Δοκιμή 6	(+10%d)-10%m	7,1%	6,7%	8,9%	9,8%	8,4%	8,2%	8,8%	8,8%
Δοκιμή 7	(-10%d)+0%m	2,9%	-2,9%	3,3%	-3,0%	4,8%	-5,6%	4,1%	-2,5%
Δοκιμή 8	(-10%d)+10%m	6,5%	-6,9%	8,5%	-8,3%	8,0%	-7,4%	8,4%	-7,7%
Δοκιμή 9	(-10%d)-10%m	1,2%	0,8%	3,1%	0,2%	4,7%	-2,4%	5,5%	0,5%
Δοκιμή 10	(+20%d)+0%m	7,7%	7,2%	6,6%	5,2%	8,9%	9,8%	7,8%	6,3%
Δοκιμή 11	(+20%d)+10%m	4,1%	3,1%	3,4%	2,2%	4,8%	6,4%	4,6%	1,1%
Δοκιμή 12	(+20%d)-10%m	12,4%	11,7%	12,6%	12,9%	14,3%	16,6%	11,3%	9,3%
Δοκιμή 13	(-20%d)+0%m	5,5%	-4,3%	6,7%	-7,4%	9,9%	-10,2%	8,7%	-7,1%
Δοκιμή 14	(-20%d)+10%m	8,4%	-8,4%	8,0%	-8,4%	10,9%	-11,7%	9,9%	-10,5%
Δοκιμή 15	(-20%d)-10%m	3,2%	-1,5%	4,7%	-5,5%	8,9%	-8,3%	7,9%	-4,1%

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου EKF για το συνθετικό δίκτυο 3x2y.

5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ LimEKF

Η εφαρμογή του αλγορίθμου EKF δίνει αρκετά ικανοποιητικά, από άποψη ακρίβειας, αποτελέσματα, ωστόσο αποτελεί μία αρκετά δύσκολη στον υπολογισμό διαδικασία καθώς περιλαμβάνει το χρονοβόρο τμήμα της γραμμικοποίησης. Για την αποφυγή αυτών των υπολογισμών έχει δημιουργηθεί μία παραλλαγή του αλγορίθμου EKF, η οποία λέγεται Lim EKF. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτού του αλγορίθμου είναι ότι αντί να υπολογίζει τον πίνακα H μέσω του βήματος της γραμμικοποίησης, έχει σαν δεδομένο εισαγωγής για τη διαδικασία εκτέλεσης έναν έτοιμο πίνακα H.

Ο αλγόριθμος αυτός είναι πολύ πιο γρήγορος στην εκτέλεση και όπως θα φανεί και παρακάτω τα αποτελέσματά του πλησιάζουν αρκετά αυτά του EKF.

Κατά την εφαρμογή του Lim EKF θα γίνουν οι ίδιες 15 δοκιμές που εκτελέστηκαν και παραπάνω με σκοπό την πιο άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων. Τα δεδομένα εισαγωγής και εξαγωγής των δύο αλγορίθμων είναι ίδια, εκτός από το πίνακα εισαγωγής H του Lim EKF.

5.3.1 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ H

Ένα ενδιαφέρον ζήτημα που προέκυψε κατά την υλοποίηση του Lim EKF, ήταν η δοκιμή διαφόρων τύπων πίνακα H με σκοπό την σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσμάτων.

Δεδομένου των εκτελέσεων του EKF που έχουν προαναφερθεί και για τις οποίες είναι διαθέσιμα τα αποτελέσματα του πίνακα H υπάρχουν έξι ενδιαφέρουσες δοκιμές διαφορετικών πινάκων H ως στοιχεία εισαγωγής του Lim EKF. Αυτές είναι:

1. Ανά διαστήματα:

- 1a Μέσος όρος των h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4) για τις δοκιμές με ζήτηση +/- 10%, δηλαδή για τις δοκιμές 4, 5, 6.
- 1b Μέσος όρος των h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4) για τις δοκιμές με ζήτηση +/- 20%, δηλαδή για τις δοκιμές 7, 8, 9.
- 1c Μέσος όρος των δύο παραπάνω h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4).

2. Συνολικά:

- 2a. Μέσος όρος των h του 1a, δηλαδή μέσος όρος όλων των διαστημάτων για τις δοκιμές με ζήτηση +/- 10%.
- 2b. Μέσος όρος των h του 1b, δηλαδή μέσος όρος όλων των διαστημάτων για τις δοκιμές με ζήτηση +/- 20%.
- 2c. Μέσος όρος των h του 2a και του 2b, δηλαδή μέσος όρος όλων των διαστημάτων για τις τιμές της ζήτησης +/- 10% και +/- 20%.

Η υλοποίηση όλων των παραπάνω πιθανών πινάκων H για τις 15 δοκιμές είναι μία πολύ χρονοβόρα διαδικασία, γι αυτό επιλέχθηκαν τρεις από αυτούς τους πίνακες H ως οι πιο αντιπροσωπευτικοί αυτής της διαδικασίας.

Επομένως, στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εκτέλεσης του Lim EKF για τα σενάρια 1a, 1b και 2a.

5.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ LimEKF

Αρχικά παρατίθενται τα αποτελέσματα εκτέλεσης του συνθετικού δικτύου **3x2y**. Για τον πρώτο υπολογισμό του πίνακα H (1a) έγινε η διαδικασία που απεικονίζεται στον πίνακα 5.9.

3x2y	h											
	1ο Διάστημα			2ο Διάστημα			3ο Διάστημα			4ο Διάστημα		
Δοκιμή 4	0,26	0,52	0,18	0,24	0,24	0,17	0,11	-0,23	0,61	0,3	0,36	0,66
	0,58	0,39	0,73	0,42	0,73	0,66	0,62	0,34	0,15	0,48	0,61	0,17
Δοκιμή 5	0,26	0,52	0,18	0,3	0,36	0,66	0,45	0,23	0,45	0,42	0,12	0,33
	0,58	0,39	0,73	0,48	0,48	0,5	0,4	0,57	0,15	0,48	0,73	0,5
Δοκιμή 6	0,26	0,52	0,18	0,3	0,48	0,33	0,4	0,8	0,15	0,18	0,48	0,5
	0,58	0,39	0,73	0,48	0,48	0,83	0,34	0	0,76	0,55	0,61	0,17
Δοκιμή 7	0,4	0,63	0,44	0,44	0,44	0,2	0,42	0,83	0,37	0,37	0,3	-0,2
	0,48	0,32	0,67	0,59	0,59	0,81	0,42	0,14	0,37	0,59	0,59	0,61
Δοκιμή 8	0,4	0,63	0,44	0,44	0,59	0,4	0,35	0,28	0,37	0,3	0,3	0,61
	0,48	0,32	0,67	0,37	0,44	0,61	0,49	0,42	0,56	0,67	0,59	0,2
Δοκιμή 9	0,4	0,63	0,44	0,74	0,59	0,4	0,28	0,42	0	0,44	0,59	0,2
	0,48	0,32	0,67	0,22	0,15	0,81	0,56	0,42	0,56	0,52	0,3	0,4
ΔΟΚΙΜΗ 1a												
Μέσος όρος	0,33	0,58	0,31	2,46	0,45	0,36	0,34	0,39	0,33	0,34	0,36	0,35
ΖΗΤΗΣΗ +/-10	0,53	0,36	0,70	0,43	0,48	0,70	0,47	0,32	0,43	0,55	0,57	0,34

Πίνακας 5.9: Υπολογισμός του μέσου όρου των h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4) για τις δοκιμές με ζήτηση +/- 10% (Σενάριο 1a) για το συνθετικό δίκτυο 3x2y.

Κατά τον υπολογισμό του συγκεκριμένου πίνακα H, γίνεται η υπόθεση ότι οι έξι αυτές δοκιμές μπορούν να δώσουν έναν γενικότερο μέσο όρο των επιμέρους πινάκων H, ο οποίος θα είναι αντιπροσωπευτικός και άρα κατάλληλος για περαιτέρω υπολογισμούς. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.9 τα στοιχεία των επιμέρους πινάκων h για κάθε διάστημα έχουν παρόμοιες τιμές και έτσι είναι λογικό να παραχθεί ένας μέσος όρος αυτών των τιμών.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου με δεδομένο τον πίνακα Η της δοκιμής 1α φαίνονται στον πίνακα 5.10.

3x2γ - Lim EKF/ 1a		1ο Διάστημα		2ο Διάστημα		3ο Διάστημα		4ο Διάστημα	
ΔΟΚΙΜΕΣ	ΖΗΤΗΣΗ/ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	(+0%d)+0%m	0	0	0	0	0	0	0	0
Δοκιμή 2	(+0%d)+10%m	3,1%	-3,0%	5,4%	-5,0%	3,5%	-3,4%	3,4%	-3,0%
Δοκιμή 3	(+0%d)-10%m	3,5%	3,4%	5,8%	5,8%	3,9%	3,8%	3,7%	3,7%
Δοκιμή 4	(+10%d)+0%m	3,2%	3,2%	4,0%	3,8%	3,6%	3,3%	3,7%	3,4%
Δοκιμή 5	(+10%d)+10%m	1,4%	-0,5%	2,8%	-0,2%	1,0%	-0,3%	0,3%	-0,3%
Δοκιμή 6	(+10%d)-10%m	6,7%	6,7%	10,8%	10,8%	8,4%	8,4%	7,9%	7,8%
Δοκιμή 7	(-10%d)+0%m	2,8%	-2,8%	4,9%	-4,9%	4,0%	-3,6%	3,6%	-3,4%
Δοκιμή 8	(-10%d)+10%m	5,6%	-5,6%	9,1%	-8,9%	5,9%	-5,9%	6,0%	-6,0%
Δοκιμή 9	(-10%d)-10%m	0,7%	0,3%	0,8%	0,0%	3,4%	0,3%	1,9%	-0,4%
Δοκιμή 10	(+20%d)+0%m	6,2%	6,1%	10,0%	9,9%	10,4%	10,3%	7,1%	7,0%
Δοκιμή 11	(+20%d)+10%m	2,9%	2,2%	5,3%	4,3%	2,9%	1,1%	3,3%	3,3%
Δοκιμή 12	(+20%d)-10%m	10,7%	10,8%	17,2%	17,2%	15,5%	15,4%	11,3%	11,3%
Δοκιμή 13	(-20%d)+0%m	5,6%	-5,6%	9,8%	-9,8%	7,4%	-6,6%	6,6%	-6,4%
Δοκιμή 14	(-20%d)+10%m	8,0%	-7,9%	13,6%	-13,5%	9,1%	-8,9%	8,5%	-8,4%
Δοκιμή 15	(-20%d)-10%m	2,9%	-2,9%	5,6%	-5,5%	5,6%	-4,0%	3,6%	-3,4%

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF του σεναρίου 1α, για το συνθετικό δίκτυο 3x2γ.

Ο υπολογισμός του H του δεύτερου σεναρίου (1b) φαίνεται στον πίνακα 5.11

3x2y	h											
	1ο Διάστημα			2ο Διάστημα			3ο Διάστημα			4ο Διάστημα		
Δοκιμή 10	0,42	0,48	0,17	-0,22	0	0,15	0,47	0,31	0,69	-0,56	0,22	0,3
	0,36	0,48	0,5	-0,17	0,44	0,15	0,52	0,83	0,69	-0,5	-0,11	-0,15
Δοκιμή 11	0,42	0,48	0,17	0,28	-0,22	0,91	0,52	-0,52	0,42	0,39	0,33	0,76
	0,36	0,48	0,5	-0,67	0,44	-0,61	0,36	1,46	0,42	0,44	0,33	0,3
Δοκιμή 12	0,42	0,48	0,17	-0,17	-0,33	-0,15	-0,1	0,21	-1,25	1,17	0	-5,91
	0,36	0,48	0,5	-0,56	0,78	0,61	-0,68	-0,21	0,42	2,28	-0,56	-4,24
Δοκιμή 13	0,54	0,54	0,5	0,5	0,67	0,23	0,63	0,47	0,62	0,5	0,83	0,91
	0,36	0,36	0,25	0,5	0,17	0,45	0,47	0,63	0,62	0,42	0,33	0,45
Δοκιμή 14	0,54	0,54	0,5	0,58	0,67	0,23	0,31	0,31	0,42	0,42	0,33	0,68
	0,36	0,36	0,25	0,42	0,33	0,45	0,55	0,63	0,62	0,75	0,33	0,23
Δοκιμή 15	0,54	0,54	0,5	0,58	1	0,68	0,47	0,47	0,21	0,75	0,5	0,45
	0,36	0,36	0,25	0,33	0	0	0,39	0,47	0,83	0,25	0	0,23
ΔΟΚΙΜΗ 1b												
Μέσος όρος	0,48	0,51	0,34	0,26	0,30	0,34	0,38	0,21	0,19	0,45	0,37	-0,47
ΖΗΤΗΣΗ +/-20	0,36	0,42	0,38	-0,03	0,36	0,18	0,27	0,64	0,60	0,61	0,05	-0,53

Πίνακας 5.11: Υπολογισμός του μέσου όρου των h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4) για τις δοκιμές με ζήτηση +/- 20% (Σενάριο 1b) για το συνθετικό δίκτυο 3x2y.

Και σε αυτή την περίπτωση, οι δοκιμές είναι παρόμοιες μεταξύ τους καθώς αναφέρονται σε μία αυξομείωση της εκτιμημένης ζήτησης κατά ένα ίδιο ποσοστό. Αυτός είναι και ο λόγος του υπολογισμού του μέσου όρου και σε αυτή την περίπτωση των μετρήσεων. Σε αυτή την περίπτωση ωστόσο οι τιμές ανά διάστημα αποκλίνουν αρκετά μεταξύ τους με αποτέλεσμα αυτός ο πίνακας H να είναι ακόμη πιο προσεγγιστικός από τον προηγούμενο.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου με δεδομένο τον πίνακα Η της δοκιμής 1b φαίνονται στον πίνακα 5.12.

3x2y - Lim EKF/ 1b		1ο Διάστημα		2ο Διάστημα		3ο Διάστημα		4ο Διάστημα	
ΔΟΚΙΜΕΣ	ΖΗΤΗΣΗ/ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	(+0%d)+0%m	0	0	0	0	0	0	0	0
Δοκιμή 2	(+0%d)+10%m	2,9%	-2,7%	3,9%	-3,0%	3,2%	-2,9%	6,9%	-6,9%
Δοκιμή 3	(+0%d)-10%m	3,1%	3,1%	4,9%	4,7%	3,1%	2,8%	9,3%	9,2%
Δοκιμή 4	(+10%d)+0%m	3,0%	3,0%	4,2%	4,1%	3,5%	3,5%	7,5%	7,3%
Δοκιμή 5	(+10%d)+10%m	1,3%	-0,3%	2,1%	0,8%	2,2%	-0,4%	0,7%	0,2%
Δοκιμή 6	(+10%d)-10%m	6,2%	6,2%	9,0%	9,0%	6,2%	5,8%	18,3%	18,1%
Δοκιμή 7	(-10%d)+0%m	2,3%	-2,4%	3,6%	-3,6%	3,2%	-2,5%	7,7%	-7,6%
Δοκιμή 8	(-10%d)+10%m	4,7%	-4,7%	7,5%	-7,1%	4,8%	-4,7%	14,6%	-14,5%
Δοκιμή 9	(-10%d)-10%m	0,7%	0,5%	0,6%	-0,3%	3,9%	0,5%	1,4%	0,1%
Δοκιμή 10	(+20%d)+0%m	5,9%	5,8%	8,4%	8,3%	9,2%	8,9%	16,6%	16,6%
Δοκιμή 11	(+20%d)+10%m	3,1%	2,3%	6,0%	5,3%	0,7%	0,3%	9,3%	8,8%
Δοκιμή 12	(+20%d)-10%m	9,7%	9,7%	13,7%	13,7%	13,9%	14,0%	27,1%	27,1%
Δοκιμή 13	(-20%d)+0%m	4,8%	-4,8%	6,7%	-6,6%	6,0%	-4,7%	16,2%	-16,2%
Δοκιμή 14	(-20%d)+10%m	6,7%	-6,7%	9,8%	-9,6%	7,3%	-7,0%	21,8%	-21,7%
Δοκιμή 15	(-20%d)-10%m	2,5%	-2,5%	3,6%	-3,7%	3,8%	-2,2%	9,3%	-9,2%

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF του σεναρίου 1b, για το συνθετικό δίκτυο 3x2y.

Ο υπολογισμός του Η του δεύτερου σεναρίου (2a) φαίνεται στον πίνακα 5.13.

3x2y	h											
	1ο Διάστημα			2ο Διάστημα			3ο Διάστημα			4ο Διάστημα		
ΔΟΚΙΜΗ 1a												
Μέσος όρος	0,33	0,58	0,31	2,46	0,45	0,36	0,34	0,39	0,33	0,34	0,36	0,35
ΖΗΤΗΣΗ +/-10	0,53	0,36	0,70	0,43	0,48	0,70	0,47	0,32	0,43	0,55	0,57	0,34

ΔΟΚΙΜΗ 2a			
Μέσος όρος	0,87	0,44	0,34
των 1a	0,49	0,43	0,54

Πίνακας 5.13: Υπολογισμός του μέσου όρου των h της δοκιμής 1a (Σενάριο 2a) για το συνθετικό δίκτυο 3x2y.

Αυτός ο πίνακας αποτελεί ακόμη πιο έντονη προσέγγιση των επιμέρους πινάκων η, καθώς προκύπτει από τον μέσο όρο των τιμών των η από διαφορετικά διαστήματα. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης αυτής της εκδοχής του αλγορίθμου του LimEKF είναι λογικό να είναι λιγότερο ακριβή, αλλά αυτός ο τρόπος υπολογισμού πίνακα του πίνακα Η σαν δεδομένο εισόδου διευκολύνει κατά πολύ τους υπολογισμούς τέτοιας φύσης προβλημάτων.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου με δεδομένο τον πίνακα Η της δοκιμής 2α φαίνονται στον πίνακα 5.14.

3x2y - Lim EKF/ 2a		1ο Διάστημα		2ο Διάστημα		3ο Διάστημα		4ο Διάστημα	
ΔΟΚΙΜΕΣ	ΖΗΤΗΣΗ/ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	(+0%d)+0%m	0	0	0	0	0	0	0	0
Δοκιμή 2	(+0%d)+10%m	3,6%	-3,4%	4,0%	-3,5%	4,0%	-4,0%	3,3%	-3,3%
Δοκιμή 3	(+0%d)-10%m	4,1%	4,1%	4,2%	4,2%	4,3%	3,9%	3,9%	3,9%
Δοκιμή 4	(+10%d)+0%m	3,6%	3,6%	3,9%	3,7%	3,5%	3,5%	4,2%	4,0%
Δοκιμή 5	(+10%d)+10%m	1,7%	-0,5%	2,3%	0,0%	1,7%	-0,4%	0,4%	-0,1%
Δοκιμή 6	(+10%d)-10%m	7,9%	7,9%	8,9%	8,8%	8,7%	8,7%	8,6%	8,6%
Δοκιμή 7	(-10%d)+0%m	3,3%	-3,3%	3,9%	-3,9%	4,1%	-3,7%	4,1%	-3,8%
Δοκιμή 8	(-10%d)+10%m	6,3%	-6,2%	7,0%	-6,8%	6,9%	-6,9%	7,0%	-7,0%
Δοκιμή 9	(-10%d)-10%m	0,7%	0,5%	0,5%	0,0%	3,6%	0,2%	1,9%	-0,4%
Δοκιμή 10	(+20%d)+0%m	7,1%	7,1%	8,4%	8,3%	10,4%	10,3%	8,4%	8,4%
Δοκιμή 11	(+20%d)+10%m	2,9%	2,3%	6,0%	5,1%	2,8%	0,8%	4,7%	4,4%
Δοκιμή 12	(+20%d)-10%m	11,9%	12,0%	12,9%	12,9%	16,7%	16,6%	12,5%	12,5%
Δοκιμή 13	(-20%d)+0%m	6,2%	-6,2%	7,6%	-7,7%	8,3%	-7,6%	7,8%	-7,6%
Δοκιμή 14	(-20%d)+10%m	8,7%	-8,7%	10,2%	-10,1%	10,5%	-10,4%	10,3%	-10,2%
Δοκιμή 15	(-20%d)-10%m	3,2%	-3,2%	4,0%	-4,0%	5,4%	-4,0%	4,8%	-4,3%

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF του σεναρίου 2α, για το συνθετικό δίκτυο 3x2y.

Οι ίδιες δοκιμές και τα ίδια σενάρια έγιναν και για το συνθετικό δίκτυο **3x3y** με την μειωμένη όμως ζήτηση που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο εφαρμογής του ΕΚΦ. Για τον πρώτο υπολογισμό του πίνακα Η (1a) έγινε η διαδικασία που απεικονίζεται στον πίνακα 5.15.

3x3y	h											
	1ο Διάστημα			2ο Διάστημα			3ο Διάστημα			4ο Διάστημα		
Δοκιμή 4	0,53	0,3	-0,23	0,35	0,56	0,61	0,26	0	0,55	0,35	0,14	-0,2
	0,45	0,3	0,91	0,56	0,28	0,4	0,65	0,65	0,36	0,56	0,7	1,21
	0,08	0	0	0,14	0	0,2	0,13	0	0	0,35	0	0
Δοκιμή 5	0,53	0,3	-0,23	0,42	0,56	0,2	0,52	0,39	0,73	0,28	0,98	0,61
	0,45	0,3	0,91	0,49	0,42	0,61	0,39	0,26	0	0,49	0,14	0,2
	0,08	0	0	0,21	-0,14	0	0,26	0,26	-0,18	0,21	0	-0,2
Δοκιμή 6	0,53	0,3	-0,23	0,35	0,42	0,4	0,19	0,39	0,18	0,42	0,56	0,61
	0,45	0,3	0,91	0,42	0,28	0,61	0,58	0,65	0,18	0,42	0,28	0,4
	0,08	0	0	0	0	0,2	0,19	0	0	0,21	0	-0,81
Δοκιμή 7	0,19	0,56	0,56	0,51	0,51	0	0,24	0,32	0,22	0,6	0,68	0,49
	0,56	0,19	0,56	0,34	0,34	0,74	0,63	0,63	0,44	0,43	0,51	0,74
	0,19	0	0	0	0	-0,25	0,4	-0,32	-0,22	0,34	0	0
Δοκιμή 8	0,19	0,56	0,56	0,6	0,68	0,49	0,48	0,79	0,22	0,43	0,17	0,25
	0,56	0,19	0,56	0,34	0,68	0,25	0,56	0,32	0,22	0,51	0,51	0,74
	0,19	0	0	0,09	0	0	0,24	0	0	0,34	0	0,25
Δοκιμή 9	0,19	0,56	0,56	0,43	0,34	0	0,32	0,32	0	0,43	0,68	0,49
	0,56	0,19	0,56	0,68	0,51	0,25	0,63	0,32	-0,22	0,51	0,17	0,49
	0,19	0	0	0,34	-0,17	0	0,16	-0,16	-0,22	0,34	0	0
ΔΟΚΙΜΗ 1a	0,36	0,43	0,17	0,44	0,51	0,28	0,34	0,37	0,32	0,42	0,54	0,38
Μέσος όρος	0,51	0,25	0,74	0,47	0,42	0,48	0,57	0,47	0,16	0,49	0,39	0,63
ΖΗΤΗΣΗ +/-10	0,14	0,00	0,00	0,13	-0,05	0,03	0,23	-0,04	-0,10	0,30	0,00	-0,13

Πίνακας 5.15:Υπολογισμός του μέσου όρου των h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4) για τις δοκιμές με ζήτηση +/- 10% (Σενάριο 1a) για το συνθετικό δίκτυο 3x3y.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου με δεδομένο τον πίνακα Η της δοκιμής 1a φαίνονται στον πίνακα 5.16.

3x3γ - Lim EKF/ 1a		1ο Διάστημα		2ο Διάστημα		3ο Διάστημα		4ο Διάστημα	
ΔΟΚΙΜΕΣ	ΖΗΤΗΣΗ/ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	(+0%d)+0%m	0	0	0	0	0	0	0	0
Δοκιμή 2	(+0%d)+10%m	3,3%	-3,2%	3,5%	-2,8%	3,3%	-2,1%	5,2%	-5,0%
Δοκιμή 3	(+0%d)-10%m	3,6%	4,7%	4,6%	4,1%	4,2%	1,2%	6,5%	5,3%
Δοκιμή 4	(+10%d)+0%m	2,6%	3,2%	2,8%	1,8%	4,4%	5,0%	4,2%	2,7%
Δοκιμή 5	(+10%d)+10%m	1,9%	-0,2%	2,1%	-0,9%	2,1%	1,0%	3,0%	-2,0%
Δοκιμή 6	(+10%d)-10%m	6,4%	6,6%	8,3%	9,1%	8,2%	6,9%	8,7%	9,9%
Δοκιμή 7	(-10%d)+0%m	2,6%	-2,4%	3,4%	-3,3%	5,4%	-6,5%	3,3%	-2,1%
Δοκιμή 8	(-10%d)+10%m	5,9%	-5,7%	6,3%	-6,4%	6,7%	-6,2%	6,2%	-6,2%
Δοκιμή 9	(-10%d)-10%m	1,4%	1,2%	3,4%	0,2%	5,0%	-1,7%	6,1%	0,4%
Δοκιμή 10	(+20%d)+0%m	6,8%	7,4%	6,5%	6,1%	8,5%	9,0%	7,3%	6,3%
Δοκιμή 11	(+20%d)+10%m	4,0%	3,0%	3,1%	2,4%	5,5%	6,1%	4,0%	1,3%
Δοκιμή 12	(+20%d)-10%m	10,2%	10,9%	12,1%	12,2%	13,1%	13,2%	11,4%	11,1%
Δοκιμή 13	(-20%d)+0%m	5,3%	-5,3%	6,6%	-6,4%	9,7%	-10,4%	6,4%	-6,3%
Δοκιμή 14	(-20%d)+10%m	8,2%	-8,6%	8,9%	-9,4%	10,5%	-11,2%	8,7%	-9,0%
Δοκιμή 15	(-20%d)-10%m	2,9%	-1,8%	4,2%	-4,7%	6,7%	-5,8%	7,0%	-3,9%

Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF του σεναρίου 1a, για το συνθετικό δίκτυο 3x3γ.

Ο υπολογισμός του H του δεύτερου σεναρίου (1b) φαίνεται στον πίνακα 5.17.

3x3y	h											
	1ο Διάστημα			2ο Διάστημα			3ο Διάστημα			4ο Διάστημα		
Δοκιμή 10	0,35	0,56	1,25	0,32	0,51	0,74	0,3	0,48	0,17	0,32	0,51	0,37
	0,63	0,42	-0,21	0,45	0,26	0,37	0,48	0,48	0,67	0,64	0,38	0,74
	0,35	-0,1	-0,21	0,06	-0,13	0	0,24	0	-0,17	0,13	0	0
Δοκιμή 11	0,35	0,56	1,25	0,38	0,64	0	0,3	0,6	0,33	0,45	0,38	0,56
	0,63	0,24	-0,21	0,51	0,38	0,56	0,54	0,48	0,5	0,51	0,51	0,56
	0,35	-0,1	-0,21	0,19	0	0	0,18	-0,12	0,33	0,06	0	0,19
Δοκιμή 12	0,35	0,56	1,25	0,32	0,51	0,56	0,36	0,36	0,5	0,32	0,51	0,74
	0,63	0,42	-0,21	0,45	0,26	0,56	0,48	0,71	0,33	0,45	0,26	0,19
	0,35	-0,1	-0,21	0,06	0,13	0	0,24	0,36	-1,17	0,13	-0,1	0
Δοκιμή 13	0,52	0,62	0	0,29	0,38	0,83	0,18	0,54	1	0,29	0,58	0,28
	0,42	0,42	0,31	0,67	0,58	0,28	0,62	0,36	0,25	0,48	0,58	0,56
	0,1	0	0	0,19	-0,19	0,28	0,18	-0,18	0,75	0,29	-0,2	0
Δοκιμή 14	0,52	0,62	0	0,19	0,38	0,83	0,36	0,36	0,75	0,29	0,38	0,56
	0,42	0,42	0,31	0,67	0,38	0	0,54	0,36	0,25	0,67	0,58	0
	0,1	0	0	0,29	0	0	0,09	-0,18	0	0,48	0,38	0
Δοκιμή 15	0,52	0,62	0	0,29	0,38	0,28	0,09	0,71	0,25	0,38	0,38	0,56
	0,42	0,42	0,31	0,67	0,58	0,56	0,18	0,18	0,75	0,48	0,38	0,28
	0,1	0	0	0,29	0	0	0,18	0	-0,75	0,38	0	0
ΔΟΚΙΜΗ 1b	0,44	0,59	0,625	0,3	0,467	0,54	0,27	0,508	0,5	0,34	0,46	0,512
Μέσος όρος	0,53	0,39	0,05	0,57	0,407	0,388	0,47	0,428	0,458	0,54	0,45	0,388
ΖΗΤΗΣΗ +/-20	0,23	-0,1	-0,11	0,18	-0,03	0,047	0,19	-0,02	-0,17	0,25	0,01	0,032

Πίνακας 5.17: Υπολογισμός του μέσου όρου των h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4) για τις δοκιμές με ζήτηση +/- 20% (Σενάριο 1b) για το συνθετικό δίκτυο 3x3y.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου με δεδομένο τον πίνακα Η της δοκιμής 1b φαίνονται στον πίνακα 5.18.

3x3y - Lim EKF/ 1b		1ο Διάστημα		2ο Διάστημα		3ο Διάστημα		4ο Διάστημα	
ΔΟΚΙΜΕΣ	ΖΗΤΗΣΗ/ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	(+0%d)+0%m	0	0	0	0	0	0	0	0
Δοκιμή 2	(+0%d)+10%m	3,9%	-2,7%	3,7%	-3,7%	3,2%	-2,9%	5,3%	-4,3%
Δοκιμή 3	(+0%d)-10%m	4,2%	4,6%	5,2%	4,9%	4,2%	1,6%	6,4%	5,5%
Δοκιμή 4	(+10%d)+0%m	3,3%	3,6%	2,7%	2,4%	4,2%	5,0%	3,8%	2,8%
Δοκιμή 5	(+10%d)+10%m	1,7%	-0,2%	1,7%	-1,5%	2,1%	2,0%	2,5%	-1,5%
Δοκιμή 6	(+10%d)-10%m	7,4%	7,1%	8,4%	9,1%	9,0%	9,2%	8,0%	8,4%
Δοκιμή 7	(-10%d)+0%m	2,8%	-2,6%	3,5%	-3,4%	6,3%	-7,2%	3,7%	-2,3%
Δοκιμή 8	(-10%d)+10%m	6,3%	-5,9%	6,5%	-6,8%	6,1%	-6,7%	6,3%	-6,1%
Δοκιμή 9	(-10%d)-10%m	1,4%	1,3%	2,5%	0,3%	4,1%	-1,4%	4,3%	0,3%
Δοκιμή 10	(+20%d)+0%m	7,1%	6,8%	6,8%	6,6%	7,3%	8,0%	7,4%	6,5%
Δοκιμή 11	(+20%d)+10%m	3,6%	3,1%	2,7%	2,5%	5,0%	6,6%	3,9%	0,9%
Δοκιμή 12	(+20%d)-10%m	12,0%	11,4%	11,0%	11,3%	12,4%	14,2%	12,5%	11,9%
Δοκιμή 13	(-20%d)+0%m	6,5%	-5,3%	6,4%	-6,9%	9,1%	-10,0%	7,4%	-6,3%
Δοκιμή 14	(-20%d)+10%m	9,1%	-8,7%	9,7%	-10,3%	10,3%	-12,6%	8,7%	-8,7%
Δοκιμή 15	(-20%d)-10%m	3,9%	-1,9%	3,7%	-3,8%	5,8%	-6,1%	7,5%	-5,0%

Πίνακας 5.18: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF του σεναρίου 1b, για το συνθετικό δίκτυο 3x3y.

Ο υπολογισμός του H του δεύτερου σεναρίου (2a) φαίνεται στον πίνακα 5.19.

3x3y	h											
	1ο Διάστημα			2ο Διάστημα			3ο Διάστημα			4ο Διάστημα		
ΔΟΚΙΜΗ 1a Μέσος όρος ΖΗΤΗΣΗ +/-10												
	0,36	0,43	0,17	0,44	0,51	0,28	0,34	0,37	0,32	0,42	0,54	0,38
	0,51	0,25	0,74	0,47	0,42	0,48	0,57	0,47	0,16	0,49	0,39	0,63
	0,14	0,00	0,00	0,13	-0,05	0,03	0,23	-0,04	-0,10	0,30	0,00	-0,13

ΔΟΚΙΜΗ 2a Μέσος όρος των 1a			
	0,39	0,46	0,29
	0,51	0,38	0,50
	0,20	-0,02	-0,05

Πίνακας 5.19: Υπολογισμός του μέσου όρου των h της δοκιμής 1a (Σενάριο 2a) για το συνθετικό δίκτυο 3x3y.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου με δεδομένο τον πίνακα Η της δοκιμής 2α φαίνονται στον πίνακα 5.20.

3x3y - Lim EKF/ 2a		1ο Διάστημα		2ο Διάστημα		3ο Διάστημα		4ο Διάστημα	
ΔΟΚΙΜΕΣ	ΖΗΤΗΣΗ/ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	(+0%d)+0%m	0	0	0	0	0	0	0	0
Δοκιμή 2	(+0%d)+10%m	3,5%	-3,3%	3,7%	-3,1%	3,5%	-2,5%	5,0%	-4,6%
Δοκιμή 3	(+0%d)-10%m	3,9%	5,0%	4,6%	4,2%	4,9%	2,0%	6,4%	5,4%
Δοκιμή 4	(+10%d)+0%m	2,4%	3,0%	2,6%	1,9%	4,1%	5,2%	3,5%	2,2%
Δοκιμή 5	(+10%d)+10%m	2,0%	-0,8%	2,1%	-0,6%	2,9%	1,7%	4,3%	-2,5%
Δοκιμή 6	(+10%d)-10%m	6,4%	6,9%	8,2%	8,7%	7,7%	8,3%	8,2%	8,2%
Δοκιμή 7	(-10%d)+0%m	2,4%	-2,3%	3,2%	-3,3%	5,1%	-5,9%	3,4%	-2,1%
Δοκιμή 8	(-10%d)+10%m	5,8%	-6,2%	6,5%	-6,1%	6,2%	-6,4%	5,8%	-5,5%
Δοκιμή 9	(-10%d)-10%m	1,5%	0,8%	2,8%	0,3%	4,3%	-1,8%	4,7%	0,5%
Δοκιμή 10	(+20%d)+0%m	6,8%	7,0%	5,9%	5,1%	8,3%	9,7%	7,4%	5,8%
Δοκιμή 11	(+20%d)+10%m	3,6%	2,8%	3,3%	2,1%	5,1%	6,2%	4,5%	0,7%
Δοκιμή 12	(+20%d)-10%m	10,2%	10,7%	10,8%	10,8%	11,8%	13,7%	11,0%	10,5%
Δοκιμή 13	(-20%d)+0%m	5,1%	-5,1%	6,9%	-6,3%	10,7%	-11,0%	6,9%	-6,1%
Δοκιμή 14	(-20%d)+10%m	8,2%	-8,6%	8,8%	-9,1%	11,8%	-14,2%	8,7%	-8,4%
Δοκιμή 15	(-20%d)-10%m	2,9%	-1,8%	4,1%	-4,6%	5,8%	-5,8%	6,7%	-4,0%

Πίνακας 5.20: Αποτελέσματα εκτέλεσης αλγορίθμου Lim EKF του σεναρίου 2α, για το συνθετικό δίκτυο 3x3y.

5.4 ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται οι συνολικοί πίνακες αποτελεσμάτων των προηγούμενων εκτελέσεων, οι συγκριτικοί πίνακες των αποτελεσμάτων των αλγορίθμων με τα αποτελέσματα του mezzo, καθώς και συγκριτικοί πίνακες των αποτελεσμάτων του EKF σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των τριών διαφορετικών σεναρίων για τον Lim EKF.

3x2y		Mezzo		EKF		LimEKF 1a		LimEKF 1b		LimEKF 2a	
		RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	Διάστημα 1	0,0%	0,0%	0%	0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Διάστημα 2	0,0%	0,0%	0%	0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Διάστημα 3	0,0%	0,0%	0%	0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Διάστημα 4	0,0%	0,0%	0%	0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Δοκιμή 2	Διάστημα 1	0,0%	0,0%	2,8%	-2,5%	3,1%	-3,0%	2,9%	-2,7%	3,6%	-3,4%
	Διάστημα 2	0,0%	0,0%	3,4%	-2,7%	5,4%	-5,0%	3,9%	-3,0%	4,0%	-3,5%
	Διάστημα 3	0,0%	0,0%	3,6%	-3,5%	3,5%	-3,4%	3,2%	-2,9%	4,0%	-4,0%
	Διάστημα 4	0,0%	0,0%	3,0%	-2,8%	3,4%	-3,0%	6,9%	-6,9%	3,3%	-3,3%
Δοκιμή 3	Διάστημα 1	0,0%	0,0%	2,9%	2,9%	3,5%	3,4%	3,1%	3,1%	4,1%	4,1%
	Διάστημα 2	0,0%	0,0%	3,4%	3,4%	5,8%	5,8%	4,9%	4,7%	4,2%	4,2%
	Διάστημα 3	0,0%	0,0%	4,1%	3,9%	3,9%	3,8%	3,1%	2,8%	4,3%	3,9%
	Διάστημα 4	0,0%	0,0%	3,9%	3,9%	3,7%	3,7%	9,3%	9,2%	3,9%	3,9%
Δοκιμή 4	Διάστημα 1	9,0%	9,0%	3,1%	3,0%	3,2%	3,2%	3,0%	3,0%	3,6%	3,6%
	Διάστημα 2	10,5%	10,3%	4,0%	3,9%	4,0%	3,8%	4,2%	4,1%	3,9%	3,7%
	Διάστημα 3	9,5%	9,2%	2,7%	2,7%	3,6%	3,3%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%
	Διάστημα 4	10,4%	10,4%	3,4%	3,1%	3,7%	3,4%	7,5%	7,3%	4,2%	4,0%
Δοκιμή 5	Διάστημα 1	9,0%	9,0%	1,6%	-0,7%	1,4%	-0,5%	1,3%	-0,3%	1,7%	-0,5%
	Διάστημα 2	10,5%	10,3%	2,6%	-0,5%	2,8%	-0,2%	2,1%	0,8%	2,3%	0,0%
	Διάστημα 3	9,5%	9,2%	1,7%	-0,4%	1,0%	-0,3%	2,2%	-0,4%	1,7%	-0,4%
	Διάστημα 4	10,4%	10,4%	0,2%	0,2%	0,3%	-0,3%	0,7%	0,2%	0,4%	-0,1%
Δοκιμή 6	Διάστημα 1	9,0%	9,0%	6,9%	6,9%	6,7%	6,7%	6,2%	6,2%	7,9%	7,9%
	Διάστημα 2	10,5%	10,3%	8,6%	8,5%	10,8%	10,8%	9,0%	9,0%	8,9%	8,8%
	Διάστημα 3	9,5%	9,2%	8,6%	8,6%	8,4%	8,4%	6,2%	5,8%	8,7%	8,7%
	Διάστημα 4	10,4%	10,4%	8,0%	8,0%	7,9%	7,8%	18,3%	18,1%	8,6%	8,6%
Δοκιμή 7	Διάστημα 1	9,2%	-9,2%	2,8%	-2,8%	2,8%	-2,8%	2,3%	-2,4%	3,3%	-3,3%
	Διάστημα 2	10,1%	-10,1%	3,6%	-3,6%	4,9%	-4,9%	3,6%	-3,6%	3,9%	-3,9%
	Διάστημα 3	10,5%	-9,8%	4,1%	-3,9%	4,0%	-3,6%	3,2%	-2,5%	4,1%	-3,7%
	Διάστημα 4	10,2%	-10,0%	4,9%	-4,8%	3,6%	-3,4%	7,7%	-7,6%	4,1%	-3,8%
Δοκιμή 8	Διάστημα 1	9,2%	-9,2%	5,5%	-5,4%	5,6%	-5,6%	4,7%	-4,7%	6,3%	-6,2%
	Διάστημα 2	10,1%	-10,1%	6,6%	-6,3%	9,1%	-8,9%	7,5%	-7,1%	7,0%	-6,8%
	Διάστημα 3	10,5%	-9,8%	6,0%	-5,9%	5,9%	-5,9%	4,8%	-4,7%	6,9%	-6,9%
	Διάστημα 4	10,2%	-10,0%	5,9%	-5,9%	6,0%	-6,0%	14,6%	-14,5%	7,0%	-7,0%
Δοκιμή 9	Διάστημα 1	9,2%	-9,2%	0,7%	0,3%	0,7%	0,3%	0,7%	0,5%	0,68%	0,46%
	Διάστημα 2	10,1%	-10,1%	0,5%	0,0%	0,8%	0,0%	0,6%	-0,3%	0,52%	0,02%
	Διάστημα 3	10,5%	-9,8%	3,8%	0,9%	3,4%	0,3%	3,9%	0,5%	3,58%	0,18%
	Διάστημα 4	10,2%	-10,0%	1,9%	0,0%	1,9%	-0,4%	1,4%	0,1%	1,93%	-0,36%

Πίνακας 5.21: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για το συνθετικό δίκτυο 3x2y.

3x2y		Mezzo		EKF		LimEKF 1a		LimEKF 1b		LimEKF 2a	
		RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 10	Διάστημα 1	17,4%	17,3%	5,6%	5,5%	6,2%	6,1%	5,9%	5,8%	7,1%	7,1%
	Διάστημα 2	19,1%	18,9%	15,0%	14,7%	10,0%	9,9%	8,4%	8,3%	8,4%	8,3%
	Διάστημα 3	14,5%	14,2%	11,3%	11,2%	10,4%	10,3%	9,2%	8,9%	10,4%	10,3%
	Διάστημα 4	20,6%	20,6%	20,1%	20,0%	7,1%	7,0%	16,6%	16,6%	8,4%	8,4%
Δοκιμή 11	Διάστημα 1	17,4%	17,3%	2,7%	1,9%	2,9%	2,2%	3,1%	2,3%	2,9%	2,3%
	Διάστημα 2	19,1%	18,9%	9,1%	8,4%	5,3%	4,3%	6,0%	5,3%	6,0%	5,1%
	Διάστημα 3	14,5%	14,2%	3,1%	1,9%	2,9%	1,1%	0,7%	0,3%	2,8%	0,8%
	Διάστημα 4	20,6%	20,6%	4,4%	3,9%	3,3%	3,3%	9,3%	8,8%	4,7%	4,4%
Δοκιμή 12	Διάστημα 1	17,4%	17,3%	9,5%	9,6%	10,7%	10,8%	9,7%	9,7%	11,9%	12,0%
	Διάστημα 2	19,1%	18,9%	28,2%	28,2%	17,2%	17,2%	13,7%	13,7%	12,9%	12,9%
	Διάστημα 3	14,5%	14,2%	31,9%	31,6%	15,5%	15,4%	13,9%	14,0%	16,7%	16,6%
	Διάστημα 4	20,6%	20,6%	40,8%	40,8%	11,3%	11,3%	27,1%	27,1%	12,5%	12,5%
Δοκιμή 13	Διάστημα 1	18,7%	-18,7%	5,0%	-5,0%	5,6%	-5,6%	4,8%	-4,8%	6,2%	-6,2%
	Διάστημα 2	19,5%	-19,5%	6,2%	-6,2%	9,8%	-9,8%	6,7%	-6,6%	7,6%	-7,7%
	Διάστημα 3	20,4%	-20,1%	8,5%	-7,8%	7,4%	-6,6%	6,0%	-4,7%	8,3%	-7,6%
	Διάστημα 4	20,2%	-20,0%	8,9%	-8,8%	6,6%	-6,4%	16,2%	-16,2%	7,8%	-7,6%
Δοκιμή 14	Διάστημα 1	18,7%	-18,7%	7,0%	-7,0%	8,0%	-7,9%	6,7%	-6,7%	8,7%	-8,7%
	Διάστημα 2	19,5%	-19,5%	9,1%	-8,9%	13,6%	-13,5%	9,8%	-9,6%	10,2%	-10,1%
	Διάστημα 3	20,4%	-20,1%	9,4%	-9,3%	9,1%	-8,9%	7,3%	-7,0%	10,5%	-10,4%
	Διάστημα 4	20,2%	-20,0%	10,5%	-10,5%	8,5%	-8,4%	21,8%	-21,7%	10,3%	-10,2%
Δοκιμή 15	Διάστημα 1	18,7%	-18,7%	2,5%	-2,5%	2,9%	-2,9%	2,5%	-2,5%	3,2%	-3,2%
	Διάστημα 2	19,5%	-19,5%	4,4%	-4,3%	5,6%	-5,5%	3,6%	-3,7%	4,0%	-4,0%
	Διάστημα 3	20,4%	-20,1%	5,6%	-3,8%	5,6%	-4,0%	3,8%	-2,2%	5,4%	-4,0%
	Διάστημα 4	20,2%	-20,0%	5,1%	-4,3%	3,6%	-3,4%	9,3%	-9,2%	4,8%	-4,3%

Πίνακας 5.22: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για το συνθετικό δίκτυο 3x2y. (συνέχεια από 5.21)

3x2y		Mezzo		EKF		LimEKF 1a		LimEKF 1b		LimEKF 2a	
		RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	Διάστημα 1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Δοκιμή 2	Διάστημα 1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Δοκιμή 3	Διάστημα 1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Δοκιμή 4	Διάστημα 1	—	—	66%	66%	65%	65%	67%	67%	60%	60%
	Διάστημα 2	—	—	62%	62%	62%	63%	60%	61%	63%	65%
	Διάστημα 3	—	—	72%	71%	63%	64%	63%	62%	63%	62%
	Διάστημα 4	—	—	67%	70%	64%	67%	28%	30%	59%	61%
Δοκιμή 5	Διάστημα 1	—	—	82%	107%	84%	106%	85%	103%	81%	106%
	Διάστημα 2	—	—	75%	105%	73%	102%	80%	92%	79%	100%
	Διάστημα 3	—	—	82%	104%	89%	104%	77%	104%	82%	104%
	Διάστημα 4	—	—	98%	98%	97%	103%	93%	98%	96%	101%
Δοκιμή 6	Διάστημα 1	—	—	23%	23%	25%	25%	31%	31%	12%	11%
	Διάστημα 2	—	—	19%	17%	-2%	-4%	14%	13%	16%	14%
	Διάστημα 3	—	—	9%	6%	12%	8%	35%	37%	8%	5%
	Διάστημα 4	—	—	23%	23%	24%	24%	-77%	-75%	17%	17%
Δοκιμή 7	Διάστημα 1	—	—	69%	70%	69%	70%	75%	74%	64%	64%
	Διάστημα 2	—	—	64%	64%	52%	52%	64%	64%	61%	62%
	Διάστημα 3	—	—	61%	61%	62%	64%	69%	75%	61%	62%
	Διάστημα 4	—	—	52%	52%	65%	66%	24%	24%	59%	62%
Δοκιμή 8	Διάστημα 1	—	—	41%	41%	40%	39%	49%	49%	32%	32%
	Διάστημα 2	—	—	35%	38%	10%	12%	26%	30%	31%	33%
	Διάστημα 3	—	—	43%	40%	44%	40%	54%	52%	34%	30%
	Διάστημα 4	—	—	42%	42%	41%	40%	-43%	-44%	31%	30%
Δοκιμή 9	Διάστημα 1	—	—	92%	103%	92%	103%	93%	105%	93%	105%
	Διάστημα 2	—	—	95%	100%	92%	100%	94%	97%	95%	100%
	Διάστημα 3	—	—	64%	109%	67%	103%	63%	105%	66%	102%
	Διάστημα 4	—	—	81%	100%	81%	96%	86%	101%	81%	96%

Πίνακας 5.23: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμων με το Mezzo για το συνθετικό δίκτυο 3x2y.

3x2y		Mezzo		EKF		LimEKF 1a		LimEKF 1b		LimEKF 2a	
		RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 10	Διάστημα 1	—	—	68%	68%	64%	65%	66%	66%	59%	59%
	Διάστημα 2	—	—	21%	22%	48%	48%	56%	56%	56%	56%
	Διάστημα 3	—	—	22%	21%	28%	27%	36%	37%	28%	27%
	Διάστημα 4	—	—	2%	3%	65%	66%	19%	19%	59%	59%
Δοκιμή 11	Διάστημα 1	—	—	84%	89%	83%	87%	82%	86%	83%	87%
	Διάστημα 2	—	—	52%	56%	72%	77%	68%	72%	69%	73%
	Διάστημα 3	—	—	79%	86%	80%	92%	95%	98%	80%	94%
	Διάστημα 4	—	—	78%	81%	84%	84%	55%	57%	77%	78%
Δοκιμή 12	Διάστημα 1	—	—	45%	45%	38%	38%	44%	44%	31%	31%
	Διάστημα 2	—	—	-48%	-49%	10%	9%	28%	28%	33%	32%
	Διάστημα 3	—	—	-121%	-123%	-7%	-9%	4%	1%	-15%	-17%
	Διάστημα 4	—	—	-98%	-98%	45%	45%	-32%	-32%	39%	39%
Δοκιμή 13	Διάστημα 1	—	—	73%	73%	70%	70%	74%	74%	67%	67%
	Διάστημα 2	—	—	68%	68%	50%	50%	65%	66%	61%	61%
	Διάστημα 3	—	—	58%	61%	63%	67%	71%	76%	60%	62%
	Διάστημα 4	—	—	56%	56%	67%	68%	20%	19%	61%	62%
Δοκιμή 14	Διάστημα 1	—	—	63%	63%	57%	57%	64%	64%	54%	54%
	Διάστημα 2	—	—	53%	54%	31%	30%	50%	51%	48%	48%
	Διάστημα 3	—	—	54%	54%	55%	55%	64%	65%	48%	48%
	Διάστημα 4	—	—	48%	47%	58%	58%	-8%	-9%	49%	49%
Δοκιμή 15	Διάστημα 1	—	—	87%	86%	85%	85%	87%	86%	83%	83%
	Διάστημα 2	—	—	78%	78%	71%	71%	81%	81%	80%	80%
	Διάστημα 3	—	—	72%	81%	72%	80%	81%	89%	73%	80%
	Διάστημα 4	—	—	75%	78%	82%	83%	54%	54%	76%	78%

Πίνακας 5.24: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμων με το Mezzo για το συνθετικό δίκτυο 3x2y.
(συνέχεια από 5.23)

3x2y		EKF		LimEKF 1a		LimEKF 1b		LimEKF 2a	
		RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	Διάστημα 1	-	-	-	-	-	-	-	-
	Διάστημα 2	-	-	-	-	-	-	-	-
	Διάστημα 3	-	-	-	-	-	-	-	-
	Διάστημα 4	-	-	-	-	-	-	-	-
Δοκιμή 2	Διάστημα 1	-	-	-10,40%	-17,60%	-3,10%	-5,90%	-28,90%	-33,50%
	Διάστημα 2	-	-	-60,90%	-81,50%	-15,50%	-9,00%	-20,20%	-28,80%
	Διάστημα 3	-	-	2,60%	3,40%	10,90%	17,00%	-12,40%	-13,80%
	Διάστημα 4	-	-	-15,00%	-9,10%	-134,70%	-149,80%	-11,50%	-19,10%
Δοκιμή 3	Διάστημα 1	-	-	-20,40%	-19,10%	-6,60%	-6,40%	-42,70%	-42,60%
	Διάστημα 2	-	-	-71,30%	-70,20%	-43,00%	-36,50%	-24,50%	-23,10%
	Διάστημα 3	-	-	4,80%	0,40%	24,30%	27,20%	-3,10%	-0,20%
	Διάστημα 4	-	-	5,70%	4,30%	-134,80%	-138,30%	1,90%	0,30%
Δοκιμή 4	Διάστημα 1	-	-	-3,80%	-4,90%	2,10%	0,50%	-18,10%	-20,30%
	Διάστημα 2	-	-	-1,40%	3,10%	-6,10%	-4,00%	0,50%	6,70%
	Διάστημα 3	-	-	-32,20%	-24,10%	-29,70%	-30,70%	-29,40%	-30,40%
	Διάστημα 4	-	-	-7,60%	-9,00%	-117,80%	-131,10%	-23,00%	-27,10%
Δοκιμή 5	Διάστημα 1	-	-	11,60%	20,10%	17,30%	62,30%	-4,40%	22,20%
	Διάστημα 2	-	-	-8,40%	56,30%	17,30%	269,70%	12,50%	107,50%
	Διάστημα 3	-	-	41,10%	5,80%	-27,80%	-3,90%	0,00%	0,00%
	Διάστημα 4	-	-	-49,40%	266,00%	-189,60%	6,10%	-68,70%	136,10%
Δοκιμή 6	Διάστημα 1	-	-	2,70%	2,70%	10,40%	10,30%	-14,70%	-14,80%
	Διάστημα 2	-	-	-26,00%	-26,50%	-5,30%	-5,90%	-3,70%	-3,80%
	Διάστημα 3	-	-	2,40%	2,00%	28,00%	32,50%	-1,10%	-1,50%
	Διάστημα 4	-	-	1,20%	1,90%	-129,40%	-127,00%	-7,40%	-7,70%
Δοκιμή 7	Διάστημα 1	-	-	0,00%	0,00%	17,00%	15,90%	-16,10%	-17,60%
	Διάστημα 2	-	-	-35,90%	-35,80%	-0,60%	0,50%	-8,00%	-7,70%
	Διάστημα 3	-	-	1,30%	7,30%	20,30%	35,40%	-0,30%	3,80%
	Διάστημα 4	-	-	26,10%	29,60%	-59,50%	-58,70%	14,80%	20,90%
Δοκιμή 8	Διάστημα 1	-	-	-1,80%	-3,00%	13,20%	13,00%	-15,40%	-15,80%
	Διάστημα 2	-	-	-38,20%	-41,90%	-13,80%	-12,30%	-6,80%	-8,50%
	Διάστημα 3	-	-	0,80%	0,30%	19,50%	20,40%	-15,90%	-16,30%
	Διάστημα 4	-	-	-2,00%	-2,00%	-147,10%	-146,60%	-19,50%	-19,70%
Δοκιμή 9	Διάστημα 1	-	-	0,00%	0,00%	8,60%	-55,20%	8,59%	-55,15%
	Διάστημα 2	-	-	-61,20%	39,50%	-13,20%	1313,20%	0,00%	0,00%
	Διάστημα 3	-	-	10,00%	65,30%	-2,00%	47,90%	6,22%	80,99%
	Διάστημα 4	-	-	-2,10%	-643,30%	24,90%	306,50%	-2,06%	-643,35%

Πίνακας 5.25: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμου LimEKF με τα αποτελέσματα του EKF για το συνθετικό δίκτυο 3x2y.

3x2y		EKF		LimEKF 1a		LimEKF 1b		LimEKF 2a	
		RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 10	Διάστημα 1	-	-	-11,00%	-11,30%	-5,50%	-5,70%	-28,60%	-28,60%
	Διάστημα 2	-	-	33,60%	32,80%	44,20%	43,70%	43,80%	43,60%
	Διάστημα 3	-	-	8,50%	7,90%	18,60%	20,20%	7,80%	8,10%
	Διάστημα 4	-	-	64,60%	65,20%	17,60%	17,10%	58,20%	58,20%
Δοκιμή 11	Διάστημα 1	-	-	-7,30%	-14,90%	-14,70%	-22,70%	-7,60%	-21,90%
	Διάστημα 2	-	-	41,80%	48,90%	33,90%	36,50%	34,80%	39,50%
	Διάστημα 3	-	-	4,80%	44,40%	77,80%	85,20%	7,60%	56,90%
	Διάστημα 4	-	-	25,90%	15,70%	-108,90%	-125,30%	-6,10%	-13,40%
Δοκιμή 12	Διάστημα 1	-	-	-12,50%	-12,70%	-1,60%	-1,70%	-25,00%	-25,30%
	Διάστημα 2	-	-	39,00%	39,00%	51,50%	51,40%	54,30%	54,30%
	Διάστημα 3	-	-	51,60%	51,20%	56,30%	55,80%	47,80%	47,40%
	Διάστημα 4	-	-	72,30%	72,30%	33,50%	33,60%	69,20%	69,20%
Δοκιμή 13	Διάστημα 1	-	-	-12,50%	-12,50%	3,10%	3,00%	-25,00%	-25,00%
	Διάστημα 2	-	-	-58,20%	-58,10%	-8,60%	-6,50%	-23,20%	-23,30%
	Διάστημα 3	-	-	12,40%	15,50%	29,90%	39,60%	2,90%	3,40%
	Διάστημα 4	-	-	25,90%	27,60%	-82,80%	-84,00%	12,20%	13,00%
Δοκιμή 14	Διάστημα 1	-	-	-14,30%	-14,20%	4,00%	4,10%	-24,00%	-24,70%
	Διάστημα 2	-	-	-49,40%	-51,90%	-7,90%	-7,20%	-12,00%	-13,50%
	Διάστημα 3	-	-	3,30%	4,00%	22,30%	25,20%	-11,70%	-11,80%
	Διάστημα 4	-	-	18,70%	19,80%	-107,80%	-106,40%	2,30%	2,50%
Δοκιμή 15	Διάστημα 1	-	-	-14,60%	-13,10%	0,00%	0,00%	-28,30%	-26,80%
	Διάστημα 2	-	-	-28,70%	-30,10%	16,80%	14,40%	9,30%	7,10%
	Διάστημα 3	-	-	0,00%	-4,00%	33,10%	42,00%	3,50%	-4,20%
	Διάστημα 4	-	-	30,10%	21,50%	-82,60%	-114,40%	5,90%	-0,20%

Πίνακας 5.26: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμου LimEKF με τα αποτελέσματα του EKF για το συνθετικό δίκτυο 3x2y. (συνέχεια από 5.25)

3x3y		Mezzo		EKF		LimEKF 1a		LimEKF 1b		LimEKF 2a	
		RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	Διάστημα 1	0,0%	0,0%	0%	0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Διάστημα 2	0,0%	0,0%	0%	0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Διάστημα 3	0,0%	0,0%	0%	0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Διάστημα 4	0,0%	0,0%	0%	0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Δοκιμή 2	Διάστημα 1	0,0%	0,0%	4,6%	-3,9%	3,3%	-3,2%	3,9%	-2,7%	3,5%	-3,3%
	Διάστημα 2	0,0%	0,0%	4,2%	-3,9%	3,5%	-2,8%	3,7%	-3,7%	3,7%	-3,1%
	Διάστημα 3	0,0%	0,0%	3,1%	-2,7%	3,3%	-2,1%	3,2%	-2,9%	3,5%	-2,5%
	Διάστημα 4	0,0%	0,0%	5,2%	-4,8%	5,2%	-5,0%	5,3%	-4,3%	5,0%	-4,6%
Δοκιμή 3	Διάστημα 1	0,0%	0,0%	5,5%	5,7%	3,6%	4,7%	4,2%	4,6%	3,9%	5,0%
	Διάστημα 2	0,0%	0,0%	4,5%	4,5%	4,6%	4,1%	5,2%	4,9%	4,6%	4,2%
	Διάστημα 3	0,0%	0,0%	5,8%	2,5%	4,2%	1,2%	4,2%	1,6%	4,9%	2,0%
	Διάστημα 4	0,0%	0,0%	6,4%	5,4%	6,5%	5,3%	6,4%	5,5%	6,4%	5,4%
Δοκιμή 4	Διάστημα 1	10,4%	9,4%	3,5%	3,0%	2,6%	3,2%	3,3%	3,6%	2,4%	3,0%
	Διάστημα 2	9,5%	7,7%	2,9%	2,1%	2,8%	1,8%	2,7%	2,4%	2,6%	1,9%
	Διάστημα 3	12,1%	12,1%	4,5%	5,3%	4,4%	5,0%	4,2%	5,0%	4,1%	5,2%
	Διάστημα 4	10,7%	6,5%	6,3%	3,4%	4,2%	2,7%	3,8%	2,8%	3,5%	2,2%
Δοκιμή 5	Διάστημα 1	10,4%	9,4%	1,8%	-0,5%	1,9%	-0,2%	1,7%	-0,2%	2,0%	-0,8%
	Διάστημα 2	9,5%	7,7%	1,8%	-0,9%	2,1%	-0,9%	1,7%	-1,5%	2,1%	-0,6%
	Διάστημα 3	12,1%	12,1%	2,9%	1,6%	2,1%	1,0%	2,1%	2,0%	2,9%	1,7%
	Διάστημα 4	10,7%	6,5%	3,2%	-1,1%	3,0%	-2,0%	2,5%	-1,5%	4,3%	-2,5%
Δοκιμή 6	Διάστημα 1	10,4%	9,4%	7,1%	6,7%	6,4%	6,6%	7,4%	7,1%	6,4%	6,9%
	Διάστημα 2	9,5%	7,7%	8,9%	9,8%	8,3%	9,1%	8,4%	9,1%	8,2%	8,7%
	Διάστημα 3	12,1%	12,1%	8,4%	8,2%	8,2%	6,9%	9,0%	9,2%	7,7%	8,3%
	Διάστημα 4	10,7%	6,5%	8,8%	8,8%	8,7%	9,9%	8,0%	8,4%	8,2%	8,2%

Πίνακας 5.27: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για το συνθετικό δίκτυο 3x3y.

3x3y		Mezzo		EKF		LimEKF 1a		LimEKF 1b		LimEKF 2a	
		RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 7	Διάστημα 1	10,1%	-8,0%	2,9%	-2,9%	2,6%	-2,4%	2,8%	-2,6%	2,4%	-2,3%
	Διάστημα 2	10,5%	-8,6%	3,3%	-3,0%	3,4%	-3,3%	3,5%	-3,4%	3,2%	-3,3%
	Διάστημα 3	13,1%	-13,1%	4,8%	-5,6%	5,4%	-6,5%	6,3%	-7,2%	5,1%	-5,9%
	Διάστημα 4	10,8%	-8,7%	4,1%	-2,5%	3,3%	-2,1%	3,7%	-2,3%	3,4%	-2,1%
Δοκιμή 8	Διάστημα 1	10,1%	-8,0%	6,5%	-6,9%	5,9%	-5,7%	6,3%	-5,9%	5,8%	-6,2%
	Διάστημα 2	10,5%	-8,6%	8,5%	-8,3%	6,3%	-6,4%	6,5%	-6,8%	6,5%	-6,1%
	Διάστημα 3	13,1%	-13,1%	8,0%	-7,4%	6,7%	-6,2%	6,1%	-6,7%	6,2%	-6,4%
	Διάστημα 4	10,8%	-8,7%	8,4%	-7,7%	6,2%	-6,2%	6,3%	-6,1%	5,8%	-5,5%
Δοκιμή 9	Διάστημα 1	10,1%	-8,0%	1,2%	0,8%	1,4%	1,2%	1,4%	1,3%	1,55%	0,76%
	Διάστημα 2	10,5%	-8,6%	3,1%	0,2%	3,4%	0,2%	2,5%	0,3%	2,84%	0,32%
	Διάστημα 3	13,1%	-13,1%	4,7%	-2,4%	5,0%	-1,7%	4,1%	-1,4%	4,25%	-1,77%
	Διάστημα 4	10,8%	-8,7%	5,5%	0,5%	6,1%	0,4%	4,3%	0,3%	4,69%	0,50%
Δοκιμή 10	Διάστημα 1	19,2%	17,7%	7,7%	7,2%	6,8%	7,4%	7,1%	6,8%	6,8%	7,0%
	Διάστημα 2	18,5%	14,5%	6,6%	5,2%	6,5%	6,1%	6,8%	6,6%	5,9%	5,1%
	Διάστημα 3	22,3%	22,3%	8,9%	9,8%	8,5%	9,0%	7,3%	8,0%	8,3%	9,7%
	Διάστημα 4	21,7%	16,8%	7,8%	6,3%	7,3%	6,3%	7,4%	6,5%	7,4%	5,8%
Δοκιμή 11	Διάστημα 1	19,2%	17,7%	4,1%	3,1%	4,0%	3,0%	3,6%	3,1%	3,6%	2,8%
	Διάστημα 2	18,5%	14,5%	3,4%	2,2%	3,1%	2,4%	2,7%	2,5%	3,3%	2,1%
	Διάστημα 3	22,3%	22,3%	4,8%	6,4%	5,5%	6,1%	5,0%	6,6%	5,1%	6,2%
	Διάστημα 4	21,7%	16,8%	4,6%	1,1%	4,0%	1,3%	3,9%	0,9%	4,5%	0,7%
Δοκιμή 12	Διάστημα 1	19,2%	17,7%	12,4%	11,7%	10,2%	10,9%	12,0%	11,4%	10,2%	10,7%
	Διάστημα 2	18,5%	14,5%	12,6%	12,9%	12,1%	12,2%	11,0%	11,3%	10,8%	10,8%
	Διάστημα 3	22,3%	22,3%	14,3%	16,6%	13,1%	13,2%	12,4%	14,2%	11,8%	13,7%
	Διάστημα 4	21,7%	16,8%	11,3%	9,3%	11,4%	11,1%	12,5%	11,9%	11,0%	10,5%
Δοκιμή 13	Διάστημα 1	20,4%	-16,4%	5,5%	-4,3%	5,3%	-5,3%	6,5%	-5,3%	5,1%	-5,1%
	Διάστημα 2	22,0%	-21,3%	6,7%	-7,4%	6,6%	-6,4%	6,4%	-6,9%	6,9%	-6,3%
	Διάστημα 3	22,7%	-19,0%	9,9%	-10,2%	9,7%	-10,4%	9,1%	-10,0%	10,7%	-11,0%
	Διάστημα 4	23,2%	-21,0%	8,7%	-7,1%	6,4%	-6,3%	7,4%	-6,3%	6,9%	-6,1%
Δοκιμή 14	Διάστημα 1	20,4%	-16,4%	8,4%	-8,4%	8,2%	-8,6%	9,1%	-8,7%	8,2%	-8,6%
	Διάστημα 2	22,0%	-21,3%	8,0%	-8,4%	8,9%	-9,4%	9,7%	-10,3%	8,8%	-9,1%
	Διάστημα 3	22,7%	-19,0%	10,9%	-11,7%	10,5%	-11,2%	10,3%	-12,6%	11,8%	-14,2%
	Διάστημα 4	23,2%	-21,0%	9,9%	-10,5%	8,7%	-9,0%	8,7%	-8,7%	8,7%	-8,4%
Δοκιμή 15	Διάστημα 1	20,4%	-16,4%	3,2%	-1,5%	2,9%	-1,8%	3,9%	-1,9%	2,9%	-1,8%
	Διάστημα 2	22,0%	-21,3%	4,7%	-5,5%	4,2%	-4,7%	3,7%	-3,8%	4,1%	-4,6%
	Διάστημα 3	22,7%	-19,0%	8,9%	-8,3%	6,7%	-5,8%	5,8%	-6,1%	5,8%	-5,8%
	Διάστημα 4	23,2%	-21,0%	7,9%	-4,1%	7,0%	-3,9%	7,5%	-5,0%	6,7%	-4,0%

Πίνακας 5.28: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων για το συνθετικό δίκτυο 3x3y. (συνέχεια από 5.27)

3x3y		Mezzo		EKF		LimEKF 1a		LimEKF 1b		LimEKF 2a	
		RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	Διάστημα 1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Δοκιμή 2	Διάστημα 1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Δοκιμή 3	Διάστημα 1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Δοκιμή 4	Διάστημα 1	—	—	66%	68%	75%	66%	68%	62%	77%	68%
	Διάστημα 2	—	—	69%	73%	70%	77%	71%	69%	73%	75%
	Διάστημα 3	—	—	63%	56%	64%	59%	65%	58%	67%	57%
	Διάστημα 4	—	—	41%	48%	61%	58%	65%	57%	68%	67%
Δοκιμή 5	Διάστημα 1	—	—	83%	105%	82%	102%	83%	102%	81%	109%
	Διάστημα 2	—	—	81%	112%	78%	112%	82%	119%	78%	108%
	Διάστημα 3	—	—	76%	87%	83%	92%	82%	83%	76%	86%
	Διάστημα 4	—	—	70%	117%	72%	131%	77%	123%	60%	139%
Δοκιμή 6	Διάστημα 1	—	—	32%	29%	39%	30%	29%	24%	39%	27%
	Διάστημα 2	—	—	7%	-28%	13%	-18%	12%	-18%	14%	-13%
	Διάστημα 3	—	—	30%	32%	32%	43%	25%	24%	37%	31%
	Διάστημα 4	—	—	18%	-36%	19%	-52%	25%	-29%	24%	-27%
Δοκιμή 7	Διάστημα 1	—	—	71%	63%	74%	70%	72%	68%	76%	71%
	Διάστημα 2	—	—	68%	65%	67%	61%	67%	60%	69%	62%
	Διάστημα 3	—	—	64%	57%	59%	50%	52%	45%	61%	55%
	Διάστημα 4	—	—	62%	71%	69%	76%	66%	74%	69%	76%
Δοκιμή 8	Διάστημα 1	—	—	35%	14%	42%	29%	37%	26%	43%	22%
	Διάστημα 2	—	—	19%	3%	39%	26%	37%	21%	38%	29%
	Διάστημα 3	—	—	39%	44%	49%	53%	53%	49%	53%	51%
	Διάστημα 4	—	—	22%	11%	42%	29%	41%	31%	46%	37%
Δοκιμή 9	Διάστημα 1	—	—	88%	110%	87%	116%	86%	117%	85%	109%
	Διάστημα 2	—	—	71%	102%	67%	102%	77%	104%	73%	104%
	Διάστημα 3	—	—	64%	81%	62%	87%	69%	89%	68%	87%
	Διάστημα 4	—	—	49%	105%	44%	105%	60%	103%	56%	106%

Πίνακας 5.29: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμων με το Mezzo για το συνθετικό δίκτυο 3x3y.

3x3y		Mezzo		EKF		LimEKF 1a		LimEKF 1b		LimEKF 2a	
		RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 10	Διάστημα 1	—	—	60%	59%	64%	58%	63%	61%	65%	61%
	Διάστημα 2	—	—	64%	64%	65%	58%	63%	55%	68%	65%
	Διάστημα 3	—	—	60%	56%	62%	60%	67%	64%	63%	56%
	Διάστημα 4	—	—	64%	62%	66%	63%	66%	61%	66%	65%
Δοκιμή 11	Διάστημα 1	—	—	79%	83%	79%	83%	81%	83%	81%	84%
	Διάστημα 2	—	—	82%	85%	83%	84%	85%	83%	82%	86%
	Διάστημα 3	—	—	79%	71%	75%	73%	77%	70%	77%	72%
	Διάστημα 4	—	—	79%	93%	81%	92%	82%	95%	79%	96%
Δοκιμή 12	Διάστημα 1	—	—	36%	34%	47%	38%	38%	35%	47%	40%
	Διάστημα 2	—	—	32%	10%	35%	16%	40%	22%	42%	25%
	Διάστημα 3	—	—	36%	26%	42%	41%	45%	36%	47%	39%
	Διάστημα 4	—	—	48%	45%	47%	34%	42%	29%	50%	37%
Δοκιμή 13	Διάστημα 1	—	—	73%	74%	74%	68%	68%	67%	75%	69%
	Διάστημα 2	—	—	70%	65%	70%	70%	71%	67%	69%	71%
	Διάστημα 3	—	—	56%	46%	57%	45%	60%	47%	53%	42%
	Διάστημα 4	—	—	63%	66%	73%	70%	68%	70%	70%	71%
Δοκιμή 14	Διάστημα 1	—	—	59%	49%	60%	48%	55%	47%	60%	48%
	Διάστημα 2	—	—	64%	61%	59%	56%	56%	52%	60%	58%
	Διάστημα 3	—	—	52%	38%	54%	41%	54%	34%	48%	25%
	Διάστημα 4	—	—	57%	50%	62%	57%	62%	59%	63%	60%
Δοκιμή 15	Διάστημα 1	—	—	84%	91%	86%	89%	81%	88%	86%	89%
	Διάστημα 2	—	—	79%	74%	81%	78%	83%	82%	81%	78%
	Διάστημα 3	—	—	61%	56%	71%	69%	75%	68%	74%	69%
	Διάστημα 4	—	—	66%	80%	70%	81%	68%	76%	71%	81%

Πίνακας 5.30: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμων με το Mezzo για το συνθετικό δίκτυο 3x3y.
(συνέχεια από 5.29)

3x3y		EKF		LimEKF 1a		LimEKF 1b		LimEKF 2a	
		RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 1	Διάστημα 1	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 2	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 3	—	—	—	—	—	—	—	—
	Διάστημα 4	—	—	—	—	—	—	—	—
Δοκιμή 2	Διάστημα 1	—	—	29%	19%	15%	31%	24%	17%
	Διάστημα 2	—	—	18%	27%	12%	5%	12%	22%
	Διάστημα 3	—	—	-7%	22%	-2%	-6%	-13%	9%
	Διάστημα 4	—	—	-1%	-5%	-1%	9%	5%	3%
Δοκιμή 3	Διάστημα 1	—	—	34%	18%	23%	19%	29%	13%
	Διάστημα 2	—	—	-1%	9%	-15%	-8%	-1%	6%
	Διάστημα 3	—	—	27%	54%	28%	39%	17%	21%
	Διάστημα 4	—	—	-1%	2%	1%	-2%	0%	0%
Δοκιμή 4	Διάστημα 1	—	—	25%	-6%	6%	-19%	31%	-1%
	Διάστημα 2	—	—	3%	15%	6%	-11%	12%	11%
	Διάστημα 3	—	—	2%	7%	7%	6%	10%	3%
	Διάστημα 4	—	—	33%	19%	40%	17%	45%	36%
Δοκιμή 5	Διάστημα 1	—	—	-6%	58%	2%	63%	-9%	-69%
	Διάστημα 2	—	—	-16%	1%	9%	-58%	-12%	36%
	Διάστημα 3	—	—	29%	35%	26%	-27%	0%	-11%
	Διάστημα 4	—	—	6%	-85%	22%	-36%	-35%	-129%
Δοκιμή 6	Διάστημα 1	—	—	10%	1%	-5%	-7%	10%	-3%
	Διάστημα 2	—	—	7%	8%	6%	8%	8%	12%
	Διάστημα 3	—	—	2%	15%	-7%	-12%	9%	-1%
	Διάστημα 4	—	—	1%	-12%	9%	5%	7%	7%
Δοκιμή 7	Διάστημα 1	—	—	10%	18%	3%	13%	15%	22%
	Διάστημα 2	—	—	-2%	-12%	-5%	-15%	4%	-11%
	Διάστημα 3	—	—	-13%	-16%	-32%	-29%	-6%	-6%
	Διάστημα 4	—	—	20%	16%	11%	9%	18%	18%
Δοκιμή 8	Διάστημα 1	—	—	10%	18%	3%	15%	12%	10%
	Διάστημα 2	—	—	25%	24%	23%	18%	24%	26%
	Διάστημα 3	—	—	16%	16%	23%	9%	22%	13%
	Διάστημα 4	—	—	26%	19%	25%	22%	31%	29%
Δοκιμή 9	Διάστημα 1	—	—	-16%	-58%	-19%	-70%	-33%	3%
	Διάστημα 2	—	—	-13%	7%	20%	-75%	7%	-68%
	Διάστημα 3	—	—	-5%	30%	13%	41%	10%	28%
	Διάστημα 4	—	—	-11%	13%	21%	41%	14%	-8%

Πίνακας 5.31: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμου LimEKF με τα αποτελέσματα του EKF για το συνθετικό δίκτυο 3x3y.

3x3y		EKF		LimEKF 1a		LimEKF 1b		LimEKF 2a	
		RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE	RMSN	MPE
Δοκιμή 10	Διάστημα 1	—	—	11%	-2%	8%	5%	12%	3%
	Διάστημα 2	—	—	1%	-17%	-2%	-26%	11%	3%
	Διάστημα 3	—	—	5%	8%	18%	18%	7%	1%
	Διάστημα 4	—	—	6%	1%	5%	-2%	4%	8%
Δοκιμή 11	Διάστημα 1	—	—	1%	3%	12%	-1%	12%	8%
	Διάστημα 2	—	—	9%	-9%	19%	-14%	2%	4%
	Διάστημα 3	—	—	-15%	5%	-5%	-3%	-7%	3%
	Διάστημα 4	—	—	12%	-13%	16%	22%	1%	33%
Δοκιμή 12	Διάστημα 1	—	—	18%	7%	3%	2%	18%	9%
	Διάστημα 2	—	—	4%	6%	12%	13%	14%	17%
	Διάστημα 3	—	—	9%	21%	13%	14%	17%	17%
	Διάστημα 4	—	—	-1%	-20%	-11%	-28%	3%	-14%
Δοκιμή 13	Διάστημα 1	—	—	4%	-23%	-18%	-24%	8%	-20%
	Διάστημα 2	—	—	1%	13%	4%	6%	-3%	15%
	Διάστημα 3	—	—	2%	-2%	8%	3%	-8%	-7%
	Διάστημα 4	—	—	27%	11%	15%	11%	21%	13%
Δοκιμή 14	Διάστημα 1	—	—	3%	-3%	-8%	-4%	3%	-3%
	Διάστημα 2	—	—	-12%	-12%	-22%	-23%	-10%	-8%
	Διάστημα 3	—	—	3%	4%	5%	-8%	-8%	-22%
	Διάστημα 4	—	—	12%	15%	12%	17%	12%	20%
Δοκιμή 15	Διάστημα 1	—	—	9%	-21%	-21%	-29%	9%	-21%
	Διάστημα 2	—	—	12%	14%	21%	30%	13%	16%
	Διάστημα 3	—	—	25%	30%	35%	27%	35%	30%
	Διάστημα 4	—	—	11%	5%	4%	-20%	15%	3%

Πίνακας 5.32: Σύγκριση αποτελεσμάτων αλγορίθμου LimEKF με τα αποτελέσματα του EKF για το συνθετικό δίκτυο 3x3y. (συνέχεια από 5.31)

Στους παραπάνω πίνακες φαίνονται αρχικά τα συνολικά αποτελέσματα όλων των 120 εκτελέσεων. Σε αυτούς του πίνακες είναι ορατή η αποδοτικότητα κάθε μεθόδου μέσω των διαφορετικών ποσοτήτων των δύο δεικτών σφάλματος RMSN και MPE. Παρατηρείται όπως είναι λογικό ότι ο προσομοιωτής Mezzo δεν υλοποιεί κάποια διόρθωση και η τιμή του δείκτη σφάλματος είναι περίπου ίσα με την απόκλιση της εκτιμημένης ζήτησης εισαγωγής από τα σωστά στοιχεία.

Ο αλγόριθμος EKF υλοποιεί μία πολύ ικανοποιητική διόρθωση των αρχικών εσφαλμένων τιμών και αυτό αποδεικνύεται από τις μειωμένες τιμές των δεικτών αποδοτικότητας. Αυτές οι δοκιμές αποδεικνύουν την χρησιμότητα αυτού του αλγορίθμου σε τέτοιου είδους προβλήματα εκτίμησης και πρόβλεψης μοντέλων Π-Π.

Ωστόσο ενδιαφέρουσα διερεύνηση για την παρούσα εργασία ήταν αυτή του αλγορίθμου LimEKF για διαφόρους πίνακες Η οι οποίοι προήλθαν από αντίστοιχες εκτελέσεις του αλγορίθμου EKF. Οι δοκιμές που υλοποιήθηκαν όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω είναι:

- 1a Μέσος όρος των h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4) για τις δοκιμές με ζήτηση $\pm 10\%$, δηλαδή για τις δοκιμές 4, 5, 6.
- 1b Μέσος όρος των h ανά διάστημα (1, 2, 3, 4) για τις δοκιμές με ζήτηση $\pm 20\%$, δηλαδή για τις δοκιμές 7, 8, 9.
- 2a. Μέσος όρος των h του 1a, δηλαδή μέσος όρος όλων των διαστημάτων για τις δοκιμές με ζήτηση $\pm 10\%$.

Αυτές οι δοκιμές, αν και πολύ προσεγγιστικές παρήγαγαν αποτελέσματα πολύ ικανοποιητικά σε σύγκριση με τον τόσο απαιτητικό από άποψη υπολογισμών και χρόνου αλγόριθμο EKF. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών είναι βέβαια χειρότερα αλλά όχι σε σημαντικό βαθμό. Αυτά τα αποτελέσματα είναι λογικά, καθώς οι διαφορετικές παραλλαγές του αλγορίθμου Lim EKF περιλαμβάνουν μεγάλο ποσοστό προσέγγισης και άρα τα αποτελέσματα χάνουν αρκετή από την ακρίβεια υπολογισμού.

Ωστόσο ο τρόπος επιλογής και υπολογισμού του κατάλληλου πίνακα μπορεί να φέρει πολλά καλά αποτελέσματα, καθώς ο σωστός πίνακας Η αν και προσεγγιστικός, έχει την δυνατότητα απαλοιφής του θορύβου των μετρήσεων καθώς υπολογίζεται από τους μέσους όρους πολλών διαφορετικών μετρήσεων παρόμοιων δοκιμών.

Αυτή είναι μια πολύ αισιόδοξη παρατήρηση καθώς είναι εφικτό με την εξοικονόμηση αρκετού χρόνου και την απώλεια μικρού ποσοστού ακρίβειας να επιτευχθούν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα για τα προβλήματα εκτίμησης και πρόβλεψης μοντέλων Π-Π.

5.5 SODERMALM

Το δίκτυο Soderholm όπως έχει προαναφερθεί, αποτελεί ένα πραγματικό δίκτυο της πόλης της Στοκχόλμης. Περιλαμβάνει 462 ροές Π-Π και είναι ένα από τα πιο πολυσύχναστα δίκτυα της πόλης καθώς εισέρχονται σε αυτό ροές από πολλά διαφορετικά νησιά.

Όσον αφορά αυτό το δίκτυο έγιναν κάποιες εκτελέσεις τόσο με τον αλγόριθμο EKF όσο και με τον πιο προσεγγιστικό LimEKF. Ωστόσο λόγω του χρονοβόρου της διαδικασίας δεν ήταν δυνατή η διεξαγωγή αποτελεσμάτων στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας καθώς και κάποιες προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

6.1 ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μία διερεύνηση της απόδοσης μεθοδολογιών δυναμικής εκτίμησης μητρώων προέλευσης- προορισμού. Έγινε μια αναφορά στις δυναμικές έναντι των στατικών μεθόδων καθώς και στις μεθοδολογίες επίλυσης προβλημάτων χώρου – κατάστασης και προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Από αυτές τις μεθοδολογίες επιλέχθηκαν οι αλγόριθμοι επίλυσης μοντέλων χώρου – κατάστασης, ώστε να συγκριθεί η απόδοση των πιο σύνθετων από θέμα υπολογισμών αλγορίθμων με τους πιο γρήγορους στην εκτέλεση και τους πιο προσεγγιστικούς.

Για τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής κυκλοφορίας Mezzo και μια ευέλικτη πλατφόρμα υλοποίησης. Όλες οι εκτελέσεις έγιναν για δύο συνθετικά δίκτυα τα $3 \times 2y$ και $3 \times 3y$. Αρχικά εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος EKF ο οποίος απαιτούσε τον περισσότερο υπολογιστικό χρόνο και παρείχε την πιο μεγάλη ακρίβεια. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος Lim EKF σε τρεις παραλλαγές. Οι παραλλαγές αυτές ήταν τρεις διαφορετικοί πίνακες εισαγωγής H οι οποίοι προέκυψαν από μέσους όρους των πινάκων H που παρήγαγε η εκτέλεση του αλγορίθμου EKF.

Τα αποτελέσματα των εκτελέσεων αυτών δείχνουν ότι ο αλγόριθμος EKF υλοποιεί μεγάλο ποσοστό διόρθωσης σε σχέση με τα αποτελέσματα του προσομοιωτή της κυκλοφορίας Mezzo που παράγει μηδενική διόρθωση. Πολύ ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης τα αποτελέσματα του προσεγγιστικού αλγορίθμου LimEKF.

Ο αλγόριθμος αυτός αν και τόσο προσεγγιστικός παράγει αποτελέσματα συγκρίσιμης ακρίβειας με τον EKF. Αυτό συμβαίνει καθώς ο LimEKF λόγω των μέσων όρων που χρησιμοποιεί καταφέρνει να απαλείψει το θόρυβο ανάμεσα στις εκτελέσεις και έτσι η προσεγγιστικότητά του δεν έχει τόσο έντονη αρνητική επίδραση στα αποτελέσματα.

6.2 ΕΠΟΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ

Σε αυτή την ενότητα θα προταθούν διάφορες παραλλαγές που μπορούν να υλοποιηθούν με σκοπό την επέκταση της διερεύνησης της αποδοτικότητας των δυναμικών μεθόδων εκτίμησης μητρώων Προέλευσης – Προορισμού.

6.2.1 ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΙΔΙΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Οι διαδικασίες που περιγράφηκαν στην παρούσα εργασία έχουν μεγάλο περιθώριο επέκτασης. Με τη χρήση της ίδιας πλατφόρμας υλοποίησης και των ίδιων αλγορίθμων είναι δυνατή η διεξαγωγή πολύ ενδιαφερόντων συμπερασμάτων. Ωστόσο είναι σημαντική η επίλυση του βασικού προβλήματος της ταχύτητας. Συγκεκριμένα, ο προσομοιωτής mezzo, παρότι λειτουργεί κατά βάση ικανοποιητικά, έχει ακόμη αρκετές προοπτικές βελτίωσης κυρίως όσον αφορά την ταχύτητα εκτέλεσης αλλά και από την άποψη της ορθότητας των αποτελεσμάτων που εξάγονται.

Σχετικά με τη βελτίωση της ταχύτητας, όχι τόσο στα 2 μικρά δίκτυα αλλά περισσότερο στο Soderalm, για την υλοποίηση του οποίου απαιτούνται αρκετές ώρες, γίνονται προσπάθειες να ενσωματωθεί στο πρόγραμμα η δυνατότητα απομνημόνευσης της διαδικασίας μέχρι ενός σημείου, κάτι που σημαίνει ότι αυτή δεν θα επαναλαμβάνεται κάθε φορά εξολοκλήρου αλλά θα προστίθενται στην εκτέλεση αποκλειστικά τα καινούργια δεδομένα.

Οι διάφορες δοκιμές που μπορούν να υλοποιηθούν περιγράφονται παρακάτω.

SODERMALM

Όσον αφορά το πραγματικό δίκτυο Soderalm θα ήταν πολύ ενδιαφέρουσα η διαπίστωση ότι ο προσεγγιστικός αλγόριθμος Lim EKF συνεχίζει να είναι τόσο αποδοτικός και κατά την εφαρμογή του σε ένα τόσο μεγάλο δίκτυο. Θα ήταν επομένως αρκετά χρήσιμη η υλοποίηση όλης της παραπάνω διαδικασίας για το δίκτυο Soderalm.

ΑΛΛΕΣ ΤΙΜΕΣ/ΤΡΟΠΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ H

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν 3 από τις 6 εναλλακτικές για διαφορετικούς πίνακες εισαγωγής H στον αλγόριθμο LimEKF. Οι επόμενοι μελετητές θα μπορούσαν να συμπεράνουν για την αποδοτικότητα και των άλλων τριών εκδοχών του H.

ITERATED LIMITING EXTENDED KALMAN FILTER

Ένας άλλος ενδιαφέρον αλγόριθμος είναι ο Iterated LimEKF, ο οποίος είναι συνδυασμός του Iterated EKF και του LimEKF. Και αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί σαν στοιχεία εισαγωγής πίνακες H . Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι ότι είναι επαναληπτικός και σε κάθε επανάληψη παίρνει σαν δεδομένο εισαγωγής για την εκτιμημένη ζήτηση το αποτέλεσμα της προηγούμενης εκτέλεσης. Αυτή η διαδικασία βοηθάει στην πιο γρήγορη σύγκλιση.

6.2.2 ΑΛΛΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

Με την υλοποίηση μίας εύκολης επέκτασης στη διαδικασία που ακολουθήθηκε στη παρούσα εργασία είναι δυνατή η επέκταση της διερεύνησης.

ΝΕΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ (SP-EKF)

Σε αυτή την επέκταση είναι δυνατό να υλοποιηθούν οι αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης όπως ο SP-EKF. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατή μία σύγκριση των δύο διαφορετικών μεθόδων επίλυσης.

ΑΛΛΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΕΣ- ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΙ

Πέρα από τους διαφορετικούς αλγορίθμους είναι εφικτή η επανεκτέλεση της διαδικασίας με διαφορετικούς προσομοιωτές κυκλοφορίας. Οι νέοι προσομοιωτές της κυκλοφορίας θα μπορούσαν να είναι μικροσκοπικοί και με αυτόν τον τρόπο να προσέδιδαν μεγαλύτερη στοχαστικότητα στο πρόβλημα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Antoniou C., H. N. Koutsopoulos, and G. Yannis, An efficient non-linear Kalman filtering algorithm using simultaneous perturbation and applications in traffic estimation and prediction, Intelligent Transportation Systems Conference, 2007.
2. Antoniou C., M. Ben-Akiva and H. N. Koutsopoulos, On-Line Calibration of Traffic Prediction Models, Transportation Research Record 1934, pp.235-245, 2005.
3. Antoniou C., On-line Calibration for Dynamic Traffic Assignment, PhD Dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2004
4. Antoniou C., R. Balakrishna, H. N. Koutsopoulos and M. Ben-Akiva, Calibration Methods for Simulation-Based Dynamic Traffic Assignment Systems, International Journal of Modelling and Simulation, Vol. 31, No. 3, pp. 227-233, 2011
5. Antoniou C., Ben-Akiva and Koutsopoulos, On-line calibration of traffic prediction models, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1934/2005, pp. 235-245, 2004.
6. Antoniou, C., M. Ben-Akiva and H. N. Koutsopoulos, Non-linear Kalman Filtering Algorithms for On-line Calibration of Dynamic Traffic Assignment Models, IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 4, pp.661-670, 2007.
7. Ashok K. and M. E. Ben-Akiva, Dynamic O-D matrix estimation and prediction for real-time traffic management systems, In C. F. Daganzo editor, Transportation and Traffic Flow Theory, pp.465-484. Elsevier Science Publishing Company Inc., 1993.
8. Ashok. K., Estimation and prediction of time-dependent origin-destination flows. PhD dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
9. Balakrishna R. and H. N. Koutsopoulos, Incorporating Within-Day Transitions in the Simultaneous Off-line Estimation of Dynamic Origin-Destination Flows without Assignment Matrices, TRB 2008 Annual Meeting, 2008
10. Balakrishna R., Calibration of the Demand Simulator in a Dynamic Traffic Assignment System, Masters thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, 2002
11. Bell M.G.H., The estimation of origin-destination matrices by constrained generalized least squares, Transportation Research Part B, Vol. 25, No. 1, pp.13–22, 1995.

12. Ben-Akiva M., K. Ashok, Alternative Approaches for Real-Time Estimation and Prediction of Time-Dependent Origin–Destination Flows, *Transportation Science*, Vol. 34, No.1, 2000
13. Burghout W., H. N. Koutsopoulos and I. Andreasson, Incident Management and Traffic Information: Tools and Methods for Simulation-Based Traffic Prediction, *TRB 2010 Annual Meeting*, 2010
14. Antoniou, C., M. Ben-Akiva and H. N. Koutsopoulos, Dynamic traffic demand prediction using conventional and emerging data sources, *IEE Proc. Intell. Transp. Syst.* Vol. 153, No. 1, 2006
15. Cascetta E. and S. Nguyen, A unified framework for estimating or updating origin destination matrices from traffic counts. *Transportation Research Part B*, Vol. 22, No. 6, pp. 437–455, 1988.
16. Cascetta E., D. Inaudi, and G. Marquis. Dynamic estimators of origin-destination matrices using traffic counts. *Transportation Science*, Vol. 27, No. 4, pp. 363–373, 1993.
17. Cascetta E., Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data, A generalized least squares estimator, *Transportation Research Part B*, Vol. 18, No. 4, pp. 288– 289, 1984.
18. Cipriani E., M. Florian , M. Mahut , M. Nigro, A gradient approximation approach for adjusting temporal origin–destination matrices, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol 19, No. 3, pp. 270-282, 2011
19. Djukic T., J.W.C. van Lint, S.P. Hoogendoorn, Exploring application perspectives of principal component analysis in predicting dynamic OD matrices, 91st meeting of Transportation Research Board, 2012
20. Djukic T., J.W.C. van Lint, S.P. Hoogendoorn, An Efficient Methodology For Benchmarking Dynamic OD Demand Estimation Methods, *TRB* 11-3191, 2011.
21. Doan D. L., A. Ziliaskopoulos and H. Mahmassani. On-line monitoring system for real-time traffic management applications, *Transportation Research Record* 1678, pages 142-149, 1999.
22. Frederix R., C.M.J. Tampère, F. Viti, Dynamic origin-destination estimation in congested networks, In *Proceedings of the 3rd Dynamic Traffic Assignment Symposium*, Japan, 2010.
23. Frederix R., F. Viti, C.M.J. Tampère, How important is capturing congestion dynamics in dynamic OD estimation? , Presented at the 2nd Traffic Flow Theory Committee Summer Meeting, France, 2010.
24. Frederix R., F. Viti, R. Corthout and C.M.J. Tampere, A New Gradient Approximation Method for Dynamic Origin-Destination Matrix Estimation on Congested Networks, *TRB 2011 Annual Meeting*, 2011.
25. He R., S. Miaou, B. Ran, and C. Lan, Developing an on-line calibration process for an analytical dynamic traffic assignment model, In Presented at the 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 1999.

26. Hess, S., K.E. Train, and J.W. Polak, On the use of a Modified Latin Hypercube Sampling (MLHS) method in the estimation of a Mixed Logit Model for vehicle choice. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 40, No. 2, pp. 147-163, 2006.
27. Huang E., C. Antoniou, Y. Wen, M. Ben-Akiva, J. Lopes, J. Bento, Real-Time Multi-Sensor Multi-Source Network Data Fusion Using Dynamic Traffic Assignment Models, *Intelligent Transportation Systems (ITSC '09)*, 12th International IEEE Conference, 2009.
28. Huynh N., H. Mahmassani and H. Tavana, Adaptive speed estimation using transfer function models for real- time dynamic traffic assignment operation, In *Proceedings of the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 2002.
29. JAMES C. SPALL, An Overview of the Simultaneous Perturbation Method for Efficient Optimization, *Johns Hopkins APL Technical Digest*, Vol. 19, No. 4, 1998.
30. Kalman R.E. , A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Transaction of the ASME – Journal of Basic Engineering*, 1960.
31. Kleijnen Jack P.C, An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis, *European Journal of Operational Research*, 0377-2217/\$, 2004
32. Kleijnen Jack P.C. , Sixth International Conference on Sensitivity Analysis of Model Output, Sensitivity analysis of simulation models: an overview, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 2, Issue 6, Pages 7585–7586, 2010
33. Kleijnen Jack P.C., Experimental Design for sensitivity Analysis, Optimization and Validation of Simulation Models, *Handbook of Simulation*, Wiley, 1997
34. Lee J. - B. and K. Ozbay, Calibration of a Macroscopic Traffic Simulation Model using Bayesian Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation Methodology, *Transportation Research Board's 87th annual meeting*, Washington, D.C., 2008
35. Lee J. – B. and K. Ozbay, A New Calibration Methodology for Microscopic Traffic Simulation Using Enhanced Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (E-SPSA) Approach, *Transportation Research Board's 88th Annual Meeting*, Washington, D.C., 2009
36. Ma X., Z. Huang and H. N. Koutsopoulos, A Numerical Approach on Model Calibration for A Dynamic Emission Simulation Platform, *TRB 2011 Annual meeting*, 2011
37. Mahanti B. P., Aggregate Calibration of Microscopic Traffic Simulation Models, Masters thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, 2004.
38. Maher M.J., Inferences on trip matrices from observations on link volumes - A bayesian statistical approach, *Transportation Research Part B*, Vol. 17, No. 6, pp.435–447, 1983.

39. McNeil S. and C. Hendrickson, A regression formulation of the matrix estimation problem, *Transportation Science*, Vol. 19, No. 3, pp. 278–292, 1985.
40. Park, B. and J. Schneeberger, Microscopic Simulation Model Calibration and Validation: Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1856(-1), pp. 185-192, 2003.
41. Qin X. and H. Mahmassani, Adaptive calibration of dynamic speed-density relations for online network traffic estimation and prediction applications, In *Proceedings of the 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2004.
42. Spiess H., A maximum-likelihood model for estimating origin-destination matrices, *Transportation Research Part B*, Vol. 21, No. 5, pp.395–412, 1987.
43. Tavana H. and H. Mahmassani. Estimation and application of dynamic speed-density relations by using transfer function models, *Transportation Research Record* 1710, pp. 47-57, 2000.
44. Tsekeris T. and A. Stathopoulos, Treating Uncertain Demand Information in Origin–Destination Matrix Estimation with Traffic Counts, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 134, No. 8, 2008
45. Tsekeris, T. and A. Stathopoulos, Real-Time Dynamic Origin-Destination Matrix Adjustment with Simulated and Actual Link Flows in Urban Networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1857(-1), pp. 117-127, 2003.
46. Van Arem B. and M. J. M. van der Vlist. An on-line procedure for estimating current capacity. Technical Report INRO-VVG 1991-17, TNO Institute of Spatial Organization, Delft, 1992.
47. Van der Zijpp N., Dynamic OD-Matrix Estimation from Traffic Counts and Automated Vehicle Identification Data, *Transportation Research Record*, No. 1607, pp.87-94, 1997
48. Van Zuylen, H.J. and L.G. Willumsen, The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 14, No. 3, pp. 281-293,1980.
49. Vaze V., C. Antoniou, Y. Wen and M. Ben-Akiva, Calibration of Dynamic Traffic Assignment Models with Point-to-Point Traffic Surveillance, 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2009
50. Wang Y. and M. Papageorgiou, Real-time Freeway Traffic State Estimation based on Extended Kalman Filter: A General Approach, Accepted for publication in *Transportation Research Part B*, 2004.
51. Wu, J., A real-time origin-destination matrix updating algorithm for on-line applications. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 31, No. 5, pp. 381-396, 1997.
52. Zhou, X., and H. S. Mahmassani, A structural state space model for real-time traffic origin-destination demand estimation and prediction in a day-to-day

learning framework, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 41, No. 8, pp.823-840, 2007.