
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΑΣ ΝΕΑΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΩΤΕΙΝΗΣ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗΣ ΤΥΣ

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων
για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης
του Τμήματος
Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Υπό
Αντιγόνη Βάκουλη

Πολυτεχνείο Κρήτης

Χανιά, Νοέμβριος 2006

© Copyright by Αντιγόνη Βάκουλη, 2006

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή της Αντιγόνης Βάκουλη εγκρίνεται από τους:

1. Καθ. Βασίλειο Κουϊκόγλου (επιβλέπων): _____

2. Καθ. Μάρκο Παπαγεωργίου: _____

3. Επικ. Καθ. Ηλία Κοσματόπουλο: _____

Ευχαριστίες

Με αφορμή την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τον καθηγητή μου Κύριο Κοσματόπουλο Ηλία για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθώς και για τις ευκαιρίες που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των Μεταπτυχιακών μου σπουδών. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση και την αγάπη τους. Ευχαριστώ, τέλος, ιδιαίτερα την οικογένειά μου, γιατί χωρίς την υποστήριξη και την πολύτιμη αγάπη τους δε θα ήταν εφικτή η πραγματοποίηση των στόχων μου.

Σύντομο Βιογραφικό

Η Αντιγόνη Βάκουλη γεννήθηκε στη Θεσσαλονίκη τον Ιανουάριο του 1981. Τον Απρίλιο του 2005 αποφοίτησε από το τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η διπλωματική της εργασία αφορούσε στις ασυνέπειες της ασαφούς λογικής. Συνέχισε τις σπουδές της στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του τμήματος, στον τομέα των Συστημάτων Παραγωγής. Κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών της σπουδών του εργάστηκε σαν βοηθός στο προπτυχιακό μάθημα του τμήματος «Οργάνωση Παραγωγής και Προγραμματισμός Έργων».

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
1.2 ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ.....	13
1.3 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	15
2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	18
2.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΙΤΙΟΚΡΑΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	18
2.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	19
2.2.1 Ο αλγόριθμος Στοχαστικής Προσέγγισης των Robins και Monro (RMSA).....	20
2.2.2 Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών (FDSA) των Keifer και Wolfowitz	21
2.2.3 Η μέθοδος των Ταυτόχρονων Διαταραχών SPSA.....	22
3 Ο ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ AFT	27
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	27
3.2 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ AFT	28
3.3 Η ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΔΕΙΞΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ AFT	34
3.4 Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (AFT) ΓΙΑ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΈΛΕΓΧΟ ΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΟΡΙΖΟΝΤΑ.	38
4 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΩΤΕΙΝΗΣ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗΣ TUC	41
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	41
4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ	42
4.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ	43
4.4 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ TUC.....	44
4.4.1 Η δομή της στρατηγικής TUC.....	45
4.4.2 Έλεγχος διάρκειας των φάσεων.....	47
5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ TUC ΣΤΟ ΑΣΤΙΚΟ ΟΔΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ	52
5.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	52
5.1.1 Περιγραφή του μοντέλου METACOR	53
5.1.1.1 Μοντελοποίηση των αστικών συνδέσμων	55
5.1.1.2 Μοντελοποίηση των αστικών διασταυρώσεων.....	55
5.1.1.3 Τα κριτήρια απόδοσης	57
5.2 ΤΟ ΑΣΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ	58
5.2.1 Περιγραφή του δικτύου.....	58
5.2.2 Μοντελοποίηση του δικτύου για την εφαρμογή της στρατηγικής TUC	60
6 ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ SPSA ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ AFT ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ TUC	63
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	63
6.2 ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ.....	64
6.2.1 Το διάνυσμα εισόδου x	64
6.2.2 Τα σενάρια ζήτησης.....	65
6.2.3 Οι αρχικοί πίνακες L που εισάγονται στους δύο αλγόριθμους SPSA και AFT.....	65

6.3	ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ SPSA	67
6.3.1	<i>Προσομοιώσεις μέσω εφαρμογής του αλγορίθμου SPSA</i>	68
6.3.2	<i>Συμπεράσματα</i>	71
6.4	ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ AFT	72
6.4.1	<i>Επιλογή του Καθολικού Προσεγγιστή</i>	72
6.4.2	<i>Σχεδιαστικές παράμετροι του αλγορίθμου</i>	72
6.4.3	<i>Πρώτη Ομάδα Προσομοιώσεων</i>	73
6.4.4	<i>Δεύτερη ομάδα προσομοιώσεων</i>	78
6.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	81
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	85
7.1	ΣΥΝΟΨΗ	85
7.2	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	86
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	88
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	91

Περίληψη

Η εκθετική αύξηση των οχημάτων ιδιωτικής χρήσης τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, καθώς και η μετακίνηση μεγάλων μαζών πληθυσμού από την ύπαιθρο στις αστικές μητροπόλεις είχε ως αποτέλεσμα την παρουσίαση έντονων φαινομένων συμφόρησης στα αστικά οδικά δίκτυα.

Λόγω των παραπάνω, τα συστήματα ελέγχου αστικής κυκλοφορίας είναι μια περιοχή έρευνας με μακρόχρονη και πλούσια δραστηριότητα. Πολλές προσεγγίσεις έχουν προταθεί, αλλά μέχρι σήμερα δεν έχει βρεθεί μια στρατηγική που να ικανοποιεί όλες τις ανάγκες που κατά καιρούς έχουν εκφραστεί σχετικά με το συντονισμένο έλεγχο μεγάλων αστικών δικτύων σε πραγματικό χρόνο.

Οι σύγχρονες στρατηγικές ελέγχου αστικής κυκλοφορίας, για να εφαρμοστούν σε κάποιο οδικό δίκτυο με επιτυχία, πρέπει να ρυθμίσουν κατάλληλα τις τιμές των παραμέτρων τους. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων αυτών διαρκεί ακόμα και χρόνια και πραγματοποιείται από εξειδικευμένο προσωπικό. Μέχρι σήμερα, δεν έχει αναπτυχθεί κάποια συστηματική προσέγγιση για την αυτόματη βελτιστοποίηση των παραμέτρων ελέγχου των συστημάτων ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης.

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να εισάγει και να αναλύσει μία τέτοια συστηματική προσέγγιση που να μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. Εμείς την εφαρμόσαμε σε μία πρόσφατα ανεπτυγμένη, αποδοτική στρατηγική ελέγχου πραγματικού χρόνου, την TUC (Traffic-responsive Urban Control). Η αποδοτικότητα της στρατηγικής TUC αποδείχθηκε κατά την πειραματική εφαρμογή της σε διαφορετικά οδικά δίκτυα. Παρόλο που κατά την πειραματική αυτή διαδικασία, η ρύθμιση των παραμέτρων της TUC διαρκούσε λιγότερο από ένα μήνα, τα αποτελέσματα που παρήγαγε ήταν εξίσου ικανοποιητικά ή και καλύτερα από τα αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου που εφαρμόζεται επί χρόνια στο συγκεκριμένο δίκτυο του κάθε πειράματος.

Η προτεινόμενη Μεθοδολογία Βελτιστοποίησης Παραμέτρων AFT (Adaptive Fine-Tuning) που αναπτύχθηκε, βασίζεται σε μία ιδέα παρόμοια με αυτή της Στοχαστικής Προσέγγισης Ταυτόχρονων Διαταραχών, SPSA (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation) του James Spall. Και οι δύο αυτές μέθοδοι καλούνται να επιλύσουν προβλήματα βελτιστοποίησης κατά τα οποία η αναλυτική μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης δεν είναι διαθέσιμη. Διαθέσιμες είναι μόνο μετρήσεις αυτής.

Η διαφορά των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι κατά τη μέθοδο SPSA, η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης προσεγγίζεται μέσω των μετρήσεων που λάβαμε για αυτήν κατά την τελευταία ή κατά τις δύο τελευταίες μόνο επανάληψεις του αλγορίθμου. Αντίθετα, κατά τον αλγόριθμο AFT η προσέγγιση της κλίσης πραγματοποιείται μέσω χρήσης ενός Γραμμικού-ως-προς-τις-παραμέτρους Μη-γραμμικού Προσεγγιστή (ΓΜΓΠ) που λαμβάνει πληροφορίες πολλών μετρήσεων της συνάρτησης με χρονικό ορίζοντα που καθορίζεται από τον χρήστη.

Μέσω της μαθηματικής ανάλυσης του προτεινόμενου αλγορίθμου AFT, αποδεικνύεται η ικανότητα σύγκλισης του και η υπεροχή του σε σχέση με τον αλγόριθμο SPSA, καθώς ο τελευταίος αποτελεί υποπερίπτωσή του πρώτου. Τα αποτελέσματα, τέλος, των προσομοιώσεων της TUC στο οδικό δίκτυο της πόλης των Χανίων αποδεικνύουν την αποδοτικότητά του AFT και την υπεροχή του απέναντι στον αλγόριθμο SPSA, του οποίου τα αποτελέσματα κατά τις προσομοιώσεις δεν ήταν ικανοποιητικά.

Εισαγωγή

1.1 Στόχος της εργασίας

Τα συστήματα ελέγχου αστικής κυκλοφορίας αποτελούν ένα επιστημονικό χώρο με μακρόχρονη και πλούσια ερευνητική δραστηριότητα. Πολλές μεθοδολογίες έχουν προταθεί, αλλά μέχρι σήμερα δεν έχει βρεθεί μια στρατηγική που να ικανοποιεί όλες τις ανάγκες που κατά καιρούς έχουν εκφραστεί σχετικά με το συντονισμένο έλεγχο μεγάλων αστικών δικτύων σε πραγματικό χρόνο.

Στην παρούσα διατριβή, στόχος μας είναι να καλύψουμε μία από τις παραπάνω ανάγκες που αφορά στην αύξηση της προσαρμοστικότητας των στρατηγικών ελέγχου ώστε να μπορούν να εφαρμόζονται εύκολα και αποδοτικά σε αστικά δίκτυα με διαφορετικά χαρακτηριστικά αλλά και να αντιμετωπίζουν με επιτυχία μεταβολές στα χαρακτηριστικά του δικτύου στο οποίο ήδη εφαρμόζονται. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει η ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος ελέγχου να γίνεται γρήγορα και αποτελεσματικά, μέσω χρήσης κάποιας μεθόδου βελτιστοποίησης, και όχι εμπειρικά μέσω δοκιμής και σφάλματος. Ένας τέτοιος προσαρμοστικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης παραμέτρων αναπτύσσεται και αναλύεται στην παρούσα διατριβή.

Το κίνητρο της δημιουργίας του προτεινόμενου προσαρμοστικού αλγορίθμου ήταν η ανάγκη που παρουσιάστηκε για ανάπτυξη μίας αυτόματης διαδικασίας βελτιστοποίησης των παραμέτρων της πρόσφατα ανεπτυγμένης στρατηγικής ελέγχου πραγματικού χρόνου, TUC (Traffic-responsive Urban Control) [5,14,6]. Η TUC είναι μία στρατηγική ελέγχου πραγματικού χρόνου, της οποίας οι σχεδιαστικές αρχές βασίζονται στην θεωρία ελέγχου με ανατροφοδότηση.

Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος SMARTNESS, η TUC εφαρμόστηκε στα οδικά δίκτυα τριών διαφορετικών πόλεων, με διαφορετικά δομικά χαρακτηριστικά το καθένα. Στα Chania, Greece (σε 23 κόμβους), στο Southampton, U.K. (σε 53 κόμβους) και στο Munich, Germany (σε 25 κόμβους). Η απόδοση της στρατηγικής TUC συγκρίθηκε με αυτή των αντίστοιχων τοπικών στρατηγικών ελέγχου TASS, SCOOT και BALANCE [14,2]. Τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από αυτή την συγκριτική αξιολόγηση είναι ότι η TUC είναι μία στρατηγική που εφαρμόζεται χωρίς δυσκολία και με μικρό κόστος, και της οποίας η απόδοση μετά από μία περιορισμένη χρονικά διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων της (συγκεκριμένα η διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων της κατά την εφαρμογή της στα παραπάνω τρία δίκτυα διήρκεσε λιγότερο από ένα μήνα) αποδείχθηκε το ίδιο ικανοποιητική ή και καλύτερη από την απόδοση των τοπικών στρατηγικών ελέγχου, των οποίων οι παράμετροι έχουν βελτιστοποιηθεί σχεδόν απόλυτα μέσα στα χρόνια για τα αντίστοιχα δίκτυα στα οποία εφαρμόζονται.

Η ρύθμιση των παραμέτρων της στρατηγικής TUC πραγματοποιήθηκε από έμπειρο προσωπικό το οποίο μελέτησε το δεδομένο, κάθε φορά, πεδίο και πειραματίστηκε με διάφορους συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων προκειμένου να καταλήξει στους βέλτιστους δυνατούς. Η βελτιστοποίηση, δηλαδή, έγινε εμπειρικά μέσω δοκιμών και όχι μέσω εφαρμογής κάποιου αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Το γεγονός αυτό, μας παρακίνησε να ερευνήσουμε την πιθανότητα χρήσης κάποιου επαναληπτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης, υποθέτοντας ότι με αυτό τον τρόπο η ρύθμιση των παραμέτρων θα είναι πιο επιτυχημένη και η στρατηγική θα γίνει ακόμα πιο αποδοτική.

Αρχικά, η μέθοδος που επιλέξαμε να εφαρμόσουμε ήταν αυτή της Στοχαστικής Προσέγγισης Ταυτόχρονων Διαταραχών (SPSA), μίας πολύ δημοφιλούς και πολλά υποσχόμενης Μεθόδου Βελτιστοποίησης [20,22]. Ο αλγόριθμος SPSA υπερνικά το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι συμβατικοί αλγόριθμοι Στοχαστικής Προσέγγισης, στους οποίους ο αριθμός των εκτιμήσεων της άγνωστης συνάρτησης κάθε επανάληψης, είναι ανάλογος του αριθμού των παραμέτρων του συστήματος. Το γεγονός αυτό καθιστά αδύνατη την εφαρμογή κλασικών αλγορίθμων στοχαστικής προσέγγισης σε προβλήματα μεγάλων διαστάσεων. Η μέθοδος SPSA έχει εφαρμοστεί αποτελεσματικά στην βελτιστοποίηση παραμέτρων διαφόρων συστημάτων ελέγχου

(βλέπε π.χ., [23]). Ένα από αυτά αφορούσε στον έλεγχο της κυκλοφορίας σε ένα τμήμα του οδικού δικτύου της κεντρικής εμπορικής περιοχής στο Manhattan, New York [21].

Δυστυχώς, όμως, η χρήση της μεθόδου SPSA για τον καθορισμό των παραμέτρων της στρατηγικής TUC κατά την εφαρμογή της στο οδικό δίκτυο της πόλης των Χανίων, δεν κατάφερε να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο λόγος αυτής της αποτυχίας, σε αντίθεση με την επιτυχία που σημείωσε ο αλγόριθμος κατά την εφαρμογή του στο δίκτυο του Manhattan [21], είναι η πολυπλοκότητα του οδικού δικτύου της πόλης των Χανίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η οργάνωση των σταδίων των διασταυρώσεων του οδικού δικτύου του Manhattan που προσομοιώνεται είναι πολύ απλή (μόνο δύο στάδια η κάθε διασταύρωση). Αντιθέτως, η δομή των σταδίων των διασταυρώσεων του δικτύου στα Χανιά (καθώς και των περισσότερων οδικών δικτύων της Ευρώπης) είναι πιο σύνθετη (π.χ., κοντινές διασταυρώσεις με κοινά στάδια σηματοδότησης, διασταυρώσεις με 3 ή και περισσότερα στάδια, διασταυρώσεις όπου οι φάσεις λαμβάνουν πράσινο σε περισσότερα από ένα στάδια, κ.α.).

Η ανικανότητα της μεθόδου SPSA να παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα μας ώθησε στην ανάπτυξη ενός νέου αλγόριθμου, του Προσαρμοστικού Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Παραμέτρων, AFT (Adaptive Fine-Tuning). Ο AFT, όπως και ο SPSA αλγόριθμος, απαιτεί μικρό αριθμό μετρήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε επανάληψη του. Οι μετρήσεις αυτές της συνάρτησης, αντιστοιχούν σε τιμές των παραμέτρων οι οποίες προκύπτουν από την προσθήκη τυχαίων διαταραχών σε αυτές της προηγούμενης επανάληψης.

Η διαφορά των δύο μεθόδων είναι ότι κατά τη μέθοδο SPSA, η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης προσεγγίζεται μέσω των μετρήσεων που λάβαμε για αυτήν κατά την τελευταία μόνο επανάληψη του αλγορίθμου. Αντίθετα, κατά τον αλγόριθμο AFT η προσέγγιση της κλίσης πραγματοποιείται μέσω χρήσης ενός Γραμμικού-ως-προς-τις-παραμέτρους Μη-γραμμικού Προσεγγιστή (ΓΜΠΠ) που λαμβάνει πληροφορίες πολλών μετρήσεων της συνάρτησης με χρονικό ορίζοντα που καθορίζεται από τον χρήστη.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, σχετίζονται μόνο με το τμήμα της στρατηγικής TUC που αφορά στον έλεγχο της διάρκειας των φάσεων και αποδεικνύουν την αποδοτικότητα της AFT προσέγγισης. Σε αντίθεση, δηλαδή, με τα αποτελέσματα της εφαρμογή του αλγορίθμου SPSA, η προτεινόμενη μεθοδολογία καταφέρνει να βελτιώσει σημαντικά την επίδοση της στρατηγικής TUC ακόμα και σε περιπτώσεις που η κυκλοφοριακή ζήτηση παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις κατά την περίοδο μίας ημέρας. Τα χρήσιμα συμπεράσματα που εξάγονται από τις σειρές προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται, αφορούν εκτός των άλλων και στο βαθμό επιρροής συγκεκριμένων παραμέτρων ελέγχου στην αποδοτικότητα της στρατηγικής.

1.2 Χρήσιμοι ορισμοί

- Στη θεωρία των πιθανοτήτων, μία ακολουθία ή ένα σύνολο τυχαίων αριθμών ονομάζεται i.i.d (independent and identically distributed) εάν όλοι οι τυχαίοι αριθμοί που το αποτελούν ακολουθούν την ίδια κατανομή και είναι αμοιβαίως ανεξάρτητοι μεταξύ τους.
- Μία συνάρτηση f λέγεται ότι είναι C^m , όπου m ένας θετικός ακέραιος αριθμός, εάν είναι συνεχής και το ίδιο ισχύει και για τις m πρώτες παράγωγούς της.
- Μία συνάρτηση f με πεδίο ορισμού ένα υποσύνολο $D \subseteq \mathfrak{R}$ και πεδίο τιμών το σύνολο των πραγματικών αριθμών, $f : D \subseteq \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R}$ ονομάζεται συνεχής κατά Lipschitz εάν υπάρχει $K \geq 0$ τέτοιο ώστε για κάθε $x, y \in D$ να ισχύει η σχέση:

$$|f(x) - f(y)| \leq K|x - y|$$

Το μικρότερο K για το οποίο ισχύει η σχέση (1.1) ονομάζεται Lipschitz σταθερά της συνάρτησης f .

Εάν η συνάρτηση f ορίζεται στο διάστημα M και δίνει τιμές στο διάστημα N , $f: M \rightarrow N$ τότε ονομάζεται συνεχής κατά Lipschitz εάν υπάρχει $K \geq 0$ τέτοιο ώστε για κάθε $x, y \in M$ να ισχύει η σχέση:

$$d'(f(x), f(y)) \leq Kd(x, y) \quad (1.1)$$

- Εάν $f_a(\cdot)$ είναι μία συνάρτηση παραμετροποιημένη από ένα διάνυσμα a με θετικά στοιχεία, τότε λέμε ότι η $f_a(\cdot)$ είναι $O(a)$, εάν υπάρχει μονοδιάστατη συνάρτηση $g(\cdot)$ που να ικανοποιεί τις σχέσεις: $g(0) = 0$, $g(a) > 0$, $\forall a \neq 0$ και $g([a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n]^T) < g([a_1, a_2, \dots, a_i + \Delta\alpha, \dots, a_n]^T)$, $\forall i, \forall \Delta\alpha > 0$, έτσι ώστε για κάθε x και κάθε $a \geq 0$ να υπάρχει ένας μη-αρνητικός, πραγματικός αριθμός c_1 για τον οποίο να ισχύει: $|f_a(x)| \leq c_1 g(a)$.
- Ο συμβολισμός $vec(A, B)$, όπου A, B είναι διανύσματα ή πίνακες, χρησιμοποιείται για να δηλώσει ένα διάνυσμα του οποίου τα στοιχεία είναι τα στοιχεία των A και B (κατά στήλη).
- Εάν x είναι ένα διάνυσμα, τότε ο $diag(x_i)$ είναι ένας διαγώνιος πίνακας με τα στοιχεία της διαγωνίου του ίσα με αυτά του διανύσματος x .
- Η μορφή ενός -ως-προς-τις-παραμέτρους Μη-γραμμικού Προσεγγιστή (Linear-in-the-Weights Universal Approximator) είναι η εξής:

$$y = \mathcal{G}^T \phi(x), \quad (1.2)$$

όπου $x \in \mathcal{R}^{n_1}$ είναι το διάνυσμα εισόδου του Προσεγγιστή, $y \in \mathcal{R}^{n_2}$ το διάνυσμα εξόδου του Προσεγγιστή, $\mathcal{G} \in \mathcal{R}^{n_2 \times L}$ ο πίνακας με τις σταθερές παραμέτρους, $\phi: \mathcal{R}^{n_1} \rightarrow \mathcal{R}^L$ μία μη-γραμμική διανυσματική συνάρτηση των όρων παλινδρόμησης, και ο L ένας ακέραιος αριθμός που δηλώνει τον πλήθος των όρων παλινδρόμησης του Προσεγγιστή. Αποδεικνύεται ότι διάφορα μοντέλα νευρωνικών δικτύων, δίκτυα καμπανοειδών συναρτήσεων (radial basis functions), νευρωνικά δίκτυα με

συναρτήσεις ενεργοποίησης σιγμοειδείς μετατοπισμένες συναρτήσεις, προσαρμοστικά ασαφή συστήματα, κ.α. (βλέπε π.χ., [3, 4, 19, 17, 1, 11, 12, 13]) ανήκουν στους Καθολικούς Προσεγγιστές της μορφής (1.2).

Μία σημαντική ιδιότητα που ικανοποιούν πολλοί Προσεγγιστές της μορφής (1.2) είναι η εξής: Μία οικογένεια συναρτήσεων λέμε ότι ανήκει σε μία οικογένεια Καθολικών Προσεγγιστών, εάν για κάθε συνεχή συνάρτηση $F: \mathfrak{R}^{n_1} \rightarrow \mathfrak{R}^{n_1}$, για κάθε $\varepsilon > 0$ και κάθε συμπαγές (δηλαδή, κλειστό και φραγμένο) υποσύνολο $X \subset \mathfrak{R}^{n_1}$ υπάρχει ένας ακέραιος L και ένας πίνακας \mathcal{G}^* τέτοιοι ώστε ο Προσεγγιστής με τους L όρους να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\sup_{x \in X} |F(x) - \mathcal{G}^{*T} \phi(x)| \leq \varepsilon \quad (1.3)$$

Εάν συμβολίσουμε με $\nu(x)$ την απόκλιση μεταξύ της συνάρτησης $F(x)$ και της εκτίμησής της, έχουμε: $F(x) = \mathcal{G}^{*T} \phi(x) + \nu(x)$. Ο βέλτιστος πίνακας των παραμέτρων \mathcal{G}^* και το βέλτιστο σφάλμα μοντελοποίησης $\nu(\cdot)$ συναρτήσει των $L, \phi, F(\cdot), X$ ορίζονται ως εξής: $\mathcal{G}^* := W(L, \phi, F, X) := \arg \min_{\mathcal{G}} \sup_{x \in X} |F(x) - \mathcal{G}^{*T} \phi(x)|$ και $\nu(x) := N(L, \phi, F, X) := F(x) - \mathcal{G}^{*T} \phi(x)$.

Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της ιδιότητας που ικανοποιούν οι Καθολικοί Προσεγγιστές, το $\sup_{x \in X} \nu(x)$ μπορεί να λάβει αυθαίρετα πολύ μικρές τιμές μέσω κατάλληλης επιλογής του ακέραιου αριθμού L . Γενικά, το $\sup_{x \in X} \nu(x)$ μειώνεται όσο αυξάνεται το L .

1.3 Η δομή της εργασίας

Η δομή της παρούσας διατριβής έχει ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται οι Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης. Οι δύο βασικές είναι αυτές των

Αιτιοκρατικών Προσεγγιστικών Μεθόδων και των Μεθόδων Στοχαστικής Προσέγγισης. Ακολουθεί, ο διαχωρισμός των Αλγορίθμων Στοχαστικής Προσέγγισης σε αυτούς που έχουν στη διάθεσή τους μετρήσεις του διανύσματος κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης και σε αυτούς που έχουν στη διάθεσή τους μετρήσεις μόνο της αντικειμενικής συνάρτησης και όχι της κλίσης αυτής. Έμφαση δίνεται στη Στοχαστική Προσέγγιση Ταυτόχρονων Διαταραχών (SPSA) που εφαρμόσαμε αρχικά για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων της στρατηγικής TUC.

- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ο προτεινόμενος Επαναληπτικός Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Παραμέτρων συστημάτων ελέγχου, AFT. Αφορμή της ανάπτυξης του αλγορίθμου αυτού αποτελεί η αποτυχία της μεθόδου SPSA να αυξήσει την αποδοτικότητα της στρατηγικής TUC μέσω της ρύθμισης των παραμέτρων της.
- Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η στρατηγική κυκλοφοριακού ελέγχου πραγματικού χρόνου TUC. Γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές αρχές της στρατηγικής, καθώς και στις υποθέσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη της.
- Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται το αστικό οδικό δίκτυο της πόλης των Χανίων στο οποίο εφαρμόζεται η στρατηγική ελέγχου TUC. Ακολουθεί παρουσίαση του του εργαλείου μοντελοποίησης και προσομοίωσης οδικών δικτύων, METACOR, που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε με σκοπό να ελέγξουμε την αποδοτικότητα της μεθόδου SPSA και του προτεινόμενου αλγορίθμου AFT.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε με σκοπό να ελέγξουμε την αποδοτικότητα της μεθόδου SPSA και του προτεινόμενου αλγορίθμου AFT.
- Στο Κεφάλαιο 7 παρατίθεται η σύνοψη της παρούσας διατριβής και η έκθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη διερεύνηση που πραγματοποιήσαμε.

Τέλος, προτείνονται κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας που μπορούν συνεισφέρουν στην επέκταση της παρούσας διατριβής.

2 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

2.1 Αλγόριθμοι Αιτιοκρατικής Βελτιστοποίησης

Ο άνθρωπος από την αρχή της ύπαρξής του, καλείται να επιλύσει προβλήματα βελτιστοποίησης για κάθε σχεδόν δραστηριότητά του. Καλείται να αντιμετωπίσει τη διαδικασία ανταλλαγής και εξισορρόπησης μεταξύ διαφορετικών παραγόντων με σκοπό την λήψη επιθυμητών αποτελεσμάτων. Η διαδικασία επιλογής των παραμέτρων μιας διαδικασίας κατά ένα βέλτιστο τρόπο αποτελεί και την ουσία του προβλήματος της βελτιστοποίησης.

Μπορούμε να μοντελοποιήσουμε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζοντας μία αντικειμενική συνάρτηση και ένα σύνολο παραμέτρων οι οποίες αν ρυθμιστούν κατάλληλα θα παρέχουν την ελάχιστη δυνατή τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η μοντελοποίηση έχει τη μορφή:

$$\text{Να βρεθεί το } \theta^* \text{ που παρέχει το } \min_{\theta \in C} L(\theta) \quad (2.1)$$

όπου το $L: \mathcal{R}^p \rightarrow \mathcal{R}^1$ απεικονίζει την υπό ελαχιστοποίηση συνάρτηση, το θ αποτελεί το διάνυσμα των ρυθμιζόμενων, p σε αριθμό, παραμέτρων, και $C \subseteq \mathcal{R}^p$ είναι το σύνολο που ορίζει τις επιτρεπτές τιμές που μπορούν να λάβουν οι παράμετροι θ .

Στην παρούσα διατριβή, αναφερόμαστε σε προβλήματα των οποίων οι παράμετροι θ λαμβάνουν συνεχείς τιμές και όχι διακριτές. Επιπλέον, οι συναρτήσεις L είναι αρκετά πολύπλοκες με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η αναλυτική επίλυση της σχέσης (2.1). Έτσι, για την επίλυση της, γίνεται χρήση ενός επαναληπτικού αλγορίθμου, μίας βαθμιαίας, δηλαδή, διαδικασίας που κινείται από μία αρχική εκτίμηση του θ^* σε ένα τελικό διάνυσμα, το οποίο αναμένεται να αποκλίνει λιγότερο

από το πραγματικό θ^* σε σύγκριση με την αρχική εκτίμησή του, παρέχοντας βελτίωση (μείωση) στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Πολλές από τις μεθόδους βελτιστοποίησης βασίζονται στον υπολογισμό του διανύσματος κλίσης της υπό βελτιστοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει των παραμέτρων του προβλήματος:

$$g(\theta) \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \theta_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial \theta_p} \end{bmatrix}.$$

Έτσι, για τοπική βελτιστοποίηση χωρίς περιορισμούς, η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται είναι:

$$g(\theta^*) = 0. \quad (2.2)$$

2.2 Αλγόριθμοι Στοχαστικής Βελτιστοποίησης

Πέρα από τις περιπτώσεις όπου μας παρέχεται η αναλυτική μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος βελτιστοποίησης (deterministic optimization), υπάρχουν περιπτώσεις όπου το μόνο που μας παρέχεται είναι μετρήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης οι οποίες εμπεριέχουν τυχαίο θόρυβο. Για την επίλυση προβλημάτων αυτής της κατηγορίας, χρησιμοποιούμε αλγόριθμους Στοχαστικής Προσέγγισης.

Οι αλγόριθμοι Στοχαστικής Προσέγγισης διαχωρίζονται σε αυτούς που βασίζονται στις απευθείας μετρήσεις του διανύσματος κλίσης $g(\theta)$ και σε αυτούς που έχουν στη διάθεσή τους μετρήσεις μόνο της αντικειμενικής συνάρτησης και όχι της κλίσης αυτής.

Γενικά, οι στοχαστικοί αλγόριθμοι που βασίζονται σε μετρήσεις της προς ελαχιστοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης και όχι της κλίσης $g(\theta)$ αυτής, επιδεικνύουν ικανότητα σύγκλισης παρόμοια με αυτή των στοχαστικών αλγορίθμων που βασίζονται σε μετρήσεις της κλίσης. Ένα βασικό πλεονέκτημα των πρώτων είναι ότι δεν απαιτούν άριστη γνώση της σχέσης μεταξύ των υπό ρύθμιση παραμέτρων και της υπό ελαχιστοποίηση συνάρτησης, η οποία απαιτείται στους αλγορίθμους που βασίζονται στη γνώση της $g(\theta)$. Ο υπολογισμός αυτής της σχέσης μπορεί να αποδειχθεί πραγματικά δύσκολος ενώ το κόστος υπολογισμού μίας αντικειμενικής συνάρτησης είναι πολύ μικρότερο από το κόστος υπολογισμού της κλίσης αυτής.

Ο πρώτος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε και που βασίζεται σε μετρήσεις της κλίσης της συνάρτησης είναι ο αλγόριθμος Στοχαστικής Προσέγγισης των Robins και Monro (R-M SA) [18]. Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί γενίκευση τεχνικών όπως αυτές των deterministic steepest descent, Newton-Raphson, Neural Network back-propagation, και infinitesimal perturbation.

Δύο κλασικές μέθοδοι Στοχαστικής Προσέγγισης που δεν βασίζονται σε μετρήσεις της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά σε μετρήσεις της ίδιας, είναι αυτές των Πεπερασμένων Διαφορών των Keifer και Wolfowitz (Finite-Difference Stochastic Approximation, FDSA) [10] και των Ταυτόχρονων Διαταραχών του Spall (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation, SPALL) [20,22]. Και οι δύο προσεγγίσεις χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους για την εκτίμηση του άγνωστου διανύσματος κλίσης.

2.2.1 Ο αλγόριθμος Στοχαστικής Προσέγγισης των Robins και Monro (RMSA)

Ένα κλασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο εφαρμόζεται ο αλγόριθμος RMSA [18] είναι αυτό της εύρεσης της ρίζας της εξίσωσης $g(\theta) = 0$, μέσω μετρήσεων με θόρυβο της $g(\theta)$. Έστω $Y(\theta)$ η εκτίμηση της $g(\theta)$. Ο αλγόριθμος έχει τη μορφή:

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k - a_k Y(\hat{\theta}_k), \quad (2.3)$$

όπου a_k μία μη-αρνητική ακολουθία, και $\hat{\theta}_k$ η εκτίμηση του θ^* στην k -οστή επανάληψη του αλγορίθμου.

Η επιλογή της ακολουθίας $\{a_k\}$ πρέπει να είναι τέτοια ώστε να παρέχεται μία ισορροπία μεταξύ της επιθυμίας για μείωση του προστιθέμενου κινδύνου καθώς πλησιάζουμε στη βέλτιστη λύση θ^* ($a_k \rightarrow 0$) και της επιθυμίας για αποφυγή πρόωρης (λανθασμένης) σύγκλισης του αλγορίθμου ($\sum_k a_k = \infty$). Η scaled αρμονική ακολουθία $\{a/(k+1)\}, a > 0$ είναι το καλύτερο παράδειγμα ακολουθίας που μας εξασφαλίζει τα παραπάνω. Η σύγκλιση του αλγορίθμου εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως για παράδειγμα το σχετικό εύρος του ενσωματωμένου στις μετρήσεις θορύβου, και την αρχική εκτίμηση του θ .

2.2.2 Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών (FDSA) των Keifer και Wolfowitz

Έστω $\hat{\theta}_k$ η εκτίμηση του θ στο k -οστό βήμα. Ένας τυπικός αλγόριθμος στοχαστικής προσέγγισης έχει τη μορφή:

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k - a_k \hat{g}_k(\hat{\theta}_k), \quad (2.4)$$

όπου $\hat{g}_k(\hat{\theta}_k)$ είναι η εκτίμηση της κλίσης $g(\theta) \equiv \partial L / \partial \theta$ στην k -οστή επανάληψη του αλγορίθμου. Οι μέθοδοι των Πεπερασμένων Διαφορών και της Ταυτόχρονης Διαταραχής διαφέρουν ως προς τον τρόπο που υπολογίζεται η εκτίμηση αυτή της κλίσης.

Έστω $y(\cdot)$ μία μέτρηση της συνάρτησης $L(\cdot)$ ($y(\cdot) = L(\cdot) + \text{noise}$), και c_k ένας μικρός θετικός αριθμός. Εάν p είναι ο αριθμός των υπό βελτιστοποίηση

παραμέτρων, κατά τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών [10] λαμβάνουμε $2p$ νέες μετρήσεις της συνάρτησης $L(\cdot)$ σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, προσθέτοντας διαταραχή σε κάθε ένα από τα στοιχεία του τρέχοντος διανύσματος $\hat{\theta}_k$ ξεχωριστά. Για παράδειγμα, οι δύο νέες μετρήσεις που λαμβάνονται μέσω προσθήκης διαταραχής στο i -οστό στοιχείο του διανύσματος $\hat{\theta}_k$ (με $i=1,2,\dots,p$) είναι οι: $y(\hat{\theta}_k + \text{διαταραχή}) = y(\hat{\theta}_k + c_k e_i) = y_k^{(+)}$ και $y(\hat{\theta}_k - \text{διαταραχή}) = y(\hat{\theta}_k - c_k e_i) = y_k^{(-)}$ όπου e_i ένα διάνυσμα του οποίου όλα τα στοιχεία είναι μηδέν, εκτός από το i -οστό που είναι ίσο με τη μονάδα. Επομένως, το i -οστό στοιχείο του διανύσματος $\hat{g}_k(\hat{\theta}_k)$ υπολογίζεται από τη σχέση: $\hat{g}_{ki}(\hat{\theta}_k) = \frac{y(\hat{\theta}_k + c_k e_i) - y(\hat{\theta}_k - c_k e_i)}{2c_k}$ με c_k έναν μικρό θετικό αριθμό που συνήθως μειώνεται καθώς το αυξάνεται.

2.2.3 Η μέθοδος των Ταυτόχρονων Διαταραχών SPSA.

Όπως προαναφέρθηκε, η διαφορά μεταξύ της προσεγγιστικής μεθόδου των Πεπερασμένων Διαφορών και αυτής των Ταυτόχρονων Διαταραχών έγκειται στον τρόπο υπολογισμού της εκτίμησης της κλίσης $g(\theta)$ της υπό ελαχιστοποίηση συνάρτησης (βλέπε σχέση (2.4)).

Η μέθοδος των Ταυτόχρονων Διαταραχών (SPSA) [20,22] που αναλύεται παρακάτω υπολογίζει την εκτίμηση της κλίσης $g(\theta)$ χρησιμοποιώντας μόνο δύο μετρήσεις της συνάρτησης $L(\cdot)$ σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, σε αντίθεση με τη προσέγγιση μέσω Πεπερασμένων Διαφορών (FDSA) που χρησιμοποιεί $2p$ μετρήσεις της L σε κάθε επανάληψη. Ο όρος Ταυτόχρονη Διαταραχή προκύπτει από το γεγονός ότι όλα τα στοιχεία του διανύσματος $\hat{\theta}_k$ αλλάζουν ταυτόχρονα.

Υποθέτουμε, λοιπόν, ότι έχουμε στη διάθεση μας τιμές της L με θόρυβο. Έστω :

$$y_k = L(\hat{\theta}_k \pm c_k \Delta_k) + e_k, \quad (2.5)$$

όπου τα e_k αντιπροσωπεύουν τον όρο του θορύβου και η $\{c_k\}$ είναι μια θετική ακολουθία. Κατά τη μέθοδο των Ταυτόχρονων Διαταραχών, η εκτίμηση της g στο k -οστό βήμα του αλγορίθμου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\hat{g}_k(\hat{\theta}_k) = \begin{bmatrix} \frac{y_k^{(+)} - y_k^{(-)}}{2c_k \Delta_{k1}} \\ \vdots \\ \frac{y_k^{(+)} - y_k^{(-)}}{2c_k \Delta_{kp}} \end{bmatrix} = \frac{y_k^{(+)} - y_k^{(-)}}{2c_k} \begin{bmatrix} (\Delta_{k1})^{-1} \\ \vdots \\ (\Delta_{kp})^{-1} \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

όπου $\Delta_k \in \mathcal{R}^p$, ένα διάνυσμα από p αμοιβαίως ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές με μέση τιμή μηδέν. Από μελέτες που έχουν γίνει από τον J. Spall [23], προκύπτει ότι τα Δ_k είναι προτιμότερο να ακολουθούν την συμμετρική κατανομή Bernoulli.

Η δυσκολία σε αυτόν τον αλγόριθμο έγκειται στην επιλογή των τιμών των μεταβλητών που σχετίζονται με τις ακολουθίες $\{a_k\}$ και $\{c_k\}$, δηλαδή των a, A, α για την πρώτη και c, γ για τη δεύτερη [23,25]. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα βήματα του αλγορίθμου SPSA.

Βήμα 1: Αρχικοποίηση και επιλογή των τιμών των συντελεστών. Αρχίζουμε τις επαναλήψεις θέτοντας $k=1$. Ορίζουμε τους μη αρνητικούς συντελεστές a, c, A, α, γ για τις ακολουθίες $a_k = \frac{a}{(k+A)^\alpha}$ και $c_k = \frac{c}{k^\gamma}$. Η επιλογή των ακολουθιών a_k και c_k παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του SPSA αλγορίθμου.

Βήμα 2: Δημιουργία του διανύσματος ταυτόχρονης διαταραχής Δ_k . Με τη βοήθεια της γεννήτριας Monte Carlo, δημιουργούμε το τυχαίο διάνυσμα διάστασης p , του οποίου τα στοιχεία είναι αμοιβαίως ανεξάρτητα και το κάθε ένα από αυτά ακολουθεί κατανομή με μέση τιμή μηδέν. Μία απλή και θεωρητικά έγκυρη κατανομή είναι η Bernoulli ± 1 με πιθανότητα $1/2$ για κάθε ένα από τα ± 1 εξαγόμενα. Να

σημειωθεί ότι οι τυχαίες μεταβλητές δεν επιτρέπεται να ακολουθούν ομοιόμορφη και κανονική κατανομή.

Βήμα 3: Μετρήσεις της προς ελαχιστοποίηση συνάρτηση. Παίρνουμε δύο τιμές της συνάρτησης L , οι οποίες βασίζονται στην ταυτόχρονη διαταραχή γύρω από το τρέχον διάνυσμα $\hat{\theta}_k$, δηλαδή την $y(\hat{\theta}_k + \text{διαταραχή}) = y(\hat{\theta}_k + c_k \Delta_k) = y_k^{(+)}$ και την $y(\hat{\theta}_k - \text{διαταραχή}) = y(\hat{\theta}_k - c_k \Delta_k) = y_k^{(-)}$, όπου τα c_k και Δ_k υπολογίζονται στα Βήματα 1 και 2 του αλγορίθμου.

Βήμα 4: Προσέγγιση του διανύσματος κλίσης. Δημιουργούμε την ταυτόχρονα διαταραγμένη εκτίμηση του άγνωστου διανύσματος κλίσης $g_k(\hat{\theta}_k)$ από τον τύπο:

$$\hat{g}_k(\hat{\theta}_k) = \begin{bmatrix} \frac{y_k^{(+)} - y_k^{(-)}}{2c_k \Delta_{k1}} \\ \vdots \\ \frac{y_k^{(+)} - y_k^{(-)}}{2c_k \Delta_{kp}} \end{bmatrix} = \frac{y_k^{(+)} - y_k^{(-)}}{2c_k} \begin{bmatrix} (\Delta_{k1})^{-1} \\ \vdots \\ (\Delta_{kp})^{-1} \end{bmatrix},$$

όπου το Δ_{ki} είναι το i -οστό στοιχείο του διανύσματος Δ_k . Ο κοινός αριθμητής και στα p στοιχεία του $\hat{g}_k(\hat{\theta}_k)$ φανερώνει την ταυτόχρονη διαταραχή όλων των στοιχείων του διανύσματος $\hat{\theta}_k$, σε αντίθεση με την περίπτωση της προσέγγισης με πεπερασμένες διαφορές όπου το κάθε στοιχείο επιδέχεται τη διαταραχή ξεχωριστά.

Βήμα 5: Ενημέρωση της εκτίμησης θ . Το νέο $\hat{\theta}$ υπολογίζεται από τον τύπο (2.4):

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k - a_k \hat{g}_k(\hat{\theta}_k)$$

Κάποιες φορές είναι απαραίτητη η μετατροπή της παραπάνω σχέσης ή η επιβολή περιορισμών ώστε να επιτευχθεί η σύγκλιση [24]. Έτσι, το $\hat{\theta}_{k+1}$ μπορεί να μεταβάλλεται ή να απορρίπτεται εάν η τιμή που του προσδίδεται από τη σχέση (2.4) κριθεί ακατάλληλη. Μία προσέγγιση είναι να κρατήσουμε τη νέα τιμή του $\hat{\theta}_{k+1}$ αν και μόνο εάν ικανοποιούνται οι δύο παρακάτω συνθήκες:

Συνθήκη 1: Η νόρμα της νέας τιμής του $\hat{\theta}$ να είναι μικρότερη από αυτή της προηγούμενης.

Συνθήκη 2: Η συνάρτηση να μειώνεται σε κάθε επανάληψη, τουλάχιστον κατά μία θετική ποσότητα, που τη συμβολίζουμε με “tolerance”. Αν θέσουμε την τιμή αυτής της ποσότητας σαν το διπλάσιο της διασποράς του θορύβου που υπάρχει στις μετρήσεις της συνάρτησης, τότε έχουμε εξασφαλίσει μια ουσιαστική βελτίωση ανά βήμα.

Βήμα 6: Επανάληψη ή τερματισμός. Επιστρέφουμε στο Βήμα 2, θέτοντας $k = k + 1$ εάν η συνθήκη τερματισμού του αλγορίθμου δεν ικανοποιηθεί, αλλιώς τερματίζουμε τον αλγόριθμο. Κάποιες από τις συνθήκες τερματισμού που μπορούν να εισαχθούν στον αλγόριθμο [16] είναι όταν το αποτέλεσμα των τελευταίων επαναλήψεων είναι ικανοποιητικό και η μεταβολή στην τιμή της εξόδου είναι πολύ μικρή ή όταν ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου φτάσει τον μέγιστο επιτρεπτό.

Παρακάτω, παρατίθεται ο Πίνακας (2.1) με τους ακριβείς συμβολισμούς των μεταβλητών στον κώδικα. Ο αλγόριθμος SPSA σε κωδικοποίηση στη Matlab παρατίθεται στο Παράρτημα.

Μεταβλητή	Συμβολισμός στον κώδικα
a_k	a_k
Δ_k	delta
c_k	c_k
$\hat{\theta}_k$	theta
$\hat{\theta}_k + c_k \Delta_k$	thetaplus
$\hat{\theta}_k - c_k \Delta_k$	thetaminus
$y(\hat{\theta}_k + c_k \Delta_k)$	yplus
$y(\hat{\theta}_k - c_k \Delta_k)$	yminus

$\hat{g}_k(\hat{\theta}_k)$	gkap
-----------------------------	------

Πίνακας 2.1: Οι συμβολισμοί των μεταβλητών του αλγορίθμου στον κώδικα της Matlab που παρατίθεται στο Παράρτημα.

3 Ο Προτεινόμενος Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης AFT

3.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέραμε, η προτεινόμενη προσέγγιση AFT (Adaptive Fine-Tuning) βασίζεται σε μία ιδέα παρόμοια με αυτή της Στοχαστικής Προσέγγισης Ταυτόχρονων Διαταραχών, SPSA. Η διαφορά μεταξύ της μεθόδου SPSA και της προτεινόμενης προσέγγισης AFT είναι ότι κατά την πρώτη, η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης προσεγγίζεται μέσω των μετρήσεων της συνάρτησης που ελήφθησαν κατά την τελευταία μόνο επανάληψη του αλγορίθμου. Αντίθετα, κατά τον αλγόριθμο AFT η προσέγγιση της κλίσης πραγματοποιείται μέσω χρήσης ενός Γραμμικού-ως-προς-τις-παραμέτρους Μη-γραμμικού Προσεγγιστή (ΓΜΓΠ) που λαμβάνει πληροφορίες πολλών μετρήσεων της συνάρτησης με χρονικό ορίζοντα που καθορίζεται από τον χρήστη.

Πριν αναλύσουμε τον προτεινόμενο αλγόριθμο AFT, θα εισάγουμε το πρόβλημα το οποίο καλούμαστε να επιλύσουμε.

Έστω $f(\theta, x)$ μία κάτω φραγμένη συνάρτηση της οποίας η αναλυτική μορφή δεν είναι γνωστή και μόνο μετρήσεις της με θόρυβο είναι διαθέσιμες. Θέλουμε να επιλύσουμε το πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου διανύσματος θ^* των παραμέτρων που την ελαχιστοποιεί. Οι διαθέσιμες μετρήσεις της συνάρτησης συμβολίζονται με J . Έτσι:

$$J = f(\theta, x) + \xi, \quad (3.1)$$

όπου ξ ο θόρυβος που συνοδεύει τη μέτρηση, $f(\cdot)$ μία τουλάχιστον C^2 κάτω φραγμένη άγνωστη συνάρτηση, θ το διάνυσμα των παραμέτρων ελέγχου ή των μεταβλητών απόφασης, και x το διάνυσμα των μεταβλητών εισόδου.

Στην πράξη, μπορεί να μην είναι πάντα διαθέσιμες μετρήσεις της εισόδου x . Υποθέτουμε, όμως, ότι μία εκτίμηση \bar{x} του x είναι διαθέσιμη. Πιθανόν είναι, επίσης, να υπάρξουν περιορισμοί για τις τιμές των στοιχείων του διανύσματος θ (π.χ., εάν το θ ανήκει σε ένα φραγμένο σύνολο Θ , η ελαχιστοποίηση πραγματοποιείται δεδομένου ότι $\theta \in \Theta$). Εμείς υποθέτουμε ότι τα στοιχεία του θ μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε τιμή.

3.2 Ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Παραμέτρων AFT

Τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής:

Βήμα 0: Επιλέγουμε $\theta^0, L_r, L_h, L_g, a, \beta, \gamma$. Θέτουμε $\ell = 0$.

Το διάνυσμα θ^0 επιλέγεται αυθαίρετα και αποτελεί την αρχική μας εκτίμηση για το προς βελτιστοποίηση διάνυσμα των παραμέτρων του προβλήματος που καλούμαστε να επιλύσουμε.

Με L_r συμβολίζουμε τον αριθμό των επαναλήψεων κατά τις οποίες πραγματοποιείται προσθήκη τυχαίου θορύβου στο αρχικό διάνυσμα των παραμέτρων. Η παράμετρος L_r μπορεί να λάβει οποιαδήποτε θετική τιμή.

Οι σχεδιαστικές παράμετροι a, β, γ μπορούν να επιλεγούν όπως και στην περίπτωση του αλγορίθμου SPSA [20,22,23,25]. Για παράδειγμα, τα a, β, γ μπορούν να είναι θετικές ακολουθίες που φθίνουν σταδιακά στο μηδέν (με άπειρες ℓ_1 νόρμες). Στις διάφορες σειρές προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε,

πειραματιστήκαμε θέτοντας διάφορες τιμές στις παραμέτρους a και γ (π.χ., $a, \gamma \in [0.001, 0.1]$). Οι διάφοροι συνδυασμοί τιμών, όμως, που επιλέχτηκαν για τις παραμέτρους, δεν επηρέασε το αποτέλεσμα των προσομοιώσεων. Το πρόγραμμα, επομένως παρουσιάζει ευρωστία όσον αφορά στην επιλογή των τιμών των παραμέτρων a και γ .

Όσον αφορά στην επιλογή της τιμής της παραμέτρου β , που καθορίζει το βήμα στην μέθοδο της μέγιστης κατάβασης (gradient descent), ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Η παράμετρος β τίθεται αρχικά ίση με 0.01. Εάν η απόδοση του αλγορίθμου βελτιωθεί στην επόμενη επανάληψη (π.χ., εάν $J^\ell > J^{\ell-L_r-1}$) τότε αυξάνουμε την τιμή του β σύμφωνα με τον τύπο $\beta = \beta * 5$. Η αύξηση του β συνεχίζεται όσο ισχύει η σχέση: $J^\ell > J^{\ell-L_r-1}$. Εάν ισχύσει $J^\ell \leq J^{\ell-L_r-1}$ τότε το β παίρνει ξανά την τιμή 0.01.

Η παράμετρος L_h αναφέρεται στον αριθμό των μετρήσεων της συνάρτησης που χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση της και τον υπολογισμό της κλίσης αυτής. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε, θέσαμε την παράμετρο L_h ίση με 30. Αυτό σημαίνει ότι ο Προσεγγιστής θα χρησιμοποιήσει τα αποτελέσματα των 30 τελευταίων επαναλήψεων του αλγορίθμου προκειμένου να υπολογίσει την κλίση της συνάρτησης $f(\cdot)$. Εφόσον, ο σκοπός του ΓΜΓΠ είναι να προσεγγίσει την άγνωστη κλίση της συνάρτησης $f(\cdot)$ για μία μικρή περιοχή περί του διανύσματος των παραμέτρων ελέγχου που εξήχθησαν την τελευταία φορά που εφαρμόστηκε το βήμα $L_r + 2$ του αλγορίθμου, δεν έχει νόημα να θέσουμε το L_h ίσο με κάποια μεγάλη τιμή. Σε περίπτωση που στο L_h δοθεί μεγάλη τιμή, θα εισαχθεί στο ΓΜΓΠ πληροφορία εκτός της μικρής περιοχής που αναφέρθηκε παραπάνω, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει μείωση της προσεγγιστικής ικανότητας του.

Βήματα 1 έως L_r : Θέτουμε $\ell := \ell + 1$. Υπολογίζουμε το νέο διάνυσμα θ μέσω του τύπου:

$$\theta^\ell = \theta^{\ell-1} + \alpha \Delta^{\ell-1}, \quad (3.2)$$

όπου $\Delta^{\ell-1}$ είναι ένα διάνυσμα για i.i.d. εισόδους με μέση τιμή μηδέν και διασπορά ίση με 1.

Για κάθε θ^ℓ , λαμβάνουμε μία μέτρηση:

$$J^\ell = J(\theta^\ell, x^\ell) + \xi^\ell. \quad (3.3)$$

Στα βήματα αυτά του αλγορίθμου, πραγματοποιείται προσθήκη τυχαίου θορύβου στο αρχικό διάνυσμα των παραμέτρων ελέγχου. Με δεδομένο το κάθε νέο διάνυσμα των παραμέτρων, λαμβάνουμε και μία μέτρηση J της άγνωστης συνάρτησης $f(\cdot)$. Κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της στρατηγικής TUC, οι μετρήσεις J εξάγονται από ένα μακροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης, το METACOR (βλέπε Κεφάλαιο 5).

Κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου AFT για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της στρατηγικής TUC, η τιμή της παραμέτρου L_r δεν διατηρείται συνεχώς σταθερή. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου, η τιμή της παραμέτρου L_r επιλέγεται ίση με 5. Κατά τις επόμενες όμως, η παράμετρος παίρνει την τιμή 1. Αυτό σημαίνει ότι τις 5 πρώτες μέρες των προσομοιώσεων, το θ που λαμβάνει μέρος στους υπολογισμούς κάθε επανάληψης είναι ένα διάνυσμα που δημιουργείται μέσω προσθήκης τυχαίου θορύβου στα στοιχεία του αρχικού διανύσματος των παραμέτρων ελέγχου. Μετά την έκτη επανάληψη, η προσθήκη του τυχαίου θορύβου πραγματοποιείται στο διάνυσμα θ κάθε δεύτερη επανάληψη.

Βήμα $L_r + 1$: Θέτουμε $\ell := \ell + 1$. Ορίζουμε τον Γραμμικό-ως-προς-τις-παραμέτρους Μη-Γραμμικό Καθολικό Προσεγγιστή με L_g όρους παλινδρόμησης:

$$\hat{J} = \mathcal{G}^T \phi(\theta, \bar{x}^\ell), \quad (3.4)$$

όπου \bar{x}^ℓ μία εκτίμηση του πραγματικού x^ℓ .

Αναζητούμε το διάνυσμα \mathcal{G}^m που ελαχιστοποιεί το σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων του ΓΜΓΠ για τις τελευταίες L_h επαναλήψεις:

$$\mathcal{G}^m = \arg \min_{\mathcal{G}} \sum_{\lambda=\max\{1, \ell-L_h\}}^{\ell-1} (J^\lambda - \mathcal{G}^T \phi(\theta^\lambda, \bar{x}^\lambda))^2 \quad (3.5)$$

Σε πολλές περιπτώσεις, οι μετρήσεις του διανύσματος εισόδου x περιέχουν θόρυβο. Μπορούμε, επομένως να υποθέσουμε ότι υπάρχει ένα γνωστό \bar{x}^ℓ που ικανοποιεί τη σχέση $\bar{x}^\ell = x^\ell + \zeta$, όπου στο ζ αποδίδεται ο θόρυβος που εισέρχεται στη μέτρηση. Κατά την εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου στην βελτιστοποίηση των παραμέτρων της TUC, το διάνυσμα εισόδου x^ℓ , περιέχει τα ιστορικά δεδομένα της καθημερινής κυκλοφοριακής ζήτησης (του αριθμού, δηλαδή, των οχημάτων που εισέρχονται στο κυκλοφοριακό δίκτυο). Η κυκλοφοριακή ζήτηση υπολογίζεται μέσω των ενδείξεων της κυκλοφοριακής ροής που λαμβάνονται από φωρατές που είναι εγκατεστημένοι σε κάθε σύνδεσμο εισόδου του δικτύου. Οι μετρήσεις αυτές είναι λογικό να περιέχουν θόρυβο. Για λόγους, επίσης, που θα αναφερθούν στο Κεφάλαιο 4, η εκτίμηση της κυκλοφοριακής ζήτησης από τις ενδείξεις των φωρατών, μπορεί να γίνει πολύ ανακριβής εξαιτίας των επαναλαμβανόμενων λανθασμένων μετρήσεων που λαμβάνονται όταν η ζήτηση στο δίκτυο είναι πολύ αυξημένη.

Όσον αφορά στους Καθολικούς Προσεγγιστές, στις περισσότερες των περιπτώσεων, ο αριθμός των όρων του διανύσματος παλινδρόμησης (regressor vector) L_g αυτών επιλέγεται μεγάλος. Με αυτό τον τρόπο, εξασφαλίζεται η προσέγγιση αγνώστων συναρτήσεων μεγάλης πολυπλοκότητας. Παρακάτω, θα αποδειχθεί ότι ο Προσεγγιστής που εισάγεται στον αλγόριθμο AFT, αρκεί να έχει τόσους όρους παλινδρόμησης όσοι χρειάζονται για να προσεγγιστεί επαρκώς η άγνωστη συνάρτηση για τιμές που να αντιστοιχούν σε μία μικρή περιοχή περί του διανύσματος των παραμέτρων ελέγχου που εξήχθησαν την τελευταία φορά που εφαρμόστηκε το βήμα $L_r + 2$ του αλγορίθμου. Το μέγεθος αυτής της περιοχής είναι ανάλογο των τιμών των παραμέτρων σχεδίασης a , β , γ , οι οποίες πρέπει να διατηρούνται μικρές ώστε ο αλγόριθμος να είναι αποδοτικός.

Να σημειωθεί, τέλος, ότι υπάρχουν πολλές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του \mathcal{G}^m (σχέση 3.5). Στις δικές μας προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ένας απλός αλγόριθμος μέγιστης κατάβασης για το σκοπό αυτό [9].

Βήμα $L_r + 2$: Υπολογίζουμε τα στοιχεία του θ^ℓ σύμφωνα με τον τύπο:

$$\theta_i^\ell = \theta_i^{\ell-L_r-1} - \beta \frac{\mathcal{G}^{mT} \phi(\theta^{\ell-L_r-1} + \gamma e_i, \bar{x}^p) - \mathcal{G}^{mT} \phi(\theta^{\ell-L_r-1} - \gamma e_i, \bar{x}^p)}{2\gamma}, \quad (3.6)$$

όπου e_i ένα διάνυσμα του οποίου τα στοιχεία είναι όλα μηδέν εκτός του i -οστού, του οποίου η τιμή είναι 1, \bar{x}^p η εκτιμώμενη τιμή του διανύσματος x^ℓ και $\theta^{\ell-L_r-1}$ το διάνυσμα των παραμέτρων το οποίο υπολογίστηκε στην προηγούμενη επανάληψη του αλγορίθμου.

Για κάθε θ^ℓ , λαμβάνουμε μία μέτρηση:

$$J^\ell = J(\theta^\ell, x^\ell) + \xi^\ell.$$

Στην εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου στην βελτιστοποίηση των παραμέτρων της στρατηγικής TUC, μία λογική επιλογή για το \bar{x}^p είναι η μέση κυκλοφοριακή ζήτηση \bar{x}^ℓ της προηγούμενης μέρας (Βλέπε Κεφάλαιο 4 για τον υπολογισμό της μέσης κυκλοφοριακής ζήτησης). Φυσικά, στην περίπτωση που μοντέλα πρόβλεψης είναι διαθέσιμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της ζήτησης της επόμενης μέρας. Αυτό θα αποδεικνυόταν ιδιαίτερα χρήσιμο ειδικά στην περίπτωση πρόβλεψης της ζήτησης κατά τη διάρκεια κάποιων ιδιαίτερων ημερών, π.χ., Σάββατα, Κυριακές, εορτές, κ.α. Κατά την εφαρμογή του AFT αλγορίθμου στην βελτιστοποίηση των παραμέτρων της TUC στρατηγικής, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στον υπολογισμό του \bar{x}^p .

Τροποποίηση του αλγορίθμου: Όπως και στην περίπτωση του αλγορίθμου SPSA, το θ που χρησιμοποιείται σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, είναι αυτό που λάβαμε την τελευταία φορά που εφαρμόσαμε το βήμα $L_r + 2$. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι σε περίπτωση που λάβουμε ένα μη ικανοποιητικό θ , τότε συνεχίζουμε τους υπολογισμούς της επόμενης επανάληψης με αυτό το θ ως δεδομένο. Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα, μπορούμε να εισάγουμε στους νέους μας υπολογισμούς το διάνυσμα θ^e αντί του $\theta^{\ell-L_r-1}$ που λάβαμε στην προηγούμενη επανάληψη. Το διάνυσμα θ^e υπολογίζεται ως εξής:

$$\theta^e = \arg \min_{\theta^\lambda, \lambda \in \{\ell-L_h, \dots, \ell-1\}} J(\theta^\lambda, x^\lambda) \quad (3.7)$$

και ταυτίζεται με το διάνυσμα θ των παραμέτρων, του οποίου η εισαγωγή στον αλγόριθμο παράγει την βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ανάμεσα σε αυτές των L_h τελευταίων επαναλήψεων.

Μπορούμε, επίσης, να επιλέξουμε και να χρησιμοποιήσουμε ένα θ^e που να αντιστοιχεί στην βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όταν στο πρόβλημα εισάγεται το χειρότερο σενάριο ζήτησης, π.χ.,

$$\theta^e = \arg \min_{\theta^\lambda, \lambda \in \{\ell-L_h, \dots, \ell-1\}} (J(\theta^\lambda, x^\lambda) |x^\lambda|^p), p > 0 \quad (3.8)$$

Βήμα $L_r + 3$: Προσαρμόζουμε τις τιμές των L_r , L_h , L_g , a , β , γ εάν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Εάν δεν ικανοποιείται κάποια από τις συνθήκες τερματισμού του αλγορίθμου επιστρέφουμε στο Βήμα 1, αλλιώς ο αλγόριθμος τερματίζεται.

Όπως προαναφέραμε, μία σωστή επιλογή για την τιμή της παραμέτρου L_r είναι να τεθεί μεγαλύτερη της μονάδας κατά την πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου (ώστε να αποκτήσει ο αλγόριθμος αρκετή πληροφορία για την άγνωστη συνάρτηση $f(\cdot)$) και να μετατραπεί σε μονάδα για όλες τις υπόλοιπες επαναλήψεις. Με τον τρόπο αυτό,

μειώνεται η αστάθεια του συστήματος, η οποία προκαλείται από την προσθήκη τυχαίου θορύβου στο θ .

Όσον αφορά στις συνθήκες τερματισμού του αλγορίθμου, οι επιλογές είναι πολλές. Ένα παράδειγμα είναι το παρακάτω:

$$J^\ell \leq \min_{\lambda \in \{1, \dots, \ell-1\}} J^\lambda + n, \quad (3.9)$$

όπου n μία σταθερά με τιμή έναν μικρό, θετικό αριθμό.

3.3 Η μαθηματική απόδειξη της σύγκλισης του Αλγορίθμου AFT

Μέσω της απόδειξης του παρακάτω θεωρήματος, αποδεικνύεται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος προσεγγίζει τη συμπεριφορά μίας τυπικής μεθόδου μέγιστης κατάβασης. Αποδεικνύονται, επομένως οι δυνατότητες σύγκλισης αυτού. Να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με αποδείξεις που αφορούν στις ιδιότητες σύγκλισης του αλγορίθμου SPSA [20,22], οι οποίες αναπτύσσονται κάτω από το στοχαστικό πλαίσιο, η παρακάτω απόδειξη ακολουθεί αιτιοκρατική ανάλυση.

Θεώρημα 1.

Υποθέτουμε ότι το \bar{x}^p της σχέσης (3.6) τίθεται ίσο με $\bar{x}^{\ell-L_r-1}$. Επίσης, υποθέτουμε ότι:

Y1. Η συνάρτηση $f(\cdot)$ είναι τουλάχιστον C^2 και $\bar{x}^\ell = x^\ell + \zeta$, με το ζ να υποδηλώνει τον ενσωματωμένο στις μετρήσεις θόρυβο.

Y2. Το διάνυσμα παλινδρόμησης $\phi(\cdot)$ ικανοποιεί τη συνθήκη persistency of excitation. Δηλαδή ισχύει:

$$c_\alpha I \leq \sum_{\lambda=\ell-L_h+1}^{\ell} \phi(\theta, \bar{x}^\lambda) \phi^T(\theta, \bar{x}^\lambda), \quad (3.10)$$

όπου c_a μία $O(a)$ θετική σταθερά.

Τότε, ισχύει:

$$\theta^\ell = \theta^{\ell-L_r-1} - \beta \frac{\partial f}{\partial \theta}(\theta^{\ell-L_r-1}, x^{\ell-L_r-1}) + O\left(\frac{1}{a}\right) + \frac{O([a, \beta, \gamma])}{O(L_g)} + O(\xi) + O(\zeta) + O(\varepsilon^\ell) \quad (3.11)$$

όπου ε^ℓ ένας εκθετικός μη αρνητικός όρος που φθίνει προς το μηδέν.

Μέσω του Θεωρήματος 1, αποδεικνύεται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος AFT είναι ισοδύναμος με έναν τυπικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης μέγιστης κατάβασης συν έναν επιπλέον όρο. Ο όρος αυτός αφορά στις διαταραχές που υπεισέρχονται στο σύστημα, και μπορεί να περιγραφεί από δύο επιμέρους όρους. Ο πρώτος όρος των διαταραχών μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα πολύ μικρός, θέτοντας τις τιμές των σχεδιαστικών παραμέτρων a , β , γ επαρκώς μικρές και/ή τον αριθμό των όρων παλινδρόμησης L_g αρκετά μεγάλο. Ο δεύτερος όρος των διαταραχών είναι ανάλογος του θορύβου και των σφαλμάτων της εκτίμησης.

Να σημειωθεί ότι, προφανώς, όταν στην εξίσωση (3.6) εισάγεται η τιμή του θ^e αντί του $\theta^{\ell-L_r-1}$ (όπου το θ^e υπολογίζεται μέσω της σχέσης (3.7) ή (3.8)), η ισότητα (3.11) του Θεωρήματος 1 αντικαθίσταται από την ισότητα:

$$\theta^\ell = \theta^e - \beta \frac{\partial f}{\partial \theta}(\theta^e, x^{\ell-L_r-1}) + O(1/a) + \frac{O([a, \beta, \gamma])}{O(L_g)} + O(\xi) + O(\zeta) + O(\varepsilon^\ell). \quad (3.12)$$

Προκειμένου να απλοποιήσουμε όσο μπορούμε την απόδειξη του Θεωρήματος 1, προσδώσαμε στο σύμβολο $O(\cdot)$ μια πιο γενική έννοια από αυτή που συνήθως ταυτίζεται μαζί του. Έτσι, η συνάρτηση $f_a(\cdot)$ με παράμετρο μία θετική σταθερά a θεωρούμε ότι είναι $O(c(a))$, όπου $c(\cdot)$ μία μη αρνητική συνάρτηση, εάν υπάρχει θετική σταθερά K τέτοια ώστε για όλα τα a και όλα τα x να ισχύει: $|f_a(x)| \leq Kc(a)$.

Η ισχύς, τέλος, της υπόθεσης (Y2), που αφορά στην persistency του διανύσματος παλινδρόμησης $\phi(\cdot)$, είναι καίρια για την απόδειξη του Θεωρήματος 1. Δεν

ικανοποιείται, όμως, αυτόματα κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου AFT για οποιαδήποτε επιλογή Καθολικού Προσεγγιστή. Στην περίπτωση που ο Προσεγγιστής που επιλέγεται είναι πολυωνυμικός (όπως αυτός που επιλέγηκε κατά τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε), η προσθήκη τυχαίου θορύβου στο αρχικό διάλυμα των παραμέτρων θ κατά τα Βήματα 1 έως L_r αρκεί για να αποκτηθεί επαρκής γνώση και να εξασφαλιστεί ότι η υπόθεση (Y2) ισχύει για το διάλυμα παλινδρόμησης $\phi(\cdot)$.

Απόδειξη Θεωρήματος 1

θεωρούμε μία χρονική στιγμή κατά τα βήματα $L_r + 1, L_r + 2$ του AFT αλγορίθμου και $\Theta_\ell^{\alpha,\beta,\gamma}$ το μικρότερο κλειστό υποσύνολο για το οποίο ισχύει η σχέση:

$$\theta^\lambda \in \Theta_\ell^{\alpha,\beta,\gamma}, \forall \lambda \in \{\ell - L_h, \dots, \ell - 1\}.$$

Προφανώς, το υποσύνολο $\Theta_\ell^{\alpha,\beta,\gamma}$ εξαρτάται από τις τιμές των σχεδιαστικών παραμέτρων a, β, γ . Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο μικρές οι τιμές των παραμέτρων τόσο πιο μικρό είναι το υποσύνολο $\Theta_\ell^{\alpha,\beta,\gamma}$. Ξαναγράφουμε την κλίση της $f(\cdot)$ ως εξής:

$$\frac{\partial f}{\partial \theta}(\theta, x) = \frac{\partial f}{\partial \theta}(\theta, \bar{x}) + f_n(\theta, x - \bar{x}),$$

όπου, εξαιτίας της υπόθεσης (Y1) που κάναμε, η $\frac{\partial f}{\partial \theta}(\theta, x)$ είναι τοπικά συνεχής κατά Lipschitz (βλέπε σχέση (1.1)) και η $f_n(\theta, x - \bar{x})$ είναι μία συνάρτηση που ικανοποιεί τη σχέση:

$$|f_n(\theta, x - \bar{x})| \leq c_1 |x - \bar{x}|, \forall \theta \in \Theta_\ell^{\alpha,\beta,\gamma} \quad (3.13)$$

για κάποιες θετικές τιμές της σταθεράς c_1 . Επιλέγουμε τον αριθμό L των όρων παλινδρόμησης του προσεγγιστή.

Ορίζοντας $\mathcal{G}^* := W(L, \phi, f, \Theta_\ell^{\alpha, \beta, \gamma}) := \arg \min_{\mathcal{G}} \sup_{\theta \in \Theta_\ell^{\alpha, \beta, \gamma}} |f(\theta, \bar{x}) - \mathcal{G}^{*T} \phi(\bar{x})|$ και

$\nu(\theta) := N(L, \phi, f, \Theta_\ell^{\alpha, \beta, \gamma})(\theta) := f(\theta, \bar{x}) - \mathcal{G}^{*T} \phi(\bar{x})$, έχουμε:

$$f(\theta, x) = \mathcal{G}^{*T} \phi(\theta, \bar{x}) + \nu(\theta) + f_n(\theta, x - \bar{x}).$$

Επομένως,

$$f(\theta, x) - \hat{J} = \tilde{\mathcal{G}}^T \phi(\theta, \bar{x}) + \nu(\theta) + f_n(\theta, x - \bar{x}),$$

όπου το $\tilde{\mathcal{G}} := \mathcal{G}^* - \mathcal{G}^m$ δηλώνει το σφάλμα στην εκτίμηση των παραμέτρων. Συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί από διάφορες εφαρμογές της θεωρίας εκτίμησης παραμέτρων (βλέπε π.χ., [9,12]) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποδειχθεί ότι, εφόσον ισχύει η συνθήκη persistency of excitation, η παρακάτω σχέση ικανοποιείται:

$$|\tilde{\mathcal{G}}^T| \leq \bar{c}_a + c_2 |x - \bar{x}| + c_3 |\nu(\theta)| + c_3 |\xi| + \varepsilon,$$

όπου το c_a είναι μία $O(1/\alpha)$ θετική σταθερά, c_2, c_3 είναι θετικές σταθερές, ε είναι ένας εκθετικός όρος που φθίνει προς το μηδέν, και έτσι τελικά λαμβάνουμε:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \theta}(\theta, x) &= \frac{\partial \mathcal{G}^{mT} \phi}{\partial \theta}(\theta, \bar{x}) + \frac{\partial \tilde{\mathcal{G}}^T \phi}{\partial \theta}(\theta, \bar{x}) + \frac{\partial \nu}{\partial \theta}(\theta) + \frac{\partial f_n}{\partial \theta}(\theta, x - \bar{x}) = \\ &= \frac{\partial \mathcal{G}^{mT} \phi}{\partial \theta}(\theta, \bar{x}) + \bar{\nu}, \end{aligned}$$

όπου $\bar{\nu} = \frac{\partial \tilde{\mathcal{G}}^T \phi}{\partial \theta}(\theta, \bar{x}) + \frac{\partial \nu}{\partial \theta}(\theta) + \frac{\partial f_n}{\partial \theta}(\theta, x - \bar{x}) \Rightarrow$

$$\begin{aligned} |\bar{\nu}| &\leq (\bar{c}_a + c_2 |x - \bar{x}| + c_3 |\nu(\theta)| + c_3 |\xi|) c_4 + c_5 |x - \bar{x}| \\ &\leq O(1/\alpha) + O(\zeta) + O(\xi) + c_6 |\nu(\theta)| + O(\varepsilon), \end{aligned}$$

όπου c_4 μία θετική σταθερά που ικανοποιεί τη σχέση $c_4 = \sup_{\theta \in \Theta_\ell^{\alpha, \beta, \gamma}, \bar{x}} \left| \frac{\partial \phi}{\partial \theta}(\theta, \bar{x}) \right|$, c_5

μία θετική σταθερά που εξαρτάται από το μέγεθος του $\Theta_\ell^{\alpha, \beta, \gamma}$ και $c_6 = c_3 c_4$.

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα των διάφορων εφαρμογών της προσεγγιστικής θεωρίας [8], συμπεραίνουμε ότι το μέγεθος του όρου του σφάλματος της μοντελοποίησης $|v(\theta)|$ είναι ανάλογο του μεγέθους του υποσυνόλου $\Theta_\ell^{\alpha,\beta,\gamma}$ και αντιστρόφως ανάλογο του αριθμού L_g των όρων παλινδρόμησης.

Κατά συνέπεια, λαμβάνουμε $\bar{v} = O(1/\alpha) + O(\zeta) + O(\xi) + \frac{O([a, \beta, \gamma])}{O(L_g)} + O(\varepsilon)$, ολοκληρώνοντας την απόδειξη του θεωρήματος.

Η απόδειξη του Θεωρήματος 1 μπορεί να επεκταθεί και να καλύψει περιπτώσεις όπου η συνάρτηση $f(\cdot)$ δεν είναι απαραίτητα C^2 . Η απόδειξη για αυτή την περίπτωση είναι πολύ μακροσκελής και γι' αυτό παραλείπεται.

3.4 Η χρήση του Προσαρμοστικού Αλγόριθμου (AFT) για Μη-Γραμμικό Έλεγχο για συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα.

Ο Προτεινόμενος Αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας για την Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Μη-Γραμμικών Συστημάτων Ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε ένα Μη-Γραμμικό Σύστημα Ελέγχου Διακριτού χρόνου:

$$z_{k+1} = g(z_k, u_k, d_k), \quad z_0 = z(0) \quad (3.14)$$

όπου z_k, u_k, d_k τα διανύσματα της κατάστασης του συστήματος, των εισόδων του ελέγχου, και των εξωγενών παραγόντων αντίστοιχα. Η μεταβλητή k είναι ο δείκτης του χρόνου και $g(\cdot)$ είναι μία πιθανών άγνωστη επαρκώς ομαλή μη-γραμμική διανυσματική συνάρτηση. Υποθέτουμε ότι ο παρακάτω κανόνας ελέγχου εφαρμόζεται στο σύστημα (3.14):

$$u_k = \varpi(\theta, z_k), \quad (3.15)$$

όπου $\varpi(\cdot)$ μία γνωστή διανυσματική συνάρτηση και θ το διάνυσμα των παραμέτρων ελέγχου του συστήματος. Η επίδοση του ελεγκτή (3.15) εκτιμάται μέσω της παρακάτω αντικειμενικής συνάρτησης:

$$J(\theta; z_0, D_K) = \pi_K(z_K) + \sum_{k=0}^{K-1} \pi_k(z_k, u_k) = \pi_K(z_K) + \sum_{k=0}^{K-1} \pi_k(z_k, \varpi(\theta, z_k)), \quad (3.16)$$

όπου π_k γνωστές μη αρνητικές συναρτήσεις, K ο χρονικός ορίζοντας στα πλαίσια του οποίου εφαρμόζεται ο κανόνας ελέγχου (3.15), και $D_K \triangleq [d_0, d_1, \dots, d_{K-1}]$ οι ιστορικές τιμές των εξωγενών παραγόντων.

Το πρόβλημα της αποδοτικής βελτιστοποίησης των παραμέτρων ελέγχου θ , επιλύεται μέσω εφαρμογής ενός αλγορίθμου ο οποίος, ξεκινάει με δεδομένο ένα αρχικό διάνυσμα θ και σε κάθε επανάληψή του παράγει ένα νέο. Στη συνέχεια, υπολογίζει τις επιδόσεις της στρατηγικής ελέγχου (3.15) για τα διάφορα νέα θ και επιλέγει αυτό που αντιστοιχεί στη βέλτιστη επίδοση. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε θ ο αλγόριθμος παράγει μία εκτίμηση της τιμής της συνάρτησης (3.16). Το θ που επιλέγεται ως βέλτιστο είναι αυτό που αντιστοιχεί στην εκτίμηση της συνάρτησης με τη βέλτιστη (ελάχιστη) τιμή. Για τη σωστή σύγκριση των τιμών των εκτιμήσεων της άγνωστης συνάρτησης, πρέπει να λαμβάνεται κάθε φορά υπόψη το σενάριο z_0, D_K που έχει εισαχθεί στο σύστημα ελέγχου για την λήψη των συγκεκριμένων εκτιμήσεων. Η επιλογή του βέλτιστου θ πρέπει να αφορά σε όλα τα πιθανά σενάρια εισόδου. Εξαιτίας, τέλος, της μη-γραμμικής φύσης της (3.16), το βέλτιστο θ που επιλέγεται μπορεί να αντιστοιχεί σε κάποιο τοπικό και όχι ολικό ελάχιστό της συνάρτησης (3.16).

Ορίζοντας $x = \text{vec}(z_0, D_K)$, η ελαχιστοποίηση της (3.16) - και κατά συνέπεια ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης παραμέτρων - περιορίζεται στην ελαχιστοποίηση της (3.1). Συνεπώς, ο Προτεινόμενος Αλγόριθμος AFT και το Θεώρημα 1 είναι απευθείας εφαρμόσιμα στο πρόβλημα βελτιστοποίησης παραμέτρων που περιγράφηκε

παραπάνω. Να σημειωθεί ότι η εφαρμογή του Προτεινόμενου Αλγορίθμου σε ένα μη-γραμμικό σύστημα της μορφής (3.14)-(3.16) δεν εγγυάται ότι οι κλειστού βρόχου λύσεις που λαμβάνονται για τις διαφορετικές επιλογές του θ θα είναι ευσταθείς. Μπορεί να υπάρξουν, για παράδειγμα, ημέρες όπου η απόδοση του συστήματος θα είναι μη ικανοποιητική, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε, ξεπεράσαμε μερικώς το παραπάνω πρόβλημα πραγματοποιώντας έναν επιπλέον έλεγχο σε μη-πραγματικό χρόνο (off-line test) πριν από κάθε έλεγχο πραγματικού χρόνου (on-line test) της απόδοσης της στρατηγικής ελέγχου για το νέο διάνυσμα θ των παραμέτρων. Σε αυτόν τον έλεγχο μη-πραγματικού χρόνου, οι αποφάσεις ελέγχου που λαμβάνονται από το σύστημα με δεδομένα το νέο διάνυσμα θ και τα αποθηκευμένα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των προηγούμενων ημερών, συγκρίνονται με παλιότερες αποφάσεις που οδήγησαν σε ικανοποιητικές επιδόσεις του συστήματος. Εάν η σύγκριση δεν φανερώσει σημαντικές διαφορές μεταξύ αυτών των αποφάσεων, τότε το νέο θ εισάγεται στο σύστημα και αξιολογείται και σε πραγματικό χρόνο.

Όπως προαναφέρθηκε, η παραπάνω μέθοδος επιλύει μερικώς το κρίσιμο πρόβλημα της πιθανής αστάθειας του συστήματος κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου AFT, που παραμένει ακόμα ανοιχτό. Οι μελλοντική μας έρευνα επικεντρώνεται στην επίλυση του.

4 Η στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης TUC

4.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα ελέγχου αστικής κυκλοφορίας αποτελούν ένα επιστημονικό χώρο με μακρόχρονη και πλούσια ερευνητική δραστηριότητα. Πολλές μεθοδολογίες έχουν προταθεί, αλλά μέχρι σήμερα δεν έχει βρεθεί μια στρατηγική που να ικανοποιεί όλες τις ανάγκες που κατά καιρούς έχουν εκφραστεί σχετικά με το συντονισμένο έλεγχο μεγάλων αστικών δικτύων σε πραγματικό χρόνο. Ευρέως χρησιμοποιούμενες στρατηγικές συντονισμένου ελέγχου κυκλοφορίας μεγάλων δικτύων σε πραγματικό χρόνο, οι οποίες αναπτύχθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '80, όπως το SCOOT και το SCATS, έχουν κριθεί ότι δεν ανταποκρίνονται ικανοποιητικά σε απότομες μεταβολές των κυκλοφοριακών συνθηκών. Άλλες προηγμένες μέθοδοι που αναπτύχθηκαν στη συνέχεια, όπως για παράδειγμα OPAC, PRODYN, CRONOS και UTOPIA, χρησιμοποιούν αλγόριθμους η εκθετική πολυπλοκότητα των οποίων δεν επιτρέπει την άμεση εφαρμογή τους σε επίπεδο δικτύου. Κατά συνέπεια, οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται σε επίπεδο κόμβου, ενώ για το συντονισμό σε επίπεδο δικτύου υιοθετούν κάποια ιεραρχικά ανώτερα επίπεδα ελέγχου. Όμως, λόγω της ευρετικής φύσης αυτών των ανώτερων επιπέδων ελέγχου, ο επιθυμητός συντονισμός σε επίπεδο δικτύου τελικά δεν διασφαλίζεται επαρκώς.

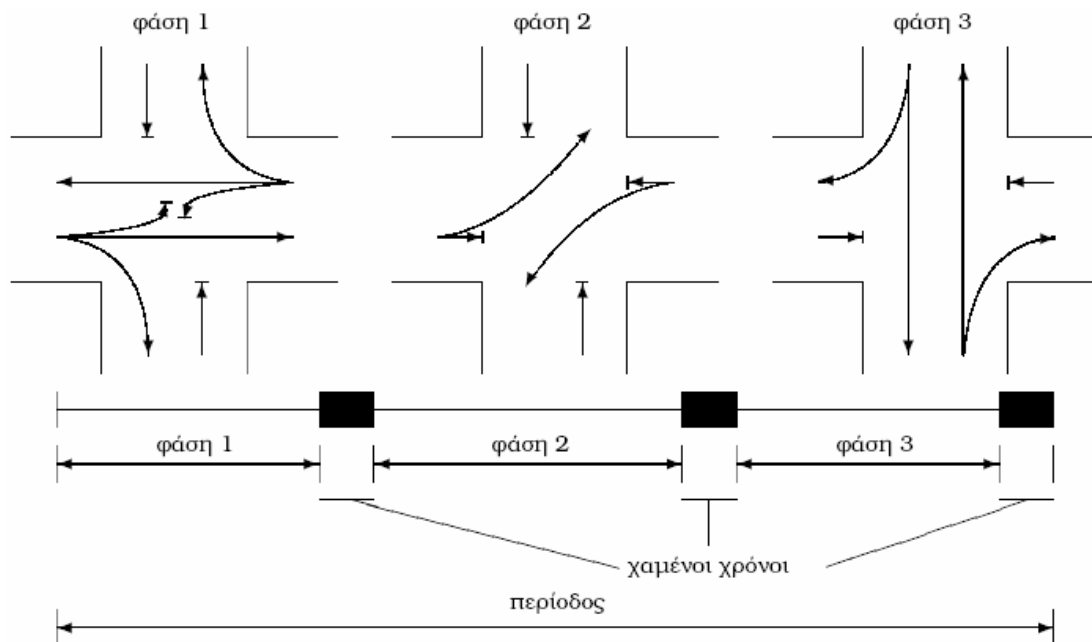
Στην παρούσα διατριβή, ο προτεινόμενος αλγόριθμος βελτιστοποίησης AFT, εφαρμόζεται για την ρύθμιση των παραμέτρων μίας στρατηγικής ελέγχου πραγματικού χρόνου, την TUC (Traffic-responsive Urban Control), η οποία έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης, με στόχο την αντιμετώπιση του προβλήματος της φωτεινής

σηματοδότησης σε δίκτυα ευρείας κλίμακας, κυρίως κάτω από κορεσμένες συνθήκες, με τη χρήση αποτελεσματικών μεθόδων βελτιστοποίησης και ελέγχου.

4.2 Βασικές έννοιες του ελέγχου κυκλοφορίας

Ένας αστικός κόμβος αποτελείται από ένα σύνολο προσεγγίσεων και μια κοινή διασταύρωση. Μια προσέγγιση είναι μέρος ενός δρόμου που αποτελείται από μια ή παραπάνω λωρίδες. Η κυκλοφορία σε ένα κόμβο διαιρείται σε ρεύματα όπου κάθε προσέγγιση χρησιμοποιείται από ένα αντίστοιχο ρεύμα και κάθε ρεύμα έχει ιδιαίτερη σηματοδότηση. Δύο ή παραπάνω ρεύματα καλούνται **συμβατά** (compatible) όταν μπορούν να διασχίσουν τον κόμβο ταυτόχρονα με ασφάλεια, αλλιώς καλούνται **ασύμβατα** ή **ανταγωνιστικά** (antagonistic). **Ροή κορεσμού** (saturation flow) είναι η μέση ροή που περνάει τη γραμμή διακοπής πορείας μιας προσέγγισης όταν το αντίστοιχο ρεύμα έχει προτεραιότητα και η ανάντη ζήτηση (ή η ουρά αναμονής) είναι αρκούντως μεγάλη. Μια **περίοδος** σηματοδότησης είναι μια επανάληψη της βασικής σειράς των συνδυασμών σημάτων σε ένα κόμβο. Η διάρκειά της καλείται **διάρκεια περιόδου** ή **κύκλος** (cycle). Μια **φάση** (phase) είναι ένα μέρος της περιόδου κατά το οποίο έχει προτεραιότητα ένα σύνολο ρευμάτων (Σχήμα 1.1). Οι φάσεις διαδέχονται η μια την άλλη κατά προκαθορισμένη κυκλική σειρά (sequence of phases).

Προκειμένου να αποφευχθεί η παρεμβολή μεταξύ ανταγωνιστικών ρευμάτων σε διαδοχικές φάσεις, προβλέπονται σταθεροί **χαμένοι χρόνοι** (lost times) λίγων δευτερολέπτων ανάμεσα στις φάσεις (Σχήμα 4.1). Ο χρόνος που προκύπτει αν αφαιρεθεί από την περίοδο ο χαμένος χρόνος ονομάζεται **αποτελεσματικός χρόνος** (effective time). Είναι ο χρόνος που χρησιμοποιείται για την κίνηση των οχημάτων και υποδιαιρείται στις διάφορες φάσεις για την εξυπηρέτηση των αντίστοιχων κινήσεων. Σε κόμβους με μεγάλη κίνηση πεζών, είναι δυνατή η δημιουργία μιας ιδιαίτερης φάσης για την αποτελεσματική εξυπηρέτηση των πεζών που μπορούν έτσι να κινηθούν ταυτόχρονα σε όλες τις κατευθύνσεις, ακόμα και διαγώνια. Κατά την διάρκεια αυτής της φάσης, όλοι οι σηματοδότες οχημάτων παρουσιάζουν κόκκινη ένδειξη που ονομάζεται **καθολική κόκκινη ένδειξη** (all red period).



Σχήμα 4.1: Δομή σηματοδότησης κόμβου.

4.3 Ταξινόμηση των στρατηγικών ελέγχου

Τα συστήματα ελέγχου που βρίσκονται σήμερα σε εφαρμογή ή υπό ανάπτυξη μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τα εξής τρία κριτήρια [15]:

- Τα συστήματα **σταθερού χρόνου** (fixed-time) λειτουργούν καθημερινά κατά τον ίδιο τρόπο, σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο ημερήσιο πρόγραμμα, ενώ τα συστήματα **πραγματικού χρόνου** (traffic responsive ή real-time) προσαρμόζουν τις αποφάσεις τους στις εκάστοτε επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες.
- Τα **μεμονωμένα** (isolated) συστήματα περιορίζουν το πεδίο δράσης τους σε μια μόνο διασταύρωση, ενώ τα **συντονισμένα** (coordinated) συστήματα αναφέρονται σε μια περιοχή ή ακόμα και σε ένα ολόκληρο δίκτυο αποτελούμενο από πολλές διασταυρώσεις.

- Κάποια συστήματα είναι εφαρμόσιμα μόνο σε συνθήκες **ακόρεστης** (undersaturated) κυκλοφορίας, όταν δηλαδή η ζήτηση είναι χαμηλότερη από την κυκλοφοριακή ικανότητα της διασταύρωσης ή του δικτύου, ενώ άλλα εφαρμόζονται σε περίπτωση **κορεσμένης** (saturated) κυκλοφορίας.

4.4 Η στρατηγική TUC

Η στρατηγική TUC (Traffic-responsive Urban Control) αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της κατάστασης σηματοδότησης σε ευρεία δίκτυα κυρίως κάτω από υπερκορεσμένες συνθήκες, ένα πρόβλημα για το οποίο ακόμη δεν έχει βρεθεί μία ολοκληρωτική λύση. Σε αντίθεση με άλλες προταθείσες μεθόδους, η προσέγγιση ανατροφοδότησης που προτείνει η TUC έχει σαν αποτέλεσμα την εφαρμογή συστηματικών και δυναμικών μεθόδων λήψης αποφάσεων. Η βασική φιλοσοφία και σημασία αυτών των μεθόδων έχει να κάνει με την ευρεία εφαρμογή τους σε κάθε διαδικασία που μπορεί να περιγραφεί από συγκεκριμένου τύπου μαθηματικά μοντέλα, ανεξαρτήτως της φύσης της διαδικασίας. Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με άλλες προτεινόμενες μεθόδους, η συγκεκριμένη προσέγγιση της στρατηγικής TUC επιτρέπει τη χρήση αποτελεσματικών μεθόδων βελτιστοποίησης και ελέγχου με εύκολη εφαρμογή στο δίκτυο, εγκατάσταση και συντήρηση καθώς και μικρές απαιτήσεις όσον αφορά τις αναγκαίες μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο.

Η TUC αναπτύχθηκε αρχικά ως μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος κυκλοφοριακού ελέγχου για δίκτυα στα πλαίσια του προγράμματος European Telematics Applications in Transport TABASCO (Telematics Applications in BAvaria, SCotland and Others). Η πρώτη έκδοση της στρατηγικής TUC χειριζόταν μόνο τη διάρκεια των φάσεων [5], ενώ περαιτέρω ανάπτυξη οδήγησε σε πραγματικό έλεγχο της διάρκειας της περιόδου και της χρονικής διαφοράς έναρξης των πρασίνων μεταξύ διαδοχικών διασταυρώσεων που αποτελούν τμήματα μίας αρτηρίας [6]. Μια επιπλέον επέκταση που έχει σήμερα η στρατηγική είναι αυτή της παροχής προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς.

4.4.1 Η δομή της στρατηγικής TUC

Η στρατηγική TUC αποτελείται από πέντε τμήματα:

- **Έλεγχος διάρκειας φάσεων.** Αυτό το τμήμα ήταν το πρώτο που αναπτύχθηκε. Το αντικείμενο ελέγχου είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου υπερκορεσμού του δικτύου και της διάχυσης των ουρών στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της κατάλληλης διαχείρισης της διάρκειας του πρασίνου στις σηματοδοτημένες διασταυρώσεις για σταθερή περίοδο και σταθερή διαφορά χρόνων έναρξης πρασίνων διαδοχικών διασταυρώσεων.
- **Έλεγχος διάρκειας περιόδου.** Αυτό το τμήμα αποτελεί μία επέκταση της στρατηγικής TUC. Πραγματοποιείται μέσω ενός απλού, βασισμένου σε ανατροφοδότηση αλγορίθμου ο οποίος μεταβάλλει τις διάρκειες των περιόδων στο δίκτυο, με σκοπό να προσαρμοστούν στις τρέχουσες παρατηρούμενες τιμές του επιπέδου κορεσμού στο δίκτυο.
- **Έλεγχος χρονικής διαφοράς.** Αυτό το τμήμα αποτελεί επίσης μία επέκταση της στρατηγικής TUC. Πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής ενός αποκεντρωμένου κανόνα ελέγχου με ανατροφοδότηση, ο οποίος τροποποιεί τη χρονική διαφορά έναρξης των πρασίνων μεταξύ διαδοχικών διασταυρώσεων που αποτελούν τμήματα αρτηρίας με σκοπό τη δημιουργία πράσινων κυμάτων, λαμβάνοντας υπόψη πιθανή ύπαρξη ουρών.
- **Παροχή προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς.** Το τμήμα αυτό της στρατηγικής αποσκοπεί στην παροχή προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς μέσω κατάλληλης τροποποίησης των αποτελεσμάτων των προηγούμενων τμημάτων της στρατηγικής TUC.
- **Επεξεργασία δεδομένων.** Αυτό το τμήμα είναι υπεύθυνο για τη συλλογή, συμπλήρωση και επεξεργασία των στοιχείων πραγματικού χρόνου που συλλέγονται από το υπό εξέταση δίκτυο με σκοπό την προετοιμασία των

απαιτούμενων δεδομένων εισόδου για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα τμήματα της στρατηγικής TUC.

Το τμήμα της επεξεργασίας των δεδομένων συλλέγει από το δίκτυο τα αναγκαία δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Μετά τον έλεγχο και την κατάλληλη επεξεργασία, τα δεδομένα αποστέλλονται στα άλλα τέσσερα τμήματα της στρατηγικής TUC, δηλαδή του ελέγχου της διάρκειας των φάσεων, της διάρκειας της περιόδου και της χρονικής διαφοράς, καθώς και της παροχής προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς. Βασισμένα σε αυτά τα δεδομένα, τα τμήματα του ελέγχου της περιόδου και της χρονικής διαφοράς εκτελούν τα βήματα ελέγχου και αποστέλλουν τις αποφάσεις στο τμήμα του ελέγχου της διάρκειας των φάσεων. Δεδομένου αυτών των αποφάσεων και των δεδομένων, το τμήμα αυτό εκτελεί τον δικό του έλεγχο και παρέχει ολοκληρωμένες αποφάσεις για την λειτουργία της σηματοδότησης οι οποίες στη συνέχεια θα εκτελεστούν. Αν και το τμήμα της παροχής προτεραιότητας είναι ενεργό, μπορεί να τροποποιήσει περαιτέρω τις ολοκληρωμένες αποφάσεις που προέκυψαν από τον έλεγχο της διάρκειας των φάσεων, με σκοπό να ικανοποιηθούν αιτήματα παροχής προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς. Οι τελικές αποφάσεις μπορούν να υλοποιηθούν με οποιαδήποτε μορφή η οποία να ικανοποιεί τις απαιτούμενες ανάγκες του συγκεκριμένου δικτύου εφαρμογής.

Τα δεδομένα που απαιτούνται από τα τμήματα ελέγχου της διάρκειας των φάσεων, της διάρκειας της περιόδου και της χρονικής διαφοράς, σε πραγματικό χρόνο είναι ο αριθμός οχημάτων μέσα στο δίκτυο. Ο μόνος τρόπος για να πάρουμε αυτά τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο είναι μέσω συστημάτων οπτικής ανίχνευσης οχημάτων. Σε αντίθετη περίπτωση και εξαιτίας του υψηλού κόστους τέτοιων συστημάτων, χρησιμοποιούνται μαγνητικοί φωρατές οι οποίοι μετρούν την κατάληψη του δικτύου και τη ροή των οχημάτων σε κάθε σύνδεσμο. Επιπρόσθετα με τα παραπάνω απαιτούμενα δεδομένα, το τμήμα παροχής προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς απαιτεί και την γνώση των διαδρομών των μέσων μαζικής μεταφοράς μέσα στο ελεγχόμενο δίκτυο.

Για το σχεδιασμό και την εφαρμογή της στρατηγικής, το δίκτυο μπορεί να χωριστεί σε μικρότερα δίκτυα. Το κριτήριο του διαχωρισμού αυτού είναι να μην επηρεάζουν σημαντικά οι κυκλοφοριακές συνθήκες ενός υποδικτύου τις κυκλοφοριακές συνθήκες

στα άλλα υποδίκτυα, ενώ ταυτόχρονα να υπάρχει μεγάλη συσχέτιση και αλληλεπίδραση μεταξύ των διασταυρώσεων μέσα σε κάθε υποδίκτυο. Κάθε υποδίκτυο αποτελείται από συνδέσμους $z \in Z$ όπου Z είναι το σύνολο όλων των συνδέσμων που αποτελούν τις κατευθύνσεις που έχουν την ίδια στιγμή προτεραιότητα, και διασταυρώσεις $j \in J$ με J το σύνολο των διασταυρώσεων όπου οι κατευθύνσεις διασταυρώνονται. Επιπλέον, I_j και O_j είναι το σύνολο όλων των συνδέσμων εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα, από τη δεδομένη διασταύρωση του δικτύου j .

Στη συνέχεια, θα γίνει μία λεπτομερής αναφορά στο τμήμα ελέγχου της διάρκειας των φάσεων της στρατηγικής TUC (Split Control Module), του οποίου τμήματος οι παράμετροι βελτιστοποιούνται στην παρούσα εργασία, μέσω της χρήσης της προτεινόμενης μεθόδου AFT.

4.4.2 Έλεγχος διάρκειας των φάσεων

Όπως προαναφέρθηκε, το αντικείμενο ελέγχου αυτού του τμήματος είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου υπερκορεσμού του δικτύου και της διάχυσης των ουρών στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της κατάλληλης διαχείρισης της διάρκειας του πρασίνου στις σηματοδοτημένες διασταυρώσεις για δεδομένη περίοδο και διαφορά χρόνων έναρξης πρασίνου διαδοχικών διασταυρώσεων. Τα αποτελέσματα όσον αφορά στις συνθήκες σηματοδότησης προκύπτουν από την εφαρμογή ενός απλού κανόνα ελέγχου με ανατροφοδότηση.

Θεωρούμε μία διασταύρωση με σηματοδότηση $j \in J$ και περίοδο C_j η οποία περιλαμβάνει ένα σύνολο σταδίων i που ανήκουν στο σύνολο F'_j και μπορούν να διαχωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Μεταβλητά στάδια τα οποία ανήκουν στο σύνολο F'_j και υπόκεινται σε τροποποιήσεις μέσα σε δεδομένα όρια.

- Σταθερά στάδια που ανήκουν στο σύνολο $F'_j - F_j$ τα οποία έχουν σχεδιαστεί για λόγους ασφαλείας και οποιαδήποτε τροποποίηση τους απαγορεύεται.

Η στρατηγική TUC τροποποιεί μόνο τα μεταβλητά στάδια, και πιο συγκεκριμένα τη διάρκεια του πρασίνου των μη σταθερών σταδίων, με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε στάδιο να έχει τουλάχιστον ένα ελάχιστο πράσινο για κάθε κύκλο, ενώ η περίοδος να παραμένει σταθερή. Αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να περιγραφούν ως ακολούθως:

$$\sum_{i \in F_j} g_{j,i} + L_j = C_j \quad \forall j \in J \quad (4.1)$$

$$g_{j,i,\min} \leq g_{j,i} \leq g_{j,i,\max}$$

όπου:

- $g_{j,i}$ είναι η διάρκεια του πρασίνου του σταδίου $i \in F_j$ της διασταύρωσης j ,
- $g_{j,i,\min}$ είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη διάρκεια του πρασίνου του σταδίου $i \in F_j$ της διασταύρωσης j ,
- $g_{j,i,\max}$ είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη διάρκεια του πρασίνου του σταδίου $i \in F_j$ της διασταύρωσης j ,
- C_j είναι η περίοδος της διασταύρωσης j και
- L_j είναι ο συνολικός χαμένος χρόνος της διασταύρωσης j που συμπεριλαμβάνει το άθροισμα των χαμένων χρόνων όλων των σταδίων $i \in F_j$ και τη συνολική διάρκεια των σταθερών σταδίων.

Το αντικείμενο ελέγχου είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου υπερκορεσμού του δικτύου και της διάχυσης των ουρών στο δίκτυο με κατάλληλη τροποποίηση της διάρκειας των πρασίνων όλων των μεταβλητών σταδίων όλων των διασταυρώσεων του δικτύου χωρίς να επηρεάζονται τόσο η περίοδος όσο και η διαφορά έναρξης των πρασίνων μεταξύ διαδοχικών διασταυρώσεων που αποτελούν τμήματα αρτηρίας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής του ακόλουθου κανόνα ελέγχου, ο οποίος προκύπτει μετά την επίλυση του Γραμμικού–Τετραγωνικού (Linear Quadratic) προβλήματος [14] και σκοπό έχει τον υπολογισμό των νέων χρόνων πρασίνου για τα μεταβλητά στάδια $i \in F_j$ των διασταυρώσεων $j \in J$:

$$g(k) = g^N - Lx'(k) \quad (4.2)$$

όπου:

g είναι το διάνυσμα των νέων χρόνων πράσινου $G_{j,i}$, $\forall i \in F_j$, $\forall j \in J$,

g^N είναι το διάνυσμα των ονομαστικών τιμών του πράσινου $g_{j,i}^N$ για τα μεταβλητά στάδια $\forall i \in F_j$ των διασταυρώσεων $\forall j \in J$,

x' είναι το διάνυσμα με στοιχεία $x'_z(k) = \frac{x_z(k)}{1 - \frac{bx_z(k)}{x_{z,\max}}}$, όπου x_z είναι ο αριθμός

των οχημάτων μέσα στο σύνδεσμο $z \in Z$, $x_{z,\max}$ είναι η ικανότητα αποθήκευσης οχημάτων του συνδέσμου $z \in Z$ και $b \in [0,1)$ είναι μία παράμετρος που επιλέγεται με τη μέθοδο δοκιμής σφάλματος για ένα δεδομένο δίκτυο έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η εσωτερική τάση της στρατηγικής να προστατεύει τους συνδέσμους από υπερκορεσμό,

L είναι ένας σταθερός πίνακας διαστάσεων $n \times m$ όπου n είναι ο αριθμός όλων των σταδίων $i \in F_j$ όλων των διασταυρώσεων $j \in J$ και m είναι ο αριθμός όλων των συνδέσμων $z \in Z$. Ο πίνακας L αποτελεί το υπολογιστικό αποτέλεσμα του προβλήματος LQ και ο υπολογισμός του απαιτεί πολύ χρόνο για δίκτυα μεγάλου μεγέθους. Τον πίνακα αυτό επιδιώκουμε να βελτιστοποιήσουμε μέσω της εφαρμογής του προσαρμοστικού αλγορίθμου AFT.

Ο κανόνας ελέγχου (4.2) ενεργοποιείται κάθε T_s , το οποίο καλείται διάστημα ελέγχου και το οποίο πρέπει να είναι ίσο με την περίοδο των περισσότερων διασταυρώσεων στο θεωρούμενο δίκτυο. Αν για κάποιες διασταυρώσεις $j \in J$ το διάστημα ελέγχου είναι διαφορετικό από τη διάρκεια της περιόδου, τότε η ονομαστική τιμή $g_{j,i}^N$ του $g_{j,i}$ που θα εισαχθεί στο διάνυσμα g^N είναι ίση με $(T_s / C_j) g_{j,i}^N$. Επιπρόσθετα, για τις διασταυρώσεις που συμβαίνει αυτό το $G_{j,i}$ που υπολογίζεται ισούται με $(C_j / T_s) G_{j,i}$.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές της κατάστασης x_z του διανύσματος x' πρέπει να είναι οι μέσες τιμές που συγκεντρώνονται στο τελευταίο διάστημα ελέγχου T_s , με σκοπό να αντιπροσωπεύουν τις μέσες κυκλοφοριακές συνθήκες κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος και όχι τις περιοδικές τιμές αυξομείωσης όπως για παράδειγμα εξαιτίας της αλλαγής μεταξύ πράσινου και κόκκινου.

Για την εφαρμογή του νόμου (4.2), απαιτείται η ύπαρξη των μετρήσεων x_z όλων των συνδέσμων $z \in Z$ σε πραγματικό χρόνο. Εν τούτοις, το πλήθος των οχημάτων δεν υπολογίζεται συνήθως απευθείας, εκτός αν υπάρχουν συστήματα οπτικής ανίχνευσης οχημάτων, αλλά έμμεσα μέσω επεξεργασίας των μετρήσεων από τους φωρατές.

Καθώς ο κανόνας ελέγχου (4.2) δεν λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς ελέγχου (4.1), θα πρέπει οι υπάρχοντες περιορισμοί να εφαρμοστούν μετά την εκτέλεση του κανόνα ελέγχου (4.2). Το πρόβλημα επιλύεται σε πραγματικό χρόνο για κάθε διασταύρωση έτσι ώστε να καθοριστούν οι δυνατές τιμές της διάρκειας των πράσινων που προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις διάρκειες $G_{j,i}$, που προκύπτουν από τον κανόνα (4.2). Αυτό πραγματοποιείται ως ακολούθως:

Δεδομένων των $G_{j,i}$ που έχουν προκύψει από την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου

$C = \sum_{i \in F_j} g_{j,i} + L_j$, να βρεθούν τα $g_{j,i} \forall i \in F_j$ έτσι ώστε:

$$\varphi = \frac{1}{2} \sum_{i \in F_j} \frac{(g_{j,i} - G_{j,i})^2}{G_{j,i}} \rightarrow \text{Min} \quad (4.3)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in F_j} g_{j,i} + L_j &= C_j \\ g_{j,i,\min} &\leq g_{j,i} \leq g_{j,i,\max} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Το πρόβλημα αυτό καθορίζει τη διάρκεια των πράσινων $g_{j,i}$ που προσεγγίζουν περισσότερο τις τιμές $G_{j,i}$ σε τετραγωνική έννοια και ικανοποιούν την ίδια στιγμή τους περιορισμούς. Η επίλυση του (4.3)–(4.4) γίνεται με τη χρήση ενός απλού

αλγορίθμου ο οποίος συγκλίνει στην ακριβή λύση σε πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων που δεν υπερβαίνουν τον αριθμό $|F_j|$ των μεταβλητών σταδίων της διασταύρωσης j . Σε περίπτωση τιμών για τις οποίες ισχύει $G_{j,i} \leq \varepsilon$, αυτές αντικαθίστανται από ένα πολύ μικρό θετικό αριθμό.

Δεδομένων των αποφάσεων του ελέγχου διάρκειας των φάσεων, καθώς και των δεδομένων που προέκυψαν μετά την εφαρμογή των ελέγχων χρονικής διαφοράς και διάρκειας περιόδου της στρατηγικής TUC, ολοκληρωμένες αποφάσεις όσον αφορά την περίοδο, την διάρκεια των φάσεων και της χρονικής διαφοράς είναι διαθέσιμες για εκτέλεση μετά το πέρας του ελέγχου της διάρκειας των φάσεων.

Ο κανόνας ελέγχου (4.2) απαιτεί τη γνώση των ονομαστικών τιμών g^N και μάλιστα η ευαισθησία του στις τιμές αυτές είναι αρκετά μεγάλη. Όσο καλύτερες είναι οι τιμές των g^N για κάποιο δίκτυο, τόσο καλύτερη είναι και η απόδοση της στρατηγικής TUC, και το αντίστροφο. Το γεγονός αυτό είναι αρνητικό κυρίως για τους εξής δύο λόγους:

- Για την υλοποίηση της TUC σε ένα καινούριο αστικό δίκτυο τυχαίας τοπολογίας απαιτείται η διερεύνηση και ο προσδιορισμός των βέλτιστων ονομαστικών τιμών g^N , διαδικασία που πολλές φορές μπορεί να είναι χρονοβόρα και επίπονη.
- Εν γένει, οι βέλτιστες ονομαστικές τιμές πρασίνων για τις φάσεις ενός δικτύου δεν είναι σταθερές αλλά επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες που επιδρούν στις κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου (π.χ. πρωί, βράδυ, καλοκαίρι, χειμώνας, ανοικτά καταστήματα, αργίες, ανομοιομορφία στον κυκλοφοριακό φόρτο, καιρικές συνθήκες).

5 Εφαρμογή της στρατηγικής TUC στο Αστικό Οδικό Δίκτυο της πόλης των Χανίων

5.1 Μοντελοποίηση κυκλοφοριακής ροής αστικών οδικών δικτύων

Το μαθηματικό μοντέλο μίας διαδικασίας είναι η απεικόνιση της διαδικασίας αυτής με μαθηματικές εξισώσεις. Αυτές οι εξισώσεις περιγράφουν τα επιμέρους τμήματα της συμπεριφοράς της διαδικασίας. Η επιλογή ενός συγκεκριμένου μοντέλου εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής με αποτέλεσμα διαφορετικά μοντέλα της ίδιας διαδικασίας να χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς σκοπούς. Από την άλλη μεριά, μια στρατηγική ελέγχου είναι η αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων για μια επιθυμητή επιρροή της διαδικασίας. Μια στρατηγική ελέγχου χρησιμοποιεί πραγματικά δεδομένα με σκοπό τη δημιουργία των κατάλληλων δεδομένων εισόδου έτσι ώστε να ικανοποιούνται προκαθορισμένοι στόχοι.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της εργασίας, τα μοντέλα κυκλοφοριακής ροής χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το επίπεδο της ανάλυσης που χρησιμοποιούν κατά την περιγραφή των κυκλοφοριακών φαινομένων. Αυτές οι κατηγορίες είναι τα μικροσκοπικά και τα μακροσκοπικά μοντέλα. Τα μικροσκοπικά μοντέλα θεωρούν κάθε όχημα και τον οδηγό του ως ένα ρυθμιστή της απόστασης σε ανεξάρτητη βάση, με φαινόμενα όπως αυτό της αλλαγής λωρίδας, της εισόδου και εξόδου από ένα ρέμα κυκλοφορίας να περιγράφονται σε ανεξάρτητη βάση δηλαδή για κάθε όχημα ξεχωριστά. Τα μακροσκοπικά μοντέλα θεωρούν την κυκλοφοριακή ροή ως ένα ρευστό με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Μία τέτοια προσέγγιση επιτρέπει τη

χρήση μεταβλητών ροής που εκφράζουν τη μέση συμπεριφορά των οχημάτων σε συγκεκριμένο χώρο και χρόνο.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η μικροσκοπική προσέγγιση επιτρέπει μία λεπτομερέστερη περιγραφή των φαινομένων της κυκλοφοριακής ροής αν και έχει μικρή αποτελεσματικότητα κατά την περιγραφή μεγάλων δικτύων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο υπολογιστικός φόρτος είναι μεγάλος και εξαρτάται από το μέγεθος του δικτύου και τον αριθμό των οχημάτων σε αυτό. Επιπλέον, πρέπει να τονιστεί ότι για να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια στα μικροσκοπικά μοντέλα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές παράμετροι κάτι πρακτικά δύσκολο. Τα μειονεκτήματα αυτά έρχονται να επιλύσουν τα μακροσκοπικά μοντέλα.

5.1.1 Περιγραφή του μοντέλου METACOR

Το METACOR [7] είναι ένα μακροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης της κυκλοφοριακής ροής μέσα σε δίκτυα τόσο αστικά όσο και σε αυτοκινητόδρομους τυχαίας τοπολογίας και χαρακτηριστικών που περιλαμβάνουν επεκτάσεις αυτοκινητοδρόμων, διχάλες και κεκλιμένες οδούς εισόδου και εξόδου σε αυτοκινητόδρομους. Μέσα στο μοντέλο αυτό η προσομοίωση της κυκλοφοριακής ροής τόσο για το αστικό όσο και για τους αυτοκινητοδρόμους βασίζεται αποκλειστικά σε μακροσκοπική προσέγγιση, με αποτέλεσμα μικρό υπολογιστικό φόρτο και χρήση στοιχείων πραγματικού χρόνου. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με τα αστικά δίκτυα μη εξετάζοντας περαιτέρω την περίπτωση των αυτοκινητοδρόμων.

Στο METACOR, το δίκτυο περιγράφεται από ένα συνεχόμενο γράφημα όπου οι διασταυρώσεις απεικονίζονται με κύκλους και τα σύνδεσμοι με βέλη μεταξύ των διασταυρώσεων. Στην περίπτωση που ένας δρόμος χωρίζεται σε περισσότερες κατευθύνσεις με διαφορετική παροχή προτεραιότητας, ο αριθμός των συνδέσμων και συνεπώς ο αριθμός των βελών αντιπροσωπεύουν τις κατευθύνσεις αυτές.

Η μακροσκοπική θεώρηση επιβάλλει την χρήση ορισμένων μεταβλητών κυκλοφοριακής ροής που να εκφράζουν την μέση συμπεριφορά των οχημάτων σε συγκεκριμένο χώρο και χρόνο. Για να γίνει αυτό πρέπει κάθε σύνδεσμος να χωριστεί σε N_m τμήματα ίσου μήκους στα οποία η κυκλοφοριακή κατάσταση θεωρείται ομογενής και χαρακτηρίζεται από τη μέση ταχύτητα, την κυκλοφοριακή πυκνότητα και την κυκλοφοριακή ροή. Το METACOR υπολογίζει τις μεταβλητές αυτές σε διακριτά διαστήματα $T, 2T, 3T, \dots$ όπου T είναι το διακριτό διάστημα ($T = 1 \dots 20$ sec).

Οι μεταβλητές αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια:

Κυκλοφοριακή πυκνότητα $\rho_{m,i}(k)$ είναι ο αριθμός των οχημάτων στο τμήμα i του συνδέσμου m κατά το χρόνο kT δια του μήκους του τμήματος L_m εκφρασμένο σε οχήματα ανά χιλιόμετρο.

Μέση ταχύτητα $v_{m,i}(k)$ είναι η μέση ταχύτητα των οχημάτων που περιλαμβάνονται στο τμήμα i του συνδέσμου m κατά το χρόνο kT εκφρασμένη σε χιλιόμετρα ανά ώρα.

Κυκλοφοριακή ροή $q_{m,i}(k)$ είναι ο αριθμός των οχημάτων που αφήνουν το τμήμα i του συνδέσμου m κατά τη χρονική περίοδο $[kT, (k+1)T]$ δια το T εκφρασμένο σε οχήματα ανά ώρα.

Τα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο πρέπει να περιγράφουν το προς μελέτη δίκτυο αναλυτικά όσον αφορά τα γεωμετρικά και κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά του. Τα απαραίτητα στοιχεία είναι:

- **Για τους συνδέσμους:** όνομα, αριθμός λωρίδων, μήκος, χωρητικότητα ανά λωρίδα, μέση ταχύτητα και μέγιστη πυκνότητα.
- **Για τους συνδέσμους εισόδου:** όνομα, αριθμό λωρίδων και εσωτερική χωρητικότητα ροής ανά λωρίδα.
- **Για τους συνδέσμους εξόδου:** όνομα, αριθμό λωρίδων.

- Για τις αστικές διασταυρώσεις: όνομα, σύνδεσμοι εισόδου και εξόδου, εσωτερικές κινήσεις και για κάθε τέτοια κίνηση την μέση ταχύτητα, το μήκος κίνησης, τη μέγιστη πυκνότητα και τις ανταγωνιστικές κινήσεις αν υπάρχουν.

5.1.1.1 Μοντελοποίηση των αστικών συνδέσμων

Οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μεταβλητών της κυκλοφοριακής ροής για τους αστικούς συνδέσμους παρουσιάζονται στη συνέχεια:

$$\text{Εξίσωση συνέχειας:} \quad \rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m} [q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)] \quad (5.1)$$

$$\text{Εξίσωση ροής:} \quad q_{m,i}(k) = \min\{q_{ups}(k), q_{down}(k)\} \quad (5.2)$$

$$\text{Βασικό διάγραμμα:} \quad Q(\rho_{m,i}(k)) = \rho_{m,i}(k) v_{f,m} \left(1 - \frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{\max} \lambda_m}\right) \quad (5.3)$$

όπου $v_{f,m}$ είναι η μέση ελεύθερη ταχύτητα, ρ_{\max} είναι μία σταθερά που εκφράζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη κυκλοφοριακή πυκνότητα ανά λωρίδα και έχει την ίδια τιμή για όλους τους συνδέσμους, $q_{ups}(k)$ είναι η ροή που επιθυμεί να εισέλθει στον επόμενο σύνδεσμο και $q_{down}(k)$ είναι η μέγιστη ροή που μπορεί να δεχτεί ο επόμενος σύνδεσμος. Οι δύο τελευταίες παράμετροι υπολογίζονται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$q_{ups}(k) = \begin{cases} Q(\rho_{m,i}(k)) & \text{αν } \rho_{m,i} \leq \rho_{\max} \lambda_m / 2 \\ Q(\rho_{\max} \lambda_m / 2) & \text{αν } \rho_{m,i} > \rho_{\max} \lambda_m / 2 \end{cases} \quad (5.4)$$

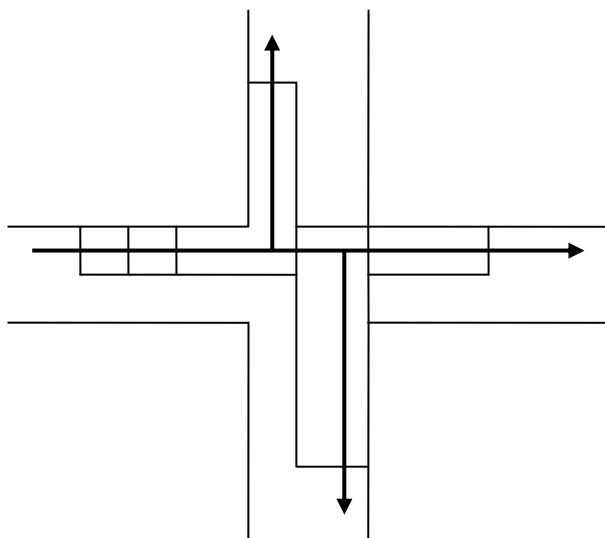
$$q_{down}(k) = \begin{cases} Q(\rho_{\max} \lambda_m / 2) & \text{αν } \rho_{m,i+1} \leq \rho_{\max} \lambda_m / 2 \\ Q(\rho_{m,i+1}(k)) & \text{αν } \rho_{m,i+1} > \rho_{\max} \lambda_m / 2 \end{cases} \quad (5.5)$$

5.1.1.2 Μοντελοποίηση των αστικών διασταυρώσεων

Κατά τη μοντελοποίηση των αστικών διασταυρώσεων η διασταύρωση χωρίζεται σε ζώνες που αντιστοιχούν σε επιτρεπόμενες κινήσεις μέσα στη διασταύρωση. Αυτές οι

ζώνες δρουν με αντίστοιχο τρόπο όπως το χωρισμό των συνδέσμων σε τμήματα. Επιπρόσθετα, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται κατά τη μοντελοποίηση των διασταυρώσεων είναι παρόμοιες με αυτές της μοντελοποίησης των συνδέσμων. Η ροή εισόδου σε κάθε ζώνη υπολογίζεται σε τον ίδιο τύπο όπως αυτόν της μοντελοποίησης των συνδέσμων (σχέση (4.2)), λαμβάνοντας υπόψη τις κυκλοφοριακές συνθήκες στο τελευταίο τμήμα του συνδέσμου εισόδου και μέσα στη ζώνη. Η ροή εξόδου υπολογίζεται αντίστοιχα λαμβάνοντας υπόψη τις κυκλοφοριακές συνθήκες μέσα στη ζώνη και στο πρώτο τμήμα του συνδέσμου εξόδου από τη διασταύρωση. Με αυτόν τον τρόπο πιθανή παρεμπόδιση της κυκλοφορίας εξαιτίας ουρών μπορεί να ληφθεί υπόψη.

Για τη μοντελοποίηση ανταγωνιστικών κινήσεων μέσα στη διασταύρωση, έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία έτσι ώστε να αντιπροσωπεύεται μία ρεαλιστική θεώρηση του φαινομένου. Στην περίπτωση ύπαρξης τέτοιων κινήσεων, η ροή εξόδου της κατεύθυνσης χωρίς προτεραιότητα εξαρτάται από την κυκλοφοριακή ροή της κατεύθυνσης με προτεραιότητα. Γι' αυτό το λόγο, η καθυστέρηση της κατεύθυνσης χωρίς προτεραιότητα βασίζεται στην θεωρία του ανυπόμονου οδηγού. Η βασική ιδέα αυτής της θεωρίας είναι ότι για να περάσει ένα όχημα από μία διασταύρωση πρέπει το κενό μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων της άλλης κατεύθυνσης να είναι αρκετά μεγάλο. Με την πάροδο του χρόνου όμως, το απαιτούμενο κενό γίνεται μικρότερο.



Σχήμα 5.1: Οι ζώνες της διασταύρωσης

Επιπρόσθετα, η κυκλοφοριακή ροή εισόδου σε μία διασταύρωση διανέμεται σε ένα αριθμό συνδέσμων εξόδου σύμφωνα με τα αντίστοιχα ποσοστά στροφής της διασταύρωσης μέσω αναλυτικών και πολύπλοκων εξισώσεων εξαιτίας του μεγάλου αριθμού συνδέσμων εισόδου και εξόδου της διασταύρωσης.

5.1.1.3 Τα κριτήρια απόδοσης

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων προσομοίωσης με τη χρήση του μοντέλου METACOR μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα πέντε κριτήρια:

Συνολικός χρόνος ταξιδιού (Total Travel Time TTT), ο οποίος υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση σε οχήματα επί ώρα και εκφράζει το συνολικό χρόνο ταξιδιού όλων των οχημάτων στο δίκτυο για τον χρόνο που εκτελέστηκε η προσομοίωση:

$$TTT = \sum_k \sum_m \sum_i [\rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m T]. \quad (5.6)$$

Συνολικός χρόνος αναμονής (Total Waiting Time TWT), ο οποίος υπολογίζεται ως το άθροισμα όλων των χρόνων αναμονής στους συνδέσμους εισόδου του δικτύου για όλον τον ορίζοντα της προσομοίωσης σε οχήματα επί ώρα:

$$TWT = \sum_k \sum_o [w_o(k) T], \quad (5.7)$$

όπου $w_o(k)$ η ουρά στο σύνδεσμο εισόδου o για τον διακριτό χρόνο k η οποία έχει προκύψει εξαιτίας κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Συνολικός Χρόνος (Total Time Spent TTS) ο οποίος υπολογίζεται ως το άθροισμα του συνολικού χρόνου ταξιδιού και του συνολικού χρόνου αναμονής:

$$TTS = TTT + TWT \quad (5.8)$$

Συνολική Διανυθείσα Απόσταση (Total Traveled Distance TTD) η οποία υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση σε οχήματα επί χιλιόμετρο και εκφράζει το σύνολο όλων των αποστάσεων που διανύθηκαν από όλα τα οχήματα για ολόκληρο τον ορίζοντα της προσομοίωσης:

$$TTD = \sum_k \sum_m \sum_i [q_{m,i}(k)L_m T] \quad (5.9)$$

Συνολική Κατανάλωση Καυσίμου (Total Fuel Consumption TFC) η οποία υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση σύμφωνα με τον Jurvillier (Jurvillier,1982) σε οχήματα επί λίτρο

$$TFC = \sum \frac{T}{100} \sum \sum \begin{cases} q_{m,i}(k)L_m \left(4.49 + \frac{122}{v_{m,i}(k)} + 0.0016(v_{m,i}(k) - 60)^2 \right) \\ q_{m,i}(k)L_m \left(4.49 + \frac{122}{v_{m,i}(k)} \right) \end{cases} \quad (5.10)$$

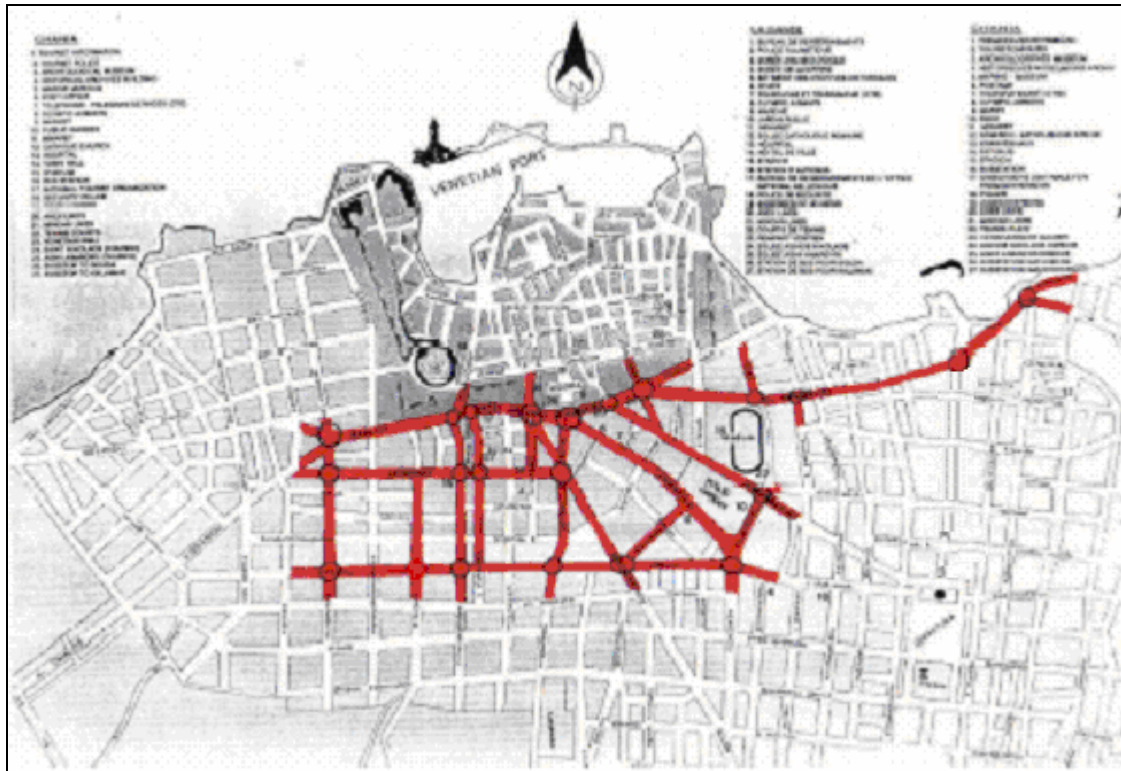
$$\alpha v \quad v_{m,i}(k) > 60$$

$$\alpha v \quad v_{m,i}(k) < 60$$

5.2 Το αστικό δίκτυο των Χανίων

5.2.1 Περιγραφή του δικτύου

Το Σχήμα 5.2 δείχνει έναν απλοποιημένο χάρτη του υπό μελέτη δικτύου που έχει μήκος περίπου 8 km και αποτελείται από 22 κόμβους ελεγχόμενους με σηματοδότες. Οι περισσότεροι από τους συνδέσμους του δικτύου αποτελούνται από μόνο μια λωρίδα, γεγονός που σημαίνει ότι απροσδόκητα γεγονότα (όπως για παράδειγμα ατυχήματα) μπορούν να μπλοκάρουν το σύνδεσμο και επομένως να επιδεινώσουν την κατάσταση της κυκλοφορίας, ακόμα και αν η διάρκειά τους είναι μόνο μερικά λεπτά.



Σχήμα 5.2: Το αστικό δίκτυο των Χανίων

Επιπλέον, τα προβλήματα συμφόρησης δεν περιορίζονται μόνο στους δρόμους με τα απροσδόκητα γεγονότα αλλά διαδίδονται σε πολλούς άλλους δρόμους. Κατά τη διάρκεια των πρωινών και βραδινών ωρών υπάρχει συχνή κυκλοφορία λεωφορείων σχεδόν σε κάθε μέρος του δικτύου. Οι μετακινήσεις των πεζών δεν δημιουργούν ιδιαίτερο πρόβλημα στο δίκτυο και δεν υπάρχει λόγος για ειδική μεταχείριση. Η προτεραιότητα των μέσων μαζικής μεταφοράς δεν αποτελεί πρόβλημα στα Χανιά και έτσι το συγκεκριμένο τμήμα της στρατηγικής (PTP Module) δεν θα εφαρμοστεί στη συγκεκριμένη εργασία.

Προβλήματα κυκλοφοριακής συμφόρησης αντιμετωπίζονται καθημερινά ειδικά στο κεντρικό και βόρειο μέρος του εξεταζόμενου δικτύου για περίπου μία έως δύο ώρες το πρωί και το βράδυ. Στις περισσότερες κυκλοφοριακές αρτηρίες της πόλης υπάρχει μεγάλη συμφόρηση στις 19:00–21:30 την Τρίτη, την Πέμπτη και την Παρασκευή το βράδυ λόγω της λειτουργίας των εμπορικών καταστημάτων. Ένας άλλος λόγος που προκαλεί τη συμφόρηση είναι η μεγάλη συχνότητα των λεωφορείων, τα οποία

επιβιβάζουν και αποβιβάζουν ανθρώπους στις στάσεις και συχνά εμποδίζουν την κυκλοφορία στη μία κατεύθυνση του δρόμου.

Άλλοι λόγοι είναι η μείωση της χωρητικότητας λόγω της παράνομης στάθμευσης στους κύριους δρόμους και η υψηλή χρήση των οχημάτων από τους κατοίκους της πόλης. Μεγάλα προβλήματα συμφόρησης προκύπτουν σε ολόκληρο το δίκτυο κατά τη διάρκεια των βροχερών ημερών όταν δημιουργείται μια υπερβολική εσωτερική και εξωτερική ζήτηση, συνήθως μια ζήτηση που δεν μπορεί να στηριχτεί από την υπάρχουσα υποδομή του δικτύου.

Προβλήματα βαριάς συμφόρησης προκύπτουν επίσης κατά τη διάρκεια της θερινής τουριστικής περιόδου. Το ήδη βαριά φορτωμένο οδικό δίκτυο της πόλης φορτώνεται περαιτέρω από τα πρόσθετα ιδιωτικά αυτοκίνητα και μοτοσικλέτες, τα ενοικιαζόμενα αυτοκίνητα και μοτοποδήλατα, τα τουριστικά λεωφορεία και την αυξημένη μετακίνηση των ταξί. Όλα τα προαναφερθέντα προβλήματα αντιμετωπίζονται καθημερινά εκτός από την Κυριακή και μερικές σπάνιες περιπτώσεις όπως για παράδειγμα τις ημέρες αργίας.

5.2.2 Μοντελοποίηση του δικτύου για την εφαρμογή της στρατηγικής TUC

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται σχηματικά το μοντέλο ελέγχου που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στο αστικό δίκτυο των Χανίων. Σημειώνεται ότι:

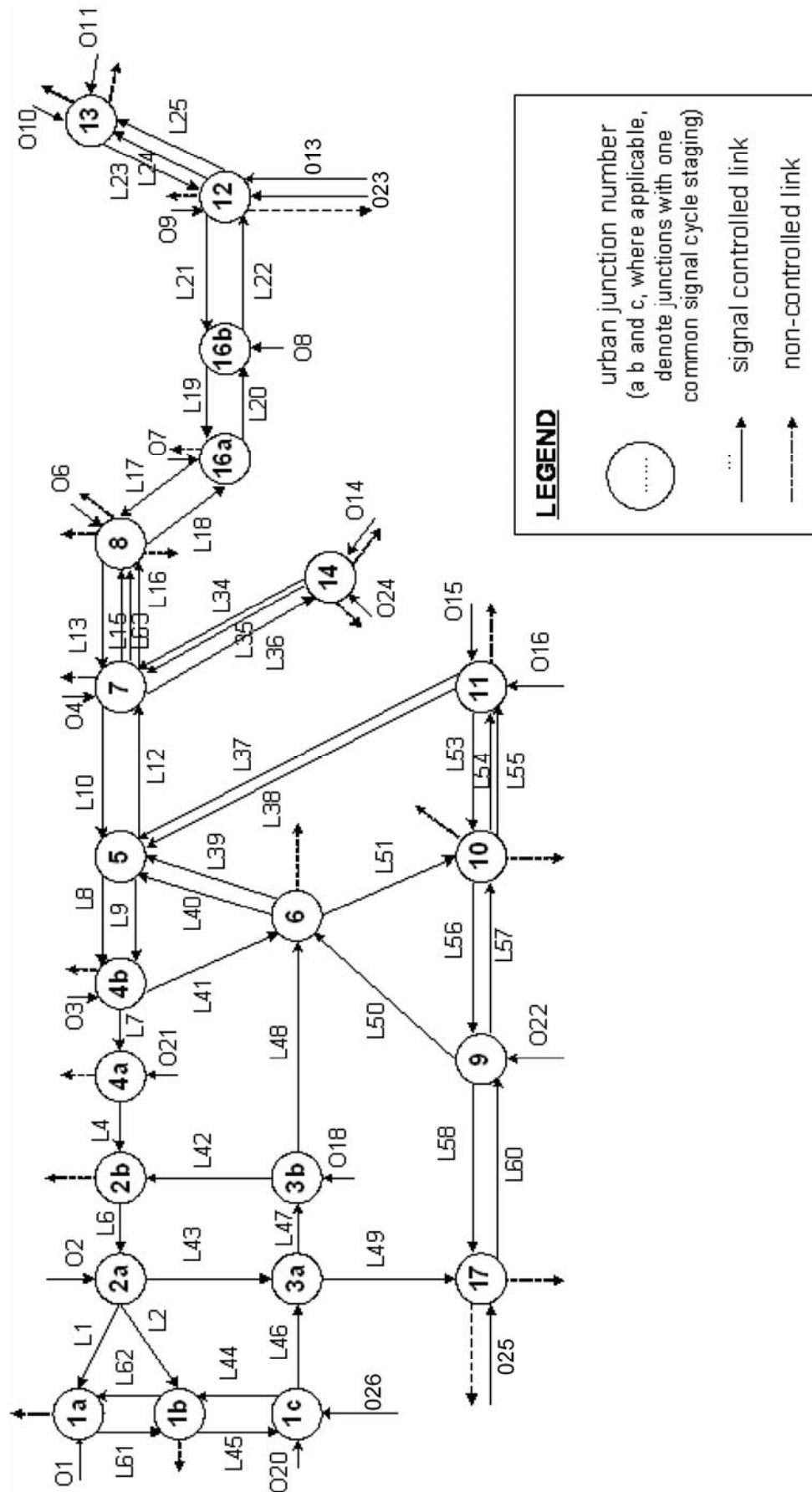
- Οι κόμβοι 1a, 1b και 1c ελέγχονται βάση κοινών πλάνων σηματοδότησης. Το ίδιο ισχύει και για τους κόμβους 2a και 2b, 3a και 3b, 4a και 4b, 16a και 16b. Συνεπώς, από την άποψη ελέγχου θεωρούνται σαν 4 κόμβοι (είναι 3 ζευγάρια και μια τριάδα κόμβων) και όχι σαν 11 ξεχωριστοί κόμβοι.
- Τα ζευγάρια των συνδέσμων *L54* και *L55*, *L37* και *L38*, *L39* και *L40*, *O13* και *O23*, *L24* και *L25*, καθώς και η τριάδα των συνδέσμων *L15*, *L16* και *L63*

αποτελούν διαφορετικές προσεγγίσεις ίδιων δρόμων επειδή δε λαμβάνουν ταυτοχρόνως προτεραιότητα. Για το λόγο αυτό, στη στρατηγική TUC θεωρούνται ως διαφορετικοί σύνδεσμοι.

Από το Σχήμα 5.3 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μοντέλο ελέγχου αποτελείται από 16 σηματοδοτημένους κόμβους και 71 συνδέσμους. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 ορίζονται τα παρακάτω σύνολα για το συγκεκριμένο δίκτυο:

- Το σύνολο των ελεγχόμενων σηματοδοτημένων κόμβων $J = \{1, 2, \dots, 16\}$.
- Το σύνολο των ελεγχόμενων αστικών συνδέσμων $Z = \{1, 2, \dots, 71\}$.

Ο Πίνακας Π.1 παρουσιάζει στοιχεία των ελεγχόμενων κόμβων που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο ελέγχου, ενώ οι Πίνακες Π.2–Π.3 παρουσιάζουν στοιχεία που αφορούν τους συνδέσμους του δικτύου, τη χωρητικότητα, τη ροή κορεσμού, το σταθερό χρόνο πρασίνου και τις φάσεις κατά τις οποίες έχουν δικαίωμα κυκλοφορίας. Επίσης στους πίνακες αυτούς δίδεται ο κόμβος με τον οποίο συνδέεται ο κάθε σύνδεσμος. Τα στοιχεία των Πινάκων Π.1–Π.3 προέρχονται από πραγματικές μετρήσεις στο δίκτυο των Χανίων και παρέχονται από τη Δημοτική Αρχή που είναι υπεύθυνη για αυτό, ενώ παρατίθενται στο Παράρτημα της εργασίας για μεγαλύτερη ευκολία για τον αναγνώστη.



Σχήμα 5.3: Σχηματικός χάρτης του μοντέλου για το δικτύου των Χανίων.

6 Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου SPSA και του προτεινόμενου αλγορίθμου AFT για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων της στρατηγικής TUC.

6.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέραμε, ο στόχος της έρευνας μας είναι η ικανοποίηση της ανάγκης που παρουσιάστηκε για ανάπτυξη μίας αυτόματης διαδικασίας βελτιστοποίησης των παραμέτρων της στρατηγικής ελέγχου πραγματικού χρόνου, TUC. Για την πραγματοποίηση της παραπάνω βελτιστοποίησης εφαρμόστηκε αρχικά η μέθοδος της Στοχαστικής Προσέγγισης μέσω Ταυτόχρονων Διαταραχών (SPSA). Δυστυχώς, όμως, η χρήση της μεθόδου αυτής αποδείχτηκε ακατάλληλη για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων της στρατηγικής ελέγχου όταν αυτή εφαρμόστηκε στο οδικό δίκτυο της πόλης των Χανίων. Ο λόγος αυτής της αποτυχίας έγκειται στην πολυπλοκότητα του συγκεκριμένου οδικού δικτύου (καθώς και των περισσότερων οδικών δικτύων της Ευρώπης).

Η ανικανότητα του αλγορίθμου SPSA να παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα μας ώθησε στην ανάπτυξη ενός νέου αλγορίθμου, του Προσαρμοστικού Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Παραμέτρων, AFT (Adaptive Fine-Tuning). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρατίθενται παρακάτω και που αφορούν στο πολύπλοκο οδικό δίκτυο της πόλης των Χανίων, αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της AFT προσέγγισης, η οποία καταφέρνει να βελτιώσει σημαντικά την επίδοση της TUC ακόμα και σε περιπτώσεις όπου σημειώνονται η κυκλοφοριακή ζήτηση παρουσιάζει συνεχείς διακυμάνσεις κατά την περίοδο μίας ημέρας ή περιπτώσεις όπου η

πληροφορία όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου που παρέχεται είναι ελλιπής ή ακόμα και μη-διαθέσιμη. Βελτίωση της αποδοτικότητας της TUC με τη χρήση του AFT αλγορίθμου παρατηρείται ακόμα και στην περίπτωση που ο σχεδιασμός του πραγματοποιείται έχοντας υποθέσει άριστη γνώση των χαρακτηριστικών στοιχείων του δικτύου.

Να σημειωθεί ότι οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται, σχετίζονται μόνο με το τμήμα της στρατηγικής TUC που αφορά στον έλεγχο της διάρκειας των φάσεων. Πολύ χρήσιμα συμπεράσματα εξάγονται από τις προσομοιώσεις σχετικά με το βαθμό επιρροής συγκεκριμένων παραμέτρων ελέγχου στην αποδοτικότητα της στρατηγικής TUC.

6.2 Χρήσιμοι ορισμοί

6.2.1 Το διάνυσμα εισόδου x

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα που καλούμαστε να επιλύσουμε, ο πίνακας \bar{x} , που αποτελεί την εκτίμηση της εισόδου του συστήματος ελέγχου, περιέχει τις ιστορικές τιμές του αριθμού των οχημάτων που εισέρχονται στο δίκτυο από τον κάθε σύνδεσμο εισόδου. Δεδομένου ότι υπάρχουν 22 είσοδοι στο δίκτυο και ένα καθημερινό σενάριο ζήτησης αντιστοιχεί σε 14 ώρες, θα ήταν υπολογιστικά ασύμφορο να χρησιμοποιήσουμε διανύσματα \bar{x}^t των οποίων τα στοιχεία αντιστοιχούν σε εκτιμήσεις του διανύσματος x για μικρά χρονικά διαστήματα (π.χ., αν τα στοιχεία των \bar{x}^t αντιστοιχούσαν σε εκτιμήσεις της ζήτησης για διάρκεια 5 λεπτών, το συνολικό μέγεθος των διανυσμάτων θα ήταν 3696×1). Επιπλέον, δεδομένου ότι η εκτίμηση της ζήτησης της επόμενης μέρας είναι ούτως ή άλλως ανακριβής (εξαιτίας της φυσικής διακύμανσης της κυκλοφοριακής ζήτησης), δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιούμε εκτιμήσεις που αναφέρονται σε μικρά χρονικά διαστήματα. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε, διαπιστώσαμε ότι αρκεί να χρησιμοποιήσουμε μία εκτίμηση για κάθε 3.5 ώρες (δηλαδή, τέσσερις διαφορετικές εκτιμήσεις κάθε ημέρα).

Η εκτίμηση της κυκλοφοριακής ροής υπολογίζεται από το μέσο όρο του αριθμού των αυτοκινήτων που εισέρχονται από μία συγκεκριμένη είσοδο του δικτύου στην περίοδο των 3.5 ωρών και τα διανύσματα \bar{x}^t που λαμβάνονται τελικά, περιέχουν 88 στοιχεία (βλέπε Παράρτημα, Αρχείο update_past_data).

6.2.2 Τα σενάρια ζήτησης

Ονομάζουμε $m\%$ - πλάτους παραλλαγή μίας ονομαστικής (nominal) τιμής του x , μία νέα τιμή x_p η οποία παράγεται όταν στην αρχική τιμή του x προστεθεί τυχαία διαταραχή μεγέθους $m\%$, βάση του τύπου:

$$x_p = x + \frac{m}{100} r, \quad (6.1)$$

όπου r μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή με μέση τιμή μηδέν και πεδίο ορισμού το $[-1,1]$. Έτσι, όταν χαρακτηρίζουμε ένα σενάριο ζήτησης ως την τυχαία διαταραγμένη $m\%$ - πλάτους παραλλαγή του βασικού σεναρίου ζήτησης, εννοούμε ότι κάθε στοιχείο του παραλλαγμένου σεναρίου υπολογίζεται από τη σχέση (6.1).

6.2.3 Οι αρχικοί πίνακες L που εισάγονται στους δύο αλγορίθμους SPSA και AFT

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το αντικείμενο ελέγχου της στρατηγικής TUC είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου υπερκορεσμού του δικτύου και της διάχυσης των ουρών στο δίκτυο με κατάλληλη τροποποίηση της διάρκειας των πρασίνων όλων των μεταβλητών σταδίων όλων των διασταυρώσεων του δικτύου χωρίς να επηρεάζονται τόσο η περίοδος όσο και η διαφορά έναρξης των πρασίνων μεταξύ διαδοχικών διασταυρώσεων που αποτελούν τμήματα αρτηρίας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής του ακόλουθου κανόνα ελέγχου, ο οποίος προκύπτει μετά την επίλυση

του Γραμμικού–Τετραγωνικού (Linear Quadratic) προβλήματος: $g(k) = g^N - Lx'(k)$ [14].

Μέσω της εφαρμογής των αλγορίθμων βελτιστοποίησης παραμέτρων στη στρατηγική TUC, επιδιώκουμε τη βελτιστοποίηση του πίνακα L ο οποίος αποτελεί τον πίνακα ελέγχου με διαστάσεις (αριθμός σταδίων / αριθμός συνδέσμων). Ο πίνακας L αποτελεί το υπολογιστικό αποτέλεσμα του προβλήματος LQ και ο υπολογισμός του απαιτεί πολύ χρόνο για δίκτυα μεγάλου μεγέθους. Τα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό του πίνακα είναι L : η ροή κορεσμού σε κάθε σύνδεσμο, τα ποσοστά στροφής σε κάθε διασταύρωση, η μέγιστη χωρητικότητα κάθε συνδέσμου.

Ο πίνακας L που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε, εκτιμάται αρχικά και εισάγεται στον αλγόριθμο ως ένας αρχικός πίνακας ελέγχου (ο Network1_fixed_correct που εισάγεται στο αρχείο init.m). Για τις προσομοιώσεις εκτελέσαμε, σχεδιάσαμε έναν αριθμό διαφορετικών αρχικών πινάκων L επιδιώκοντας την βελτιστοποίηση καθενός από αυτούς.

Για να ξεχωρίσουμε τους αρχικούς αυτούς πίνακες των παραμέτρων, χρησιμοποιήσαμε τον συμβολισμό $L_{(ms)}$, όπου ms είναι η τιμή (σε Km/h) της μέσης ταχύτητας στο δίκτυο όταν η κυκλοφοριακή ζήτηση σε αυτό ορίζεται από το βασικό σενάριο ζήτησης και τα χαρακτηριστικά του στοιχεία από τον συγκεκριμένο πίνακα $L_{(ms)}$. Για παράδειγμα, ο πίνακας $L_{(7.53)}$ είναι ο πίνακας που αν εισαχθεί στο σύστημα μαζί με το βασικό σενάριο ζήτησης της κυκλοφορίας, η μέση ταχύτητα που θα λάβουμε από την προσομοίωση είναι $7.53 km/h$.

Συνολικά σχεδιάστηκαν τέσσερις διαφορετικοί πίνακες L :

- Ο πίνακας $L_{(7.53)}$, τον οποίο σχεδιάσαμε υποθέτοντας τέλεια γνώση των χαρακτηριστικών του οδικού δικτύου της πόλης των Χανίων (π.χ., της ροής κορεσμού και των ποσοστών στροφής στους συνδέσμους αυτού).

- Οι πίνακες $L_{(6.55)}$, $L_{(6.2)}$, τους οποίους σχεδιάσαμε θέτοντας για τα χαρακτηριστικά του δικτύου τιμές που αποκλίνουν κατά 40% περίπου από τις πραγματικές τιμές αυτών (π.χ., στις ροές κορεσμού και τα ποσοστά στροφής των συνδέσμων του δικτύου που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό αυτών των πινάκων, προστέθηκε τυχαίος θόρυβος που προκάλεσε απόκλιση από τις τιμές που εισήχθησαν στον προσομοιωτή METACOR και που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό του πίνακα $L_{(7.53)}$ της τάξης του 40%).
- Ο πίνακας $L_{(3.2)}$, του οποίου τα στοιχεία είναι όλα ίσα με το μηδέν (δεν υπάρχει γνώση για τα χαρακτηριστικά του δικτύου). Να σημειωθεί ότι σε αυτή την περίπτωση, μόνο το διάνυσμα g_N των ονομαστικών τιμών του πράσινου χρησιμοποιείται, και η μέση ταχύτητα που λαμβάνεται ως αποτέλεσμα είναι πολύ μικρότερη από αυτές που λαμβάνονται στις περιπτώσεις όπου υπάρχει γνώση για τα χαρακτηριστικά στοιχεία του δικτύου.

6.3 Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μέσω εφαρμογής της μεθόδου SPSA

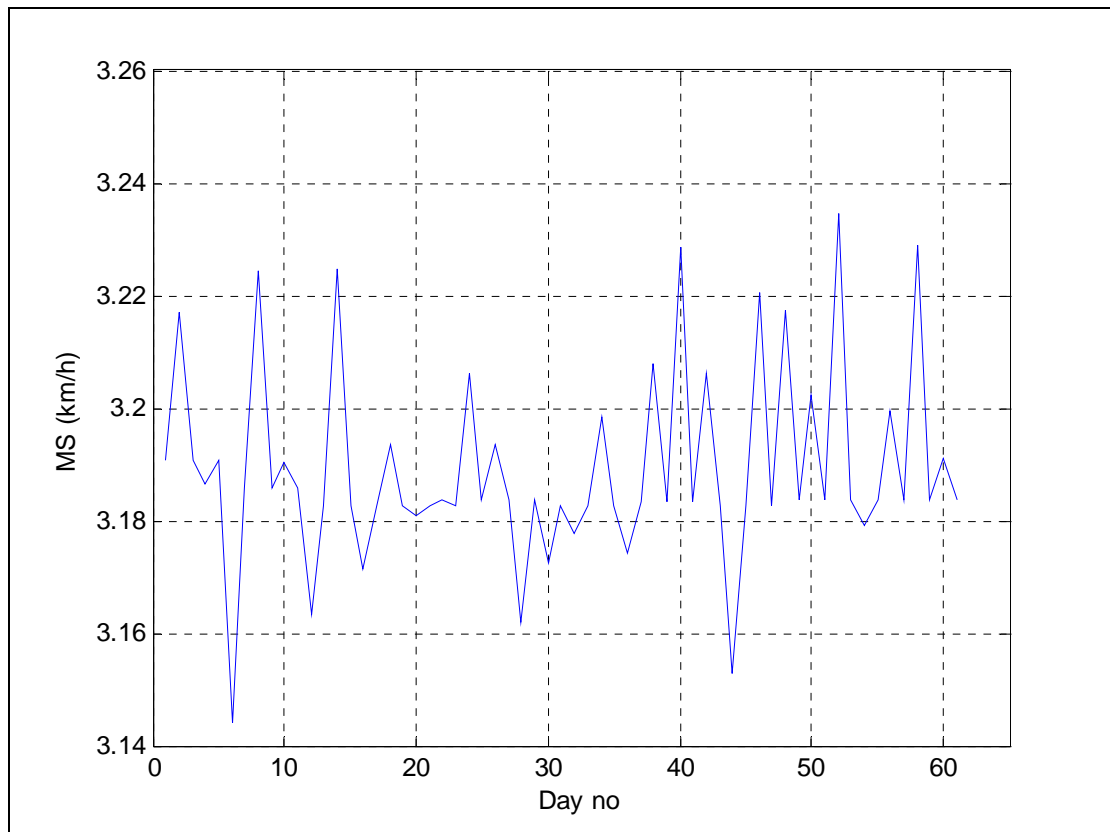
Μία κλασική μέθοδος Στοχαστικής Προσέγγισης που βασίζεται σε μετρήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η SPSA που χρησιμοποιεί την αριθμητική μέθοδο των Ταυτόχρονων Διαταραχών για την εκτίμηση του άγνωστου διανύσματος κλίσης. Εφαρμόσαμε τη μέθοδο αυτή για τον καθορισμό των παραμέτρων της στρατηγικής TUC για το οδικό δίκτυο της πόλης των Χανίων. Τα αποτελέσματα, όμως, που λάβαμε δεν ήταν ικανοποιητικά.

Κατά τις διάφορες σειρές προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε, μεταβάλαμε τις τιμές των παραμέτρων του αλγορίθμου προσπαθώντας να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τις σειρές των προσομοιώσεων αυτών, τις χωρίσαμε σε τρεις ομάδες, ανάλογα με τον πίνακα L που εισαγόταν στον αλγόριθμο κάθε φορά.

6.3.1 Προσομοιώσεις μέσω εφαρμογής του αλγορίθμου SPSA

Πρώτη Ομάδα Προσομοιώσεων: Στις προσομοιώσεις της Πρώτης Ομάδας, ο αρχικός πίνακας των εκτιμήσεων των τιμών των παραμέτρων είναι ο $L_{(3,2)}$ του οποίου τα στοιχεία είναι μηδενικά. Σε καθεμία σειρά προσομοιώσεων αυτής της ομάδας, εισάγουμε τον ίδιο αρχικό πίνακα $L_{(3,2)}$, αλλά μεταβάλλουμε τις τιμές των παραμέτρων a_k (της σχέσης 2.4) και c_k (της σχέσης 2.5) του αλγορίθμου. Να σημειωθεί ότι στον κωδικοποιημένο στη Matlab αλγόριθμο SPSA (βλέπε Παράρτημα), η μεταβλητή a_k συμβολίζεται με *alpha* και η μεταβλητή c_k με *eta*.

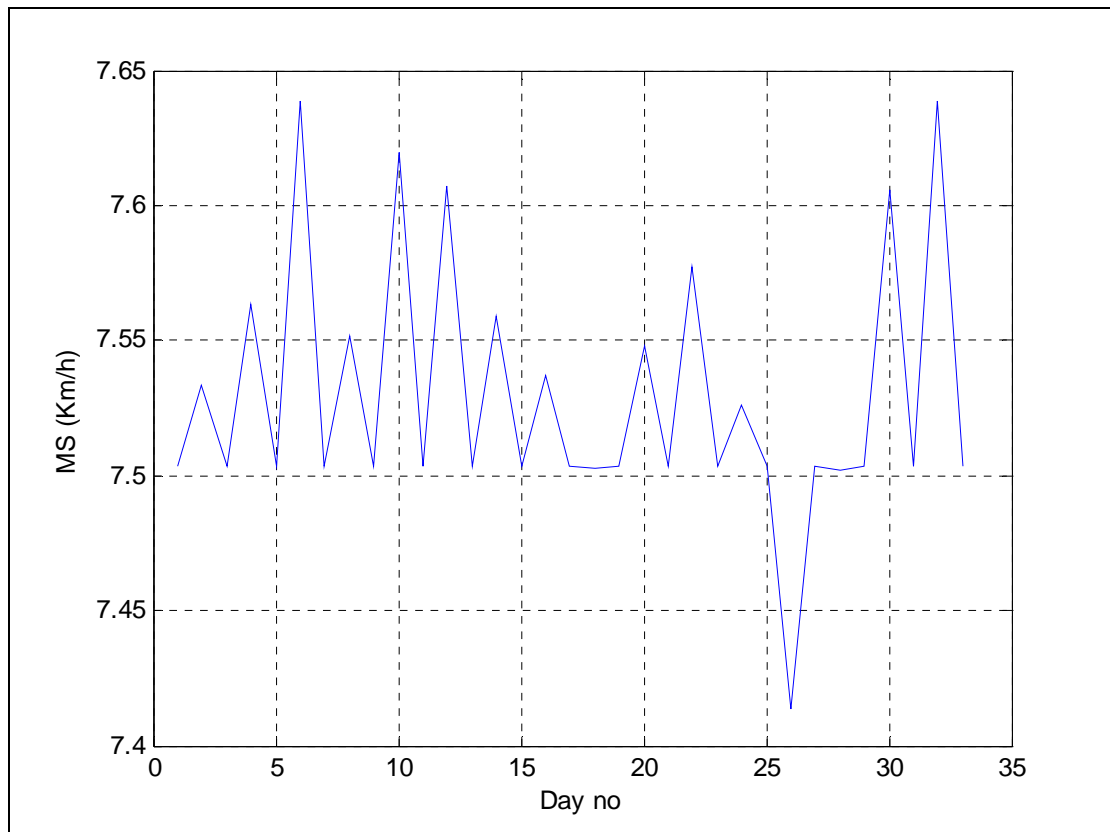
Η Σειρά Προσομοιώσεων που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα είναι αυτή όπου οι παράμετροι του αλγορίθμου έλαβαν τις τιμές: $a_k = 0.001$ και $c_k = 0.001$. Στο Διάγραμμα 1 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών.



Σχήμα 6.1: Τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας Σειράς Προσομοιώσεων της Πρώτης Ομάδας με αρχικό πίνακα L τον $L_{(3,2)}$ και τιμές των παραμέτρων a_k και c_k , τις $a_k = 0.001$ και $c_k = 0.001$.

Δεύτερη Ομάδα Προσομοιώσεων: Στις προσομοιώσεις της Δεύτερης Ομάδας, ο αρχικός πίνακας των εκτιμήσεων των τιμών των παραμέτρων είναι ο $L_{(7,53)}$ τον οποίο σχεδιάσαμε υποθέτοντας τέλεια γνώση των χαρακτηριστικών του δικτύου. Σε καθεμία σειρά προσομοιώσεων αυτής της ομάδας, εισάγουμε τον ίδιο αρχικό πίνακα $L_{(7,53)}$, αλλά μεταβάλλουμε τις τιμές των παραμέτρων a_k και c_k του αλγορίθμου.

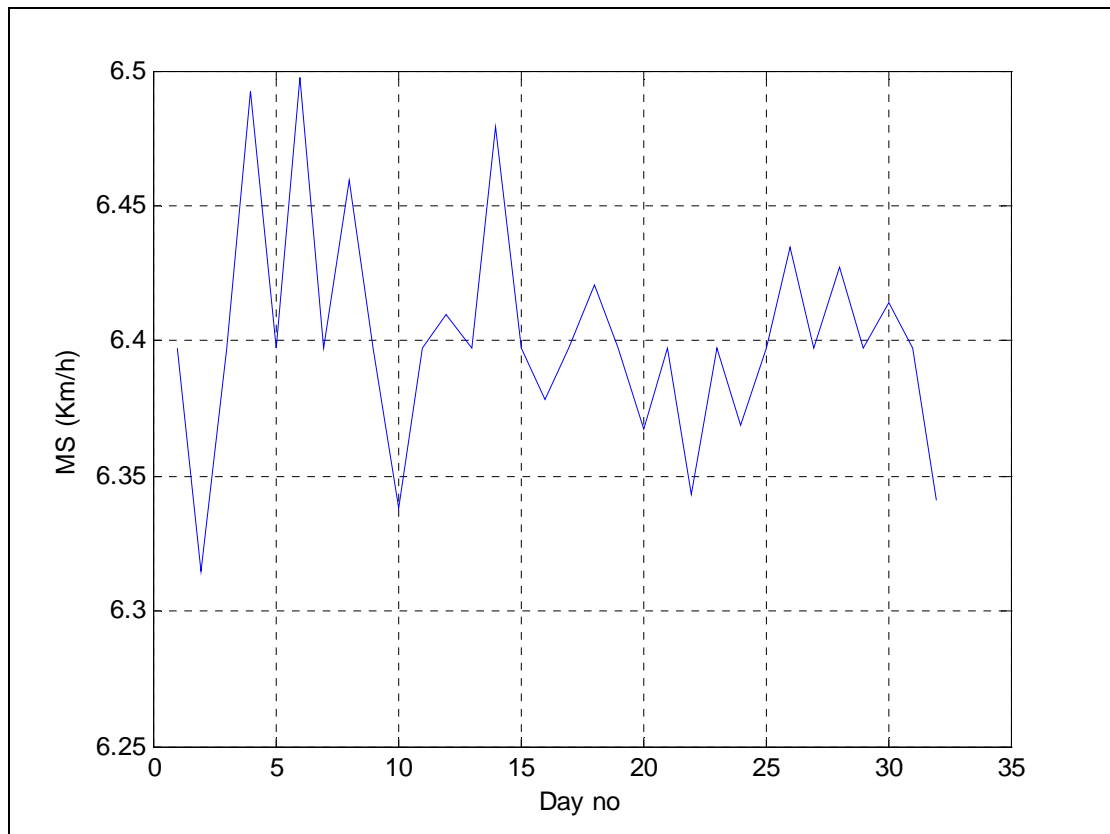
Η Σειρά Προσομοιώσεων που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα είναι αυτή όπου οι παράμετροι του αλγορίθμου έλαβαν τις τιμές: $a_k = 0.01$ και $c_k = 0.01$. Στο Διάγραμμα 2 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών.



Σχήμα 6.2: Τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας Σειράς Προσομοιώσεων της Δεύτερης ομάδας με αρχικό πίνακα L τον $L_{(7,53)}$ και τιμές των παραμέτρων a_k και c_k , τις $a_k = 0.01$ και $c_k = 0.01$.

Τρίτη Ομάδα Προσομοιώσεων: Στις προσομοιώσεις της Τρίτης Ομάδας, ο αρχικός πίνακας των εκτιμήσεων των τιμών των παραμέτρων είναι ο $L_{(6,4)}$, τον οποίο σχεδιάσαμε θέτοντας για τα χαρακτηριστικά του δικτύου τιμές που αποκλίνουν κατά 40% περίπου από τις πραγματικές τιμές αυτών. Σε καθεμία Σειρά Προσομοιώσεων αυτής της ομάδας, εισάγουμε τον ίδιο αρχικό πίνακα $L_{(6,4)}$, αλλά μεταβάλλουμε τις τιμές των παραμέτρων a_k και c_k του αλγορίθμου.

Η Σειρά Προσομοιώσεων που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα είναι αυτή όπου οι παράμετροι του αλγορίθμου έλαβαν τις τιμές: $a_k = 0.1$ και $c_k = 0.01$. Στο Διάγραμμα 3 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών.



Σχήμα 6.3: Τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας Σειράς Προσομοιώσεων της Δεύτερης ομάδας με αρχικό πίνακα L τον $L_{(6,4)}$ και τιμές των παραμέτρων a_k και c_k , τις $a_k = 0.1$ και $c_k = 0.01$.

6.3.2 Συμπεράσματα

Μελετώντας τα αποτελέσματα όλων των Σειρών Προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε, διαπιστώνουμε ότι η εφαρμογή της μεθόδου Στοχαστικής Προσέγγισης μέσω Ταυτόχρονων Διαταραχών για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων της στρατηγικής TUC, δεν είναι επιτυχημένη. Δεν διαπιστώνεται καμία αύξηση στην μέση ταχύτητα του δικτύου στο οποίο εφαρμόζεται η TUC, δεν επιτυγχάνεται, δηλαδή, καμία βελτίωση στην απόδοση της στρατηγικής.

Η παραπάνω διαπίστωση μας οδήγησε να αναπτύξουμε έναν νέο αλγόριθμο βελτιστοποίησης παραμέτρων, τον AFT. Την αποδοτικότητα του αλγορίθμου αυτού την εξετάζουμε μέσω προσομοιώσεων, των οποίων τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω.

6.4 Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μέσω εφαρμογής του αλγορίθμου AFT

6.4.1 Επιλογή του Καθολικού Προσεγγιστή

Ο Γραμμικός-ως-προς-τις-παραμέτρους Μη Γραμμικός Καθολικός Προσεγγιστής (ΓΜΓΠ) που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του αλγορίθμου AFT είναι ένας πολυωνυμικός προσεγγιστής δευτέρου βαθμού ως προς το θ και το \bar{x}^ℓ . Η μορφή του είναι:

$$\hat{J} = \mathcal{G}_0 + \sum_{i=1}^N \mathcal{G}_i \theta_j \bar{x}_k^\ell + \sum_{i=1}^N \mathcal{G}_{i+N} \theta_h \theta_j \bar{x}_k^\ell, \quad (6.2)$$

όπου το $\hat{J} \equiv \hat{m}s$ δηλώνει την εκτίμηση της πραγματικής μέσης ταχύτητας στο δίκτυο, και \mathcal{G}_i είναι οι σταθερές παράμετροι του προσεγγιστή υπολογισμένες μέσω της ελαχιστοποίησης της (3.4). Οι δείκτες j, k, h επιλέγονται τυχαία σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Με άλλα λόγια, σε αυτόν τον προσεγγιστή τρίτου βαθμού λαμβάνεται υπόψη μόνο ένας περιορισμένος αριθμός τυχαίων πιθανών συνδυασμών, αντί όλων. Όσον αφορά στην τιμή του N , μετά από πειραματισμούς καταλήξαμε στο ότι η τιμή $N = 300$ είναι επαρκής για μία αποδοτική εφαρμογή του αλγορίθμου AFT. Να σημειωθεί ότι με αυτή την επιλογή του ΓΜΓΠ, η προσθήκη τυχαίου θορύβου στο διάνυσμα των παραμέτρων κατά τα βήματα 1 έως L , του αλγορίθμου αρκεί ώστε να ισχύει πάντα η συνθήκη persistency of excitation.

6.4.2 Σχεδιαστικές παράμετροι του αλγορίθμου

Όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 3, στη συγκεκριμένη εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου στην βελτιστοποίηση των παραμέτρων της στρατηγικής TUC, μία λογική επιλογή για το \bar{x}^p της σχέσης (3.7) είναι η μέση κυκλοφοριακή ζήτηση \bar{x}^ℓ της προηγούμενης μέρας. Για τον υπολογισμό της μέσης αυτής

κυκλοφοριακής ζήτησης απαιτούνται μετρήσεις της κυκλοφοριακής ροής σε όλους τους συνδέσμους του δικτύου. Οι μετρήσεις αυτές παρέχονται από τους φωρατές που έχουν εγκατασταθεί σε κάθε έναν από τους συνδέσμους αλλά δεν αντιστοιχούν πάντοτε στην πραγματική κυκλοφοριακή ζήτηση. Αυτό συμβαίνει μόνο όταν η ουρά των αυτοκινήτων στους συνδέσμους εισόδου είναι μικρή. Όταν η ουρά μεγαλώσει τόσο ώστε να καλυφτεί ο φωρατής, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να οδηγηθούμε σε υποτίμηση της ζήτησης. Με άλλα λόγια, όταν η ζήτηση στο δίκτυο είναι πολύ μεγάλη ή η συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου δεν μπορεί να διαχειριστεί αποδοτικά την ύπαρξη ουρών στους συνδέσμους εισόδου, είναι πολύ πιθανό οι μετρήσεις της κυκλοφοριακής ροής του συστήματος που λαμβάνονται να υποτιμούν το μέγεθος της πραγματικής κυκλοφοριακής ζήτησης.

Για να αντιμετωπιστεί, τουλάχιστον μερικώς, αυτό το πρόβλημα, το διάνυσμα \bar{x}^p που εισάγεται στον αλγόριθμο AFT υπολογίζεται από το μέσο όρο μετρήσεων ροής 3.5 ωρών στον κάθε σύνδεσμο εισόδου του δικτύου, οι οποίες, όμως, αντιστοιχούν στις καλύτερες επιδόσεις (μεγαλύτερη μέση ταχύτητα) στο δίκτυο μέχρι εκείνη τη στιγμή. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύγουμε τον κίνδυνο χρήσης ενός διανύσματος \bar{x}^p που να αντιστοιχεί σε μία μη αποδοτική επιλογή του διανύσματος των παραμέτρων ελέγχου. Φυσικά, το διάνυσμα \bar{x}^l του βήματος $L_r + 1$ περιλαμβάνει το μέσο όρο μετρήσεων ροής 3.5 ωρών στον κάθε σύνδεσμο εισόδου του δικτύου της πιο πρόσφατης προσομοίωσης.

6.4.3 Πρώτη Ομάδα Προσομοιώσεων

Για κάθε μία από τις προσομοιώσεις αυτής της ομάδας, χρησιμοποιήθηκε μία τυχαία διαταραγμένη 5%- πλάτους παραλλαγή του βασικού σεναρίου ζήτησης. Να σημειωθεί ότι αυτού του βαθμού η διαταραχή είναι πολύ μικρή για να προκαλέσει κάποια αλλαγή στη συμπεριφορά του αστικού δικτύου. Πραγματοποιήσαμε τις Σειρές Προσομοιώσεων της συγκεκριμένης ομάδας επιδιώκοντας να ερευνήσουμε τις δυνατότητες του προτεινόμενου αλγόριθμου για διαφορετικές τιμές των σχεδιαστικών παραμέτρων του. Γι' αυτό το λόγο, θεωρήσαμε την ύπαρξη πολύ μικρών αυξομειώσεων στην καθημερινή ζήτηση.

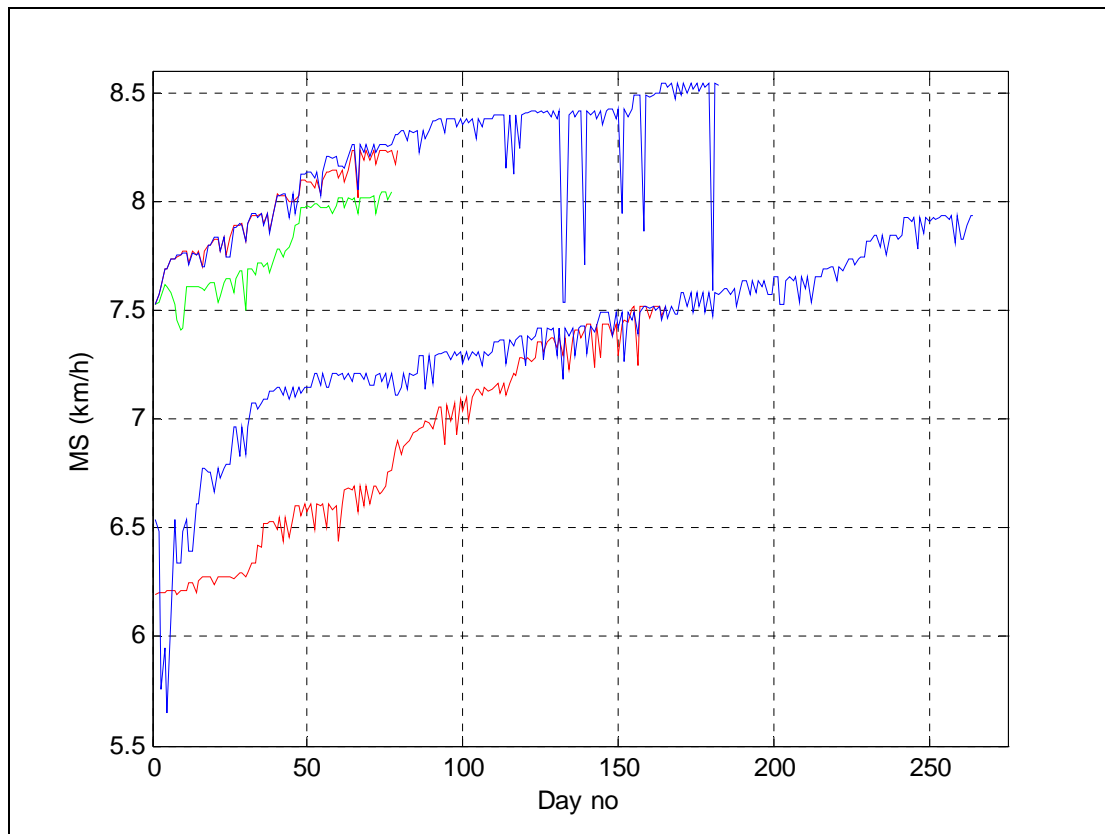
Οι προσομοιώσεις της ομάδας αυτής πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια εφαρμογής τριών διαφορετικών στρατηγικών βελτιστοποίησης παραμέτρων:

Στρατηγική 1

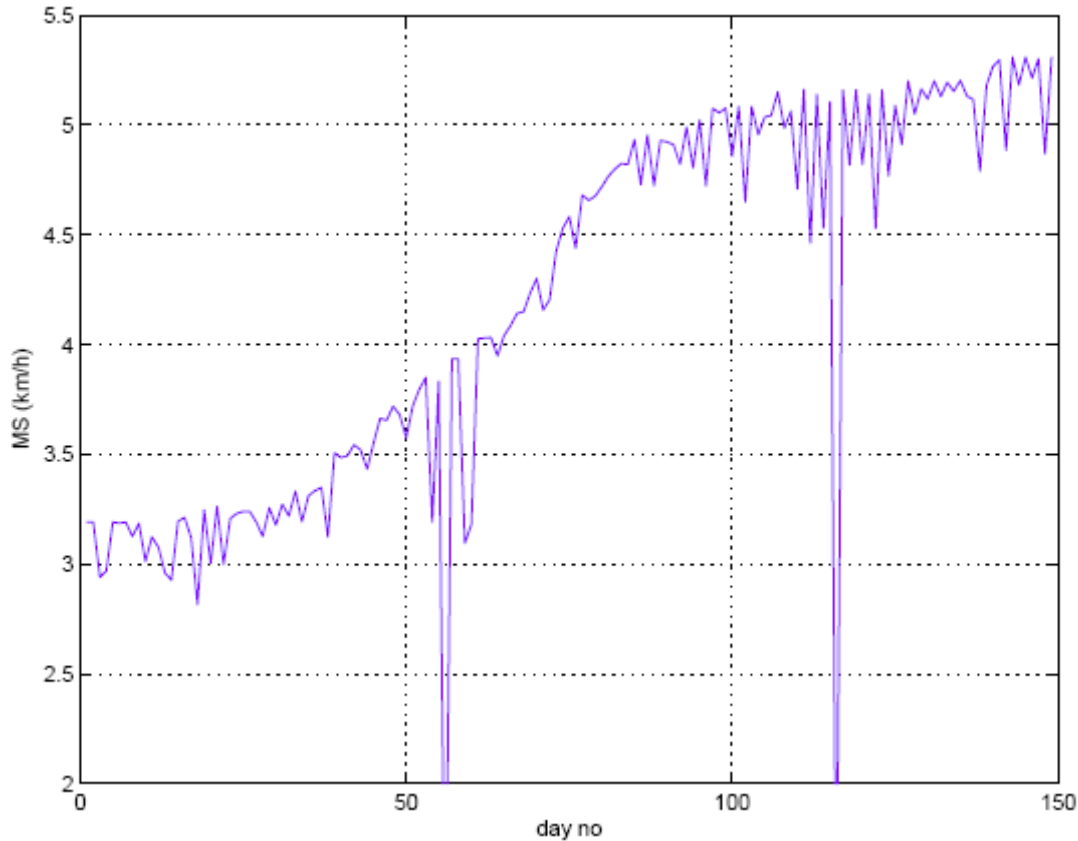
Σε αυτή την περίπτωση, μόνο τα 544 πιο σημαντικά στοιχεία του πίνακα L συμμετείχαν στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Ο πίνακας L περιέχει 2982 στοιχεία ($[\text{αριθμός σταδίων}=42] \times [\text{αριθμός συνδέσμων}=71]$). Τα περισσότερα από αυτά τα στοιχεία λαμβάνουν πολύ μικρές τιμές αφού αντιστοιχούν σε συνδέσμους αρκετά απομακρυσμένους από τη διασταύρωση στην οποία πραγματοποιούνται κάποια από τα στάδια. Συνεπώς, δεν είναι απαραίτητο να βελτιστοποιήσουμε όλα τα στοιχεία του πίνακα. Εξετάζοντας τα στοιχεία των πινάκων $L_{(7.53)}$, $L_{(6.55)}$ και $L_{(6.2)}$ καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι μόνο 544 λαμβάνουν τιμές που δεν είναι αμελητέες. Στα Σχήματα (6.4) και (6.5), συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα τεσσάρων σειρών προσομοιώσεων, στην καθεμία από τις οποίες ο αρχικός πίνακας L που εισάγεται είναι διαφορετικός και ίσος με $L_{(7.53)}$, $L_{(6.55)}$, $L_{(6.2)}$ και $L_{(3.2)}$ αντίστοιχα. Οι τιμές των παραμέτρων a , γ του αλγορίθμου, όμως, διατηρούνται σταθερές.

Στο Σχήμα (6.4) προστίθενται και τα αποτελέσματα δύο ακόμα σειρών προσομοιώσεων που αφορούν στην περίπτωση όπου ο αρχικός πίνακας που εισάγεται στον αλγόριθμο είναι σταθερός και ίσος με τον $L_{(7.53)}$, αλλά οι τιμές των παραμέτρων a , γ μεταβάλλονται.

Σε όλες τις παραπάνω προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν οι παράμετροι b_i τέθηκαν ίσοι με το μηδέν.



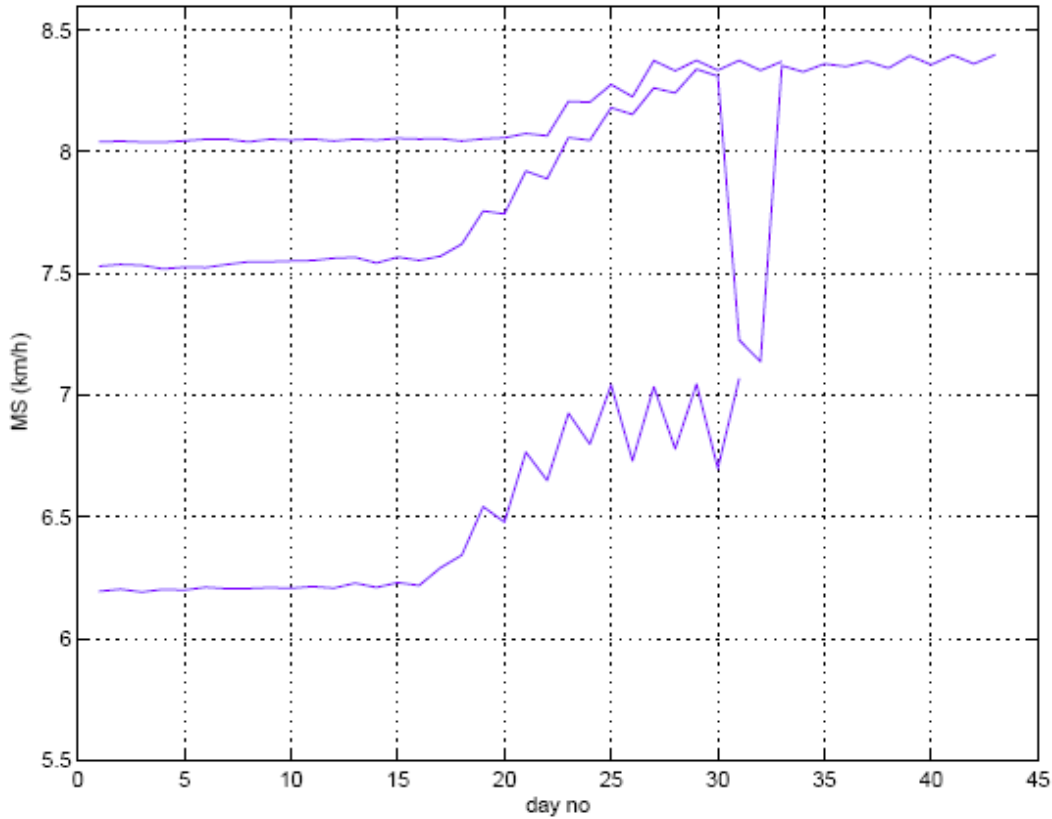
Σχήμα 6.4: Τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας Σειρών Προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της Στρατηγικής 1, για διαφορετικές επιλογές του αρχικού πίνακα L ($L = L_{(7.53)}, L_{(6.55)}, L_{(6.2)}$) και τιμών των σχεδιαστικών παραμέτρων a και γ .



Σχήμα 6.5: Τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας Σειράς Προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της Στρατηγικής 1, για αρχικό πίνακα L τον $L_{(3.2)} = 0$.

Στρατηγική 2

Στα πλαίσια της δεύτερης στρατηγικής βελτιστοποίησης που ακολουθήσαμε, πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις στις οποίες διατηρήσαμε σταθερά τα στοιχεία του πίνακα L , επιδιώκοντας αυτή τη φορά την βελτιστοποίηση των παραμέτρων b_i , των οποίων οι τιμές, που αρχικά τέθηκαν ίσες με το μηδέν, μεταβάλλονται κατά τις προσομοιώσεις. Στο Σχήμα (6.6), συγκεντρώνονται κάποια από τα αποτελέσματα Σειρών Προσομοιώσεων που κάνουν χρήση των πινάκων $L_{(8.1)}$, $L_{(7.53)}$, και $L_{(6.2)}$. Ο πίνακας $L_{(8.1)}$, προέκυψε από τη διαδικασία βελτιστοποίησης των στοιχείων του πίνακα $L_{(7.53)}$, ο οποίος εισήχθη ως αρχικός πίνακας των παραμέτρων του συστήματος ελέγχου σε Σειρά Προσομοιώσεων κατά την εφαρμογή της Στρατηγικής 1 (βλέπε Σχήμα (6.4)).



Σχήμα 6.6: Τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας Σειρών Προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της Στρατηγικής 2, για διαφορετικές επιλογές του αρχικού πίνακα L ($L = L_{(8,1)}, L_{(7,53)}, L_{(6,2)}$).

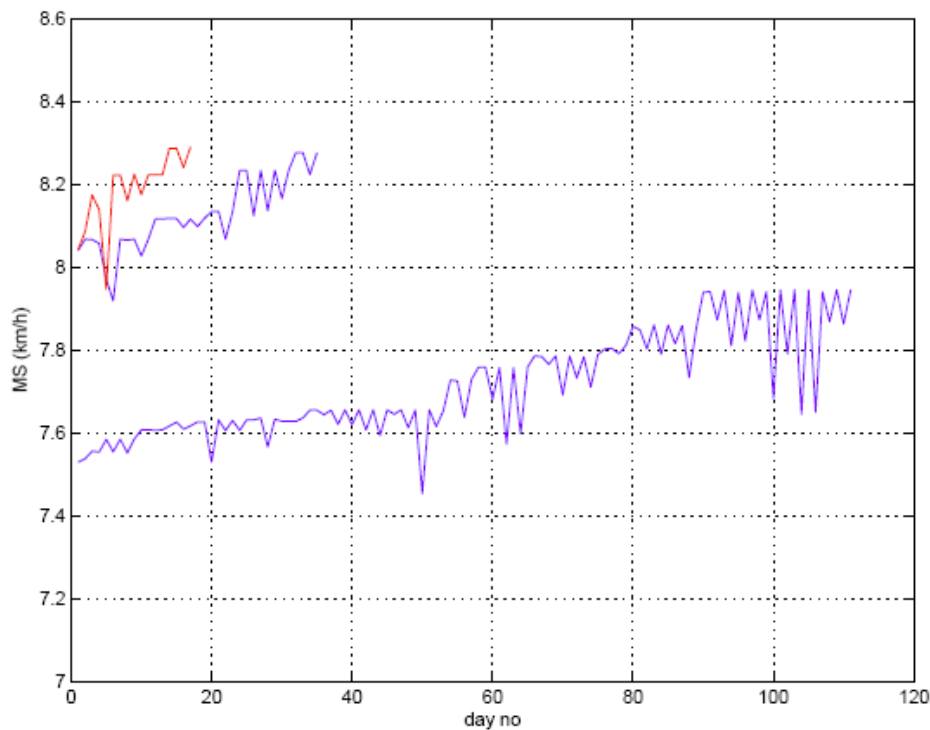
Στρατηγική 3

Κατά την εφαρμογή της Στρατηγικής 3, στις διάφορες Σειρές Προσομοιώσεων που πραγματοποιούμε διατηρούμε τον πίνακα L σταθερό. Μετασχηματίζουμε, όμως, τον κανόνα ελέγχου της στρατηγικής TUC, ως εξής:

$$g(k) = g_N - Lx(k-1) + NN(k-1), \quad (6.3)$$

όπου $NN(k-1)$ η έξοδος ενός νευρωνικού δικτύου πολλαπλών επιπέδων. Δύο διαφορετικά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται. Το ένα δέχεται ως εισόδους τις μετρήσεις $x(k-1)$ και το δεύτερο τις μετρήσεις της κυκλοφοριακής ροής $f(k-1)$ που λαμβάνονται από τους φωρατές κατά τη διάρκεια του προηγούμενου κύκλου. Οι αρχικές τιμές των βαρών στα νευρωνικά δίκτυα τέθηκαν όλες ίσες με το μηδέν. Στο Σχήμα (6.7) συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε χρησιμοποιώντας κάθε φορά και διαφορετικό πίνακα L . Όπως

και στις Σειρές Προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της Στρατηγικής 1, έτσι και εδώ οι τιμές των παραμέτρων b_i τίθενται ίσες με το μηδέν.



Σχήμα 6.7: Τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας Σειρών Προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της Στρατηγικής 3. Οι καμπύλες με το μπλε χρώμα αντιστοιχούν στον ελεγκτή $g(k) = g_N - Lx(k-1) + NN(k-1)$ για διαφορετικές επιλογές του αρχικού πίνακα L ($L = L_{(8,1)}, L_{(7,53)}$). Η καμπύλη με το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στον ελεγκτή $g(k) = g_N - Lx(k-1) + NN(f(k-1))$ με $L = L_{(8,1)}$.

6.4.4 Δεύτερη ομάδα προσομοιώσεων

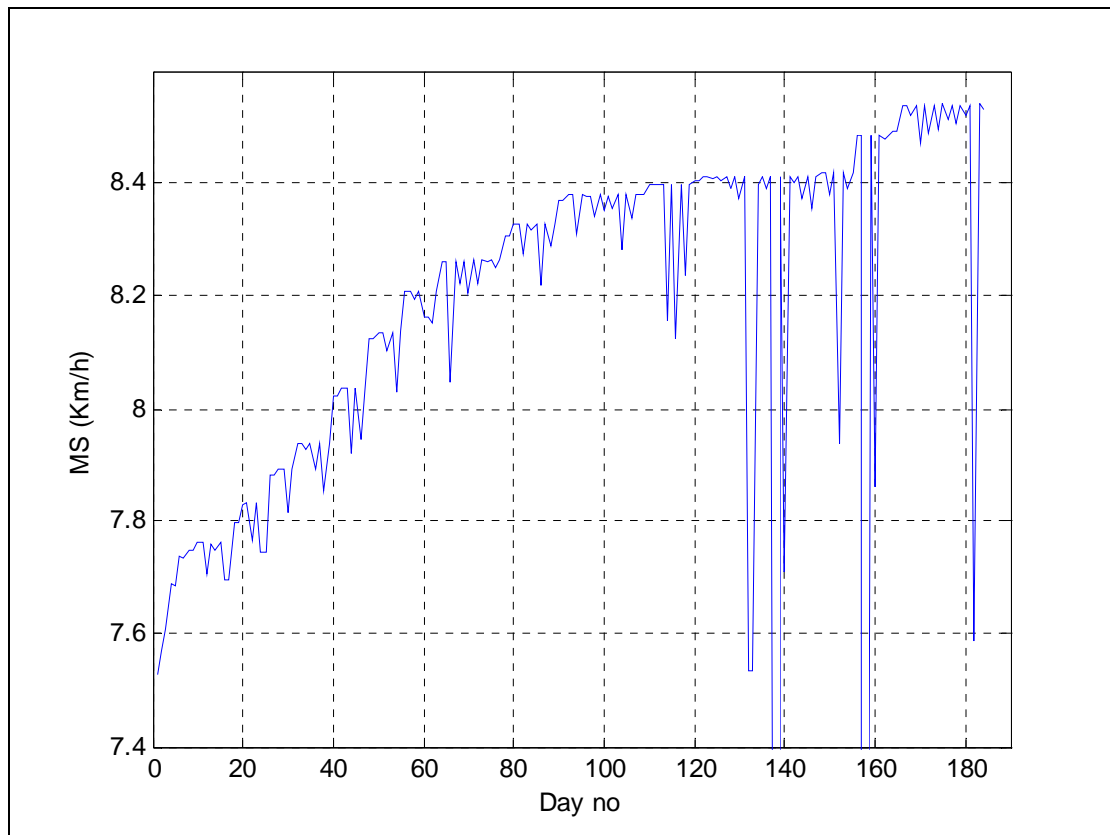
Ένα πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά τις προσομοιώσεις της Πρώτης Ομάδας είναι αυτό της αστάθειας του συστήματος λόγω της χρήσης ορισμένων διανυσμάτων θ^i που το οδηγούν σε μη επιθυμητή συμπεριφορά. Ειδικά στην περίπτωση της σειράς προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν με δεδομένο τον αρχικό πίνακα $L_{(3,2)}$ (βλέπε Διάγραμμα 5), υπήρξαν ημέρες που η μέση ταχύτητα στο δίκτυο έλαβε πολύ μικρές τιμές. Για να αντιμετωπίσουμε μερικώς αυτό το πρόβλημα της αστάθειας, στο

επόμενο σύνολο των προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε επιφέραμε μετατροπές στον αλγόριθμο AFT κατά τα βήματα $1, \dots, L_r$.

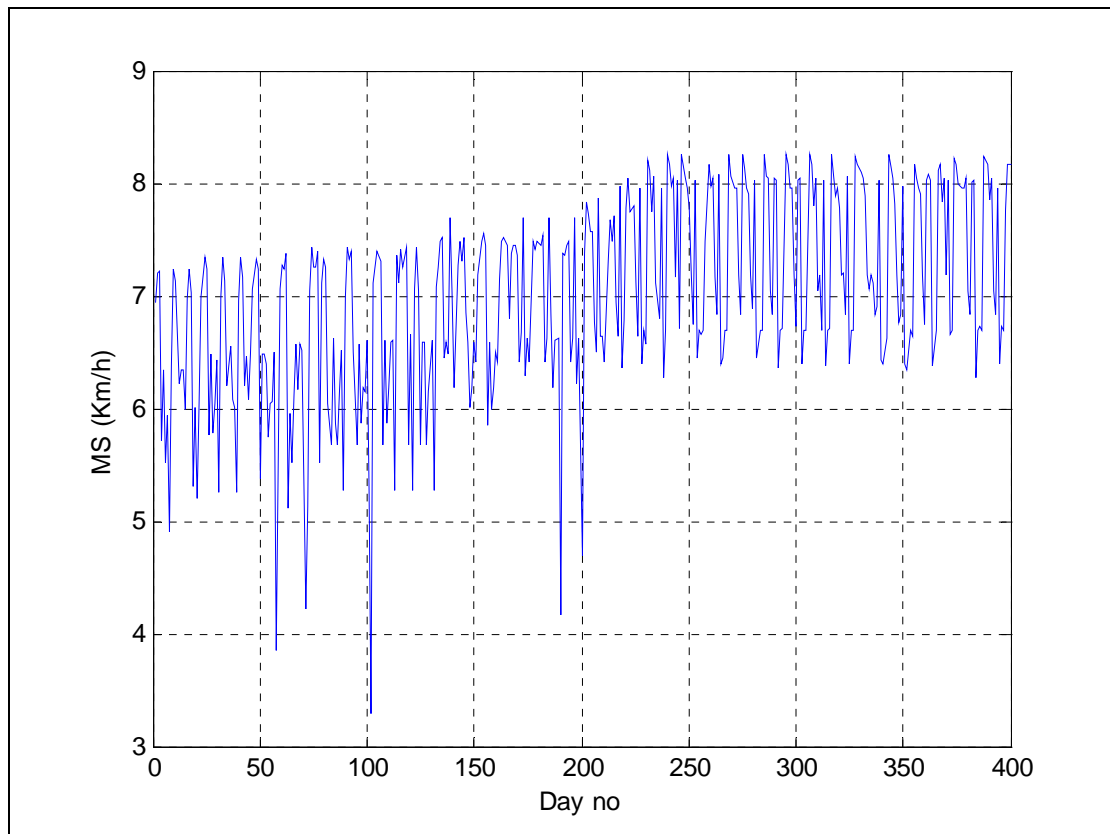
Σε κάθε ένα από αυτά τα βήματα, οι τυχαίως διαταραγμένες τιμές των παραμέτρων ελέγχου που λαμβάνονται από τις σχέσεις (2.2)-(2.3) αξιολογούνται αρχικά εκτός πραγματικού χρόνου (off-line test) πριν χρησιμοποιηθούν στα επόμενα βήματα του αλγορίθμου. Σε αυτόν τον έλεγχο μη-πραγματικού χρόνου, οι αποφάσεις ελέγχου που λαμβάνονται από το σύστημα με δεδομένα το νέο διάνυσμα θ και τα αποθηκευμένα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των προηγούμενων ημερών, συγκρίνονται με παλιότερες αποφάσεις που οδήγησαν σε ικανοποιητικές επιδόσεις του συστήματος. Εάν η σύγκριση δεν εξακριβώνει σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο αποφάσεων τότε το νέο θ εισάγεται στο σύστημα και αξιολογείται και σε πραγματικό χρόνο. Εάν διαπιστωθεί μεγάλη απόκλιση, τότε το νέο διάνυσμα των παραμέτρων θ απορρίπτεται και ένα καινούριο λαμβάνεται. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται εφόσον εισαχθεί ένα διάνυσμα θ που οδηγεί σε επιθυμητά αποτελέσματα. Η σύγκριση πραγματοποιείται εξετάζοντας τις νόρμες όλων των διαφορών μεταξύ των αποφάσεων του ελέγχου σε πραγματικό χρόνο (on-line control) και του ελέγχου μη-πραγματικού χρόνου (off-line control). Εάν η νόρμα υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, τότε το υπό εξέταση διάνυσμα των παραμέτρων απορρίπτεται.

Στη Δεύτερη Ομάδα Προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκαν 9 ακόμα βασικά σενάρια κυκλοφοριακής ζήτησης τα οποία δημιουργήθηκαν μέσω της προσθήκης διαταραχής στις τιμές του βασικού σεναρίου της πρώτης σειράς προσομοιώσεων. Οι αρχικές τιμές του σεναρίου αυτού δέχτηκαν διαταραχή κατά μέσο όρο της τάξης του 50%. Κάθε μέρα γίνεται χρήση ενός από τα δέκα σενάρια που δημιουργήθηκαν, μέσω της προσθήκης διαταραχής στα στοιχεία του της τάξης του 5%. Για μεγαλύτερη ευκολία στην σύγκριση της απόδοσης του αλγορίθμου για κάθε σενάριο, διατηρείται σταθερή η σειρά εισαγωγής στον αλγόριθμο καθενός από τα δέκα αυτά σενάρια καθ' όλη τη διάρκεια των προσομοιώσεων. Με αυτό τον τρόπο, καθίσταται εύκολη η σύγκριση της μέσης ταχύτητας στο δίκτυο κατά την τρέχουσα επανάληψη, με αυτήν που εξήχθη κατά την τελευταία προσομοίωση στην οποία έγινε χρήση του ίδιου βασικού σεναρίου ζήτησης (10 επαναλήψεις πίσω).

Μέσω αυτής της Ομάδας Προσομοιώσεων, εξετάσαμε την αποδοτικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης για σενάρια ζήτησης που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις. Όπως και στην Πρώτη Ομάδα Προσομοιώσεων, μόνο τα 544 πιο σημαντικά στοιχεία του πίνακα L συμμετείχαν στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Στα Σχήματα (6.8) και (6.9) συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα δύο σειρών προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας για κάθε μία από αυτές διαφορετικούς αρχικούς πίνακες $L_{(7,53)}$ και $L_{(6,2)}$. Κατά τις προσομοιώσεις, οι τιμές των παραμέτρων b_i του αλγορίθμου διατηρούνται μηδενικές.



Σχήμα 6.8: Τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας Σειράς Προσομοιώσεων που ανήκει στη Δεύτερη Ομάδα, για αρχικό πίνακα L τον $L_{(7,53)}$.



Σχήμα 6.9: Τα αποτελέσματα της μέσης ταχύτητας Σειράς Προσομοιώσεων που ανήκει στη Δεύτερη Ομάδα, για αρχικό πίνακα L τον $L_{(6.55)}$.

6.5 Συμπεράσματα

Κατά την εξέταση των Σχημάτων (6.4)-(6.9) καταλήξαμε στα παρακάτω εξής συμπεράσματα:

1. Οι σχεδιαστικές αρχές της στρατηγικής ελέγχου TUC οδηγούν στη δημιουργία ενός αποδοτικού ελεγκτή κυκλοφορίας ακόμα και αν αυτός δεν έχει δεχτεί ρύθμιση στις τιμές των παραμέτρων του μέσω ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Για την ακρίβεια, ο ελεγκτής που βασίζεται στην άριστη γνώση των χαρακτηριστικών του δικτύου δεν υστερεί πολύ από αυτόν που λαμβάνεται μετά τη χρήση του AFT αλγορίθμου. Επίσης, ο ελεγκτής που δημιουργείται θεωρώντας γνωστά σε μικρό βαθμό τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της TUC (π.χ., αυτός που κάνει χρήση του πίνακα $L_{(6.55)}$) αντιστοιχεί, μετά την βελτιστοποίηση των παραμέτρων του, σε

απόδοση ($\approx 7.59 \text{ km/h}$) που δεν απέχει πολύ από αυτή που λαμβάνεται μέσω της χρήσης του αρχικού πίνακα $L_{(7.53)}$. Εν συντομία, ο έλεγχος διάρκειας φάσεων της στρατηγικής TUC οδηγεί ήδη σε ικανοποιητικά αποτελέσματα, όσον αφορά στην αποδοτικότητα του δικτύου στο οποίο εφαρμόζεται. Αυτή η απόδοση, όμως, μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω μέσω της χρήσης του αλγορίθμου AFT.

2. Ο αλγόριθμος AFT αποδεικνύεται πολύ αποδοτικός κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή του στην ρύθμιση των τιμών των παραμέτρων της στρατηγικής TUC για τον έλεγχο του οδικού δικτύου της πόλης των Χανίων. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέσαμε, ο αλγόριθμος μεταβάλλει τις τιμές των παραμέτρων του συστήματος ελέγχου, βελτιώνοντας συνεχώς την απόδοσή του, αυξάνοντας, δηλαδή, τη μέση ταχύτητα στο δίκτυο. Να σημειωθεί ότι η εφαρμογή του αλγορίθμου αποδεικνύεται αποδοτική τόσο στην περίπτωση που η τιμή της κυκλοφοριακής ζήτησης δεν παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις (Πρώτη Ομάδα Προσομοιώσεων με διακυμάνσεις στη ζήτηση της τάξης του 5%) όσο και στην περίπτωση ύπαρξης μεγάλων αυξομειώσεων στην τιμή της (Δεύτερη Ομάδα Προσομοιώσεων με διακυμάνσεις στη ζήτηση της τάξης του 40%).

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που τα χαρακτηριστικά του δικτύου θεωρούνται γνωστά, η χρήση του AFT αλγορίθμου αυξάνει τη μέση ταχύτητα στο δίκτυο από 7.53 km/h σε 8.5 km/h περίπου (αύξηση της τάξης του 13.3%). Στην περίπτωση που η γνώση των χαρακτηριστικών του δικτύου συνοδεύεται από αβεβαιότητα λόγω απόκλισης από τις αρχικές τιμές έως και 40%, η μέση ταχύτητα στο δίκτυο αυξάνεται από 6.4 km/h σε 7.9 km/h περίπου (αύξηση της τάξης του 23.4%). Στην περίπτωση, τέλος, που και η στρατηγική TUC και ο αλγόριθμος AFT υποθέτουν μηδενική γνώση των χαρακτηριστικών του δικτύου, η χρήση του αλγορίθμου οδηγεί στην αύξηση της μέσης ταχύτητας στο δίκτυο από 3 km/h σε 5.2 km/h (73% αύξηση).

Αντίθετα, η χρήση του αλγορίθμου SPSA για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων του ίδιου οδικού δικτύου δεν κατάφερε να αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα (στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν παρατηρήθηκε καμία βελτίωση στην μέση ταχύτητα του δικτύου).

3. Παρατηρείται ότι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων b_i της στρατηγικής TUC οδηγεί σε πιο γρήγορη αύξηση της αποδοτικότητας του δικτύου συγκρινόμενη με αυτήν που λαμβάνεται μέσω της βελτιστοποίησης του πίνακα L των παραμέτρων της (συγκρίνοντας τα Σχήματα (6.5) και (6.8)), διαπιστώνουμε ότι παρόμοιες βελτιώσεις επιτυγχάνονται σε λιγότερες μέρες στην περίπτωση βελτιστοποίησης των παραμέτρων b_i). Ωστόσο, η ρύθμιση των b_i παραμέτρων δεν μπορεί να προκαλέσει τόσο μεγάλες βελτιώσεις στην απόδοση όσο η ρύθμιση των στοιχείων του πίνακα L της TUC. Για αυτό τον λόγο, η καλύτερη τακτική που μπορούμε να ακολουθήσουμε είναι να εφαρμόσουμε αρχικά τον αλγόριθμο AFT για να βελτιστοποιήσουμε τον πίνακα L της TUC και όταν διαπιστώσουμε ότι ο πίνακας δεν επιδέχεται περαιτέρω βελτίωση, να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο ώστε να βελτιστοποιήσουμε και τις παραμέτρους b_i . Μπορούμε, επίσης, να καταφύγουμε στην ταυτόχρονη βελτιστοποίηση και του L και των παραμέτρων b_i , χωρίς αυτό να σημαίνει σημαντική αύξηση της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου ή της υπολογιστικού φόρτου.

Μία από τις μελλοντικές μας έρευνες θα αφορά στην ταυτόχρονη βελτιστοποίηση διαφορετικών παραμέτρων της TUC, όπως στοιχεία του πίνακα L , παράμετροι b_i , ακόμα και παράμετροι που αφορούν στο τμήμα του ελέγχου της διάρκειας περιόδου και στο τμήμα του ελέγχου των χρονικών διαφορών.

4. Η επιπρόσθετη χρήση ελέγχου μέσω εισαγωγής ενός νευρωνικού δικτύου στον γραμμικό ελεγκτή της διάρκειας των φάσεων (σχέση (6.4)), οδήγησε σε αποτελέσματα χειρότερα από αυτά που εξάγονται κατά τη χρήση του απλού γραμμικού ελεγκτή (σχέση (4.2)). Το νευρωνικό δίκτυο πολλαπλών επιπέδων που χρησιμοποιήθηκε, μπορεί να προσεγγίσει τη συμπεριφορά ενός μη-γραμμικού ελεγκτή. Συμπεραίνουμε, επομένως, ότι η αντικατάσταση ενός γραμμικού ελεγκτή (σχέση (4.2)) από έναν μη-γραμμικό, δε θα βελτιώσει τις δυνατότητες του τμήματος του ελέγχου της διάρκειας των φάσεων της TUC.

5. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων γίνεται φανερό ότι υπάρχουν πολλά τοπικά ελάχιστα για τον πίνακα L . Όπως φαίνεται και στο Σχήμα (6.4), εισάγοντας

στον αλγόριθμο διαφορετικούς αρχικούς πίνακες L λαμβάνουμε νέους πίνακες η εισαγωγή των οποίων στο σύστημα ελέγχου οδηγεί σε διαφορετικές κάθε φορά επιδόσεις. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση που εισάγουμε στον αλγόριθμο τον ίδιο αρχικό πίνακα αλλά διαφορετικές τιμές για τις σχεδιαστικές παραμέτρους του αλγορίθμου. Και σ' αυτήν την περίπτωση, ο αλγόριθμος καταλήγει κάθε φορά στη δημιουργία διαφορετικού βέλτιστου πίνακα (π.χ., βλέπε Σχήμα (6.4) για αρχικό πίνακα τον $L_{(7,53)}$). Εντούτοις, όλοι οι τελικοί πίνακες που προκύπτουν από την εφαρμογή του AFT αλγορίθμου, αντιστοιχούν σε ικανοποιητική απόδοση του δικτύου.

6. Όπως έχουμε προαναφέρει, όταν πραγματοποιήσαμε τη Δεύτερη Ομάδα Προσομοιώσεων (βλέπε Σχήματα (6.8) και (6.9)), χρησιμοποιήσαμε έναν έλεγχο εκτός πραγματικού χρόνου (off-line) της διαδικασίας, προκειμένου να μπλοκάρουμε την εισαγωγή στον αλγόριθμο διανυσμάτων $\hat{\theta}$ τα οποία οδηγούν σε μη ικανοποιητική συμπεριφορά του δικτύου. Ωστόσο, παρόλο τον off-line έλεγχο που πραγματοποιούμε, εμφανίζονται περιπτώσεις όπου η απόδοση του AFT αλγορίθμου μειώνεται σημαντικά συγκριτικά με την απόδοσή του κατά τις προηγούμενες επαναλήψεις (βλέπε π.χ., την απόδοση του αλγορίθμου μετά την επανάληψη 120 στο Σχήμα (6.8)). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο AFT αλγόριθμος δεν παρέχει κάποια εγγύηση για την ποιότητα των διανυσμάτων $\hat{\theta}$ που γίνονται δεκτά κατά τον έλεγχο εκτός πραγματικού χρόνου. Η σημαντικότερη μελλοντική μας έρευνα θα αφορά στην κατάλληλη επέκταση του αλγορίθμου ώστε να αντιμετωπιστεί το παραπάνω πρόβλημα.

7 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

7.1 Σύνοψη

Τα συστήματα ελέγχου αστικής κυκλοφορίας είναι μια περιοχή έρευνας με μακρόχρονη και πλούσια δραστηριότητα. Πολλές προσεγγίσεις έχουν προταθεί, αλλά μέχρι σήμερα δεν έχει βρεθεί μια στρατηγική που να ικανοποιεί όλες τις ανάγκες που κατά καιρούς έχουν εκφραστεί σχετικά με το συντονισμένο έλεγχο μεγάλων αστικών δικτύων σε πραγματικό χρόνο.

Οι σύγχρονες στρατηγικές ελέγχου αστικής κυκλοφορίας, για να εφαρμοστούν σε κάποιο οδικό δίκτυο με επιτυχία, πρέπει να ρυθμίσουν κατάλληλα τις τιμές των παραμέτρων τους. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων αυτών διαρκεί ακόμα και χρόνια και πραγματοποιείται από εξειδικευμένο προσωπικό. Μέχρι σήμερα, δεν έχει αναπτυχθεί κάποια συστηματική προσέγγιση για την αυτόματη βελτιστοποίηση των παραμέτρων ελέγχου των συστημάτων ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης.

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάστηκε και αναλύθηκε μία τέτοια συστηματική προσέγγιση η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. Εμείς την εφαρμόσαμε σε μία πρόσφατα ανεπτυγμένη, αποδοτική στρατηγική ελέγχου πραγματικού χρόνου, την TUC (Traffic-responsive Urban Control). Ο νέος αυτός αλγόριθμος βελτιστοποίησης παραμέτρων μη-γραμμικών συστημάτων ελέγχου ονομάζεται AFT και βασίζεται σε μία ιδέα παρόμοια με αυτή της μεθόδου Στοχαστικής Προσέγγισης μέσω Ταυτόχρονων Διαταραχών, SPSA.

Η αποδοτικότητα του αλγορίθμου αποδεικνύεται μέσω της μαθηματικής ανάλυσης που πραγματοποιήσαμε, αλλά και μέσω των προσομοιώσεων που εκτελέσαμε και που αφορούν στο πολύπλοκο οδικό δίκτυο της πόλης των Χανίων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδεικνύουν ότι η μέθοδος AFT καταφέρνει να βελτιώσει σημαντικά την επίδοση της TUC ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η κυκλοφοριακή ζήτηση παρουσιάζει συνεχείς διακυμάνσεις κατά την περίοδο μίας ημέρας ή περιπτώσεις όπου η πληροφορία που παρέχεται και που αφορά στα χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου είναι ελλιπής ή ακόμα και μη-διαθέσιμη. Βελτίωση της αποδοτικότητας της TUC με τη χρήση του AFT αλγορίθμου παρατηρείται ακόμα και στην περίπτωση που ο σχεδιασμός του πραγματοποιείται έχοντας υποθέσει άριστη γνώση των χαρακτηριστικών στοιχείων του δικτύου.

7.2 Παρατηρήσεις και μελλοντικές εργασίες

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να χαρακτηρισθούν αρκετά ικανοποιητικά. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη ανοικτές κατευθύνσεις έρευνας που μπορούν να συνεισφέρουν στην περαιτέρω μελέτη του προβλήματος της βελτιστοποίησης των παραμέτρων των στρατηγικών κυκλοφοριακού ελέγχου.

Ζητήματα στα οποία μπορεί να στραφεί η μελλοντική έρευνα είναι:

- Στην αναβάθμιση της μεθοδολογίας ώστε να πραγματοποιεί ταυτόχρονη βελτιστοποίηση διαφορετικών παραμέτρων της υπό μελέτη στρατηγικής ελέγχου, όπως των στοιχείων του πίνακα L , των παραμέτρων b_i , ακόμα και των παραμέτρων που αφορούν στο τμήμα του ελέγχου της διάρκειας περιόδου και στο τμήμα του ελέγχου των χρονικών διαφορών.
- Στην επίλυση του κρίσιμου προβλήματος της πιθανής αστάθειας του συστήματος κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου AFT που παραμένει ακόμα ανοιχτό. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε, ξεπεράσαμε μερικώς το πρόβλημα αυτό πραγματοποιώντας έναν επιπλέον έλεγχο σε μη-πραγματικό χρόνο (off-line test)

πριν από κάθε έλεγχο πραγματικού χρόνου (on-line test) της απόδοσης της στρατηγικής ελέγχου για το νέο διάνυσμα θ των παραμέτρων.

Βιβλιογραφία

- [1] A.R. Barron, “Universal approximation bounds for superpositions of a sigmoidal function,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.39, no. 3, pp. 930-945, 1993.
- [2] Ch. Bielefeldt, C. Diakaki, and M. Papageorgiou, “TUC and the SMART NETS project,” *Proc. IEEE 4th International Conference on Intelligent Transportation systems*, Oakland, California, pp. 55-60, 25-29 August 2001.
- [3] N.E. Cotter, “The Stone-Weierstrass theorem and its application to neural networks,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 1, no. 4, pp. 290-295, 1990.
- [4] G. Cybenko, “Approximations by superpositions of a sigmoidal function,” *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, vol. 2, pp. 303-314, 1989.
- [5] C. Diakaki, M. Papageorgiou, and K. Aboudolas, “A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control,” *Control Engineering Practice*, vol.10, pp. 183-195, 2002.
- [6] C. Diakaki, V. Dinopoulou, K. Aboudolas, M. Papageorgiou, E. Ben-Shabat, E. Seider, and A. Leibov, “Extensions and new applications of the traffic signal control strategy TUC,” *Transportation Research Record no. 1856*, pp. 202-216, 2003.
- [7] N. Elloumi, H. Haj-Salem, and M. Papageorgiou, “METACOR: A macroscopic modeling tool for urban corridors,” *TRISTAN II (Triennial Symposium on Transportation Analysis)*, Capri, Italy, Vol.1, pp. 135-150, June 23-28, 1994.
- [8] J. A. Farrell and M.M. Polycarpou. *Adaptive Approximation Based Control : Unifying Neural, Fuzzy and Traditional Adaptive Approximation Approaches*. Wiley Publishers, 2006.

- [9] P. A. Ioannou and J. Sun, *Stable and Robust Adaptive Control*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.
- [10] J. Keifer, and J. Wolfowitz, "Stochastic Estimation of a Regression Function," *Ann. Math. Stat.*, vol. 23, pp. 462-466, 1952.
- [11] E.B. Kosmatopoulos and M.A. Christodoulou, "Filtering, prediction, & learning properties of ECE neural networks," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 24, no. 7, pp. 971-981, July 1994.
- [12] E.B. Kosmatopoulos, M.M. Polycardou, M.A. Christodoulou, and P.A. Ioannou, "High-order neural network structures for identification of dynamical systems," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 6, no. 2, pp.422-431, March 1995.
- [13] E.B. Kosmatopoulos, and M.A. Christodoulou, "Structural properties of gradient recurrent high-order neural networks," *IEEE Transactions on Circuits And Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 42, no. 9, September 1995.
- [14] E.B. Kosmatopoulos, M. Papageorgiou, V. Dinopoulou, Ch. Bielefeldt, R. Morris, J. Mueck, A. Richards, F. Weichenmeier, "International comparative field evaluation of a traffic signal control strategy in three cities," *Transportation Research A*, vol. 40, no. 5, pp. 399-413, 2006.
- [15] M. Papageorgiou, *Traffic Control*, Handbook of Transportation Engineering (R.W. Hall, ed.), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999, pp. 233-267.
- [16] G. Ch. Pflug, "Optimization of Stochastic Models: the Interface Between Simulation and Optimization, Kluwer Academic, Boston, 1996.
- [17] M.M. Polycardou, and P.A. Ioannou, "Identification and control of non-linear systems using neural network models: design and stability analysis," *Tech. Rep. 91-09-01*, Univ. of Southern Cal., Los Angeles, September, 1991.

- [18] H. Robbins, and S. Monro, "A Stochastic Approximation Method," *Ann. Math. Stat.*, vol. 29, pp. 400-407, 1951.
- [19] R.M. Sanner and J.-J.E. Slotine, "Gaussian networks for direct adaptive control", Proc. American Control Conf., ACC91, pp. 2153-2159, 1991; also in *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 3, no. 6, pp. 837-863, November 1992.
- [20] J.C. Spall, "Multivariate Stochastic Approximation Using a Simultaneous Perturbation Gradient Approximation," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 37, pp. 332-341, 1992.
- [21] J.C. Spall, and D.C. Chin, "Traffic-Responsive Signal Timing for System-Wide Traffic Control," *Transportation Research C*, vol. 5, pp. 153-163, 1997.
- [22] J.C. Spall, "Adaptive Stochastic Approximation by the Simultaneous Perturbation Method," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, pp. 1839-1853, 2000.
- [23] <http://www.jhuapl.edu/SPSA>.
- [24] J.C. Spall, "Adaptive Simultaneous Perturbation Method for Accelerated Optimization," Memo PSA-98-017, JHU/APL, Laurel, MD, 1998.
- [25] J.C. Spall, "Implementation of the simultaneous Perturbation Algorithm for Stochastic Optimization," *IEEE Transactions Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 34, pp. 817-823, 1998.

Παράρτημα

Στο Παράρτημα αυτό παρατίθενται οι κωδικοποιημένοι στη MATLAB αλγόριθμοι SPSA και AFT. Για την εκτέλεση του αλγορίθμου AFT καλούνται τα αρχεία Π1-Π7. Παρατίθενται, επίσης, οι πίνακες που συγκεντρώνουν τα χαρακτηριστικά στοιχεία του δικτύου της πόλης των Χανίων. Ο Πίνακας Π.1 παρουσιάζει στοιχεία των ελεγχόμενων κόμβων που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο ελέγχου, ενώ οι Πίνακες Π.2-Π.3 παρουσιάζουν στοιχεία που αφορούν τους συνδέσμους του δικτύου, τη χωρητικότητα, τη ροή κορεσμού, το σταθερό χρόνο πρασίνου και τις φάσεις κατά τις οποίες έχουν δικαίωμα κυκλοφορίας.

Π1. Το αρχείο `Fine_honn_randomsearch_all.m`.

```
%1. Call the M-file: init.m.
%2. Run Metacor.
%3. Set new=1 & call the M-file: fine_honn_randomsearch_all.m.
%4. Run Metacor.
%5. Set new=0 & Call the M-file: fine_honn_randomsearch_all.m.
%6. Run Metacor...e.t.c.

clear all
close all

load xz1.xls %Produced by Metacor. Contains the relative space occupancies  $x_i/x_{max}$  in the
network links.
load ii.dat %Produced by init. Contains the indices corresponding to the entries of the
initial matrix  $L_q(\theta)$  that are not too small.
load Network1.lq %PRODUCED BY init. It's the matrix  $\theta_0$  we use in the first iteration of
the algorithm.

global N_STAGES N_LINKS N_ORIGINS N_SENARIOS N_NEURONS ETA_LEARN
ETA_GRAD ETA_RANDOM HISTORY N_II TT ER DELTA
```

```

global SIZE_DATA N_INTERVALS SIZE_LEARN_DATA N_ITERATIONS JJR1 JJR2
JJR3 JJR4 JJR5

N_STAGES=42; N_LINKS=71; N_SENARIOS=10; N_ORIGINS=22; N_NEURONS=1000;

ETA_LEARN=0.003;
ETA_GRAD=0.002;    %Eta_grad represents  $\beta$ .
DELTA=0.01;        %Delta represents  $\gamma$ .
ETA_RANDOM=0.01;   %Eta_random represents  $\alpha$ .

HISTORY=30;        % The number of iterations whose results are used for the
approximation of f().
STEP=2; N_LEARN_ITERATIONS=30000;    %A termination condition.
N_II=max(size(ii));    % Number of tunable parameters.

new=0;    %We set new=1 when we start a new set of simulations.

[past_data]=create_past_data(new,xz1);    %We call the function Create_past_data().

[nn_xz1,theta_all,theta,demand,past_data]=update_past_data(ii,past_data); %We call the
function update_past_data().

if N_ITERATIONS+1>5 & mod(N_ITERATIONS+1,STEP)==0 %In the first 4 iterations
we just add disturbance to  $\theta$ . Afterwards, we do that every second step.

[vartheta,jj1]=nnet(past_data);    %The neural network

iimax=find(past_data(:,SIZE_LEARN_DATA)==max(past_data(:,SIZE_LEARN_DATA)));
%|
imax=iimax(1);
%|
max_sen=past_data(imax,SIZE_LEARN_DATA);
%|-->( $\Sigma 1$ )
theta=past_data(imax,1:N_II);
%|
theta=theta';
%|

```

```

max_sen1=max_sen;
%|

% (Σ1): The matrix theta contains the elements of  $\theta$  that corresponds to max measurement of
the function  $f$  (max J). We save this max J in max_sen1.

load past_data_honn_random_all.dat
pp_data=past_data_honn_random_all(1,1:jj1-1);
[theta]=gradient(theta,pp_data,vartheta); %GRADIENT

else
    theta= theta+ETA_RANDOM*randn(size(theta)); %  $\theta^{\ell} = \theta^{\ell-1} + \alpha\Delta^{\ell-1}$ 
end
save_results(theta_all, theta, past_data, ii); % Save  $\theta_{new}$  & matrix past_data.

load Network1_fixed_correct.lq
theta_fixed=reshape(Network1_fixed_correct, N_STAGES*N_LINKS,1);
theta_f=theta_fixed(ii);
xx=theta./theta_f;

```

Π2. Το αρχείο update_past_data.m

```

function [nn_xz11,theta_all1,theta1,demand1,past_data1]=update_past_data(ii1,past_data1)

global N_STAGES N_LINKS N_ORIGINS N_II SIZE_DATA SIZE_LEARN_DATA
N_INTERVALS N_ITERATIONS

load critere.out %PRODUCED BY METACOR
load Network1.lq %PRODUCED BY init
load xz1.xls %PRODUCED BY METACOR

tts=critere(1,1); %Total Time Spent
ttd=critere(2,1); %Total Travel Distance
nn_xz11=ttd/tts; %Mean Speed for Nominal L Matrix values, the measurement J.

```

```

theta_all1=reshape(Network1, N_STAGES*N_LINKS,1);
theta1=theta_all1(ii1);

for i=1:N_INTERVALS,    %N_INTERVALS=the number of estimations of x, each day.
    dem(i,1:N_ORIGINS)= mean(xz1((i-
1)*SIZE_DATA+1:i*SIZE_DATA,2:N_ORIGINS+1));
end
demand1=reshape(dem,1,N_INTERVALS*N_ORIGINS);

past_data1(N_ITERATIONS+1,1:N_II)=theta1'; % the vector  $\theta$ 
past_data1(N_ITERATIONS+1,N_II+1:SIZE_LEARN_DATA-1)=demand1; % the
estimation of x, made by Metacor.

past_data1(N_ITERATIONS+1,SIZE_LEARN_DATA)=m_xz11; % the measurement J

```

Π3. Το αρχείο create_past_data.m

```

function [past_data1]=create_past_data(new1,xz11)

global N_ITERATIONS SIZE_DATA N_INTERVALS SIZE_LEARN_DATA N_II
N_ORIGINS

SIZE_DATA=max(size(xz11));
N_INTERVALS=floor(SIZE_DATA/100);
SIZE_DATA=floor(SIZE_DATA/N_INTERVALS);

if new1==1
    N_ITERATIONS=0;
    SIZE_LEARN_DATA=N_II+ N_ORIGINS*N_INTERVALS+1;
    past_data1=zeros(1,SIZE_LEARN_DATA);
    'You must change the variable new'

```

```

else
    load past_data.dat %Save old data in the matrix past_data and then add a zero line for the
new data
    [N_ITERATIONS SIZE_LEARN_DATA]=size(past_data);
    past_data1=cat(1,past_data,zeros(1,SIZE_LEARN_DATA));
end

```

Π4. Το αρχείο nnet.m.

```

function [vartheta1,jj]=nnet(past_data1)

global N_NEURONS N_II N_LEARN_ITERATIONS HISTORY ETA_LEARN JJR1
JJR2 JJR3 JJR4 JJR5 TT ER

[ii1 jj]=size(past_data1); % ii1=N_ITERATIONS
TT=past_data1(:,jj); % We save the last column of past_data matrix as TT. It contains
the measurements J of past iterations.

jjr=N_NEURONS;

JJR1=floor(N_II*rand(jjr,1));
JJR2=N_II+floor((jj-N_II-1)*rand(jjr,1));
JJR3=floor(N_II*rand(jjr,1));
JJR4=floor(N_II*rand(jjr,1));
JJR5=N_II+floor((jj-N_II-1)*rand(jjr,1));

% We search for zero elements in each vector. If we find any we replace
% it by 1.

if size(find(JJR1==0))>0
    ijij=find(JJR1==0);
    JJR1(ijij)=ones(size(ijij));

```

```

end

if size(find(JJR3==0))>0
    ijij=find(JJR3==0);
    JJR3(ijij)=ones(size(ijij));
end

if size(find(JJR4==0))>0
    ijij=find(JJR4==0);
    JJR4(ijij)=ones(size(ijij));
End

% We search for zero elements in each vector. If we find any we replace it by (N_II+1).

if size(find(JJR2==N_II))>0
    ijii=find(JJR2==N_II);
    JJR2(ijii)=ones(size(ijii))+ones(size(ijii))*N_II;
end

if size(find(JJR5==N_II))>0
    ijii=find(JJR5==N_II);
    JJR5(ijii)=ones(size(ijii))+ones(size(ijii))*N_II;
end

jjjj=floor(2*jjr+1); % The size of honn.
pp=zeros(ii1,jjjj); % pp denotes  $\phi$ .
pp(:,1:jjr)=past_data1(:,JJR1).*past_data1(:,JJR2);
pp(:,jjr+1:2*jjr)=past_data1(:,JJR3).*past_data1(:,JJR4).*past_data1(:,JJR5);
pp(:,2*jjr+1)=ones(size(pp(:,jjr+1)));

vartheta1=zeros(jjjj,1); % We create the initial matrix  $\vartheta$ 
vartheta1(jjjj,1)=6.5;

old_er=0;

for loop=1:N_LEARN_ITERATIONS % The number of loops we chose for the training.

```



```

for iter=max(1,ii1-HISTORY):ii1 % ii1=Number of iterations.
    error=pp(iter,:)*vartheta1-TT(iter,1); % error= $\phi^* \mathcal{G} - J$ 
    vartheta1=vartheta1-ETA_LEARN*pp(iter,:)*error;
end

nn=norm(pp(max(1,ii1-HISTORY):ii1,:)*vartheta1-TT(max(1,ii1-HISTORY),1));
ER(loop,1)=nn;

if loop> 1000 & nn>old_er
    break
end
old_er=nn;

if mod(loop,1000)==0 % Every 1000 loops, the number of loops & the  $\sqrt{|error|^2}$  are
shown on the workspace.
    loop
    norm(pp*vartheta1-TT)
end

if norm(pp*vartheta1-TT)<0.0001 % If error is too small, break.
    break
end

end

figure
plot(ER);
grid;
figure
plot(TT);
hold;
plot(pp*vartheta1, 'r');
hold;
grid

```

Π5. Το αρχείο gradient.m

```
function [theta1]=gradient(theta1,pp_data1,vartheta1)

global N_NEURONS N_II DELTA ETA_GRAD JJR1 JJR2 JJR3 JJR4 JJR5

y1=zeros(N_II,1);
y2=zeros(N_II,1);
y3=zeros(N_II,1);
j jr=N_NEURONS;
theta_old=theta1;

for i=1:N_II %N_II: the number of tunable parameters

theta1=theta_old; %It's the vector  $\theta$  that corresponds to max J.
theta1(i,1)=theta1(i,1)+DELTA; %We add a disturbance DELTA in every element of  $\theta$ 
pp_data1(1,1:N_II)=theta1';
pp_new(1,1:N_NEURONS)=pp_data1(1,JJR1).*pp_data1(1,JJR2); % pp_new denotes  $\phi$ .

pp_new(1,N_NEURONS+1:2*N_NEURONS)=pp_data1(1,JJR3).*pp_data1(1,JJR4).*pp_data1(1,JJR5);
pp_new(1,2*N_NEURONS+1)=1;
ms_plus=pp_new(1,:)*vartheta1;
y1(i,1)=ms_plus;

theta1=theta_old;
theta1(i,1)=theta1(i,1)-DELTA;
pp_data1(1,1:N_II)=theta1';

pp_new(1,1:N_NEURONS)=pp_data1(1,JJR1).*pp_data1(1,JJR2);
pp_new(1,N_NEURONS+1)=1;
ms_minus=pp_new(1,:)*vartheta1;
y2(i,1)=ms_minus;

iik=find(JJR1==i);
```

```

if min(size(iik))>0
    for j=1:max(size(iik)),
        y3(i,1)=y3(i,1)+vartheta1(JJR1(j))*pp_data1(1,JJR2(j));
    end
end
ikk=find(JJR3==i);

if min(size(ikk))>0
    for j=1:max(size(ikk)),
        y3(i,1)=y3(i,1)+vartheta1(N_II+JJR3(j))*pp_data1(1,JJR4(j))*pp_data1(1,JJR5(j));
    end
end
kkk=find(JJR4==i);

if min(size(kkk))>0
    for j=1:max(size(kkk)),
        y3(i,1)=y3(i,1)+vartheta1(N_II+JJR4(j))*pp_data1(1,JJR3(j))*pp_data1(1,JJR5(j));
    end
end
end

pp_data1(1,1:N_II)=theta1';

pp_new(1,1:jjr)=pp_data1(1,JJR1).*pp_data1(1,JJR2);
pp_new(1, jjr+1:2*jjr)=pp_data1(1,JJR3).*pp_data1(1,JJR4).*pp_data1(1,JJR5);
pp_new(1,2*jjr+1)=1;

ms_predicted=pp_new(1,:)*vartheta1;    %  $\hat{J} = \mathcal{G}^T \phi(\theta, \bar{x}^\ell)$ 
ms_predicted

ETA_GRAD
ETA_GRAD=input('input new value for ETA_GRAD') % The user can change the value of
β
theta1=theta_old+ETA_GRAD*(y1-y2);

```

Π6. Το αρχείο save_results.m

```
function save_results(theta_all1, theta1, past_data1, ii1)

global N_STAGES N_LINKS SIZE_LEARN_DATA

theta_all1(ii1)=theta1;
Network1=reshape(theta_all1, N_STAGES, N_LINKS);
save Network1.lq Network1 -ascii
save past_data.dat past_data1 -ascii
save past_data_honn_random_all.dat past_data1 -ascii

figure
plot(past_data1(:,SIZE_LEARN_DATA)) %Plot of Mean speed
grid
```

Π7. Το αρχείο init.m

```
%Initialization of the matrix Network1.lq
%We call init.m when we start a new Set of Simulations
%When new=1

clear all
close all
load Network1_fixed_correct.lq
N_STAGES=42; N_LINKS=71;

theta_all=reshape(Network1_fixed_correct, N_STAGES*N_LINKS,1);
load xmax.dat
nnet=Network1_fixed_correct.*(ones(42,1)*xmax');
ttt=reshape(nnet, N_STAGES*N_LINKS,1);
```

```

ii=find(abs(ttt)>1.5);
theta_all(ii)=(theta_all(ii)-(0.586*rand(size(ii))));
Network1=reshape(theta_all, N_STAGES, N_LINKS);
save ii.dat ii -ascii
save Network1.lq Network1 -ascii
'please now run metacor for 1st time'

```

Π8. Ο αλγόριθμος SPSA

```

clear all
p=#;
sigma=0.01;
a=0.06;
A=50;
c=0.04;
alpha=0.602;
gamma=0.101;
n=1000;
gH_avg=1;
thetamiden=(#,#);
theta=thetamiden;
tolerance=2*sigma;
loss=('function');
losspalia=feval(loss,theta);
for k=1:n
a_k=a/(k+A)^alpha;
c_k=c/(k^gamma);
gkapeisodou=zeros(1,p);
for m=1:gH_avg
delta=2*round(rand(p,1))-1;
thetaplus=theta+c_k*delta;

```

```

thetaminus=theta-c_k*delta;
yplus=feval(loss,thetaplus);
yminus=feval(loss,thetaminus);
gkap=((yplus-yminus)/(2*c_k))*delta;
gkapeisodou=((m-1)/m)*gkapeisodou+gkap^2/m;
end
thetatest=theta;
theta=theta-a_k*gkapeisodou';
lossnea=feval(loss,theta);
losspalia=feval(loss,thetatest);
if lossnea > losspalia-tolerance
theta=thetatest;
else
losspalia1=losspalia;
losspalia=lossnea;
end
if norm(theta)>norm(thetatest)
theta=thetatest;
losspalia=losspalia1;
end
LL(k)=feval(loss,theta);
end

```

j	φάσεων		χρόνος		$g_{j,i}(\text{sec})$				$g_{j,i}(\text{sec})$			
	F_j	$C_j(\text{sec})$	$L_j(\text{sec})$		$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
1	{1, 2, 3}	90	23		7	7	7	—	53	53	53	—
2	{1, 2}	90	32		7	7	—	—	51	51	—	—
3	{1, 2}	90	24		7	7	—	—	59	59	—	—
4	{1, 2, 3}	90	19		7	7	7	—	57	57	57	—
5	{1, 2, 3}	90	25		7	7	7	—	51	51	51	—
6	{1, 2, 3}	90	33		7	7	7	—	43	43	43	—
7	{1, 2, 3}	90	37		7	7	7	—	39	39	39	—
8	{1, 2, 3, 4}	90	32		7	7	7	7	37	37	37	37
9	{1, 2}	90	35		7	7	—	—	48	48	—	—
10	{1, 2, 3}	90	19		7	7	7	—	57	57	57	—
11	{1, 2, 3}	90	24		7	7	7	—	52	52	52	—
12	{1, 2, 3}	90	33		7	7	9	—	41	41	43	—
13	{1, 2}	90	34		7	10	—	—	46	49	—	—
14	{1, 2}	90	30		7	7	—	—	53	53	—	—
16	{1, 2}	90	32		7	7	—	—	51	51	—	—
17	{1, 2}	90	16		7	7	—	—	67	67	—	—

Πίνακας III: Περιγραφή της σηματοδότησης των κόμβων του δικτύου των Χανίων.

Σύνδεσμος	Ελεγχόμενος κόμβος	Μήκος	Αριθμός λωρίδων	Χωρητικότητα	Ροή κορεσμού	Σύνολο φάσεων με προτεραιότητα	Σταθερό πράσινο	Απόσταση φωρατή από το Stopline
z	j	L_z	λ_z	$x_{z,max} (veh)$	$s_z (veh/h)$	u_z	$e_z (sec)$	(m)
O1	1	66	1	13	1800	{3}	8	21
O2	2	50	1	10	1800	{2}	5	50
O3	4	50	1	10	1800	{3}	2	50
O4	7	80	2	30	3600	{2}	0	40
O6	8	90	1	22	3600	{2}	1	40
O7	16	100	1	20	1800	{2}	7	30
O8	16	60	1	12	1800	{2}	0	3
O9	12	80	1	16	1600	{3}	0	40
O10	13	200	1	40	1900	{1}	21	100
O11	13	400	1	80	2000	{2}	6	190
O13	12	100	1	20	1850	{1, 3}	7	65
O14	14	160	1	32	1800	{1}	17	80
O15	11	120	1	24	1800	{3}	5	65
O16	11	170	2	68	3000	{1}	8	85
O18	3	120	1	24	1800	{2}	8	56
O20	1	150	2	60	3400	{1}	4	60
O21	4	100	1	20	1575	{2, 3}	3	82
O22	9	200	2	80	3600	{1}	11	90
O23	12	100	1	20	1650	{3}	3	65
O24	14	118	1	24	1800	{2}	6	50
O25	17	305	1	61	1800	{2}	4	96
O26	1	100	1	20	1800	{2}	3	40

Πίνακας Π2: Περιγραφή των συνδέσμων εισόδου του δικτύου των Χανίων (origins).

Σύνδεσμος	Ελεγχόμενος κόμβος	Μήκος	Αριθμός λωρίδων	Χωρητικότητα	Ροή κορεσμού	Σύνολο φάσεων με προτεραιότητα	Σταθερό πράσινο	Απόσταση φωρατή από το Stopline
z	j	L_z	λ_z	$x_{z,max}(veh)$	$s_z(veh/h)$	u_z	$e_z(sec)$	(m)
L1	1	300	2	60	4000	{1, 2}	7	95
L4	2	110	2	44	3600	{1}	19	90
L8	4	40	3	14	3600	{1}	7	30
L9	4	40	1	8	1800	{1}	1	30
L10	5	60	3	36	3600	{1}	0	44
L12	7	60	3	24	4000	{1}	11	50
L13	7	64	2	26	3600	{1}	11	40
L15	8	64	1	25	1575	{3}	0	33
L16	8	64	1	13	1800	{1, 2, 3}	12	33
L17	8	248	1	50	2500	{1, 4}	13	110
L18	16	248	1	50	2000	{1}	17	40
L21	16	384	1	77	1800	{1}	24	50
L22	12	384	1	77	2150	{2}	18	90
L23	12	190	1	38	2200	{1}	1	90
L24	13	190	1	20	1950	{1}	18	60
L25	13	190	1	20	2400	{1, 2}	29	60
L34	7	360	1	38	1575	{3}	12	40
L35	7	360	1	38	2400	{3}	0	40
L36	14	360	1	72	1575	{1}	1	40
L37	5	540	1	20	1800	{3}	9	90

Πίνακας Π3: Περιγραφή των εσωτερικών συνδέσμων του δικτύου των Χανίων (links, 1/2).

Σύνδεσμος	Ελεγχόμενος κόμβος	Μήκος	Αριθμός λωρίδων	Χωρητικότητα	Ροή κορεσμού	Σύνολο φάσεων με προτεραιότητα	Σταθερό πράσινο	Απόσταση φωρατή από το Stopline
z	j	L_z	λ_z	$x_{z,max}(veh)$	$s_z(veh/h)$	u_z	$e_z(sec)$	(m)
L38	5	540	1	60	1800	{3}	9	90
L39	5	118	1	24	1800	{1, 2}	7	40
L40	5	118	1	24	1800	{2}	4	40
L41	6	106	2	42	3600	{2}	4	50
L42	2	126	1	25	1800	{2}	8	70
L43	3	138	2	55	2500	{2}	11	92
L46	3	312	2	124	3600	{1}	7	220
L48	6	188	2	75	3600	{1}	6	90
L49	17	220	2	88	3600	{1}	4	54
L50	6	210	1	42	1800	{3}	9	54
L51	10	224	2	90	3600	{1}	1	90
L53	10	244	1	49	1600	{2}	0	150
L54	11	244	1	25	1800	{2}	0	98
L55	11	244	1	25	1800	{2, 3}	9	98
L56	9	140	1	28	1800	{2}	5	70
L57	10	140	1	28	1800	{3}	7	70
L58	17	222	1	35	1575	{2}	5	115
L60	9	222	1	35	1575	{2}	17	105
L63	8	64	1	25	1800	{2, 3}	7	33

Πίνακας Π3: Περιγραφή των εσωτερικών συνδέσμων του δικτύου των Χανίων (links, 2/2).