
ΡΥΘΜΙΣΗ ΦΩΤΕΙΝΗΣ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΟΔΙΚΩΝ
ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΙΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

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

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης
του Τμήματος
Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Υπό
Αναστάσιο Κουβελά

Πολυτεχνείο Κρήτης

Χανιά, Σεπτέμβριος 2006

© Copyright by Αναστάσιος Κουβελάς, 2006

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Αναστάσιου Κουβελά εγκρίνεται από:

1. Επίκ. Καθ. Ηλίας Κοσματόπουλος (επιβλέπων): _____

2. Καθ. Μάρκος Παπαγεωργίου: _____

3. Λέκτ. Ιωάννης Παπαμιχαήλ: _____

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	VII
ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ	VIII
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	IX
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	4
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.1.1 Κυκλοφοριακή συμφόρηση	4
1.1.2 Η ανάγκη ελέγχου της κυκλοφορίας	5
1.1.3 Ο βρόχος ελέγχου	5
1.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ	7
1.2.1 Βασικές έννοιες.....	7
1.2.2 Τρόποι ελέγχου κυκλοφορίας μέσω σηματοδοτών	9
1.2.3 Ταξινόμηση των στρατηγικών ελέγχου	10
1.3 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ	11
1.4 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	15
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	16
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	17
2.2.1 Το μαθηματικό πρότυπο αποθήκευσης-και-προώθησης	17
2.2.2 Ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου	19

2.3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	22
2.3.1	Κυκλοφοριακές μεταβλητές	23
2.3.2	Βασικές εξισώσεις.....	25
2.3.3	Υπολογιζόμενα κριτήρια	28
	Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	30
3.1	Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ TUC	30
3.2	Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ TUC	31
3.2.1	Εισαγωγή	31
3.2.2	Έλεγχος διάρκειας των φάσεων	33
3.3	Η ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ TUC.....	38
3.3.1	Εισαγωγή	38
3.3.2	Ο κανόνας εξισορρόπησης της ζήτησης (Balance of Demand)	39
3.3.3	Ο αλγόριθμος συνεργασίας των κανόνων BD και LQ	43
3.3.4	Επέκταση του κανόνα BD.....	49
	ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	58
4.1	ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	58
4.2	ΤΟ ΑΣΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ.....	59
4.2.1	Περιγραφή του δικτύου	59
4.2.2	Μοντελοποίηση του δικτύου για την εφαρμογή της στρατηγικής	61
4.3	ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ SOUTHAMPTON	63
4.3.1	Περιγραφή του δικτύου	63
4.3.2	Μοντελοποίηση του δικτύου για την εφαρμογή της στρατηγικής	64
	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΕΩΝ	71
5.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	71
5.1.1	Εφαρμογή στο δίκτυο των Χανίων	72

5.1.2	Εφαρμογή στο δίκτυο του Southampton.....	76
5.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	81
5.2.1	Κριτήριο για τη σύγκριση των συστημάτων TUC και TASS	82
5.2.2	Δυσκολίες που παρουσιάστηκαν κατά την υλοποίηση	84
5.2.3	Αποτελέσματα από την εφαρμογή στο δίκτυο των Χανίων σε πραγματικό χρόνο	88
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	100
6.1	ΣΥΝΟΨΗ.....	100
6.2	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	102
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	109

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής οφείλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου κύριους Κοσματοπούλο Ηλία και Παπαγεωργίου Μάρκο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους καθ' όλη τη διάρκειά της. Επίσης, τον προϊστάμενο του Τμήματος Φωτεινής Σηματοδότησης του Δήμου Χανίων κύριο Μαρινάκη Γαβριήλ και τον ερευνητή κύριο Αμπουντώλα Κωνσταντίνο για την εξίσου πολύτιμη βοήθεια και τις γνώσεις που μου παρείχαν. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση και όλους τους φίλους μου για τις στιγμές που μοιράστηκα μαζί τους.

Σύντομο Βιογραφικό

Ο Αναστάσιος Κουβελάς γεννήθηκε στην Αθήνα τον Ιούλιο του 1981. Το 2004 αποφοίτησε από το τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η διπλωματική του εργασία αφορούσε τη ρύθμιση φωτεινής σηματοδότησης αστικών οδικών δικτύων με τη χρήση Γραμμικού-Τετραγωνικού-Ολοκληρωτικού ελέγχου. Συνέχισε τις σπουδές του στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του τμήματος, στον τομέα Επιχειρησιακής Έρευνας. Καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών του εργάστηκε και εξακολουθεί να εργάζεται στο Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων σαν επιστημονικός συνεργάτης. Στα πλαίσια αυτής της συνεργασίας έχει εργαστεί σε ερευνητικά προγράμματα καθώς επίσης και έχει διδάξει, σαν βοηθός, στο προπτυχιακό μάθημα του τμήματος Δυναμικός Προγραμματισμός.

Περίληψη

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 αλγορίθμους 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.

Η παρούσα διατριβή διαπραγματεύεται την επέκταση της γνωστής στρατηγικής ελέγχου TUC (Traffic-responsive Urban Control), η οποία έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης, με στόχο να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της φωτεινής σηματοδότησης σε δίκτυα ευρείας κλίμακας, κυρίως κάτω από κορεσμένες συνθήκες, με τη χρήση αποτελεσματικών μεθόδων βελτιστοποίησης και ελέγχου. Ο κανόνας Γραμμικού-Τετραγωνικού ελέγχου (Linear-Quadratic, LQ) της TUC μεταβάλλει τους χρόνους πρασίνου στους φωτεινούς σηματοδότες γύρω από σταθερές ονομαστικές τιμές. Ως εκ τούτου, για την υλοποίηση της TUC σε ένα συγκεκριμένο αστικό δίκτυο, είναι απαραίτητος ο καθορισμός των ονομαστικών τιμών πρασίνου στους φωτεινούς σηματοδότες του δικτύου. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της λειτουργίας του κανόνα ελέγχου LQ σε συνεργασία με έναν

εναλλακτικό κανόνα ελέγχου (Κανόνας Εξισορρόπησης της Ζήτησης), έτσι ώστε η υλοποίηση της TUC να μην απαιτεί τον καθορισμό των ονομαστικών τιμών.

Σε κάθε περίοδο ελέγχου της σηματοδότησης η επεκταμένη στρατηγική ελέγχου που αναπτύχθηκε ενεργοποιεί έναν από τους δύο κανόνες σε κάθε ελεγχόμενο κόμβο του δικτύου, ανάλογα με τις τρέχουσες παρατηρούμενες τιμές του επιπέδου κορεσμού στο συγκεκριμένο κόμβο. Ο αντικειμενικός στόχος και των δύο κανόνων ελέγχου είναι η βελτιστοποίηση της διαχείρισης της διάρκειας του συνολικού χρόνου ενεργού πρασίνου σε όλες τις σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις. Ενώ όμως ο κανόνας LQ είναι αποτελεσματικότερος σε συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού, ο νέος κανόνας ελέγχου είναι καταλληλότερος για συνθήκες μη κορεσμού. Όταν ο κανόνας που εφαρμόζεται σε κάποιον από τους κόμβους του δικτύου είναι ο Γραμμικός-Τετραγωνικός έλεγχος, τότε σαν ονομαστικές τιμές πρασίνων λαμβάνονται οι τιμές που υπολόγισε ο Κανόνας Εξισορρόπησης της Ζήτησης κατά την τελευταία περίοδο εφαρμογής του στον συγκεκριμένο κόμβο.

Δημιουργείται έτσι ένας υβριδικός αλγόριθμος ελέγχου ο οποίος δρα σε κάθε σηματοδοτούμενο κόμβο ανάλογα με τις εκάστοτε κυκλοφοριακές συνθήκες (σε πραγματικό χρόνο) και εφαρμόζει τον αντίστοιχο καταλληλότερο κανόνα ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η βέλτιστη διαχείριση της διάρκειας του πρασίνου σε κόμβους των οποίων η κυκλοφοριακή κατάσταση βρίσκεται κάτω από τα όρια του κορεσμού, καθώς επίσης και ο απαραίτητος συντονισμός των σηματοδοτούμενων κόμβων στους οποίους παρουσιάζονται προβλήματα κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Η αποτελεσματικότητα του αναπτυχθέντος υβριδικού ελέγχου εξετάζεται τόσο μέσω προσομοίωσης, όσο και μέσω της εφαρμογής του σε πραγματικές συνθήκες, στο αστικό οδικό δίκτυο των Χανίων. Τα αποτελέσματα των διερευνήσεων και της υλοποίησης του αλγορίθμου στο πεδίο κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά και παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5. Η ανάλυση των συνολικών χρόνων ταξιδιού των προσομοιώσεων καθώς και των μέσων ταχυτήτων στους συνδέσμους των δικτύων που διερευνήθηκαν, καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του υβριδικού αλγορίθμου στην επίλυση του προβλήματος της σηματοδότησης αστικών δικτύων.

Εισαγωγή

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. Ιδιαίτερα προβλήματα συμφόρησης παρουσιάζονται κατά την διάρκεια των ωρών αιχμής (το πρωί και το απόγευμα, δηλαδή κατά την ώρα έναρξης και τερματισμού της εργασίας), όπως και σε περιπτώσεις ατυχημάτων και άλλων επεισοδίων. Αποτέλεσμα των φαινομένων αυτών είναι η υποβάθμιση της ποιότητας ζωής στα αστικά κέντρα καθώς και η ρύπανση του περιβάλλοντος. Εξίσου σημαντικά είναι και τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν στην κινητικότητα ανθρώπων και αγαθών. Στην Αμερική το 20% του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος καταναλώνεται για τις μεταφορές, ενώ στην Ευρώπη το αντίστοιχο ποσοστό είναι 6%, με τις οικογένειες να διαθέτουν το 10% των ετήσιων εσόδων τους για την μεταφορά τους. Λόγω των παραπάνω οικονομικών λόγων και της καθημερινής αντιμετώπισης των προβλημάτων αυτών από εκατομμύρια ανθρώπων σε παγκόσμιο επίπεδο, πολιτικοί, οργανισμοί και φορείς άρχισαν με αργούς ρυθμούς την αναζήτηση τρόπων επίλυσης και τη χρηματοδότηση ερευνητικών έργων.

Για τους παραπάνω λόγους, 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 προσεγγίσεις αυτές χρησιμοποιούν μεθόδους βελτιστοποίησης, έμπειρα συστήματα, συστήματα βασισμένα σε ασαφή λογική, γενετικούς αλγορίθμους, νευρωνικά δίκτυα καθώς και κλασικό αναδραστικό έλεγχο.

Μία εναλλακτική προσέγγιση του προβλήματος είναι η χρήση μεθόδων βέλτιστου ελέγχου και αντίστοιχων αριθμητικών αλγορίθμων επίλυσης. Η στρατηγική

σηματοδότησης TUC βασίζεται σε μία τέτοια μεθοδολογία. Οι βέλτιστες αποφάσεις που προκύπτουν από την επίλυση του διατυπωμένου προβλήματος βέλτιστου ελέγχου μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να εκπλήσσουν το σχεδιαστή καθώς και να τον αναγκάζουν σε μια εκ των υστέρων επεξήγηση των αποτελεσμάτων. Η προσεκτική επεξήγηση των αποτελεσμάτων συχνά δίνει την δυνατότητα επέκτασης, κατανόησης ή και διόρθωσης των χρησιμοποιούμενων μεθόδων, οι οποίες είναι αποτέλεσμα της εμπειρίας. Στην πραγματικότητα, οι λύσεις που προκύπτουν από την προσέγγιση αυτή είναι πιο αποτελεσματικές επειδή οι αποφάσεις ελέγχου βασίζονται σε μια ακριβή ελαχιστοποίηση ενός κατάλληλου κριτηρίου και μια ακριβή θεώρηση όλων των παραμέτρων της διαδικασίας.

Στην παρούσα διατριβή επιχειρείται η επέκταση της γνωστής στρατηγικής σηματοδότησης TUC. Χρησιμοποιείται ένας καινούριος κανόνας ελέγχου (Κανόνας Εξισορρόπησης της Ζήτησης) και εφαρμόζεται ένας υβριδικός αλγόριθμος ελέγχου (σε συνεργασία με τον Γραμμικό-Τετραγωνικό κανόνα ελέγχου). Στη μέχρι τώρα βιβλιογραφία δεν υπάρχει καμία αναφορά για την εφαρμογή του Κανόνα Εξισορρόπησης της Ζήτησης σε πραγματικό χρόνο. Η συνεισφορά της παρούσας διατριβής στο πεδίο των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου αστικής κυκλοφορίας συνοψίζεται στα εξής σημεία:

- Ο προτεινόμενος έλεγχος δε χρησιμοποιεί δυαδικές μεταβλητές, προτείνοντας ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο αποθήκευσης-και-προώθησης για την περιγραφή της διεργασίας της κυκλοφοριακής ροής.
- Η στρατηγική TUC παράγει καλύτερες τιμές πρασίνων, καθώς οι τιμές των ονομαστικών τιμών πρασίνων δεν είναι πλέον στατικές, αλλά μεταβάλλονται σύμφωνα με τις κυκλοφοριακές συνθήκες.
- Επίλυση του προβλήματος μεγιστοποίησης της χωρητικότητας ενός κόμβου, για τους κόμβους που δεν έχουν μεγάλη συμφόρηση, σε πραγματικό χρόνο.
- Δυνατότητα εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας με τυχαία τοπολογία και χαρακτηριστικά, χωρίς να απαιτείται ο καθορισμός των ονομαστικών τιμών πρασίνων.

Η οργάνωση της διατριβής έχει ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 1 ορίζονται οι βασικές έννοιες που αφορούν τον έλεγχο κυκλοφοριακών δικτύων μέσω σηματοδοτών, ενώ γίνεται και η ανασκόπηση των κυριότερων προηγμένων συστημάτων ελέγχου αστικής κυκλοφορίας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα συντονισμένα συστήματα πραγματικού χρόνου ενώ τέλος γίνεται μια εισαγωγή στην προτεινόμενη μεθοδολογία για τον υβριδικό έλεγχο κυκλοφορίας αστικών δικτύων.
- Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το μοντέλο ελέγχου που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της δυναμικής της κυκλοφοριακής ροής, το οποίο στηρίζεται στο μαθηματικό πρότυπο αποθήκευσης-και-προώθησης. Επιπλέον, γίνεται λεπτομερής αναφορά στη λειτουργία του μακροσκοπικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της κυκλοφοριακής ροής και στις παραμέτρους που χρησιμοποιεί.
- Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται λεπτομερώς το τμήμα ελέγχου της διάρκειας των φάσεων της στρατηγικής TUC και περιγράφονται όλες οι επεκτάσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία. Επίσης, παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο του νέου κανόνα Εξισορρόπησης της Ζήτησης (όλες οι εξισώσεις και η μοντελοποίηση), ο υβριδικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, ενώ τέλος παρατίθενται κάποιες παρατηρήσεις από την αρχική υλοποίηση του συστήματος στο πεδίο εφαρμογής.
- Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αστικά οδικά δίκτυα των Χανίων και του Southampton στα οποία θα εξεταστεί η αποτελεσματικότητα του υβριδικού αλγορίθμου ελέγχου της σηματοδότησης.
- Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διερευνήσεων με τα οποία εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του υβριδικού αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα αφορούν τις προσομοιώσεις που έγιναν για διαφορετικά σενάρια ζήτησης, αλλά και τις συγκρίσεις που έγιναν κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου στο πεδίο εφαρμογής. Οι διερευνήσεις αφορούν τα δύο αστικά δίκτυα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.
- Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται σύνοψη της παρούσας εργασίας και έκθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τις διερευνήσεις. Ακόμη, προτείνονται κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας που μπορούν συνεισφέρουν στην επέκταση της παρούσας διατριβής.

Έλεγχος κυκλοφορίας αστικών οδικών δικτύων

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι ο ορισμός των βασικών εννοιών που αφορούν στον έλεγχο κυκλοφοριακών δικτύων μέσω σηματοδοτών καθώς και η ανασκόπηση των κυριότερων προηγμένων συστημάτων ελέγχου αστικής κυκλοφορίας. Το κεφάλαιο αυτό εστιάζεται κυρίως γύρω από τα συντονισμένα συστήματα ελέγχου ενώ παρουσιάζονται τα κύρια μειονεκτήματα των πιο διαδεδομένων συστημάτων τα οποία είναι σήμερα σε εφαρμογή παγκοσμίως. Επιπλέον, γίνεται η εισαγωγή στην προτεινόμενη μεθοδολογία προσδιορίζοντας τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αυτή προσφέρει σε σχέση με τα υπάρχοντα συστήματα.

1.1 Εισαγωγή

1.1.1 Κυκλοφοριακή συμφόρηση

Επί αιώνες, οι μεταφορές ήταν μια από τις σημαντικότερες δραστηριότητες του ανθρώπινου πολιτισμού. Ωστόσο, μόνο μετά το δεύτερο μισό του προηγούμενου αιώνα άρχισαν να εμφανίζονται φαινόμενα συμφόρησης λόγω της ταχύτατης αύξησης του αριθμού των οχημάτων και της συνεχούς αύξησης των μετακινήσεων για τη μεταφορά αγαθών, ανθρώπων κ.λπ. Κυκλοφοριακή συμφόρηση παρουσιάζεται όταν μεγάλος αριθμός οχημάτων (“πελάτης”) προσπαθεί να χρησιμοποιήσει μια κοινή υποδομή μετακίνησης (“εξυπηρετητής”) με περιορισμένη χωρητικότητα. Στην καλύτερη περίπτωση, η συμφόρηση οδηγεί σε φαινόμενα σχηματισμού ουρών (και αντίστοιχων καθυστερήσεων) ενώ η χωρητικότητα της υποδομής χρησιμοποιείται πλήρως. Στην χειρότερη (και πολύ

πιο συχνή) περίπτωση, η συμφόρηση οδηγεί στη μειωμένη χρήση της διαθέσιμης υποδομής (μείωση εξυπηρέτησης η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μπλοκάρισμα μέρους του δικτύου) με επακόλουθα καθυστερήσεις, μειωμένη οδική ασφάλεια, αυξημένη κατανάλωση καυσίμων και σοβαρή ατμοσφαιρική ρύπανση.

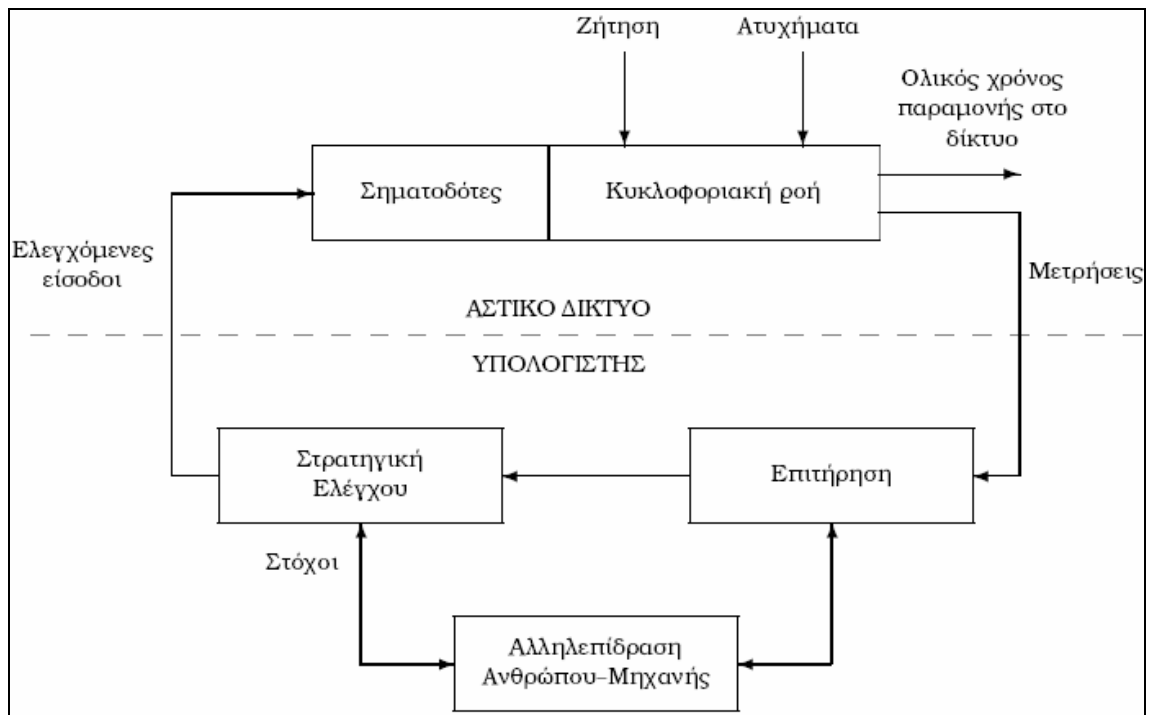
1.1.2 Η ανάγκη ελέγχου της κυκλοφορίας

Η εμφάνιση κυκλοφορίας (δηλαδή, πολλά οχήματα τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας μια κοινή υποδομή) και συνακόλουθα η κυκλοφοριακή συμφόρηση (όπου η ζήτηση ξεπερνά τη χωρητικότητα της υποδομής) έδωσε ισχυρή ώθηση στην ανάπτυξη καινοτόμων ιδεών στον τομέα των οδικών μεταφορών. Η ενεργειακή κρίση την δεκαετία του 1970, το έντονο ενδιαφέρον για το περιβάλλον και τα όρια των φυσικών και οικονομικών πόρων είναι μεταξύ των πιο σημαντικών λόγων που οδήγησαν στην αλλαγή του τρόπου αντιμετώπισης των προβλημάτων συμφόρησης με άμεσους τρόπους (δηλαδή, τη συνεχή επέκταση της υπάρχουσας υποδομής). Ο μυωπικός αυτός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος της αύξησης των αναγκών μεταφοράς και κινητικότητας των σύγχρονων κοινωνιών δεν μπορούσε πλέον να είναι η μόνη λύση. Μια εναλλακτική και εφικτή προσέγγιση προς την επίλυση των κυκλοφοριακών προβλημάτων, η οποία δέχθηκε ισχυρή ώθηση από τις αλματώδεις εξελίξεις στην τεχνολογία των επικοινωνιών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών (τηλεματική), είναι η ορθολογική και πλήρης αξιοποίηση και χρήση της υπάρχουσας υποδομής μέσω της ανάπτυξης και υλοποίησης σύγχρονων μορφών ελέγχου και διαχείρισης.

1.1.3 Ο βρόχος ελέγχου

Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει τα βασικά στοιχεία του βρόχου ελέγχου. Η συμπεριφορά της κυκλοφοριακής ροής στο δίκτυο (αστικό, αυτοκινητόδρομος ή μεικτό) εξαρτάται από κάποιες εξωτερικές ποσότητες οι οποίες ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- **Ελεγχόμενες εισοδοι** οι οποίες άμεσα αφορούν κάποια αντίστοιχη διάταξη ελέγχου όπως φωτεινοί σηματοδότες, πίνακες μεταβλητών μηνυμάτων, κ.λπ.



Σχήμα 1.1: Ο βρόχος ελέγχου.

Οι ελεγχόμενες εισοδοί μπορεί να επιλέγονται από μια επιτρεπτή περιοχή ελέγχου που καθορίζεται από τεχνικούς, φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς.

- **Διαταραχές** των οποίων οι τιμές δεν μπορούν να είναι άμεσες προς διαχείριση. Εν τούτοις μπορεί να είναι μετρήσιμες (π.χ. ζήτηση) ή ανιχνεύσιμες (π.χ. ατύχημα) ή προβλέψιμες για ένα μελλοντικό χρονικό ορίζοντα.

Η αποτελεσματικότητα ή η απόδοση ενός δικτύου είναι μετρήσιμη μέσω κατάλληλων δεικτών, όπως ο ολικός χρόνος παραμονής όλων των οχημάτων μέσα στο δίκτυο για δεδομένο χρονικό ορίζοντα. Ο στόχος της **Επιτήρησης** είναι η διαχείριση της πληροφορίας που προέρχεται από τις συσκευές μετρήσεων (π.χ. φωρατές) πριν αυτή διοχετευθεί στην στρατηγική ελέγχου και τον άνθρωπο ο οποίος αλληλεπιδρά με το σύστημα. Ο πυρήνας του βρόχου ελέγχου είναι η **Στρατηγική Ελέγχου** η οποία έχει ως στόχο:

“Τον προσδιορισμό των **ελεγχόμενων εισόδων** βάσει διαθέσιμων **μετρήσεων, εκτιμήσεων και προβλέψεων** έτσι ώστε να επιτευχθεί ο

προκαθορισμένος στόχος (π.χ. ελαχιστοποίηση του ολικού χρόνου παραμονής στο δίκτυο) υπό οποιεσδήποτε συνθήκες **διαταραχών**".

Αν τη διαδικασία αυτή την αναλάμβανε ένας άνθρωπος τότε θα είχαμε ένα χειροκίνητο σύστημα ελέγχου. Στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου τη δουλειά αυτή αναλαμβάνει ένας αλγόριθμος (στρατηγική ελέγχου). Η αποτελεσματικότητα της στρατηγικής ελέγχου κατά μεγάλο ποσοστό καθορίζει την αποτελεσματικότητα όλου του συστήματος ελέγχου. Ως εκ τούτου, όταν είναι δυνατό, οι στρατηγικές ελέγχου πρέπει να σχεδιάζονται με προσοχή, μέσω της εφαρμογής ισχυρών και συστηματικών μεθόδων βελτιστοποίησης και αυτομάτου ελέγχου παρά μέσω ευρετικών μεθόδων με αμφισβητήσιμη αποτελεσματικότητα [42, 43].

1.2 Έλεγχος κυκλοφορίας

1.2.1 Βασικές έννοιες

Τα κύρια εργαλεία ελέγχου σε αστικά δίκτυα είναι οι φωτεινοί σηματοδότες. Οι σηματοδότες είχαν χρησιμοποιηθεί αρχικά για να εξασφαλίζουν την ασφαλή διασταύρωση ανταγωνιστικών ρευμάτων οχημάτων και πεζών. Όμως, με τη σταθερά αυξανόμενη κυκλοφοριακή ζήτηση κατέστη σαφές ότι η ρύθμιση της κυκλοφορίας επιδρά όχι μόνο στην ασφάλεια αλλά και στην αποτελεσματικότητα της ροής, με την έννοια του μέσου χρόνου διαδρομής των οχημάτων στο δίκτυο. Με άλλα λόγια έγινε φανερό ότι διαφορετικά, εξίσου ασφαλή σχέδια ρύθμισης της κυκλοφορίας μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλότερους ή χαμηλότερους μέσους χρόνους. Επομένως, θα πρέπει να υπάρχει ένα βέλτιστο σχέδιο ρύθμισης που να οδηγεί στην ελαχιστοποίηση του μέσου χρόνου διαδρομής των οχημάτων μέσα στο δίκτυο.

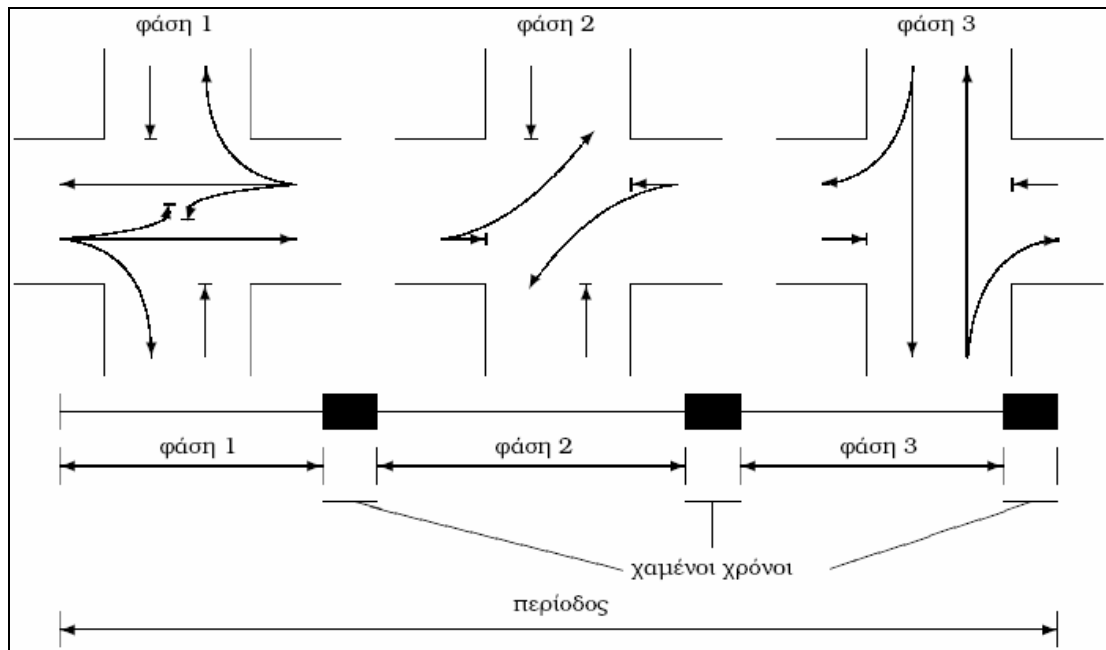
Αν και το αντίστοιχο πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου μπορεί εύκολα να διατυπωθεί για οποιοδήποτε οδικό δίκτυο, η επίλυση του σε πραγματικό χρόνο και η εφαρμογή του σε ένα βρόχο ελέγχου σαν αυτό του Σχήματος 1.1 αντιμετωπίζει ένα αριθμό δυσκολιών οι οποίες είναι φαινομενικά ανυπέρβλητες:

- Το μέγεθος του προβλήματος για ένα δίκτυο είναι πολύ μεγάλο.

- Υπάρχουν πολλές μη προβλέψιμες και δύσκολα μετρήσιμες διαταραχές (ατυχήματα, παράνομο παρκάρισμα, μπλοκάρισμα κόμβου, κ.λπ.) που διαταράσσουν την κυκλοφοριακή ροή.
- Οι μετρήσεις των συνθηκών κυκλοφορίας που επικρατούν στο δίκτυο συνήθως είναι τοπικές (μέσω φωρατών) και ανακριβείς λόγω διαφόρων φυσικών επιπτώσεων.
- Υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί κατά την εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο, π.χ. προηγμένα συστήματα ελέγχου λαμβάνουν αποφάσεις μέσα σε 2 sec.

Ο συνδυασμός των δυσκολιών αυτών έχει ως αποτέλεσμα η επίλυση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου να μην είναι εφικτή για πάνω από ένα κόμβο. Συνεπώς, οι προτεινόμενες στρατηγικές ελέγχου αστικών δικτύων εισάγουν έναν αριθμό απλοποιήσεων διαφορετικού είδους η κάθε μια ή απευθύνονται μόνο σε ένα κομμάτι του προβλήματος 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** (stage ή phase) είναι ένα μέρος της περιόδου κατά το οποίο έχει προτεραιότητα ένα σύνολο ρευμάτων (Σχήμα 1.2). 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 1.2). Ο χρόνος που προκύπτει αν αφαιρεθεί από την περίοδο ο χαμένος χρόνος ονομάζεται **αποτελεσματικός**



Σχήμα 1.2: Δομή σηματοδότησης κόμβου.

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).

1.2.2 Τρόποι ελέγχου κυκλοφορίας μέσω σηματοδοτών

Ο έλεγχος της κυκλοφορίας με φωτεινή σηματοδότηση μπορεί να επιτευχθεί με έναν από τέσσερις διαφορετικούς τρόπους [44]:

- Ο πρώτος τρόπος έγκειται στον καθορισμό του αριθμού και της σύστασης των φάσεων κυκλοφορίας σε κάθε διασταύρωση (δηλαδή στην επιλογή των κινήσεων που λαμβάνουν πράσινο ή κόκκινο σε κάθε φάση). Ο αριθμός των φάσεων σε ένα σηματοδοτούμενο κόμβο καθορίζεται από τον αριθμό και το μέγεθος των κυκλοφοριακών ρευμάτων οχημάτων και πεζών που πρόκειται να εξυπηρετηθούν.

- Ο δεύτερος και ίσως σημαντικότερος τρόπος έγκειται στον προσδιορισμό της σχετικής διάρκειας κάθε φάσης. Η σχετική διάρκεια ισούται με τη διάρκεια της φάσης δια τη διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης.
- Ο τρίτος τρόπος έγκειται στη μεταβολή της χρονικής διάρκειας της περιόδου σηματοδότησης. Η αύξηση της διάρκειας της περιόδου οδηγεί συνήθως, υπό σταθερές συνθήκες, στην αύξηση της κυκλοφοριακής ικανότητας του κόμβου λόγω της σχετικής μείωσης των μεταβατικών σταδίων. Ωστόσο, μεγάλες περίοδοι δημιουργούν και μεγαλύτερες καθυστερήσεις.
- Ο τέταρτος τρόπος αναφέρεται μόνο σε συντονισμένα συστήματα και αφορά στον καθορισμό της χρονικής μετατόπισης μεταξύ της έναρξης των περιόδων γειτονικών διασταυρώσεων. Ο σωστός καθορισμός της χρονικής μετατόπισης είναι απαραίτητος για τη δημιουργία του λεγόμενου “πράσινου κύματος” κατά μήκος μιας οδικής αρτηρίας.

1.2.3 Ταξινόμηση των στρατηγικών ελέγχου

Τα συστήματα ελέγχου που βρίσκονται σήμερα σε εφαρμογή ή υπό ανάπτυξη μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τα εξής τρία κριτήρια [44]:

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

Στην παρούσα διατριβή γίνεται συνδυασμός ενός μεμονωμένου κανόνα για συνθήκες ακόρεστης κυκλοφορίας με την στρατηγική ελέγχου TUC (συντονισμένο σύστημα σε επίπεδο δικτύου). Δημιουργείται έτσι ένας υβριδικός αλγόριθμος με δύο κανόνες ελέγχου που εφαρμόζονται εναλλάξ σε κάθε σηματοδοτούμενο κόμβο ξεχωριστά ανάλογα με τον μετρούμενο κυκλοφοριακό φόρτο.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των συστημάτων σταθερού χρόνου πηγάζει από το γεγονός ότι οι ρυθμίσεις γίνονται βάσει ιστορικών μετρήσεων και όχι με δεδομένα πραγματικού χρόνου. Η απλοποίηση αυτή μειώνει την αποτελεσματικότητα των συστημάτων σταθερού χρόνου επειδή:

- Η ζήτηση δεν είναι σταθερή, δηλαδή μπορεί να μεταβάλλεται από μέρα σε μέρα ή σε διαφορετικές περιόδους του έτους.
- Η ζήτηση αλλάζει μακροπρόθεσμα και οδηγεί στην «παλαιώση» των βέλτιστων ρυθμίσεων.
- Τα ποσοστά στροφής επίσης μεταβάλλονται με τους ίδιους τρόπους που μεταβάλλεται και η ζήτηση.
- Ατυχήματα και περαιτέρω διαταραχές μπορούν να διαταράξουν τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες με τέτοιο τρόπο ώστε αυτές να μην είναι δυνατό να προβλεφθούν.

Για τους λόγους αυτούς, τα συντονισμένα συστήματα αν σχεδιαστούν κατάλληλα είναι πιο αποτελεσματικά. Εν τούτοις, είναι και πιο δαπανηρά, αφού απαιτούν εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση ενός συστήματος το οποίο λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο και περιλαμβάνει συσκευές μετρήσεων, επικοινωνίας, τοπικούς ελεγκτές και ειδικότερα στην περίπτωση του συντονισμένου ελέγχου, ένα κεντρικό χώρο ελέγχου.

1.3 Επισκόπηση προηγμένων στρατηγικών ελέγχου

Η πολύχρονη έρευνα, σε παγκόσμιο επίπεδο, στην ερευνητική περιοχή των συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός αριθμού στρατηγικών ελέγχου οι οποίες υιοθετούν διαφορετική

φιλοσοφία σχεδιασμού και έχουν διάφορα κοινά και ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Γενικά, τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν βελτίωση του μέσου χρόνου διαδρομής στο δίκτυο από 0 ως 20%. Εν τούτοις, έχει βρεθεί ότι η αποδοτικότητα τους μειώνεται αισθητά κάτω από συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού, ενώ σε μερικές περιπτώσεις οδηγούν στο μπλοκάρισμα μέρους του δικτύου (gridlocks).

Οι πρώτες στρατηγικές ελέγχου αστικής κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο εμφανίστηκαν στη δεκαετία του 1980 με την ανάπτυξη και εφαρμογή του βρετανικού συστήματος SCOOT [23] και του αυστραλιανού συστήματος SCATS [32].

Τόσο το SCOOT όσο και το SCATS στοχεύουν στο συντονισμένο έλεγχο αστικών δικτύων, με το SCATS να υιοθετεί μια ιεραρχική δομή στην εφαρμογή του ελέγχου κατά την οποία ένα ανώτερο επίπεδο είναι υπεύθυνο για το συντονισμό σε επίπεδο δικτύου, ενώ σε ένα κατώτερο επίπεδο τροποποιείται η σηματοδότηση κάθε κόμβου μεμονωμένα ώστε να ανταποκριθεί στις επικρατούσες τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες.

Τόσο το SCOOT όσο και το SCATS επιχειρούν σε πραγματικό χρόνο μικρές αλλαγές στη σχετική διάρκεια των φάσεων, στη διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης και στη χρονική μετατόπιση της έναρξης περιόδων διαδοχικών κόμβων. Το αποτέλεσμα είναι να θεωρούνται από κάποιους ανεπαρκή [12], ιδιαίτερα κατά τις ταχέως μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες στις ώρες αιχμής ή σε περίπτωση συμβάντων που μειώνουν την κυκλοφοριακή ικανότητα του ελεγχόμενου δικτύου. Αυτός είναι ενδεχομένως κι ένας από τους λόγους για τους οποίους παρά τη μακρόχρονη ανάπτυξη, διερεύνηση και εφαρμογή τους, τα συστήματα αυτά εξακολουθούν να συμπεριφέρονται άλλοτε καλύτερα και άλλοτε χειρότερα από τα παραδοσιακά συστήματα ελέγχου σταθερού χρόνου [18, 21].

Ο προσδιορισμός της χρονικής μετατόπισης σε πραγματικό χρόνο είναι το αντικείμενο του γερμανικού MOTION [5] το οποίο όμως προς το παρόν δεν έχει εφαρμοστεί και διερευνηθεί επαρκώς. Πρόσφατα προτάθηκαν επίσης μια σειρά από προηγμένα συστήματα ελέγχου αστικής κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο όπως τα OPAC [16, 17], RHODES [38], PROLYN [14, 26], CRONOS [6], UTOPIA [34], CLAIRE [4]. Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση του MOTION, κανένα απ'

αυτά δεν έχει ακόμα εφαρμοστεί και διερευνηθεί επαρκώς. Αυτά τα νέα συστήματα δε λαμβάνουν υπόψη τους ρητά τις χρονικές μετατοπίσεις και την περίοδο σηματοδότησης. Βασισμένα σε προκαθορισμένο αριθμό και σύσταση φάσεων επιχειρούν σε πραγματικό χρόνο να προσδιορίσουν βέλτιστα τις επόμενες εναλλαγές κόκκινου-πράσινου ξεκινώντας από τον τρέχοντα χρόνο και την τρέχουσα φάση. Για τον καθορισμό των βέλτιστων αυτών εναλλαγών, οι μέθοδοι που υλοποιούν τα προαναφερόμενα συστήματα, επιλύουν σε πραγματικό χρόνο ένα δυναμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας ιδιαίτερος ρεαλιστικά μοντέλα για την περιγραφή της διεργασίας της κυκλοφοριακής ροής, τα οποία περιλαμβάνουν δυαδικές μεταβλητές με στόχο την αναπαράσταση της επίδρασης των εναλλαγών κόκκινου-πράσινου στην κυκλοφοριακή ροή.

Άλλα συστήματα, όπως το TASS [37] επιλέγουν με βάση μετρήσεις πραγματικού χρόνου ένα προϋπολογισμένο πλάνο από μια βιβλιοθήκη αποθηκευμένων πλάνων, ενώ το BALANCE [15] αναπτύχθηκε αρχικά ως ένα εργαλείο βελτιστοποίησης για την παροχή προτεραιότητας στις δημόσιες μεταφορές. Τα συστήματα αυτά είναι σχεδιασμένα κυρίως για συνθήκες ακόρεστης και βραχυπρόθεσμα κορεσμένης κυκλοφορίας ενώ έχουν αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά στις μετρήσεις δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Πρόσφατα προτάθηκε η στρατηγική ελέγχου TUC [9] η οποία είναι εφαρμόσιμη σε πραγματικό χρόνο σε μεγάλα δίκτυα και κύρια χαρακτηριστικά της είναι η ευρωστία, η απλότητα και η αποτελεσματικότητα σε συνθήκες γενικευμένης κυκλοφοριακής συμφόρησης. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή έχει ως κύριο μειονέκτημα το ότι δεν λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη περιορισμών κατά την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου (προβάλλονται εκ των υστέρων).

Για την εφαρμογή πολλών από τις παραπάνω μεθοδολογίες σε πραγματικό χρόνο, υιοθετείται η αρχή του κυλιόμενου ορίζοντα, σύμφωνα με την οποία το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται, εκκινώντας από μετρήσεις της τρέχουσας κατάστασης, για μια αρκετά μακρά χρονική περίοδο (π.χ. 60 sec). Τα αποτελέσματα, όμως, εφαρμόζονται για ένα συντομότερο διάστημα (π.χ. 4 sec) το οποίο ακολουθείται από νέα επίλυση με χρήση πιο πρόσφατων μετρήσεων κ.ο.κ. Με εξαίρεση το σύστημα CRONOS, τα συστήματα αυτά είναι κατά ουσία μεμονωμένα, αφού ο υπέρμετρος υπολογιστικός φόρτος δεν επιτρέπει επέκτασή τους σε παραπάνω από

ένα κόμβο. Έτσι υιοθετούν μια ιεραρχική δομή για την πρακτική εφαρμογή τους, όπου ένα ανώτερο επίπεδο ελέγχου είναι υπεύθυνο για το συντονισμό σε επίπεδο δικτύου, ενώ οι μεθοδολογίες βελτιστοποίησης που υλοποιούν εφαρμόζονται σε ένα κατώτερο επίπεδο με στόχο το μεμονωμένο έλεγχο των κόμβων.

Σε αυτό το κατώτερο επίπεδο ελέγχου υιοθετούνται οι ακόλουθες μεθοδολογίες για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης:

- Το OPAC υιοθετεί έναν αλγόριθμο εξαντλητικής απαρίθμησης με τον οποίο παράγει μια βέλτιστη ακολουθία εναλλαγών κόκκινου-πράσινου σε πραγματικό χρόνο.
- Το PROLYN εφαρμόζει δυναμικό προγραμματισμό.
- Το RHODES εφαρμόζει τον COP [47], έναν αλγόριθμο που εφαρμόζει επίσης δυναμικό προγραμματισμό.
- Το UTOPIA εφαρμόζει κάποια μορφή βελτιστοποίησης που όμως δεν περιγράφεται σαφώς στη σχετική βιβλιογραφία.
- Το CRONOS εφαρμόζει μια μεθοδολογία ευρετικής βελτιστοποίησης με πολυωνυμική πολυπλοκότητα που επιτρέπει την ταυτόχρονη εφαρμογή του σε άνω της μίας διασταύρωσης. Οδηγεί όμως σε τοπικά βέλτιστες λύσεις και προς το παρόν δεν έχει εφαρμοστεί σε δίκτυα που περιλαμβάνουν περισσότερους από 6–8 κόμβους.
- Το CLAIRE είναι ένα έμπειρο σύστημα που διαθέτει ένα εργαλείο διαχείρισης της συμφόρησης.

Τέλος, μια σειρά από νέες προσεγγίσεις στο χώρο των συστημάτων ελέγχου αστικών δικτύων είναι συστήματα που βασίζονται σε ασαφή έλεγχο και γενετικούς αλγορίθμους [40], γενετικούς αλγορίθμους [2], νευρωνικά δίκτυα [49], νευρο-ασαφή έλεγχο [22], ασαφή έλεγχο [39], δυναμικό προγραμματισμό [30] (παρόμοια με τον COP), γραμμικό προγραμματισμό [31], τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης [24, 1]. Επίσης στην [33] προτείνεται ένα πολυεπίπεδο σύστημα που βασίζεται σε ευφυείς πράκτορες, ενώ στα κατώτερα επίπεδα χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι αναζήτησης (Branch-and-Bound, BFS, Shortest path) για την επίλυση στατικών προβλημάτων σε κυλιόμενο ορίζοντα.

1.4 Εισαγωγή στην προτεινόμενη μεθοδολογία

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται την ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου κυκλοφορίας που επιλύει το πρόβλημα σηματοδότησης αστικών δικτύων. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται ένας αποτελεσματικός υβριδικός αλγόριθμος ελέγχου, στον οποίο η κυκλοφοριακή ζήτηση των σηματοδοτούμενων κόμβων χωρίζεται σε δύο διακριτές καταστάσεις.

Στην περίπτωση **ακόρεστης κυκλοφορίας** η ζήτηση είναι χαμηλότερη από την κυκλοφοριακή ικανότητα μιας διασταύρωσης (ή ενός δικτύου). Η κυκλοφοριακή ικανότητα εξαρτάται από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του δικτύου αλλά και από την εφαρμοζόμενη στρατηγική ελέγχου. Στην αντίθετη περίπτωση, της **κορεσμένης κυκλοφορίας**, παρατηρούμε φαινόμενα προσωρινής αποθήκευσης οχημάτων επί των οδών (ένα όχημα που εισέρχεται στον κόμβο περνάει πάνω από μια φάση κόκκινου για να εξέλθει). Σε ακραίες, πλην όλο και συχνότερα εμφανιζόμενες περιπτώσεις, οι σχηματιζόμενες ουρές οχημάτων επεκτείνονται μέχρι την ανάντη διασταύρωση και φράζουν το κάθετο ρεύμα κυκλοφορίας με αποτέλεσμα τη σοβαρή μείωση της κυκλοφοριακής ικανότητας. Η ρύθμιση της ακόρεστης κυκλοφορίας απαιτεί συχνά διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου απ' ό τι η ρύθμιση κορεσμένης κυκλοφορίας.

Αυτή είναι και η ειδοποιός διαφορά της προτεινόμενης μεθοδολογίας από παλαιότερες εργασίες που αφορούν την ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου και βασίζονται στο ίδιο μαθηματικό πρότυπο. Στη στρατηγική TUC υπάρχουν πλέον δύο κανόνες ελέγχου και ανάλογα με την κυκλοφοριακή κατάσταση που επικρατεί σε κάθε κόμβο εφαρμόζεται ο αντίστοιχος έλεγχος. Ο ένας κανόνας είναι ο Γραμμικός-Τετραγωνικός έλεγχος ο οποίος εφαρμόζεται στην περίπτωση κορεσμένης κυκλοφορίας και προϋπήρχε στην στρατηγική TUC [9], ενώ ο άλλος (Κανόνας Εξισορρόπησης της Ζήτησης) αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και εφαρμόζεται στους κόμβους με ακόρεστη κυκλοφορία.

Στην νέα έκδοση της στρατηγικής TUC, οι δύο αυτοί κανόνες συνεργάζονται μεταξύ τους σε πραγματικό χρόνο μέσω ενός αποτελεσματικού υβριδικού αλγορίθμου ελέγχου που παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Μοντελοποίηση κυκλοφοριακής ροής αστικών οδικών δικτύων

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η περιγραφή του μοντέλου ελέγχου το οποίο βασίζεται στο μαθηματικό πρότυπο αποθήκευσης-και-προώθησης, καθώς και η παρουσίαση του μακροσκοπικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της κυκλοφοριακής ροής των δικτύων. Η §2.1 παρουσιάζει βασικές έννοιες που αφορούν στην ανάπτυξη στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας, ενώ η §2.2 παρουσιάζει τον σχεδιασμό του μοντέλου ελέγχου. Τέλος, στην §2.3 γίνεται λεπτομερής παρουσίαση των κυκλοφοριακών μεταβλητών, των βασικών εξισώσεων και των κριτηρίων απόδοσης που χρησιμοποιεί το μοντέλο προσομοίωσης.

2.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας, σε μεγάλο βαθμό, δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την γνώση των φαινομένων της κυκλοφοριακής ροής όσο και της συμπεριφοράς των οδηγών. Για το λόγο αυτό, οι πρώτες προσπάθειες κατανόησης και περιγραφής των φαινομένων της κυκλοφοριακής ροής άρχισαν ήδη από την δεκαετία του '30 [41] με την ανάπτυξη απλών μαθηματικών μοντέλων κυκλοφοριακής ροής. Στις μέρες μας, υπάρχουν διάφορα εργαλεία μοντελοποίησης της κυκλοφοριακής ροής τα οποία επίσης χρησιμεύουν και σε άλλους τομείς όπως:

- Βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη και επιτήρηση της κυκλοφορίας σε περίπλοκα οδικά δίκτυα.
- Αξιολόγηση της επίδρασης νέων κατασκευών, σύγκριση εναλλακτικών λύσεων.

- Αξιολόγηση της επίδρασης γεγονότων που οδηγούν στην μείωση της χωρητικότητας του δικτύου (π.χ. εργασίες, ατυχήματα και/ή επεισόδια) ή την αύξηση της ζήτησης κ.λπ.

Γενικά, το **μαθηματικό μοντέλο** μιας διαδικασίας είναι η περιγραφή της διαδικασίας με χρήση μαθηματικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές, περιγράφουν (μιμούνται) σημαντικά μέρη της συμπεριφοράς της διαδικασίας. Η επιλογή ενός συγκεκριμένου μοντέλου εξαρτάται από τις απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης εφαρμογής και συνεπώς διαφορετικά μοντέλα της ίδιας διαδικασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικούς σκοπούς.

Στην πραγματικότητα, ο ρόλος των μαθηματικών μοντέλων στην διαδικασία ανάπτυξης στρατηγικών ελέγχου οδικής κυκλοφορίας είναι διπλός. Από την μια πλευρά, ένα (πιθανώς απλοποιημένο) μοντέλο χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό της στρατηγικής ελέγχου και από την άλλη, ένα (ενδεχομένως διαφορετικό, δηλαδή πιο ρεαλιστικό) μοντέλο χρησιμοποιείται για σύγκριση και εξέταση της στρατηγικής που αναπτύχθηκε, κάτω από διαφορετικά σενάρια ζήτησης και επεισοδίων πριν την υλοποίηση σε πραγματικές συνθήκες. Μια τέτοια προσέγγιση είναι προφανές ότι μειώνει το απαιτούμενο κόστος, απαιτεί λιγότερο χρόνο και είναι μια πιο ασφαλής και εύκολη προσέγγιση συγκριτικά με την απευθείας διερεύνηση στρατηγικών ελέγχου σε πραγματικές συνθήκες.

2.2 Σχεδιασμός του μοντέλου ελέγχου

2.2.1 Το μαθηματικό πρότυπο αποθήκευσης-και-προώθησης

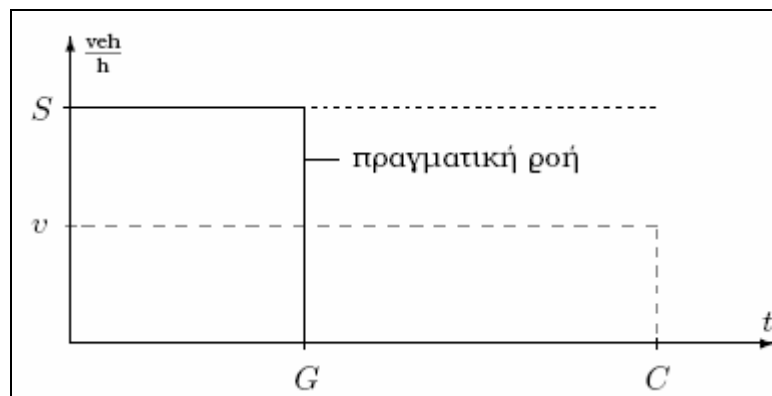
Το μαθηματικό πρότυπο αποθήκευσης-και-προώθησης προτάθηκε αρχικά από τον Ντινο Γκαζή στην [20] και έκτοτε χρησιμοποιήθηκε σε διάφορες εργασίες για τον έλεγχο κυκλοφορίας σε οδικά δίκτυα [19, 3, 48, 35, 36, 29, 7, 45, 46, 27]. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, τα οχήματα ταξιδεύουν κατά μήκος ενός συνδέσμου για κάποιο σταθερό χρόνο και συσσωρεύονται στην έξοδο του συνδέσμου αν η εισροή είναι μεγαλύτερη από την εκροή. Η εκροή προωθείται σύμφωνα με την εκάστοτε εφαρμοζόμενη ρύθμιση σηματοδότησης.

Το κύριο χαρακτηριστικό που κάνει την συγκεκριμένη προσέγγιση ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα, είναι η εισαγωγή ενός απλοποιημένου μοντέλου που επιτρέπει τη μαθηματική περιγραφή της διεργασίας της κυκλοφοριακής ροής χωρίς την χρήση δυαδικών μεταβλητών. Η απλοποίηση αφορά την μοντελοποίηση της εκροής ενός συνδέσμου. Υποθέτοντας ότι η ανάντη ζήτηση του συνδέσμου είναι αρκούντως μεγάλη, η εκροή v κατά το διακριτό διάστημα k τίθεται ίση προς:

$$v(k) = \frac{SG(k)}{C} \quad (2.1)$$

όπου S είναι η ροή κορεσμού του συνδέσμου, G είναι η διάρκεια του πράσινου για το αντίστοιχο ρεύμα κυκλοφορίας και C η διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης του κόμβου. Σύμφωνα με την (2.1), αν η περίοδος του μοντέλου T ισούται με C , η εκροή v ισούται με μια μέση ροή καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης αντί να ισούται με S όταν ο σύνδεσμος δέχεται προτεραιότητα (πράσινο) και με μηδέν διαφορετικά (κόκκινο) όπως δείχνει το Σχήμα 2.1. Με άλλα λόγια, η (2.1) υποθέτει την ύπαρξη μιας συνεχούς εκροής από τον σύνδεσμο (όσο βέβαια υπάρχει επαρκής ζήτηση). Ως συνέπεια αυτής της θεώρησης έχουμε τα εξής [44]:

- Η περίοδος του μοντέλου T δεν μπορεί να είναι μικρότερη από την περίοδο σηματοδότησης C , όλων των ελεγχόμενων κόμβων. Συνεπώς, οι αποφάσεις ελέγχου δεν μπορούν να λαμβάνονται συχνότερα από τη διάρκεια της μεγαλύτερης χρονικά περιόδου σηματοδότησης που χρησιμοποιείται στο ελεγχόμενο αστικό δίκτυο.
- Το μοντέλο υποθέτει την ύπαρξη μιας συνεχούς εκροής ανταγωνιστικών ρευμάτων.



Σχήμα 2.1: Απλοποιημένη μοντελοποίηση της εκροής v ενός συνδέσμου.

- Το μοντέλο δεν περιγράφει τις περιοδικές μεταβολές των ουρών στους συνδέσμους που απορρέουν από την εναλλαγή κόκκινης-πράσινης ένδειξης.
- Η επίδραση της χρονικής μετατόπισης μεταξύ γειτονικών κόμβων δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη, ενώ η χρονική διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης δεν μπορεί να μεταβληθεί.

Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, η εισαγωγή της παραπάνω απλούστευσης βοηθάει στην επίλυση του προβλήματος, καθώς δίνει την δυνατότητα αποφυγής των δυαδικών μεταβλητών και ανοίγει τον δρόμο για την εφαρμογή αποτελεσματικών μεθόδων βελτιστοποίησης και ελέγχου πολυωνυμικής πολυπλοκότητας (π.χ. γραμμικός προγραμματισμός, τετραγωνικός προγραμματισμός, μη γραμμικός προγραμματισμός, πολυμεταβλητοί ρυθμιστές).

2.2.2 Ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου

Ένα αστικό δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί σε ένα διάγραμμα με τους συνδέσμους $z \in Z$ και τους κόμβους $j \in J$. Θεωρούμε ένα ελεγχόμενο σηματοδοτούμενο κόμβο j με I_j και O_j τους συνδέσμους εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Ακόμη ορίζουμε για κάθε σύνδεσμο $z \in Z$ το σύνολο P_z με στοιχεία τους συνδέσμους στους οποίους έχει την δυνατότητα να προωθήσει τη ροή του. Επιπλέον υποθέτουμε τα ακόλουθα:

- Η διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης C_j και ο συνολικός χαμένος χρόνος L_j του κόμβου j έχουν σταθερές τιμές. Για απλότητα και συντονισμό του αστικού δικτύου υποθέτουμε ότι $C_j = C$ για όλους τους κόμβους $j \in J$.
- Οι χρονικές μετατοπίσεις είναι σταθερές (δηλαδή το ξεκίνημα της κύριας φάσης για κάθε περίοδο σηματοδότησης είναι σταθερό).
- Ο έλεγχος των σηματοδοτών του κόμβου j βασίζεται σε σταθερό αριθμό φάσεων που ανήκουν στο σύνολο F_j , ενώ u_z είναι το σύνολο των φάσεων στις οποίες έχει προτεραιότητα ο σύνδεσμος z .

- Οι ροές κορεσμού και η μέγιστη χωρητικότητα (μετρημένη σε αριθμό οχημάτων) των συνδέσμων S_z και $x_{z,\max}$, $z \in I_j$ αντίστοιχα, είναι γνωστές για κάθε κόμβο $j \in J$.
- Τα ποσοστά στροφής για κάθε κίνηση t_{zw} , $z \in I_j$, $w \in O_j$, $j \in J$ είναι γνωστά και μπορούν να μεταβάλλονται με το χρόνο. Για το λόγο αυτό τα ποσοστά στροφής για κάθε κίνηση μπορεί να μετρώνται ή να εκτιμώνται σε πραγματικό χρόνο, αν αυτό κριθεί απαραίτητο.

Για κάθε κόμβο j βάση του ορισμού ισχύει ο περιορισμός:

$$C = \sum_{i \in F_j} g_{j,i} + L_j \quad (2.2)$$

όπου $g_{j,i}$ είναι ο αποτελεσματικός χρόνος πρασίνου της φάσης i στον κόμβο j .

Επίσης, εισάγεται ο παρακάτω περιορισμός για να εγγυηθεί την κατανομή χρόνου πρασίνου σε όλες τις φάσεις:

$$g_{j,i} \geq g_{j,i,\min}, \quad \forall i \in F_j \quad (2.3)$$

όπου $g_{j,i,\min}$ είναι ο μικρότερος δυνατός αποτελεσματικός χρόνος πρασίνου για τη φάση i στον κόμβο j . Σε μερικές περιπτώσεις περιορισμοί όπως ο ακόλουθος μπορούν να εφαρμοστούν:

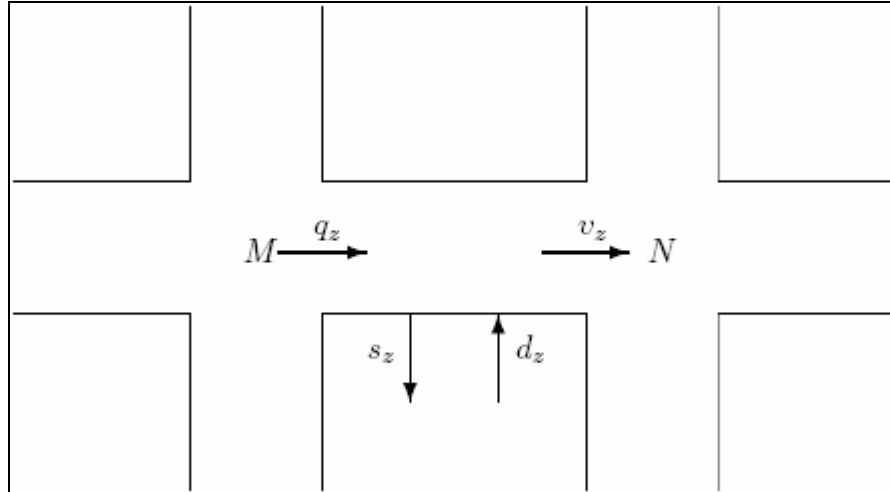
$$g_{j,i} \leq g_{j,i,\max}, \quad \forall i \in F_j \quad (2.4)$$

όπου $g_{j,i,\max}$ είναι ο μεγαλύτερος δυνατός αποτελεσματικός χρόνος πρασίνου για την φάση i στον κόμβο j .

Έστω ο σύνδεσμος z που συνδέει δυο κόμβους M , N τέτοιος ώστε $z \in O_M$ και $z \in I_N$ (Σχήμα 2.2). Η δυναμική του συνδέσμου z διατυπώνεται από την εξίσωση:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T[q_z(k) - s_z(k) + d_z(k) - v_z(k)] \quad (2.5)$$

όπου x_z είναι ο αριθμός των οχημάτων στον σύνδεσμο z , q_z και v_z η εισροή και εκροή αντίστοιχα στον ίδιο σύνδεσμο κατά την διάρκεια $[kT, (k+1)T]$, με T την περίοδο του μοντέλου και $k = 0, 1, \dots, K$ είναι ο δείκτης διακριτού διαστήματος ελέγχου.



Σχήμα 2.2: Σύνδεσμος αστικού δικτύου που συνδέει τους κόμβους M και N .

Τέλος d_z και s_z είναι η ζήτηση και η ροή εξόδου του συνδέσμου z , αντίστοιχα.

Η ροή εξόδου στο σύνδεσμο z είναι:

$$s_z(k) = t_{z0} q_z(k) \quad (2.6)$$

Τα ποσοστά στροφής t_{z0} υποθέτουμε ότι είναι γνωστά ή μπορούν να μετρηθούν σε πραγματικό χρόνο, ενώ η ζήτηση της ροής $d_z(k)$ μπορεί να προέρχεται από ιστορικές μετρήσεις που με κατάλληλη επεξεργασία μέσω ειδικών προγραμμάτων είναι διαθέσιμη για ένα δεδομένο δίκτυο.

Η εξίσωση (2.5) λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (2.6) δίνει:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T[(1 - t_{z0})q_z(k) + d_z(k) - v_z(k)] \quad (2.7)$$

Η εισροή στο σύνδεσμο z είναι:

$$q_z(k) = \sum_{w \in I_M} t_{wz} v_w(k) \quad (2.8)$$

όπου t_{wz} με $w \in I_M$, είναι τα ποσοστά στροφής των συνδέσμων εισόδου στον κόμβο M προς τον σύνδεσμο z .

Σύμφωνα με το μαθηματικό πρότυπο αποθήκευσης-και-προώθησης, αν η περίοδος του μοντέλου T είναι ίση με την περίοδο C , τότε η μέση τιμή της εκροής του συνδέσμου z από την εφαρμογή της (2.1) είναι:

$$v_z(k) = \frac{S_z G_z(k)}{C} \quad (2.9)$$

όπου ο αποτελεσματικός χρόνος πρασίνου G_z του συνδέσμου z υπολογίζεται ως:

$$G_z(k) = \sum_{i \in U_z} g_{N,i}(k) + e_z \quad (2.10)$$

όπου e_z σταθερά που μπορεί να πάρει αρνητικές ή θετικές τιμές. Στην περίπτωση που ο σύνδεσμος z δέχεται προτεραιότητα σε περισσότερες από μια φάσεις, τότε χρησιμοποιεί τους ενδιάμεσους χρόνους μαζί με τους χρόνους πρασίνου και/ή ο χρόνος πρασίνου του συνδέσμου z αρχίζει νωρίτερα ή τελειώνει αργότερα στην αντίστοιχη φάση (ή φάσεις) που έχει προτεραιότητα, και έτσι το e_z λαμβάνει θετικές τιμές που αντιστοιχούν στον επιπρόσθετο χρόνο που χρησιμοποιείται από τον σύνδεσμο. Στην περίπτωση που ο χρόνος πρασίνου του συνδέσμου z αρχίζει αργότερα ή τελειώνει νωρίτερα στην αντίστοιχη φάση (ή φάσεις) που έχει προτεραιότητα, το e_z λαμβάνει αρνητικές τιμές. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, το e_z είναι ίσο με μηδέν. Οι σταθερές αυτές τιμές $e_z \forall z \in Z$ χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις του Κανόνα Εξισορρόπησης της Ζήτησης που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3.

Η καταστατική εξίσωση (2.7) μαζί με τις εξισώσεις ροών (2.8) και (2.9), μπορούν να περιγράψουν την δυναμική εξέλιξη των ουρών στους συνδέσμους $z \in Z$ για ένα δίκτυο με τυχαία τοπολογία και χαρακτηριστικά. Το διάνυσμα κατάστασης x έχει για στοιχεία του τους αριθμούς των οχημάτων x_z στους συνδέσμους $z \in Z$, ενώ το διάνυσμα ελέγχου g έχει για στοιχεία του τους αποτελεσματικούς χρόνους πρασίνου $g_{j,i}$, για κάθε $i \in F_j$, $j \in J$. Ας σημειωθεί εδώ, ότι σε αντίθεση με άλλες εφαρμογές της μοντελοποίησης αποθήκευσης-και-προώθησης [19, 3, 48], το x_z δηλώνει τον αριθμό των οχημάτων και όχι το μήκος της ουράς στον σύνδεσμο z .

2.3 Μοντελοποίηση για τις προσομοιώσεις

Τα μοντέλα προσομοίωσης της κυκλοφοριακής ροής χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το επίπεδο της ανάλυσης που χρησιμοποιούν κατά την περιγραφή των κυκλοφοριακών φαινομένων [41]. 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 τον ορισμό κατάλληλων κυκλοφοριακών μεταβλητών για την περιγραφή της μέσης συμπεριφοράς των οχημάτων σε συγκεκριμένη θέση και χρόνο. Τα μακροσκοπικά μοντέλα περιέχουν εξισώσεις που περιγράφουν την εξέλιξη των κυκλοφοριακών μεταβλητών στο χώρο και τον χρόνο συναρτήσει των αρχικών και συνοριακών συνθηκών.

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 που πρακτικά είναι δύσκολο. Τα μειονεκτήματα αυτά έρχονται να επιλύσουν τα μακροσκοπικά μοντέλα.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιείται το μακροσκοπικό μοντέλο METACOR [8]. Το METACOR είναι ένα εργαλείο μοντελοποίησης και προσομοίωσης μεικτών οδικών δικτύων τυχαίας τοπολογίας και χαρακτηριστικών. Στο μοντέλο αυτό το δίκτυο περιγράφεται από ένα συνεχόμενο γράφημα όπου οι διασταυρώσεις απεικονίζονται με κύκλους και οι 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.

2.3.1 Κυκλοφοριακές μεταβλητές

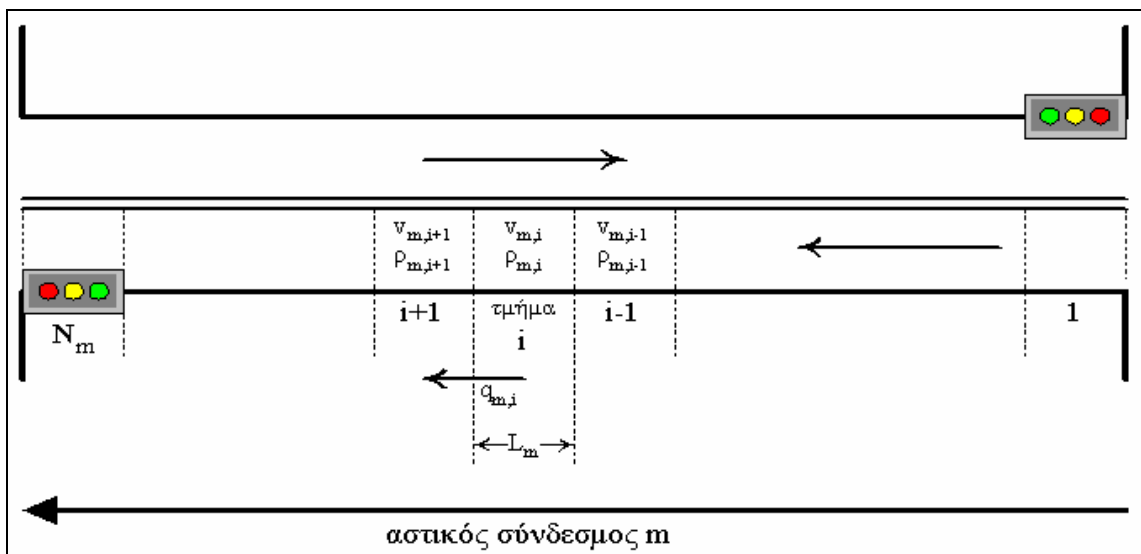
Η μακροσκοπική περιγραφή της κυκλοφοριακής ροής προϋποθέτει τον ορισμό κατάλληλων κυκλοφοριακών μεταβλητών που να μπορούν να εκφράζουν την μέση συμπεριφορά των οχημάτων σε συγκεκριμένη τοποθεσία και χρόνο. Στο

μοντέλο METACOR κάθε σύνδεσμος m υποδιαιρείται σε N_m τμήματα ίσου μήκους. Η κυκλοφοριακή κατάσταση σε κάθε τμήμα, θεωρείται ομογενής και χαρακτηρίζεται από την αντίστοιχη κυκλοφοριακή πυκνότητα, τη μέση ταχύτητα και την κυκλοφοριακή ροή (Σχήμα 2.3).

Οι μεταβλητές κυκλοφορίας υπολογίζονται τις διακριτές χρονικές στιγμές T , $2T$, $3T$, ..., όπου το T δηλώνει την περίοδο ή το διάστημα διακριτού χρόνου ($T = 1 \dots 20 \text{sec}$). Η περίοδος T μπορεί να είναι διαφορετική για τον αυτοκινητόδρομο και το αστικό δίκτυο και εξαρτάται από το μήκος του κάθε τμήματος. Γενικά, ισχύει $T_{ul} \leq T_{uj}$, όπου T_{ul} , T_{uj} είναι το διάστημα διακριτού χρόνου προσομοίωσης για τους αστικούς συνδέσμους και τους αστικούς κόμβους αντίστοιχα.

Οι μεταβλητές κυκλοφορίας ορίζονται ως εξής:

- Κυκλοφοριακή Πυκνότητα, $\rho_{m,i}(k)$, είναι ο αριθμός των οχημάτων στο τμήμα i του συνδέσμου m την χρονική στιγμή kT , διαιρούμενο με το μήκος του τμήματος L_m (σε veh/km).
- Μέση Ταχύτητα, $v_{m,i}(k)$, είναι η μέση ταχύτητα των οχημάτων που βρίσκονται στο τμήμα i του συνδέσμου m την χρονική στιγμή kT (σε km/h).



Σχήμα 2.3: Τμηματική διακριτοποίηση αστικού συνδέσμου.

- Κυκλοφοριακή Ροή, $q_{m,i}(k)$, είναι ο αριθμός των οχημάτων που αποχωρούν από το τμήμα i του συνδέσμου m κατά την διάρκεια της περιόδου $[kT, (k+1)T]$, διαιρεμένος με T (veh/h), όπου k είναι ο δείκτης διακριτού χρόνου ($k = 0, 1, 2, \dots$).

Επιπλέον, για τους αστικούς κόμβους είναι αναγκαίο να οριστούν και τα ποσοστά στροφής. Γενικά, η κυκλοφοριακή ροή εισέρχεται στους αστικούς κόμβους μέσω ενός αριθμού συνδέσμων εισόδου και αποχωρεί μέσω ενός αριθμού συνδέσμων εξόδου. Ωστόσο, η ροή εισόδου από ένα συγκεκριμένο σύνδεσμο εισόδου δεν κατανέμεται σε όλους τους συνδέσμους εξόδου, καθώς κάποιες κινήσεις (π.χ. στροφές τύπου “U”) μπορεί να απαγορεύονται. Για το λόγο αυτό, ο ορισμός των ποσοστών στροφής για τους αστικούς κόμβους λαμβάνει υπόψη τις εισροές των συνδέσμων και ορίζεται ως $\beta_{n,\mu}^m(k)$, εκφράζοντας το ποσοστό της κυκλοφοριακής ροής $q_{\mu,N_\mu}(k)$ που εισέρχεται στον αστικό κόμβο n μέσω του συνδέσμου εισόδου μ και αποχωρεί από τον κόμβο n τη χρονική στιγμή kT μέσω του συνδέσμου εξόδου m . Επομένως, $\sum_{m \in O_n} \beta_{n,\mu}^m(k) = 1, \forall (n, \mu)$.

2.3.2 Βασικές εξισώσεις

Μοντελοποίηση συνδέσμων

Οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της χρονικής εξέλιξης των κυκλοφοριακών μεταβλητών σε κάθε τμήμα i του συνδέσμου m είναι οι παρακάτω:

- Εξίσωση συνέχειας: $\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m} [q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)]$ (2.11)

- Εξίσωση ροής: $q_{m,i}(k) = \min\{q_{ups}(k), q_{dwn}(k)\}$ (2.12)

- Θεμελιώδες διάγραμμα: $Q(\rho_{m,i}(k)) = \rho_{m,i}(k) \cdot v_{f,m} \left(1 - \frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{\max} \cdot \lambda_m}\right)$ (2.13)

όπου $v_{f,m}$ είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής και είναι χαρακτηριστική για το θεμελιώδες διάγραμμα του αστικού συνδέσμου m ενώ ρ_{\max} είναι σταθερά που δηλώνει την μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ανά λωρίδα και έχει την ίδια τιμή για όλους τους αστικούς συνδέσμους.

Επιπλέον, στην εξίσωση ροής (2.12) $q_{ups}(k)$ είναι, κατά προσέγγιση, η επιθυμητή ροή εισόδου στο επόμενο κατάντη τμήμα, ενώ $q_{down}(k)$ είναι η μέγιστη ροή που το κατάντη τμήμα μπορεί να εξυπηρετήσει και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το θεμελιώδες διάγραμμα (Σχήμα 2.4) ως εξής:

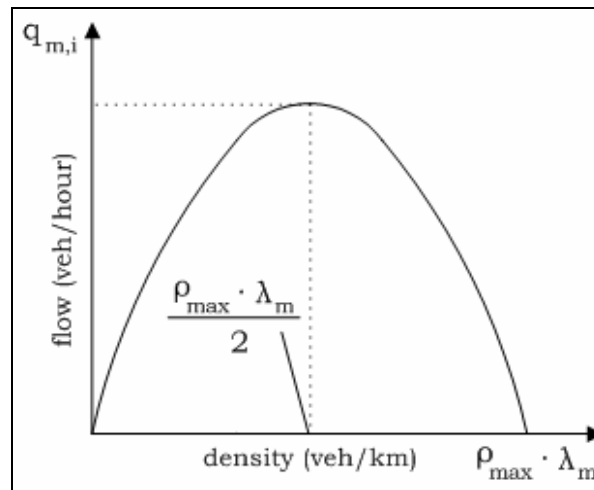
$$q_{ups}(k) = \begin{cases} Q(\rho_{m,i}(k)) & \text{αν } \rho_{m,i} \leq \rho_{\max} \lambda_m / 2 \\ Q(\rho_{\max} \lambda_m / 2) & \text{αν } \rho_{m,i} > \rho_{\max} \lambda_m / 2 \end{cases} \quad (2.14)$$

$$q_{down}(k) = \begin{cases} Q(\rho_{\max} \lambda_m / 2) & \text{αν } \rho_{m,i+1} \leq \rho_{\max} \lambda_m / 2 \\ Q(\rho_{m,i+1}(k)) & \text{αν } \rho_{m,i+1} > \rho_{\max} \lambda_m / 2 \end{cases} \quad (2.15)$$

Αυτή η ιδιαίτερη επεξεργασία με την οποία λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς πιθανή συμφόρηση, επιτρέπει γενικά την εξέταση της ύπαρξης διαφορετικών χωρητικοτήτων σε διαδοχικά τμήματα (π.χ. παράλειψη λωρίδας ή αύξηση του αριθμού λωρίδων).

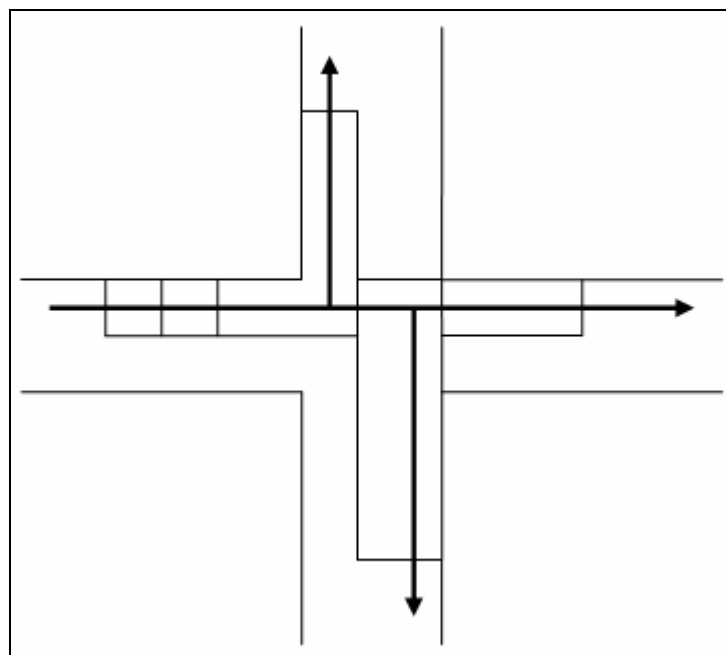
Μοντελοποίηση κόμβων

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 ο χωρισμός 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 με τον ίδιο τύπο που χρησιμοποιείται και για τη μοντελοποίηση των συνδέσμων (εξίσωση 2.12), 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.



Σχήμα 2.4: Το θεμελιώδες διάγραμμα για το διακριτό τμήμα συνδέσμου (m,i) .

Ιδιαίτερη σημασία έχει δοθεί στη μοντελοποίηση ανταγωνιστικών κινήσεων μέσα στη διασταύρωση, 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



Σχήμα 2.5: Οι ζώνες της αστικής διασταύρωσης.

άλλης κατεύθυνσης να είναι αρκετά μεγάλο. Με την πάροδο του χρόνου όμως, το απαιτούμενο κενό γίνεται μικρότερο.

Επιπρόσθετα, η κυκλοφοριακή ροή εισόδου σε μία διασταύρωση κατανέμεται σε ένα αριθμό συνδέσμων εξόδου σύμφωνα με τα αντίστοιχα ποσοστά αποκοπής ή ποσοστά στροφής του αστικού κόμβου, μέσω αναλυτικών και πολύπλοκων εξισώσεων εξαιτίας του μεγάλου αριθμού συγκεχυμένων συνδέσμων εισροής και εκροής της διασταύρωσης.

2.3.3 Υπολογιζόμενα κριτήρια

Με βάση το μοντέλο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο αυτό, μπορούν να υπολογιστούν διάφορα κριτήρια απόδοσης. Αυτά τα κριτήρια ποσοτικοποιούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συνολικού δικτύου και αποτελούν δείκτες που περιγράφουν την αντίστοιχη απόδοσή του. Κατ' αυτόν τον τρόπο διάφορες στρατηγικές ελέγχου της κυκλοφορίας μπορούν να αξιολογηθούν ως προς την αποτελεσματικότητά τους.

Τα κριτήρια απόδοσης που μπορούν να υπολογιστούν είναι τα εξής:

- **Συνολικός Χρόνος Διαδρομής** (Total Travel Time), αντιπροσωπεύει το συνολικό χρόνο ταξιδιού όλων των αυτοκινήτων του δικτύου για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προσομοίωσης και υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (veh*h):

$$TTT = T \cdot \sum_k \sum_m \sum_i [\rho_{m,i}(k) \cdot L_m] \quad (2.16)$$

- **Συνολικός Χρόνος Αναμονής** (Total Waiting Time), αναπαριστά το άθροισμα των χρόνων αναμονής των οχημάτων σε όλους τους συνδέσμους του δικτύου για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προσομοίωσης και υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (veh*h):

$$TWT = T \cdot \sum_k \sum_o [\omega_o(k)] \quad (2.17)$$

όπου $\omega_o(k)$ είναι η ουρά στο σύνδεσμο εισόδου o για το διακριτό χρόνο k η οποία έχει προκύψει εξαιτίας κυκλοφοριακής συμφόρησης.

- **Συνολικός Χρόνος Παραμονής** (Total Time Spent), υπολογίζεται ως το άθροισμα του Συνολικού Χρόνου Διαδρομής και του Συνολικού Χρόνου Αναμονής (veh*h):

$$TTS = TTT + TWT \quad (2.18)$$

- **Συνολική Διανυθείσα Απόσταση** (Total Traveled Distance), εκφράζει το άθροισμα των διανυομένων αποστάσεων από όλα τα αυτοκίνητα κατά τη διάρκεια προσομοίωσης για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα και υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (veh*km):

$$TTD = T \cdot \sum_k \sum_m \sum_i [q_{m,i}(k) \cdot L_m] \quad (2.19)$$

- **Συνολική Κατανάλωση Καυσίμων** (Total Fuel Consumption), εκφράζει την ποσότητα των καυσίμων που καταναλώνεται από τα οχήματα καθώς αυτά κινούνται μέσα στο δίκτυο και υπολογίζεται από τη σχέση (veh*lt):

$$TFC = \sum_k \frac{T}{100} \sum_m \sum_i \kappa_1(k) \quad (2.20)$$

με

$$\kappa_1(k) = \begin{cases} q_{m,i}(k) \cdot L_m \left(4.49 + \frac{122}{v_{m,i}(k)} + 0.0016(v_{m,i}(k) - 60)^2 \right) & \text{αν } v_{m,i}(k) > 60 \\ q_{m,i}(k) \cdot L_m \left(4.49 + \frac{122}{v_{m,i}(k)} \right) & \text{αν } v_{m,i}(k) < 60 \end{cases} \quad (2.21)$$

Οι σχέσεις (2.20)–(2.21) βασίζονται στην [25].

Η προτεινόμενη μεθοδολογία

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η στρατηγική ελέγχου TUC καθώς και οι μετατροπές που έγιναν σε αυτή στην παρούσα εργασία. Στις §3.1 και §3.2 αναλύεται η λειτουργία της στρατηγικής με το ενδιαφέρον να εστιάζεται κυρίως στο τμήμα του ελέγχου της διάρκειας των φάσεων, το οποίο περιγράφεται λεπτομερώς. Στην §3.3 παρουσιάζεται η μεθοδολογία που διερευνήθηκε στην παρούσα διατριβή. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται ο νέος κανόνας ελέγχου Εξισορρόπησης της Ζήτησης, ο υβριδικός αλγόριθμος ελέγχου που αναπτύχθηκε καθώς και μια επέκταση που έγινε στις εξισώσεις του κανόνα ελέγχου λόγω παρατηρήσεων κατά την εφαρμογή της στρατηγικής στο πεδίο.

3.1 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, 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. Μια επιπλέον επέκταση που έχει σήμερα η στρατηγική είναι αυτή της παροχής προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς.

3.2 Η δομή της στρατηγικής TUC

3.2.1 Εισαγωγή

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 σηματοδοτούμενες 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 που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια και αποστέλλουν τις αποφάσεις ελέγχου 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 τότε 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 ότι οι κυκλοφοριακές συνθήκες σε κάθε υποδίκτυο δεν επηρεάζουν σημαντικά τις κυκλοφοριακές συνθήκες στα άλλα υποδίκτυα, ενώ υπάρχει μεγάλη συσχέτιση και αλληλεπίδραση μεταξύ των διασταυρώσεων μέσα σε κάθε υποδίκτυο. Αυτό συμβαίνει στο αστικό δίκτυο του Southampton που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, το οποίο χωρίζεται σε δύο υποδίκτυα. Κάθε υποδίκτυο παρουσιάζεται μέσω ενός γραφήματος με συνδέσμους $z \in Z$ όπου Z είναι το σύνολο όλων των συνδέσμων που αποτελούν τις κατευθύνσεις που έχουν την ίδια στιγμή προτεραιότητα, και διασταυρώσεων $j \in J$ 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), το οποίο αποτελεί και το αντικείμενο έρευνας της παρούσας εργασίας.

3.2.2 Έλεγχος διάρκειας των φάσεων

Όπως προαναφέρθηκε, 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 σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις για δεδομένη περίοδο και διαφορά χρόνων έναρξης πρασίνου διαδοχικών διασταυρώσεων. Τα αποτελέσματα

όσον αφορά τις 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 (τα στάδια αυτά λαμβάνονται υπόψη στην επέκταση της μοντελοποίησης του Κανόνα Εξισορρόπησης της Ζήτησης στην §3.3.4).

Η στρατηγική TUC τροποποιεί μόνο τα μεταβλητά στάδια και πιο συγκεκριμένα τη διάρκεια του πράσινου 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:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in F_j} g_{j,i} + L_j &= C_j \\ g_{j,i,\min} &\leq g_{j,i} \leq g_{j,i,\max} \end{aligned} \quad \forall j \in J \quad (3.1)$$

όπου:

$g_{j,i}$ είναι η διάρκεια του πράσινου του σταδίου $i \in F_j$ της διασταύρωσης j ,

$g_{j,i,\min}$ είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη διάρκεια του πράσινου του σταδίου $i \in F_j$ της διασταύρωσης j ,

$g_{j,i,\max}$ είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη διάρκεια του πράσινου 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 προβλήματος που απορρέει από το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στην §2.2.2 και σκοπό έχει τον υπολογισμό των νέων χρόνων πράσινου για τα μεταβλητά στάδια $i \in F_j$ των διασταυρώσεων $j \in J$:

$$g(k) = g^N - Lx'(k) \quad (3.2)$$

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 υπολογισμός του πίνακα L αποτελεί το υπολογιστικό αποτέλεσμα του προβλήματος LQ και απαιτεί πολύ χρόνο για δίκτυα μεγάλου μεγέθους. Εν τούτοις, αυτοί οι υπολογισμοί δεν γίνονται σε πραγματικό χρόνο αλλά μια φορά για κάθε δίκτυο, ενώ οι υπολογισμοί σε πραγματικό χρόνο περιορίζονται στην εκτέλεση του νόμου (3.2) με σταθερό πίνακα L και μετρήσεις κατάστασης $x_z \forall j \in J$.

Ο νόμος ελέγχου (3.2) 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 (3.2), 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 εμμέσως μέσω της χρήσης φωρατών.

Καθώς ο κανόνας ελέγχου (3.2) δεν λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς ελέγχου (3.1), θα πρέπει οι υπάρχοντες περιορισμοί να εφαρμοστούν μετά την εκτέλεση του κανόνα ελέγχου (3.2). 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 (3.2). Αυτό πραγματοποιείται ως ακολούθως:

Δεδομένων των $G_{j,i}$ που έχουν προκύψει από την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου (2.2), να βρεθούν τα $g_{j,i} \forall i \in F_j$ έτσι ώστε:

$$\varphi = \frac{1}{2} \sum_{i \in F_j} \frac{(g_{j,i} - G_{j,i})^2}{G_{j,i}} \rightarrow \text{Min} \quad (3.3)$$

δεδομένων των περιορισμών:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in F_j} g_{j,i} + L_j &= C_j \\ g_{j,i,\min} &\leq g_{j,i} \leq g_{j,i,\max} \end{aligned} \quad (3.4)$$

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 (3.3)–(3.4) 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 νόμος ελέγχου (3.2) απαιτεί την ύπαρξη 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).

Στην παρούσα εργασία το τμήμα ελέγχου της διάρκειας των φάσεων της TUC τροποποιείται, καθώς προτείνεται ένας νέος κανόνας ελέγχου ο οποίος λειτουργεί σε συνεργασία με τον κανόνα 3.2 (σύμφωνα με τον αλγόριθμο που περιγράφεται στην §3.5), ενώ παράλληλα οι τιμές πρασίνων που υπολογίζει χρησιμοποιούνται σαν g^N στον κανόνα LQ (σε πραγματικό χρόνο).

3.3 Η επέκταση της στρατηγικής TUC

3.3.1 Εισαγωγή

Όπως έχει προαναφερθεί, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε ένας καινούριος κανόνας ελέγχου, ο οποίος ενσωματώθηκε στο λογισμικό της στρατηγικής TUC με σκοπό να βελτιώσει την απόδοσή της. Ο κανόνας αυτός εφαρμόζεται σε κάθε κόμβο $j \in J$ του δικτύου ο οποίος βρίσκεται σε κατάσταση ακόρεστης κυκλοφορίας και μοιράζει με βέλτιστο τρόπο το συνολικό χρόνο ενεργού πρασίνου στο σύνολο των F_j σταδίων του κόμβου.

Αποδεικνύεται μαθηματικά πως η βέλτιστη αυτή διαχείριση του χρόνου $C_j - L_j$ μεγιστοποιεί τη συνολική χωρητικότητα της ελεγχόμενης διασταύρωσης. Ωστόσο, ο έλεγχος που εφαρμόζεται είναι τοπικός (κάθε αστικός κόμβος ελέγχεται χωριστά) και δεν λαμβάνεται υπόψη η συνολική κυκλοφοριακή κατάσταση του δικτύου. Άλλο ένα αρνητικό στοιχείο του νέου κανόνα είναι ότι εξ' ορισμού δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κόμβους στους οποίους υπάρχουν κορεσμένες κυκλοφοριακές συνθήκες. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους:

- Όταν σε κάποιο αστικό κόμβο εμφανίζονται φαινόμενα κυκλοφοριακής συμφόρησης (αρχίζουν να αποθηκεύονται οχήματα στους συνδέσμους), δεν μπορούν να διαλυθούν με τοπικό έλεγχο αλλά απαιτείται συντονισμός με τους γειτονικούς κόμβους.
- Όταν οι ουρές των συνδέσμων αρχίζουν να μεγαλώνουν σε μήκος τότε υπερκαλύπτουν τη θέση των φωρατών στο οδόστρωμα και οι μετρήσεις που παίρνουμε δεν αφορούν τη ροή των οχημάτων (ζήτηση), αλλά την ουρά του κάθε συνδέσμου.

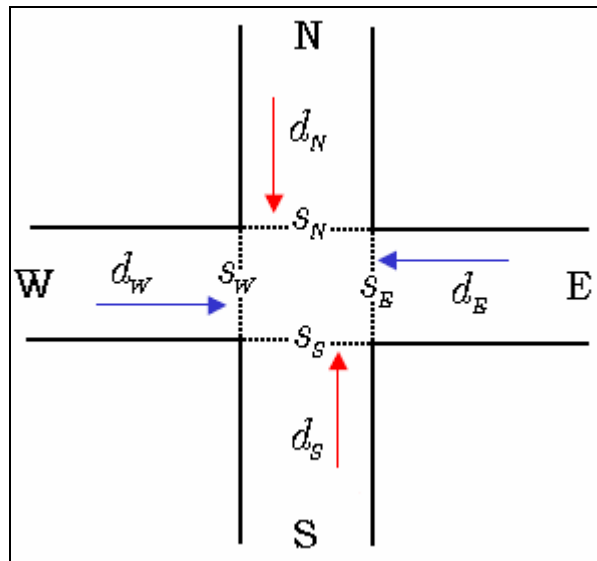
Παρά τα δύο αυτά μειονεκτήματα, όταν ένας κόμβος βρίσκεται σε συνθήκες ακόρεστης κυκλοφορίας και οι μετρήσεις της ροής των οχημάτων για όλους τους συνδέσμους είναι ακριβείς, τότε ο κανόνας Εξισορρόπησης της Ζήτησης εφαρμόζει βέλτιστο έλεγχο στη συγκεκριμένη σηματοδοτούμενη διασταύρωση, ενώ παράλληλα παρέχει στον κανόνα ελέγχου LQ τις ονομαστικές τιμές για τα πράσινα όλων των σταδίων $i \in F_j$ όποτε αυτές χρειάζονται. Επίσης, οι τιμές αυτές υπολογίζονται σε πραγματικό χρόνο, γεγονός θετικό, καθώς οι ονομαστικές τιμές πρασίνων που χρησιμοποιούνται από τον κανόνα LQ μεταβάλλονται δυναμικά σύμφωνα με τις τρέχουσες κυκλοφοριακές συνθήκες της διασταύρωσης.

Μέχρι τώρα, η στρατηγική ελέγχου TUC χρειαζόταν μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, μόνο για το ποσοστό κατάληψης (occupancy data) σε κάθε σύνδεσμο του δικτύου. Μετά την επέκταση της παρούσας διατριβής, απαιτείται πλέον και η γνώση της ροής οχημάτων (flow data) κάθε συνδέσμου. Για τον υπολογισμό της διάρκειας των φάσεων ο κανόνας ελέγχου LQ χρησιμοποιεί τις μετρήσεις ποσοστού κατάληψης που παρέχονται σε κάθε περίοδο σηματοδότησης, ενώ ο κανόνας Εξισορρόπησης της Ζήτησης τις αντίστοιχες μετρήσεις ροής (ή ζήτησης).

3.3.2 Ο κανόνας εξισορρόπησης της ζήτησης (Balance of Demand)

Ο κανόνας αυτός, είναι γνωστός σαν **Webster Formula** και στηρίζεται στη Θεωρία Ουρών Αναμονής (Queueing Theory). Έχει εφαρμοστεί κατά καιρούς σε πολλά αστικά δίκτυα για τον υπολογισμό των πρασίνων σε fixed-time πλάνα σηματοδότησης καθώς και σε απομονωμένες διασταυρώσεις δικτύων που διαθέτουν αυτόματα συστήματα ελέγχου της κυκλοφορίας. Πουθενά όμως στη βιβλιογραφία δεν αναφέρεται η εφαρμογή του σε συστήματα ελέγχου σηματοδότησης πραγματικού χρόνου. Η μαθηματική λογική του κανόνα Εξισορρόπησης της Ζήτησης (BD) είναι απλή. Ας δούμε ένα απλό παράδειγμα που θα βοηθήσει στην καλύτερη κατανόησή της.

Έστω ότι έχουμε την αστική διασταύρωση του Σχήματος 3.1, στην οποία υπάρχουν δύο μεταβλητά στάδια σηματοδότησης. Στο πρώτο στάδιο έχουν προτεραιότητα οι σύνδεσμοι W και E ενώ στο δεύτερο λαμβάνουν προτεραιότητα



Σχήμα 3.1: Ο κανόνας BD σε μία απλή διασταύρωση.

οι σύνδεσμοι N, S. Θεωρούμε ότι σε κάθε περίοδο σηματοδότησης C (sec) ο κάθε σύνδεσμος W, E, N, S έχει ζήτηση d_W, d_E, d_N, d_S (οχήματα/ώρα, μετρούμενη π.χ. με φωρατές), ενώ οι σταθερές ροές κορεσμού του κάθε συνδέσμου είναι s_W, s_E, s_N, s_S (οχήματα/ώρα) αντίστοιχα. Ο ενεργός χρόνος πρασίνου που μπορεί να μοιραστεί στα δύο στάδια σύμφωνα με την εξίσωση (3.1) είναι $C - L$. Μπορούμε λοιπόν για τον κόμβο αυτό να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

- Ο ρυθμός άφιξης των οχημάτων για την τρέχουσα περίοδο σηματοδότησης σε κάθε σύνδεσμο του κόμβου είναι d (οχήματα/ώρα).
- Ο μέσος ρυθμός εξόδου των οχημάτων για την τρέχουσα περίοδο σε κάθε σύνδεσμο του κόμβου είναι $\frac{g \cdot s}{C}$ (οχήματα/ώρα), όπου g ο χρόνος πρασίνου (sec) του σταδίου στο οποίο έχει προτεραιότητα ο αντίστοιχος σύνδεσμος.
- Το πηλίκο $\frac{d}{\frac{g \cdot s}{C}}$ είναι ένας αριθμός που δείχνει το βαθμό κορεσμού για την

τρέχουσα περίοδο σε κάθε σύνδεσμο του κόμβου.

Αν ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος του 1 αυτό σημαίνει πως όλα τα αυτοκίνητα που εισέρχονται στο συγκεκριμένο σύνδεσμο στη διάρκεια της τρέχουσας περιόδου προλαβαίνουν να εξέλθουν από αυτόν κατά τη διάρκεια της φάσης που

λαμβάνει προτεραιότητα (ακόρεστη κατάσταση), ενώ στην αντίθετη περίπτωση (όταν ο λόγος είναι μεγαλύτερος του 1) δεν προλαβαίνουν όλα τα αυτοκίνητα να εξέλθουν από το σύνδεσμο και αποθηκεύονται στην ουρά του συνδέσμου περιμένοντας το πράσινο της επόμενης περιόδου (κορεσμένη κατάσταση).

Αν λοιπόν στο παράδειγμα του Σχήματος 3.1 υπολογίσουμε το λόγο αυτό για κάθε έναν από τους συνδέσμους, έχουμε ένα πηλίκο που μας δείχνει τον κυκλοφοριακό φόρτο στον κάθε σύνδεσμο και εξαρτάται από τη διάρκεια του χρόνου πρασίνου που λαμβάνει. Για να μεγιστοποιήσουμε, λοιπόν, τη συνολική χωρητικότητα του κόμβου δεν έχουμε παρά να εξισώσουμε όλα αυτά τα πηλίκια, δηλαδή:

$$\frac{d_W}{\frac{g_1}{C} s_W} = \frac{d_E}{\frac{g_1}{C} s_E} = \frac{d_N}{\frac{g_2}{C} s_N} = \frac{d_S}{\frac{g_2}{C} s_S} \quad (3.5)$$

Επειδή τα ζευγάρια των συνδέσμων W, E, και N, S λαμβάνουν προτεραιότητα στο ίδιο στάδιο, αρκεί να λάβουμε υπόψη μας αυτό με το μεγαλύτερο πηλίκο (κυκλοφοριακό φόρτο) και τότε έχουμε:

$$\begin{aligned} \arg \max \left\{ \frac{d_W}{\frac{g_1}{C} s_W}, \frac{d_E}{\frac{g_1}{C} s_E} \right\} &= \arg \max \left\{ \frac{d_W}{s_W}, \frac{d_E}{s_E} \right\} \\ \arg \max \left\{ \frac{d_N}{\frac{g_2}{C} s_N}, \frac{d_S}{\frac{g_2}{C} s_S} \right\} &= \arg \max \left\{ \frac{d_N}{s_N}, \frac{d_S}{s_S} \right\} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση 3.1 καθώς και τις 3.5–3.6 εύκολα, μετά από μερικές πράξεις, υπολογίζουμε τα πράσινα των δύο σταδίων του κόμβου τα οποία εξισορροπούν τις ζητήσεις (ροή οχημάτων) των πιο φορτωμένων συνδέσμων του κάθε σταδίου. Αυτά είναι:

$$g_1 = \frac{d_W/s_W}{d_W/s_W + d_N/s_N} (C - L) \quad (3.7)$$

$$\text{και } g_2 = \frac{d_N/s_N}{d_W/s_W + d_N/s_N} (C - L) \quad (3.8)$$

στην περίπτωση που οι σύνδεσμοι με τα μεγαλύτερα πηλίκια κορεσμού για κάθε στάδιο είναι οι W, N. Αν είναι κάποιοι άλλοι οι εξισώσεις αυτές μεταβάλλονται αντίστοιχα.

Για τις σχέσεις (3.7)–(3.8) μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

- Ο κανόνας ελέγχου BD (Εξισορρόπησης της Ζήτησης) μοιράζει αναλογικά το συνολικό ενεργό πράσινο $C - L$ του κόμβου στα δύο στάδια, σύμφωνα με τη ζήτηση αλλά και την ικανότητα εξυπηρέτησης των συνδέσμων κάθε σταδίου που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο κυκλοφοριακό φόρτο.
- Όσο μεγαλύτερο είναι το πηλίκο d/s κάποιου σταδίου, τόσο μεγαλύτερη είναι και η διάρκεια πρασίνου (επί του συνολικού πρασίνου του κόμβου) που προκύπτει από τον κανόνα BD για το στάδιο αυτό.
- Δεδομένου ότι ο κανόνας ελέγχου BD χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις ακόρεστων κυκλοφοριακών συνθηκών (όπου η ζήτηση σε όλους τους συνδέσμους του κόμβου μπορεί να εξυπηρετηθεί από το συνολικό χρόνο πρασίνου), οι εξισώσεις (3.7)–(3.8) μοιράζουν το χρόνο σε κάθε στάδιο έτσι ώστε:
 - (i) να εξυπηρετηθεί η ζήτηση σε όλους τους συνδέσμους που λαμβάνουν προτεραιότητα στο στάδιο, και
 - (ii) ο ενωμένων χρόνος (πέρα από την κάλυψη της ζήτησης) να μοιραστεί σε κάθε στάδιο ανάλογα με την ικανότητα εξυπηρέτησης του πιο “φορτωμένου” κυκλοφοριακά συνδέσμου του.

Στην γενική περίπτωση όπου έχουμε έναν κόμβο με n στάδια οι χρόνοι πρασίνου του κάθε σταδίου υπολογίζονται ως εξής. Θέλουμε:

$$\frac{d_1}{\frac{g_1}{C} s_1} = \frac{d_2}{\frac{g_2}{C} s_2} = \dots = \frac{d_i}{\frac{g_i}{C} s_i} = \dots = \frac{d_n}{\frac{g_n}{C} s_n}$$

δηλαδή:

$$\frac{d_1}{g_1 s_1} = \frac{d_2}{g_2 s_2} = \dots = \frac{d_i}{g_i s_i} = \dots = \frac{d_n}{g_n s_n}$$

επίσης ισχύει:

$$C - L = g_1 + g_2 + \dots + g_i + \dots + g_n$$

από τις δύο τελευταίες σχέσεις προκύπτει:

$$g_j = \frac{d_j/s_j}{\sum_{j=1}^n d_j/s_j} (C - L), \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (3.9)$$

όπου d_j/s_j είναι το μέγιστο από τα πηλίκα όλων των συνδέσμων που έχουν

προτεραιότητα στο στάδιο j . Στην περίπτωση που κάποιος σύνδεσμος z λαμβάνει προτεραιότητα σε περισσότερα από ένα στάδια ($u_z > 1$), τότε ορίζεται ένα “κυρίαρχο” στάδιο και στη μοντελοποίηση του κανόνα ελέγχου BD λαμβάνεται υπόψη μόνο στο στάδιο αυτό. Αντίστοιχα, η ζήτηση d_z του συνδέσμου που μετριέται σε πραγματικό χρόνο μεταβάλλεται, έτσι ώστε να συμβαδίζει με τη μοντελοποίηση αυτή, σύμφωνα με τη σχέση:

$$d_z = d_z \frac{g_z}{\sum_{i \in u_z} g_i} \quad (3.10)$$

όπου g_z η διάρκεια του πρασίνου του “κυρίαρχου” σταδίου και $\sum_{i \in u_z} g_i$ η συνολική διάρκεια πρασίνου του συνδέσμου z (για όλα τα στάδια που λαμβάνει προτεραιότητα), όπως αυτές υπολογίστηκαν από τη στρατηγική TUC κατά την προηγούμενη περίοδο σηματοδότησης.

Μέσω της σχέσης (3.9) επιτυγχάνεται η βέλτιστη διαχείριση του πρασίνου σε κάποιον κόμβο (Split Control Module), όταν από την στρατηγική TUC έχει αποφασιστεί ότι στον συγκεκριμένο κόμβο πρέπει να εφαρμοστεί ο κανόνας ελέγχου Εξισορρόπησης της Ζήτησης (BD). Στη συνέχεια οι τιμές των πρασίνων που υπολογίστηκαν εισέρχονται στη συνάρτηση ελέγχου των περιορισμών (σχέσεις 3.3–3.4) για να αποκλειστούν πιθανές μη επιτρεπτές τιμές ελέγχου.

3.3.3 Ο αλγόριθμος συνεργασίας των κανόνων BD και LQ

Η νέα έκδοση της στρατηγικής TUC έχει μια υβριδική μορφή ελέγχου καθώς οι δύο κανόνες που περιγράφηκαν στις §3.2.2 και 3.3.2 εναλλάσσονται μεταξύ τους σε κάθε ελεγχόμενο κόμβο ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες κυκλοφορίας. Αρχικά, ο αλγόριθμος που καθορίζει ποιος από τους δύο κανόνες θα εφαρμοστεί σε κάθε κόμβο και σε κάθε περίοδο σηματοδότησης είχε την ακόλουθη δομή:

Βήμα 1: Για τους πρώτους 10 κύκλους εφάρμοσε τον κανόνα ελέγχου BD σε όλους τους κόμβους του δικτύου.

Βήμα 2: Μετά τον δέκατο κύκλο εφάρμοσε τα βήματα 3–5 του αλγορίθμου για κάθε ελεγχόμενο κόμβο $j \in J$.

Βήμα 3: Υπολόγισε για κάθε σύνδεσμο z που εισέρχεται στον κόμβο το πηλίκο

$$\frac{x_z(k)}{x_{z,\max}}$$

$z \in Z$ για το συγκεκριμένο κύκλο και $x_{z,\max}$ είναι η ικανότητα αποθήκευσης οχημάτων του συνδέσμου.

Βήμα 4: Αν στον προηγούμενο κύκλο ο κανόνας ελέγχου που εφαρμόστηκε στον συγκεκριμένο κόμβο ήταν ο BD έλεγξε για όλους τους συνδέσμους αν

$$\frac{x_z(k)}{x_{z,\max}} \leq \text{threshold1}.$$

Αν έστω και ένας σύνδεσμος δεν ικανοποιεί την ανισότητα τότε εφάρμοσε στον κόμβο αυτό τον κανόνα LQ. Αλλιώς εφάρμοσε τον κανόνα ελέγχου BD.

Βήμα 5: Αν στον προηγούμενο κύκλο ο κανόνας ελέγχου που εφαρμόστηκε στον συγκεκριμένο κόμβο ήταν ο LQ έλεγξε για όλους τους συνδέσμους αν

$$\frac{x_z(k)}{x_{z,\max}} \leq \text{threshold2}.$$

Αν έστω και ένας σύνδεσμος δεν ικανοποιεί την ανισότητα τότε εφάρμοσε στον κόμβο αυτό τον κανόνα LQ. Αλλιώς εφάρμοσε τον κανόνα ελέγχου BD.

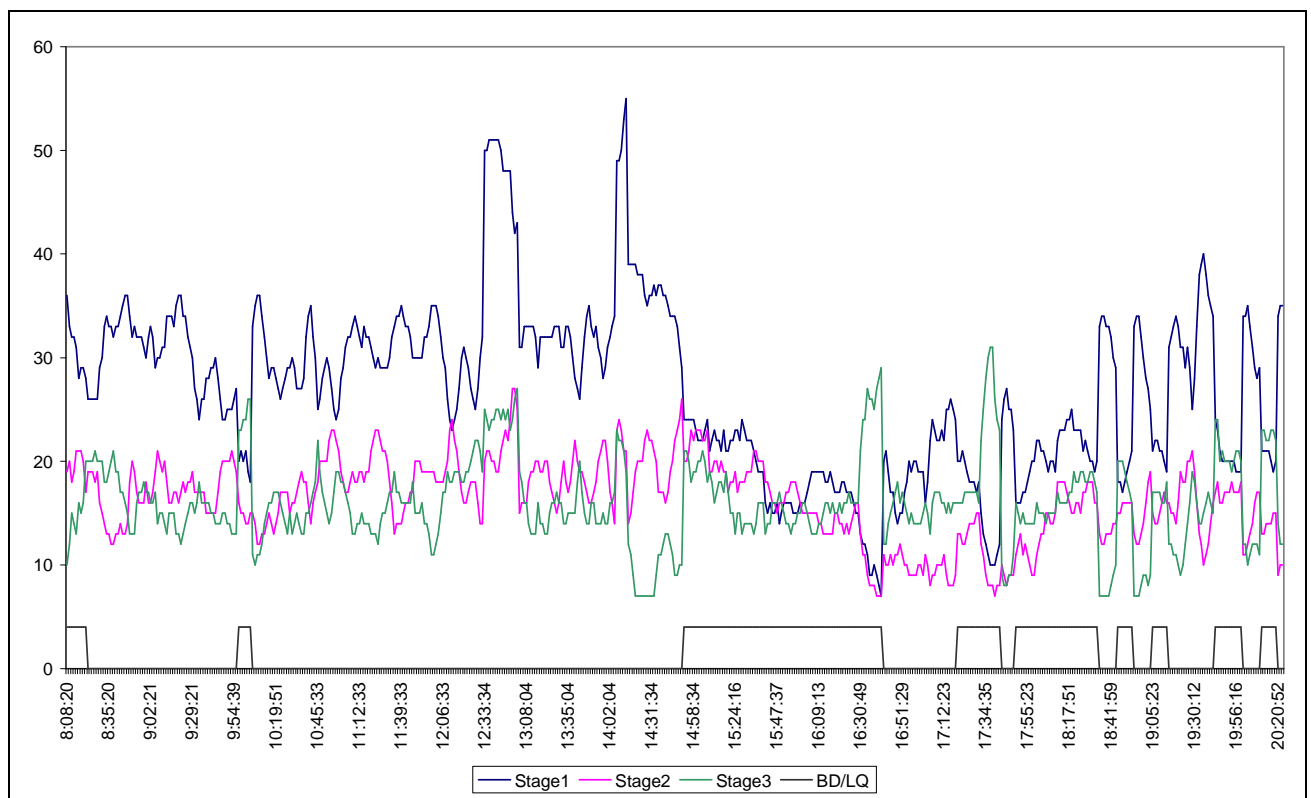
Στον αλγόριθμο παρατηρούμε πως η επιλογή του κανόνα ελέγχου που θα εφαρμοστεί σε κάθε ελεγχόμενο κόμβο την τρέχουσα περίοδο, εξαρτάται από το ποιος κανόνας εφαρμόστηκε στον κόμβο αυτό την προηγούμενη περίοδο σηματοδότησης. Τα όρια *threshold1* και *threshold2* χρησιμοποιήθηκαν έτσι ώστε να υπάρχει μια υστέρηση (hysteresis) στην εναλλαγή των δύο κανόνων και να μην υπάρχει συχνή αλλαγή στον εφαρμοζόμενο έλεγχο (switching) από τη στρατηγική TUC, καθώς αυτό επιδρά αρνητικά στην κυκλοφορία του κόμβου. Τα όρια αυτά μπορούν να οριστούν στα αρχεία εισόδου της στρατηγικής TUC για κάθε σύνδεσμο $z \in Z$ του δικτύου ξεχωριστά. Στην εφαρμογή της παρούσας εργασίας οι τιμές των ορίων τέθηκαν 0.5 και 0.3 αντίστοιχα.

Δεδομένων αυτών των τιμών, έγινε μια προσπάθεια να οριστούν η κορεσμένη και η ακόρεστη κατάσταση της κυκλοφορίας σε κάποιο κόμβο. Ωστόσο μετά την εφαρμογή της στρατηγικής TUC στο πεδίο παρουσιάστηκε το εξής πρόβλημα: Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο συνεργασίας των κανόνων BD και LQ με τη μορφή

που παρουσιάστηκε παραπάνω, υπήρχαν περιπτώσεις περιόδων σηματοδότησης στις οποίες σε κάποιες διασταυρώσεις εφαρμόζοταν ο κανόνας BD, ενώ ο κυκλοφοριακός φόρτος της διασταύρωσης βρισκόταν σε κορεσμένη κατάσταση (γεγονός που εκ του ορισμού του κανόνα δεν θα έπρεπε να συμβαίνει).

Ας δούμε ένα παράδειγμα που θα κάνει πιο ξεκάθαρο το πρόβλημα αυτό. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η εφαρμογή του υβριδικού αλγορίθμου στο δίκτυο των Χανίων την Τετάρτη 08/03/2006. Πιο συγκεκριμένα, στο γράφημα αυτό παρουσιάζονται οι διάρκειες των πρασίνων (sec) για τα 3 στάδια του κόμβου j5 για τις ώρες 8:00–20:00. Στο κάτω μέρος του διαγράμματος φαίνεται ποιος κανόνας εφαρμόζοταν από τη στρατηγική TUC καθ' όλη τη διάρκεια εφαρμογής (σύμφωνα με τη συνθήκη των βημάτων 4 και 5 του αλγορίθμου). Στα κομμάτια του γραφήματος που η ευθεία ταυτίζεται με τον οριζόντιο άξονα εφαρμόζεται από τον αλγόριθμο ο κανόνας ελέγχου LQ, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ο κανόνας BD.

Τις απογευματινές ώρες 16:00–20:00 παρατηρείται το εξής αρνητικό φαινόμενο:



Σχήμα 3.2: Οι διάρκειες των πρασίνων (σε sec) για τα τρία στάδια του κόμβου j5.

Γίνεται συχνή εναλλαγή μεταξύ των δύο κανόνων ελέγχου της TUC (φαίνεται στο κάτω μέρος του γραφήματος), γεγονός που επηρεάζει τις διάρκειες των πρασίνων του πρώτου και του τρίτου σταδίου του κόμβου οι οποίες παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις.

Έπειτα από προσεκτική μελέτη των μετρήσεων της κυκλοφοριακής ροής των οχημάτων για τις παραπάνω ώρες στους συνδέσμους του κόμβου j5 (off-line προσομοίωση της στρατηγικής TUC στο εργαστήριο με τις μετρήσεις του πεδίου), καταλήξαμε στο εξής συμπέρασμα: όταν εφαρμόζεται ο υβριδικός αλγόριθμος με τη μορφή που παρουσιάστηκε παραπάνω δεν μπορούμε να είμαστε βέβαιοι για την κυκλοφοριακή κατάσταση του κόμβου, όταν αυτή βρίσκεται κοντά στα όρια κορεσμού. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος πρέπει να εισαχθεί στον αλγόριθμο ένας έλεγχος για την εισερχόμενη και εξερχόμενη ροή σε κάθε σύνδεσμο του κόμβου, καθώς ο αλγόριθμος με τη μορφή που παρουσιάστηκε ελέγχει μόνο την κατάληψη των συνδέσμων.

Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε σύνδεσμο και για κάθε περίοδο σηματοδότησης θα πρέπει να ελέγχεται εάν ισχύει η σχέση:

$$\frac{d_z}{\frac{G_z}{C} s_z} \leq 1 \quad (3.11)$$

όπου d_z η ζήτηση του συνδέσμου (οχήματα/ώρα), s_z η ροή κορεσμού του (οχήματα/ώρα) και G_z ο αποτελεσματικός χρόνος πρασίνου του συνδέσμου $z \in Z$, όπως αυτός ορίστηκε στο Κεφάλαιο 2 (σχέση (2.10)).

Αν αυτή η ανισότητα ικανοποιείται, τότε όλα τα οχήματα που εισέρχονται στο σύνδεσμο στη διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης προλαβαίνουν να εξέλθουν πριν από το πέρας αυτής και δεν αποθηκεύονται στην ουρά του συνδέσμου. Τότε και μόνον τότε υπάρχει η βεβαιότητα ότι η κυκλοφορία στο σύνδεσμο αυτό είναι σε μη κορεσμένη κατάσταση. Οπότε στον αλγόριθμο συνεργασίας των κανόνων BD και LQ όπου αναφέρεται η πρόταση “εφάρμοσε τον κανόνα ελέγχου BD” (βήματα 4 και 5), αυτή αντικαθίσταται από τον αλγόριθμο:

Βήμα 1.1: Εφάρμοσε τον κανόνα ελέγχου BD και υπολόγισε τις διάρκειες πρασίνων για κάθε στάδιο $i \in F_j$ του κόμβου.

Βήμα 1.2: Εφάρμοσε τον αλγόριθμο προβολής των περιορισμών έτσι ώστε οι διάρκειες πρασίνων που υπολογίστηκαν να τους ικανοποιούν.

Βήμα 1.3: Υπολόγισε για κάθε σύνδεσμο z που εισέρχεται στον κόμβο το πηλίκο

$$\frac{d_z}{\frac{G_z}{C} s_z}, \text{ χρησιμοποιώντας τα πράσινα που έχουν υπολογιστεί καθώς και}$$

τα σταθερά στάδια πρασίνων του κάθε συνδέσμου.

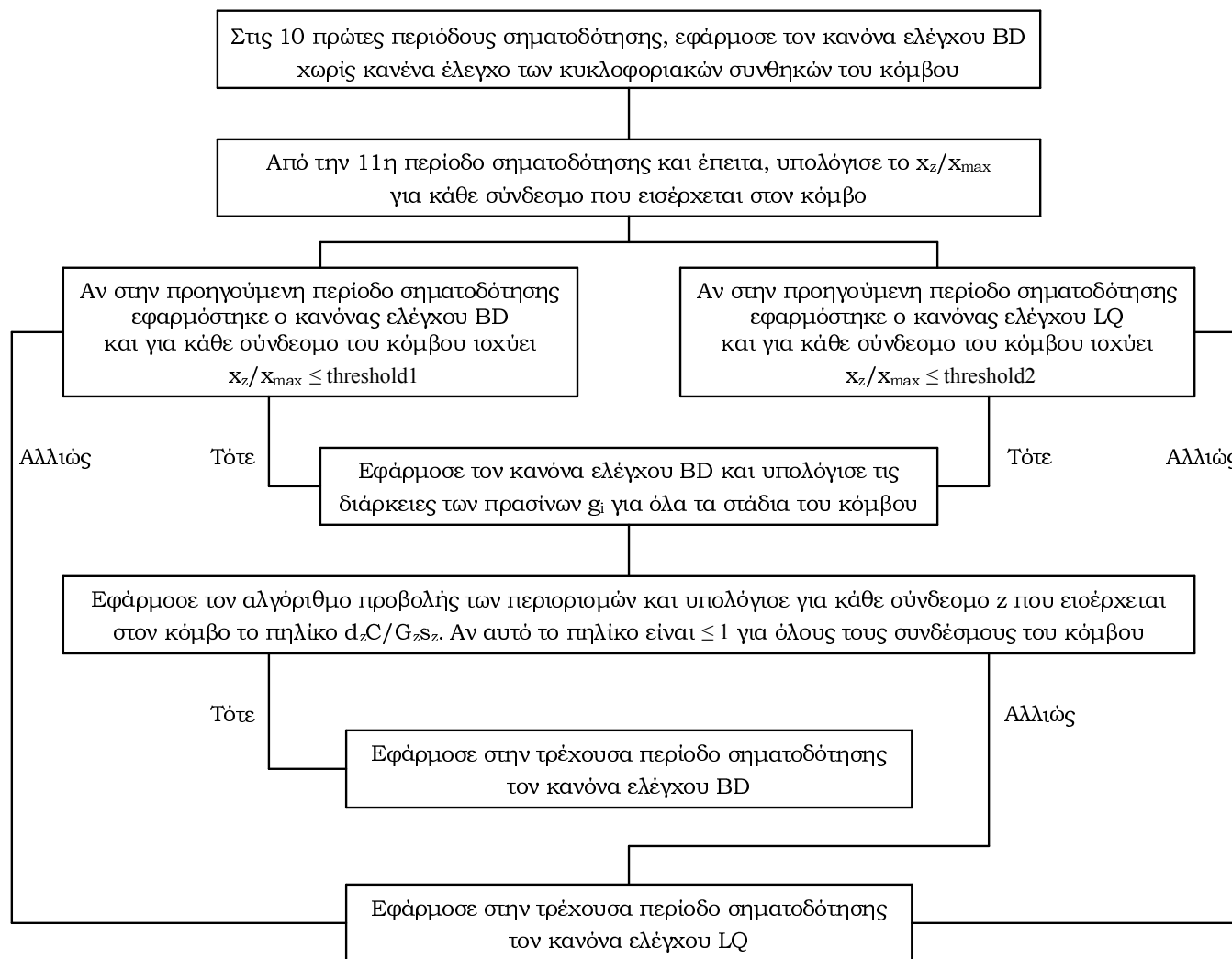
Βήμα 1.4: Αν αυτό το πηλίκο είναι ≤ 1 για όλους τους συνδέσμους του κόμβου τότε εφάρμοσε στον κόμβο αυτό τον κανόνα ελέγχου BD με τις διάρκειες πρασίνων που υπολογίστηκαν (κόμβος με ακόρεστη κυκλοφορία).

Βήμα 1.5: Αν αυτό το πηλίκο είναι >1 έστω και για έναν σύνδεσμο τότε εφάρμοσε στον κόμβο αυτό τον κανόνα ελέγχου LQ (κόμβος με κορεσμένη κυκλοφορία).

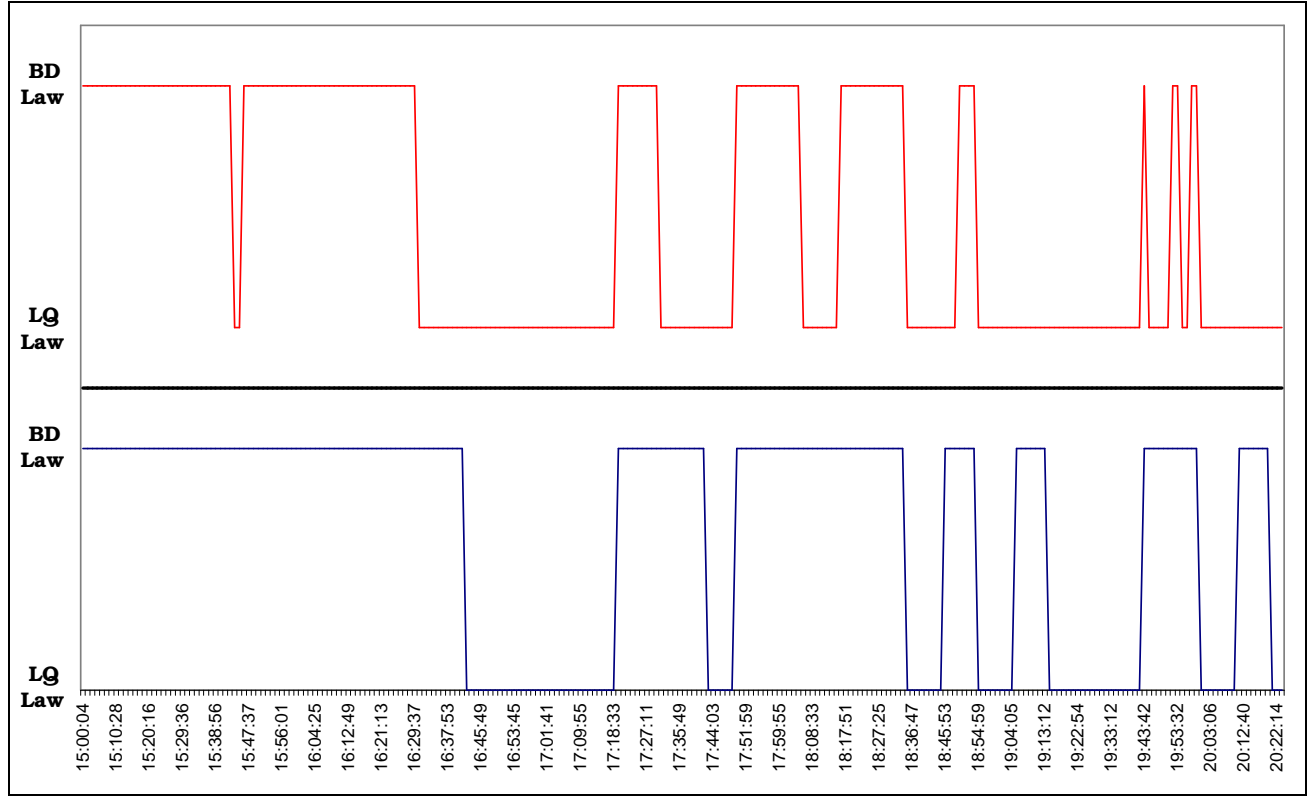
Στο Σχήμα 3.3 της επόμενης σελίδας παρουσιάζεται η τελική μορφή του υβριδικού αλγορίθμου. Σύμφωνα με τους ελέγχους που παρουσιάζονται στο διάγραμμα αυτό, η στρατηγική TUC αποφασίζει ποιος από τους δύο κανόνες ελέγχου θα εφαρμοστεί για την τρέχουσα περίοδο, σε κάθε σηματοδοτούμενο κόμβο ξεχωριστά.

Αν εφαρμοστεί ο αλγόριθμος με αυτή τη δομή σε όλους τους κόμβους του δικτύου τότε ο κανόνας ελέγχου BD ενεργοποιείται μόνο όταν οι κυκλοφοριακές συνθήκες το επιτρέπουν, ενώ σε διαφορετική περίπτωση εφαρμόζεται ο κανόνας ελέγχου LQ. Στο Σχήμα 3.4 βλέπουμε ποιος κανόνας έτρεχε στο δίκτυο των Χανίων τις ώρες που παρουσιάστηκε το πρόβλημα (15:00–20:00). Στο κάτω μέρος του γραφήματος (μπλε γραμμή) παρουσιάζεται ποιος κανόνας έτρεχε στην πραγματικότητα την Τετάρτη 08/03/2006 με την αρχική μορφή του υβριδικού αλγορίθμου, ενώ από πάνω (κόκκινη γραμμή) φαίνεται η απόφαση της TUC για το ποιος κανόνας θα εφαρμοστεί όταν προστέθηκαν στον αλγόριθμο τα βήματα 1.1–5.1 και εφαρμόστηκε off-line για τα ίδια δεδομένα.

Αυτό που παρατηρούμε στο Σχήμα 3.4 για την Τετάρτη 08/03/2006, είναι πως υπάρχουν περίοδοι εφαρμογής της στρατηγικής, κατά τις οποίες στον κόμβο j5



Σχήμα 3.3: Τελική μορφή του υβριδικού αλγορίθμου.



Σχήμα 3.4: Συγκριτικό διάγραμμα για την εφαρμογή του υβριδικού αλγορίθμου.

δικτύου εφαρμοζόταν ο κανόνας ελέγχου BD, παρόλο που σύμφωνα με τον κυκλοφοριακό φόρτο των συνδέσμων του κόμβου θα έπρεπε να εφαρμόζεται ο κανόνας LQ. Αυτό συνέβηκε διότι δεν υπήρχε ο έλεγχος (3.11) στους συνδέσμους του κόμβου με αποτέλεσμα να διαταραχτεί το σύστημα, παρουσιάζοντας πολύ συχνή μεταπήδηση της στρατηγικής από τον ένα κανόνα στον άλλο και αντίστοιχες διακυμάνσεις στις διάρκειες των πρασίνων, γεγονός που όπως προαναφέρθηκε επιδρά αρνητικά στο ελεγχόμενο σύστημα.

3.3.4 Επέκταση του κανόνα BD

Στη σχέση (2.10) της §2.2.2 παρουσιάζεται ο συνολικός αποτελεσματικός χρόνος πρασίνου G_z που λαμβάνει κάθε σύνδεσμος $z \in Z$. Αντίθετα, στην αρχική μοντελοποίηση που έγινε για τον κανόνα ελέγχου BD, ο χρόνος πρασίνου g που εμφανίζεται (σχέση (3.5)) αναφέρεται στο μεταβλητό χρόνο $\sum_{i \in U_z} g_{N,i}(k)$ της σχέσης (2.10) και δεν λαμβάνει υπόψη το σταθερό χρόνο πρασίνου e_z του κάθε

συνδέσμου z . Οι χρόνοι πρασίνου e_z είναι σταθεροί χρόνοι που δεν μπορούν να μεταβληθούν από τη στρατηγική ελέγχου. Ωστόσο, εφόσον για κάποιο δίκτυο είναι γνωστοί, μπορούν να ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό των χρόνων των μεταβλητών σταδίων. Οι εξισώσεις του κανόνα ελέγχου BD μπορούν να επεκταθούν και να χρησιμοποιούν για τον υπολογισμό των χρόνων g και τους σταθερούς χρόνους e_z .

Πρέπει λοιπόν και στη σχέση (3.5), η οποία χρησιμοποιείται στον κανόνα BD για την εξαγωγή του βέλτιστου ελέγχου της διάρκειας των φάσεων (Split Control), να χρησιμοποιηθεί ο αποτελεσματικός χρόνος πρασίνου του κάθε συνδέσμου όπως περιγράφεται στη σχέση (2.10). Αυτό θα τροποποιήσει τις εξισώσεις (3.6)–(3.9) που αναπτύχθηκαν στην §3.3.2 και θα βελτιώσει τα αποτελέσματα του ελέγχου της σχέσης (3.9), δημιουργώντας ένα πιο ρεαλιστικό μαθηματικό μοντέλο ελέγχου για το νόμο BD.

Οι σταθεροί χρόνοι πρασίνου e_z του κάθε συνδέσμου $z \in Z$ μπορούν να εισέλθουν στη μοντελοποίηση της κυκλοφοριακής ροής που οδήγησε στη σχέση (3.5) με δύο τρόπους (στη γενική περίπτωση όπου εξετάζουμε ένα κόμβο με n μεταβλητά στάδια πρασίνου):

- (i) Θεωρώντας ότι ο ρυθμός άφιξης των οχημάτων για την τρέχουσα περίοδο σηματοδότησης σε κάθε σύνδεσμο του κόμβου δεν είναι d_z αλλά $d_z - \frac{e_z s_z}{C}$ (οχήματα/ώρα), αφαιρώντας τη ζήτηση που θα εξυπηρετηθεί κατά τη διάρκεια του σταθερού χρόνου πρασίνου e_z του συνδέσμου, ή εναλλακτικά,
- (ii) θεωρώντας ότι ο μέσος ρυθμός εξόδου των οχημάτων για την τρέχουσα περίοδο σε κάθε σύνδεσμο του κόμβου δεν είναι $\frac{g_z \cdot s_z}{C}$ αλλά $\frac{(g_z + e_z) s_z}{C}$ (οχήματα/ώρα), αυξάνοντας έτσι την ικανότητα του συνδέσμου με τα οχήματα που μπορούν να εξυπηρετηθούν στο σταθερό χρόνο πρασίνου e_z .

Η κάθε μια από αυτές τις προσεγγίσεις οδηγεί σε ένα διαφορετικό κανόνα για τον έλεγχο της διάρκειας των φάσεων BD. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αλλαγές των εξισώσεων (3.6)–(3.9) για κάθε μια από τις περιπτώσεις και ο αντίστοιχος κανόνας ελέγχου για την περίπτωση ενός κόμβου με τρία στάδια σηματοδότησης.

Προσέγγιση (i)

Στην γενική περίπτωση όπου έχουμε έναν κόμβο με n στάδια οι χρόνοι πρασίνου του κάθε σταδίου υπολογίζονται ως εξής. Θέλουμε:

$$\frac{d_1 - \frac{e_1 s_1}{C}}{\frac{g_1}{C} s_1} = \frac{d_2 - \frac{e_2 s_2}{C}}{\frac{g_2}{C} s_2} = \dots = \frac{d_i - \frac{e_i s_i}{C}}{\frac{g_i}{C} s_i} = \dots = \frac{d_n - \frac{e_n s_n}{C}}{\frac{g_n}{C} s_n}$$

δηλαδή:

$$\frac{C d_1 - e_1 s_1}{g_1 s_1} = \frac{C d_2 - e_2 s_2}{g_2 s_2} = \dots = \frac{C d_i - e_i s_i}{g_i s_i} = \dots = \frac{C d_n - e_n s_n}{g_n s_n}$$

επίσης ισχύει:

$$C - L = g_1 + g_2 + \dots + g_i + \dots + g_n$$

από τις δύο τελευταίες σχέσεις μετά από πράξεις προκύπτει:

$$g_i = \frac{C d_i \prod_{j=1, j \neq i}^n s_j - e_i \prod_{j=1}^n s_j}{C \sum_{j=1}^n \left(d_j \prod_{k=1, k \neq j}^n s_k \right) - \left(\prod_{j=1}^n s_j \right) \left(\sum_{j=1}^n e_j \right)} (C - L) \quad (3.12)$$

Εάν για παράδειγμα έχουμε ένα κόμβο με $n = 3$ μεταβλητά στάδια πρασίνου από τη σχέση (3.12) και για $i = 1$ έχουμε:

$$g_1 = \frac{C d_1 s_2 s_3 - e_1 s_1 s_2 s_3}{C (d_1 s_2 s_3 + d_2 s_1 s_3 + d_3 s_1 s_2) - s_1 s_2 s_3 (e_1 + e_2 + e_3)} (C - L)$$

Προσέγγιση (ii)

Στην γενική περίπτωση όπου έχουμε έναν κόμβο με n στάδια οι χρόνοι πρασίνου του κάθε σταδίου υπολογίζονται ως εξής. Θέλουμε:

$$\frac{d_1}{\left(\frac{g_1 + e_1}{C} \right) s_1} = \frac{d_2}{\left(\frac{g_2 + e_2}{C} \right) s_2} = \dots = \frac{d_i}{\left(\frac{g_i + e_i}{C} \right) s_i} = \dots = \frac{d_n}{\left(\frac{g_n + e_n}{C} \right) s_n}$$

δηλαδή:

$$\frac{d_1}{(g_1 + e_1) s_1} = \frac{d_2}{(g_2 + e_2) s_2} = \dots = \frac{d_i}{(g_i + e_i) s_i} = \dots = \frac{d_n}{(g_n + e_n) s_n}$$

επίσης ισχύει:

$$C - L = g_1 + g_2 + \dots + g_i + \dots + g_n$$

από τις δύο τελευταίες σχέσεις μετά από πράξεις προκύπτει:

$$g_i = \frac{d_i/s_i}{\sum_{j=1}^n d_j/s_j} (C - L) + \frac{d_i/s_i}{\sum_{j=1}^n d_j/s_j} \sum_{j=1, j \neq i}^n e_j + \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n d_j/s_j}{\sum_{j=1}^n d_j/s_j} e_i \quad (3.13)$$

Εάν για παράδειγμα έχουμε ένα κόμβο με $n = 3$ μεταβλητά στάδια πρασίνου από τη σχέση (3.13) και για $i = 1$ έχουμε:

$$g_1 = \frac{d_1/s_1 (C - L) + d_1/s_1 (e_2 + e_3) - (d_2/s_2 + d_3/s_3) e_1}{d_1/s_1 + d_2/s_2 + d_3/s_3}$$

Οι δύο αυτές προσεγγίσεις οδηγούν σε δύο διαφορετικούς κανόνες ελέγχου (σε επίπεδο κόμβου), οι οποίοι όμως παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά σε αριθμητικά παραδείγματα, γεγονός απόλυτα λογικό αφού προέρχονται από πανομοιότυπη μοντελοποίηση. Οι δύο κανόνες μελετήθηκαν διεξοδικά σε τυχαία παραδείγματα ακραίων κυκλοφοριακών συνθηκών, προκειμένου να αποφασιστεί ποιος αποδίδει καλύτερα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια (πάντα σε ακόρεστες συνθήκες).

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται το παράδειγμα ενός κόμβου σηματοδότησης με τυχαία χαρακτηριστικά. Στον πίνακα αναγράφονται τα αποτελέσματα των δύο κανόνων ελέγχου για διάφορες τυχαίες τιμές κυκλοφοριακού φόρτου στους συνδέσμους του κόμβου. Στο παράδειγμα αυτό θεωρούμε ένα σηματοδοτούμενο κόμβο με $n = 3$ στάδια, $z = 3$ σύνδεσμοι (1 σε κάθε στάδιο), $C = 90$ sec, $L = 20$ sec, $s_1 = s_2 = s_3 = 1800$ οχήματα/ώρα, $e_1 = 7$ και $e_2 = e_3 = 2$ sec, ενώ πρέπει να σημειωθεί πως για όλες τις περιπτώσεις ζήτησης (d_1 , d_2 , d_3) που εξετάζονται ικανοποιείται η σχέση (3.11) για όλους τους συνδέσμους της διασταύρωσης.

Μετά από τη μελέτη του Πίνακα 3.1 αλλά και τη λεπτομερή διερεύνηση των αποτελεσμάτων πολλών άλλων παρόμοιων παραδειγμάτων καταλήγουμε στις εξής παρατηρήσεις:

- Οι δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις καταλήγουν σε δύο διαφορετικούς κανόνες ελέγχου, οι οποίοι όμως δίνουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα για τις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής τους (οι διάρκειες των πρασίνων που δίνουν διαφέρουν συνήθως στα δεκαδικά ψηφία). Μετά την εφαρμογή των

			Προσέγγιση (i)						Προσέγγιση (ii)					
Ζήτηση σε οχήματα/ώρα			Διάρκειες πρασίνων πριν τους περιορισμούς			Διάρκειες μετά τους περιορισμούς			Διάρκειες πρασίνων πριν τους περιορισμούς			Διάρκειες μετά τους περιορισμούς		
d_1	d_2	d_3	g_1	g_2	g_3	g_1	g_2	g_3	g'_1	g'_2	g'_3	g'_1	g'_2	g'_3
0	0	0	44.546	12.727	12.727	44	13	13	20.000	25.000	25.000	20	25	25
0	0	50	57.647	16.471	-4.118	49	14	7	-7.000	-2.000	79.000	7	7	56
0	900	250	-10.538	64.731	15.806	7	51	12	-7.000	61.391	15.609	7	50	13
400	0	912	16.667	-2.564	55.897	14	7	49	17.695	-2.000	54.305	15	7	48
500	519	309	22.744	30.262	16.995	23	30	17	23.497	29.656	16.847	23	30	17
600	213	667	25.556	9.611	34.833	25	10	35	25.838	9.657	34.505	26	10	34
700	600	200	30.625	30.625	8.750	30	31	9	30.800	30.400	8.800	31	30	9
800	560	100	37.258	29.355	3.387	35	28	7	37.384	29.068	3.548	35	28	7
900	411	100	44.668	21.805	3.526	42	21	7	44.665	21.594	3.741	42	21	7
100	385	441	-3.966	34.207	39.759	7	29	34	1.747	31.677	36.576	7	29	34
200	486	399	4.855	36.092	29.052	7	35	28	7.931	34.282	27.787	8	34	28
500	274	377	27.068	17.594	25.338	27	18	25	28.187	17.282	24.531	28	17	25
600	39	359	41.388	-0.090	28.702	37	7	26	41.697	1.165	27.137	38	7	25
700	254	485	32.158	12.289	25.554	32	12	26	32.402	12.297	25.300	33	12	25
800	107	239	49.892	5.065	15.043	48	7	15	49.545	5.563	14.893	48	7	15
900	281	300	42.189	13.378	14.433	42	13	15	42.223	13.369	14.408	42	13	15
1000	176	131	55.382	8.758	5.860	54	9	7	54.974	8.907	6.119	54	9	7
900	289	161	47.080	15.425	7.496	47	15	8	47.000	15.340	7.660	47	15	8

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα αριθμητικού παραδείγματος για τις δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις.

περιορισμών του προβλήματος υπάρχουν διαφορές της τάξεως του 1 sec που συνήθως οφείλονται σε στρογγυλοποιήσεις.

- Οι δύο κανόνες παρουσιάζουν διαφορές σε κάποιες ακραίες περιπτώσεις (π.χ. μηδενική ζήτηση σε όλους τους συνδέσμους του κόμβου ή σε κάποιους από αυτούς). Στις δύο πρώτες γραμμές του Πίνακα 3.1 παρατηρούμε τις περιπτώσεις $d_1 = d_2 = d_3 = 0$ (οχήματα/ώρα) και $d_1 = d_2 = 0$, $d_3 = 50$ (οχήματα/ώρα) και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δύο προσεγγίσεων.
- Στα δύο αυτά ακραία αριθμητικά παραδείγματα οι δύο κανόνες υπολογίζουν τη διάρκεια πρασίνου του κάθε σταδίου κάνοντας χρήση των σταθερών χρόνων πρασίνου e_z του κάθε συνδέσμου. Ωστόσο, κρίνεται, ότι ο κανόνας ελέγχου της δεύτερης προσέγγισης διαχειρίζεται το συνολικό χρόνο πρασίνου του κόμβου $C - L$ με καλύτερο τρόπο. Τα αποτελέσματά του σε αυτά τα παραδείγματα δεν επηρεάζονται από τους σταθερούς χρόνους e_z σε αντίθεση με τον κανόνα της πρώτης προσέγγισης, ο οποίος παρουσιάζει μια συμπεριφορά που κρίνεται αρνητική (αν και τα παραδείγματα αυτά είναι αρκετά δύσκολο να εμφανιστούν σε πραγματικές συνθήκες εφαρμογής).

Λόγω των παραπάνω παρατηρήσεων αποφασίστηκε στον υβριδικό αλγόριθμο της στρατηγικής TUC να χρησιμοποιηθεί ο κανόνας της δεύτερης προσέγγισης για τον έλεγχο BD, αν και οι δύο κανόνες δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Με την επέκταση αυτή, όταν ο Κανόνας Εξισορρόπησης της Ζήτησης εφαρμόζεται από την TUC για τον υπολογισμό της διάρκειας των φάσεων λαμβάνει υπόψη του τους σταθερούς χρόνους πρασίνου e_z , εφαρμόζοντας έτσι αποτελεσματικότερο έλεγχο.

Όσον αφορά τη σχέση (3.6), η οποία δείχνει ποιος σύνδεσμος επιλέγεται για κάθε στάδιο όταν υπάρχουν περισσότεροι από ένας, μεταβάλλεται και αυτή μετά την εισαγωγή των σταθερών χρόνων πρασίνων e_z και γίνεται:

- για την προσέγγιση (i) και για όλους τους συνδέσμους i που λαμβάνουν προτεραιότητα στο ίδιο στάδιο επιλέγεται αυτός με το μεγαλύτερο πηλίκο:

$$\max_i \left\{ \frac{d_i - \frac{e_i s_i}{C}}{\frac{g_i}{C} s_i} \right\} \quad (3.14)$$

- για την προσέγγιση (ii) και για όλους τους συνδέσμους i που λαμβάνουν προτεραιότητα στο ίδιο στάδιο επιλέγεται αυτός με το μεγαλύτερο πηλίκο:

$$\max_i \left\{ \frac{d_i}{\left(\frac{g_i + e_i}{C} \right) s_i} \right\} \quad (3.15)$$

Εάν για παράδειγμα σε κάποιο στάδιο λαμβάνουν προτεραιότητα n σύνδεσμοι, στον Κανόνα Εξισορρόπησης της Ζήτησης πρέπει να χρησιμοποιηθεί αυτός με το αντίστοιχο μεγαλύτερο λόγο ((3.14) ή (3.15)). Η σχέση (3.14) μας υποδεικνύει ποιόν σύνδεσμο να χρησιμοποιήσουμε ως εξής:

$$\arg \max_i \left\{ \frac{d_i - \frac{e_i s_i}{C}}{\frac{g_i}{C} s_i} \right\} \Rightarrow \arg \max_i \left\{ \frac{d_i}{s_i} - \frac{e_i}{C} \right\} \quad (3.16)$$

αφού τα g_i , C είναι τα ίδια για όλους τους συνδέσμους που λαμβάνουν προτεραιότητα μαζί.

Η εξίσωση (3.16) μας δείχνει ποιος σύνδεσμος πρέπει να χρησιμοποιηθεί για κάθε στάδιο και διαφέρει από την (3.6) ως προς τον παράγοντα $\frac{e_i}{C}$ που προήλθε από την επέκταση της παρούσας παραγράφου στον κανόνα ελέγχου. Από τη σχέση (3.15) δεν μπορεί να εξαχθεί κάποια παρόμοια εξίσωση, καθώς δεν μπορεί να γίνει απαλοιφή του παράγοντα $(g_i + e_i)$ που υπάρχει στον παρανομαστή αφού το e_i είναι διαφορετικό για κάθε σύνδεσμο i .

Αποδεικνύεται, ωστόσο, ότι όταν από ένα σύνολο συνδέσμων με τυχαία χαρακτηριστικά ο σύνδεσμος i επαληθεύει τη σχέση (3.14), τότε ο σύνδεσμος αυτός θα επαληθεύει και τη σχέση (3.15). Στη συνέχεια ακολουθεί η μαθηματική απόδειξη.

Απόδειξη

Θέλουμε να αποδείξουμε πως αν σε κάποιο στάδιο σηματοδότησης ενός κόμβου λαμβάνουν ταυτόχρονα προτεραιότητα περισσότεροι από ένας σύνδεσμοι και

ισχύει:

$$\frac{d_i}{s_i} - \frac{e_i}{C} \geq \frac{d_j}{s_j} - \frac{e_j}{C} \quad \forall j \neq i \Leftrightarrow \frac{d_i}{s_i} \geq \frac{d_j}{s_j} - \frac{e_j + e_i}{C} \quad \forall j \neq i \quad (3.17)$$

για κάποιον από τους συνδέσμους i , τότε αναγκαστικά θα ισχύει επίσης:

$$\frac{d_i}{(g_i + e_i)s_i} \geq \frac{d_j}{(g_j + e_j)s_j} \quad \forall j \neq i \Leftrightarrow \frac{d_i}{s_i} \geq \frac{d_j}{s_j} \left(\frac{g_i + e_i}{g_j + e_j} \right) \quad \forall j \neq i \quad (3.18)$$

όπου για το σύνδεσμο j έχουμε d_j τη ζήτηση, g_j το μεταβλητό χρόνο πρασίνου, e_j το σταθερό χρόνο πρασίνου και s_j τη ροή κορεσμού, ενώ C είναι η διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης του κόμβου (όλοι θετικοί αριθμοί).

Αρκεί λοιπόν να αποδειχθεί ότι:

$$\begin{aligned} \frac{d_j}{s_j} \left(\frac{g_i + e_i}{g_j + e_j} \right) &\leq \frac{d_j}{s_j} - \frac{e_j + e_i}{C} \quad \forall j \neq i \Leftrightarrow \frac{d_j}{s_j} \left(\frac{g_i + e_i}{g_j + e_j} - 1 \right) \leq -\frac{e_j + e_i}{C} \quad \forall j \neq i \\ \Leftrightarrow \frac{d_j}{s_j} \left(\frac{g_i + e_i - g_j + e_j}{g_j + e_j} \right) &\leq -\frac{e_j + e_i}{C} \quad \forall j \neq i \Leftrightarrow \frac{d_j}{s_j} \left(\frac{e_i + e_j}{g_j + e_j} \right) \leq \frac{e_j + e_i}{C} \quad \forall j \neq i \end{aligned}$$

επειδή $g_i = g_j \quad \forall j \neq i$, καθώς όλοι οι σύνδεσμοι λαμβάνουν μαζί προτεραιότητα.

Πρέπει λοιπόν να αποδειχτεί ότι:

$$\frac{d_j}{s_j} \left(\frac{e_i + e_j}{g_j + e_j} \right) \leq \frac{e_j + e_i}{C} \quad \forall j \neq i \Leftrightarrow \frac{d_j}{s_j} \leq \frac{g_j + e_j}{C} \quad \forall j \neq i$$

Η ανισότητα όμως αυτή ισχύει για κάθε σύνδεσμο του κόμβου (σχέση (3.11)), αφού ο Κανόνας Εξισορρόπησης της Ζήτησης εφαρμόζεται μόνο σε περιπτώσεις ακόρεστης κυκλοφορίας, σε κόμβους δηλαδή στους οποίους για κάθε σύνδεσμο ισχύει:

$$\frac{d_j}{\left(\frac{g_j + e_j}{C} \right) s_j} \leq 1$$

Αποδεικνύεται λοιπόν για την ακόρεστη κατάσταση κυκλοφορίας, ότι όταν ισχύει η σχέση (3.17) για κάποιον σύνδεσμο τότε απαραίτητα θα ισχύει και η σχέση

(3.18). Αυτό σημαίνει πως σύμφωνα με την επέκταση που αναλύθηκε στην παρούσα παράγραφο, οι εξισώσεις των δύο εναλλακτικών προσεγγίσεων μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους καθώς βασίζονται στο ίδιο μαθηματικό πρότυπο και οδηγούν σε παρόμοια αποτελέσματα. Επιλέγεται λοιπόν στον κανόνα ελέγχου BD του υβριδικού αλγορίθμου να χρησιμοποιηθεί η σχέση (3.13) για τον υπολογισμό της βέλτιστης διάρκειας των φάσεων και η σχέση (3.16) για το σύνδεσμο που θα χρησιμοποιείται σε κάθε φάση (σε περίπτωση που είναι πάνω από ένας).

Τα δίκτυα εφαρμογής

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αστικά οδικά δίκτυα στα οποία θα εξεταστεί η αποτελεσματικότητα του υβριδικού αλγορίθμου που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Για το σκοπό αυτό θα γίνει εφαρμογή του αλγορίθμου στα αστικά οδικά δίκτυα των Χανίων και του Southampton. Τα δίκτυα που εξετάστηκαν θεωρούνται δίκτυα μεγάλης κλίμακας με τυχαία τοπολογία και χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα των διερευνήσεων αυτών θα παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο 5.

4.1 Απαιτούμενα δεδομένα

Για την εφαρμογή του υβριδικού αλγορίθμου σε δίκτυα τυχαίας τοπολογίας, σύμφωνα με το μοντέλο ελέγχου που αναπτύχθηκε στα Κεφάλαια 2 και 3 απαιτούνται τα ακόλουθα δεδομένα:

- Για τους αστικούς συνδέσμους (links) απαιτούνται η χωρητικότητα (storage capacity), η ροή κορεσμού (saturation flow), τα ποσοστά στροφής (turning rates), η διάρκεια του σταθερού χρόνου πρασίνου e_z και οι φάσεις κατά τις οποίες τα οχήματα επί συνδέσμων έχουν δικαίωμα κυκλοφορίας (r.o.w.).
- Για τους αστικούς κόμβους (junctions) απαιτούνται η περίοδος σηματοδότησης (cycle), ο χαμένος χρόνος (lost time), ο αριθμός των φάσεων (phases), οι ελάχιστοι και μέγιστοι χρόνοι πρασίνων ($g_{j,i,\min}$, $g_{j,i,\max}$).

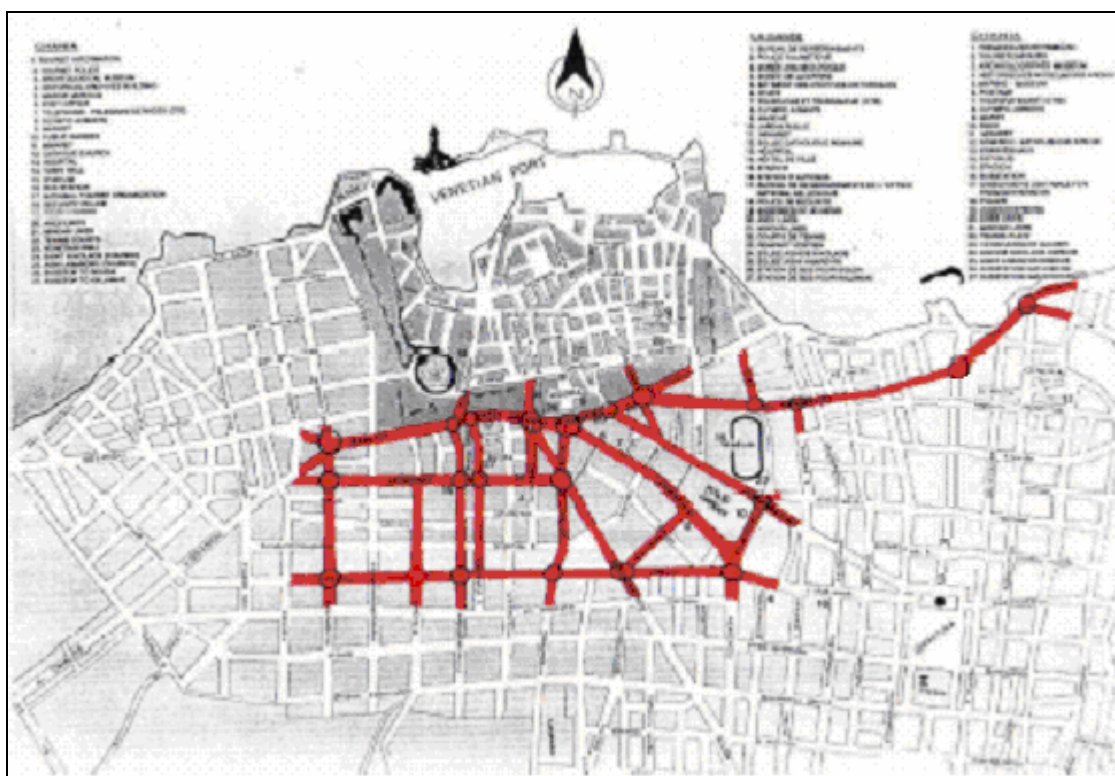
Επιπλέον, για κάθε δίκτυο εφαρμογής απαιτείται ο προσδιορισμός της ελάχιστης και μέγιστης περιόδου σηματοδότησης (C_{\min} , C_{\max}), καθώς και κάποιων

παραμέτρων βάρους οι οποίες προσδιορίζονται από μια διαδικασία δοκιμής-και-σφάλματος έτσι ώστε να επιτευχθεί μια ικανοποιητική συμπεριφορά ελέγχου για το εκάστοτε δίκτυο. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών έχουν διερευνηθεί σε προηγούμενες εργασίες [9, 11] και στην παρούσα διατριβή θεωρούνται δεδομένες.

4.2 Το αστικό δίκτυο των Χανίων

4.2.1 Περιγραφή του δικτύου

Το Σχήμα 4.1 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 4.1: 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.

4.2.2 Μοντελοποίηση του δικτύου για την εφαρμογή της στρατηγικής

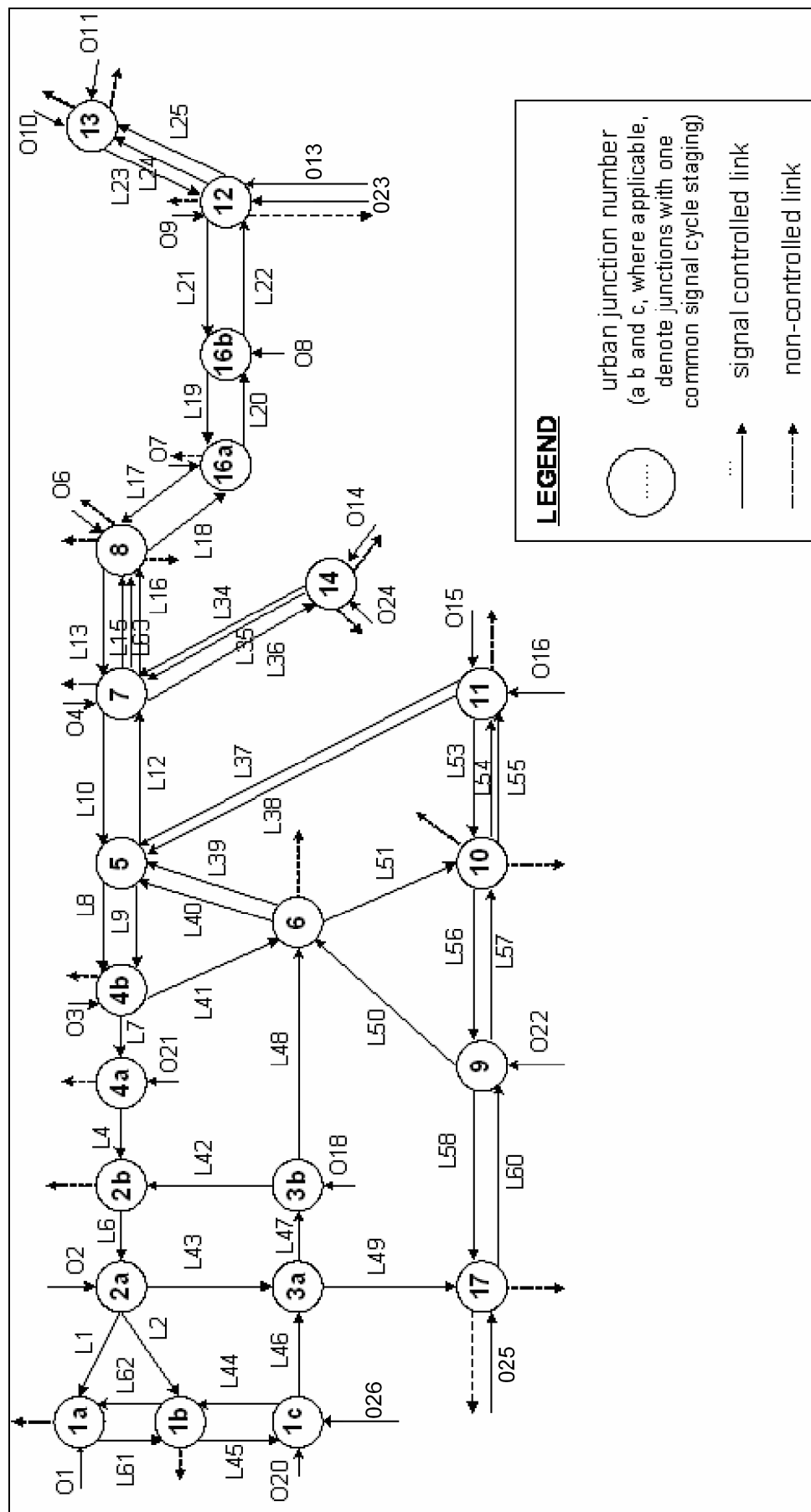
Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται σχηματικά το μοντέλο ελέγχου που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στο αστικό δίκτυο των Χανίων. Σημειώνεται ότι:

- 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 4.2 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μοντέλο ελέγχου αποτελείται από 16 σηματοδοτημένους κόμβους και 71 συνδέσμους. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2 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 4.2: Σχηματικός χάρτης του μοντέλου για το δικτύου των Χανίων.

4.3 Το δίκτυο του Southampton

4.3.1 Περιγραφή του δικτύου

Η πόλη του Southampton αποτελεί το μεγαλύτερο βιομηχανικό και εμπορικό κέντρο στο νοτιοανατολικό τμήμα της Αγγλίας και την πρώτη οικονομική δύναμη στη νότια ακτή. Το αστικό δίκτυο της χώρας περιορίζεται από τη θάλασσα και δύο ποτάμια που διασχίζουν την πόλη. Υπάρχουν πέντε βασικές κυκλοφοριακές αρτηρίες μέσα και έξω από το κέντρο της πόλης, που περνάνε πάνω από τα δύο ποτάμια από πέντε γέφυρες. Μακρύτερα η πόλη ενώνεται με το δίκτυο του αυτοκινητόδρομου του νοτιοανατολικού τμήματος.

Το Σαουθάμπτον εξυπηρετείται ικανοποιητικά από το αστικό δίκτυο και από τα μέσα μαζικής μεταφοράς. Το σιδηροδρομικό δίκτυο μέσα στην πόλη έχει μικρή έκταση καθώς αποσκοπεί κυρίως στην κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων όπως London–Southampton. Η βασική πολιτική του συμβουλίου της πόλης είναι ο περιορισμός της χρήσης των ιδιωτικών οχημάτων και η εξάπλωση της χρήσης των μέσων μαζικής μεταφοράς, με ένα ολοκληρωμένο τρόπο που θα ευνοεί τη χρήση έξυπνων κυκλοφοριακών συστημάτων και προηγμένων τηλεματικών λύσεων.

Το αστικό δίκτυο του Σαουθάμπτον θα χωριστεί σε δύο υποδίκτυα. Το πρώτο περιλαμβάνει το κέντρο της πόλης το οποίο αποτελεί μία βασική εμπορική περιοχή και ένα οικονομικό και εμπορικό κέντρο. Επίσης, στο κέντρο είναι ο βασικός σιδηροδρομικός σταθμός και τρεις εισοδοί προς το λιμάνι. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συντελούν σε υψηλή κυκλοφοριακή ζήτηση μέσα σε ένα περιορισμένο οδικό δίκτυο. Όπως όλες τις πόλεις, έτσι και στο Σαουθάμπτον αυξημένη κίνηση παρατηρείται τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες αιχμής. Αυτή η κυκλοφοριακή συμφόρηση εμφανίζεται με τη μορφή τακτικών ουρών και καθυστερήσεων στις βασικές διασταυρώσεις, οι πλειοψηφία των οποίων βρίσκονται κάτω από κυκλοφοριακό έλεγχο μέσω σηματοδότησης. Επιπρόσθετα με την καθημερινή συμφόρηση στους δρόμους του κέντρου, περαιτέρω πρόβλημα δημιουργείται όταν διεξάγονται ποδοσφαιρικοί αγώνες και κατά την άφιξη και αναχώρηση επιβατών από το λιμάνι.

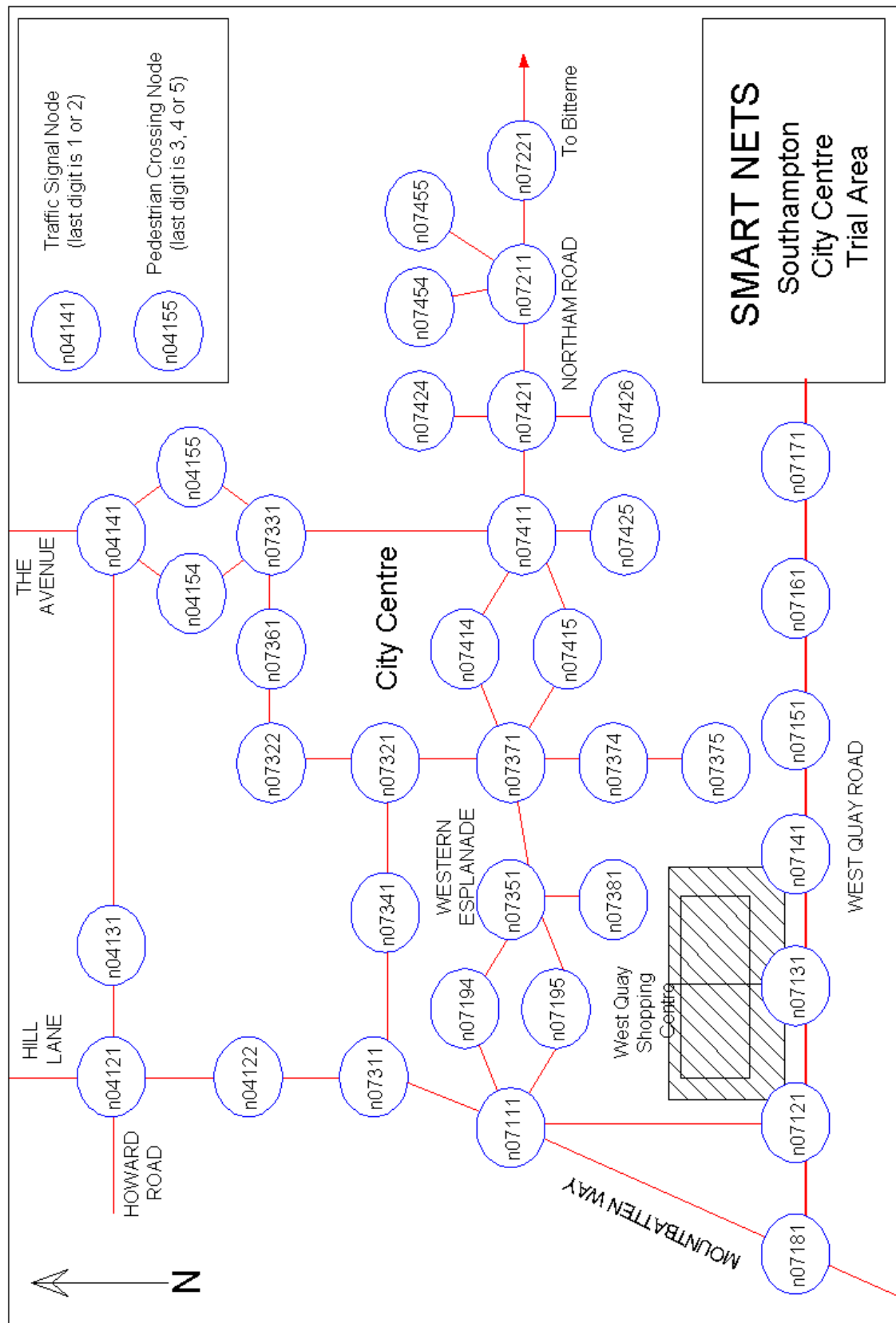
Η κυκλοφοριακή συμμόρφωση στο κέντρο της πόλης είναι εντονότερη τα Σάββατα και εντοπίζεται κυρίως στο αστικό δίκτυο γύρω από ένα πρόσφατα κατασκευασμένο εμπορικό κέντρο. Η συμμόρφωση αυτή υφίσταται από το πρωί μέχρι αργά το απόγευμα και η βασική αιτία της είναι ο μεγάλος αριθμός οχημάτων που κατευθύνονται στο ίδιο σημείο σε τακτά χρονικά διαστήματα σε συνδυασμό με τον περιορισμένο αριθμό θέσεων στάθμευσης. Τα αποτελέσματα είναι παρεμπόδιση της κυκλοφορίας κατά την έξοδο από το τοπικό αστικό δίκτυο. Η κατάσταση χειροτερεύει αργότερα όταν τα οχήματα φεύγουν από τις θέσεις στάθμευσης ενώ η κυκλοφορία συνεχίζει να είναι αυξημένη, με αποτέλεσμα ακόμα και τα μέσα μαζικής μεταφοράς και ιδίως τα λεωφορεία να εμφανίζουν καθυστερήσεις στην εκτέλεση των δρομολογίων τους.

Το δεύτερο υποδίκτυο περιλαμβάνει μια αρτηρία που κατευθύνεται στο κέντρο της πόλης από τα ανατολικά και είναι γνωστή ως Bitterne. Η αρτηρία αυτή διασχίζει τον ποταμό Ίτσεν από μία μόνο γέφυρα, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται έντονα φαινόμενα κυκλοφοριακής συμμόρφωσης κυρίως τις ώρες αιχμής. Ένας τρόπος αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι ο περιορισμός της εισόδου οχημάτων στην αρτηρία με σκοπό την διευκόλυνση των μέσων μαζικής μεταφοράς.

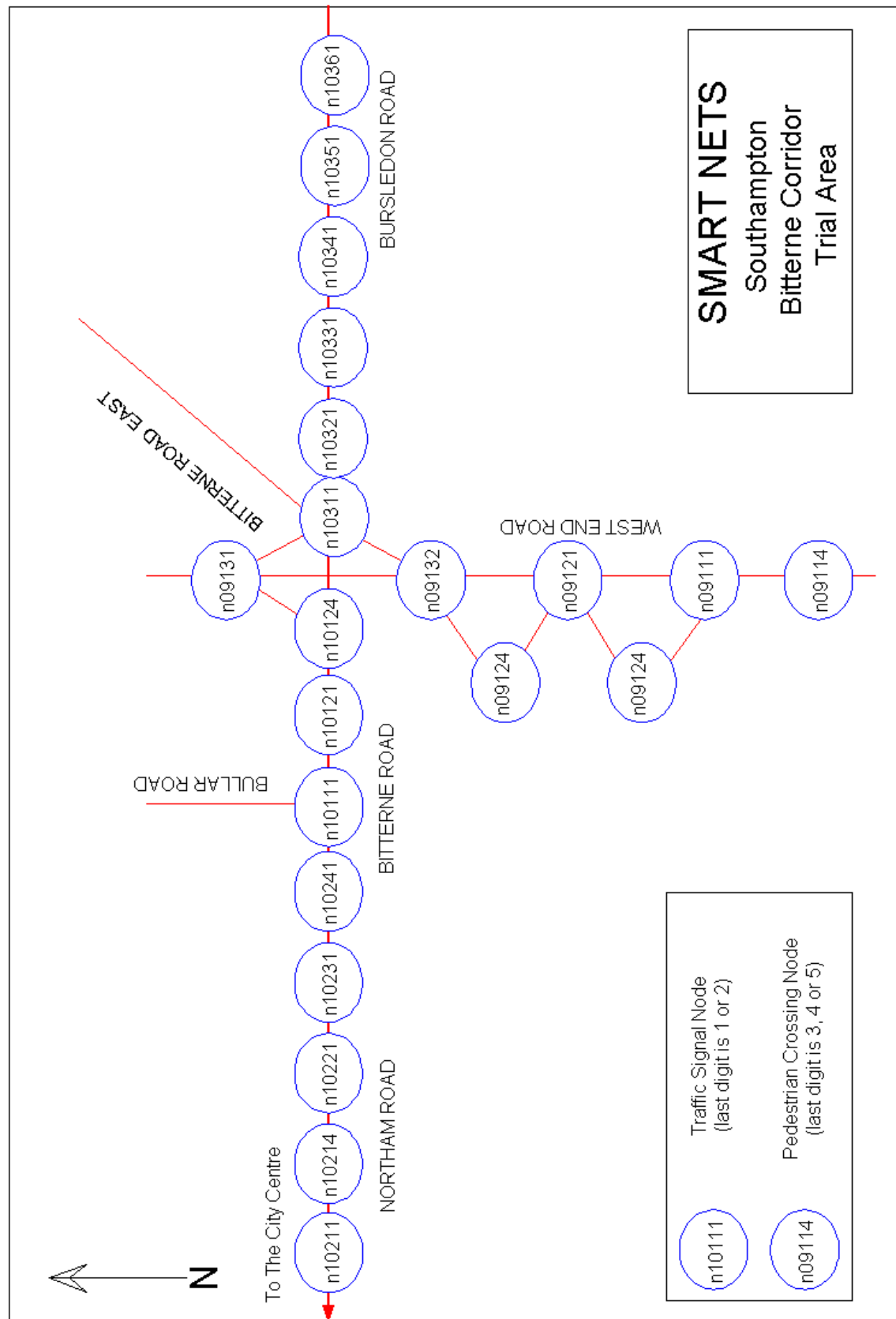
Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 των δύο επόμενων σελίδων ακολουθεί η γραφική απεικόνιση των δύο υποδικτύων που περιγράφηκαν παραπάνω.

4.3.2 Μοντελοποίηση του δικτύου για την εφαρμογή της στρατηγικής

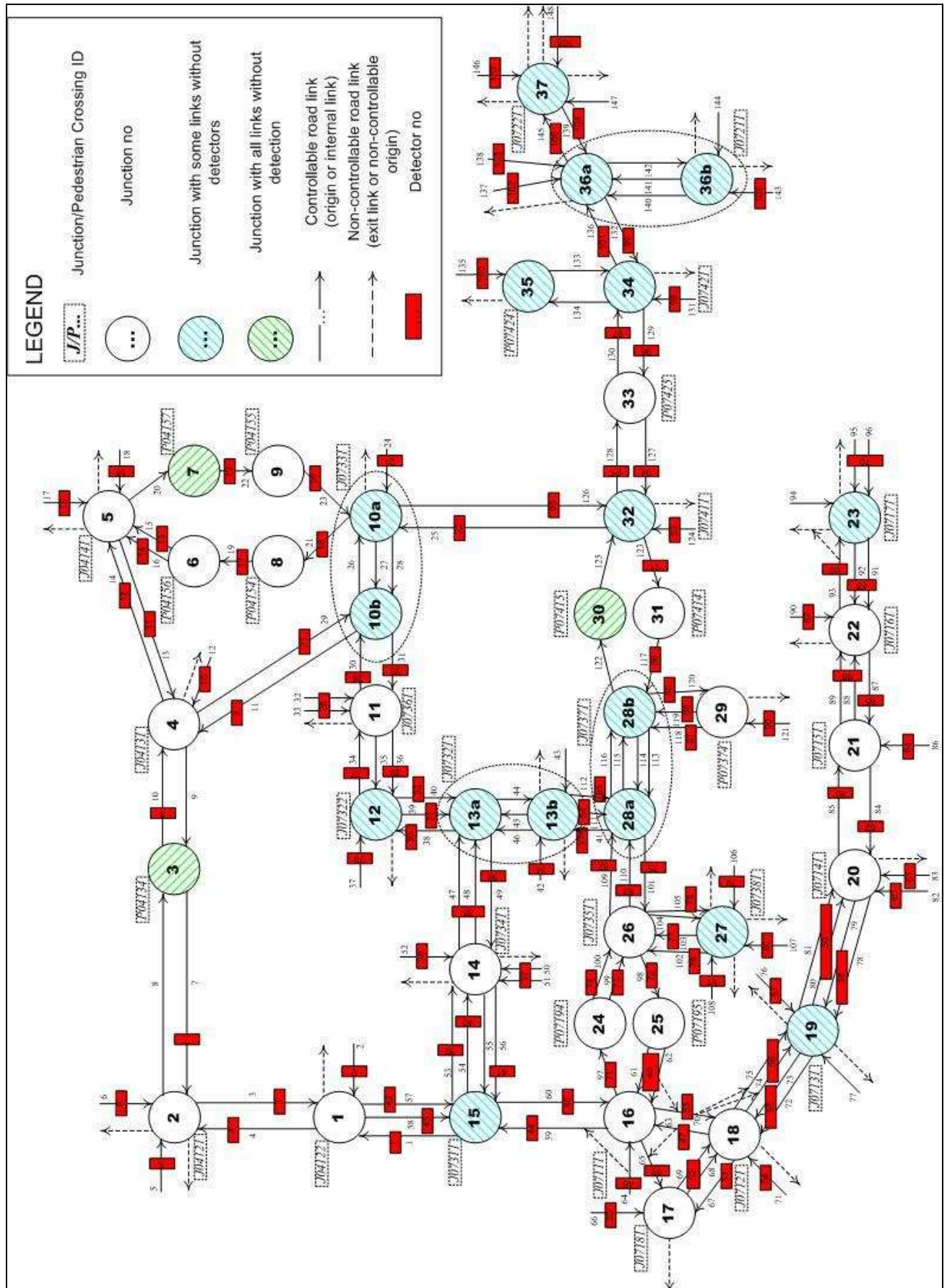
Στο δίκτυο αυτό η εφαρμογή της στρατηγικής TUC αφορούσε τον έλεγχο της διάρκειας των φάσεων και τον έλεγχο της διάρκειας της περιόδου. Στα Σχήματα 4.5 και 4.6 παρουσιάζεται σχηματικά το μοντέλο ελέγχου που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στα δύο δίκτυα του Southampton.



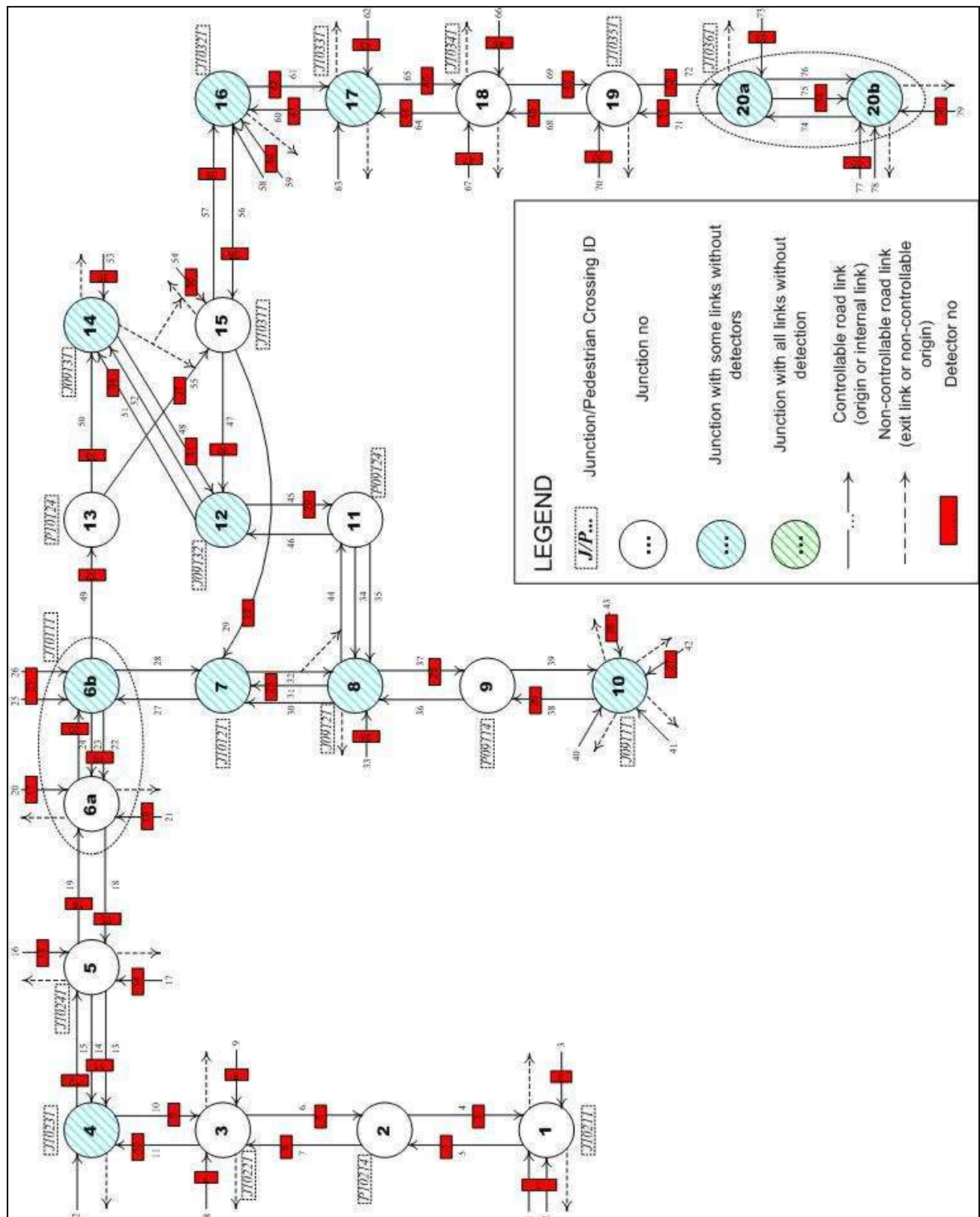
Σχήμα 4.3: Το αστικό οδικό δίκτυο του Southampton (υποδίκτυο 1).



Σχήμα 4.4: Το αστικό οδικό δίκτυο του Southampton (υποδίκτυο 2).



Σχήμα 4.5: Το μοντέλο της στρατηγικής TUC για το Southampton (Region 1).



Σχήμα 4.6: Το μοντέλο της στρατηγικής TUC για το Southampton (Region 2).

Σημειώνεται ότι:

- Οι κόμβοι 10a και 10b, 13a και 13b, 28a και 28b, 36a και 36b του πρώτου υποδικτύου ελέγχονται βάση κοινών πλάνων σηματοδότησης. Το ίδιο ισχύει και για τους κόμβους 6a και 6b, 20a και 20b του δεύτερου υποδικτύου. Συνεπώς, από την άποψη ελέγχου θεωρούνται σαν 6 κόμβοι (6 ζευγάρια) και όχι σαν 12 ξεχωριστοί κόμβοι.
- Τα ζευγάρια των συνδέσμων του πρώτου υποδικτύου:
27 και 28, 32 και 33, 35 και 36, 39 και 40, 45 και 46, 47 και 48, 50 και 51, 53 και 54, 55 και 56, 57 και 58, 61 και 62, 68 και 69, 72 και 73, 74 και 75, 78 και 79, 80 και 81, 82 και 83, 88 και 89, 91 και 92, 95 και 96, 99 και 100, 102 και 103, 104 και 105, 109 και 110, 111 και 112, 113 και 114, 115 και 116, 118 και 119, 137 και 138, 140 και 141,
καθώς και τα ζευγάρια των συνδέσμων:
1 και 2, 13 και 14, 22 και 23, 25 και 26, 30 και 31, 34 και 35, 51 και 52, 75 και 76, 77 και 78
αποτελούν διαφορετικές προσεγγίσεις ιδίων δρόμων επειδή δε λαμβάνουν ταυτοχρόνως προτεραιότητα. Για το λόγο αυτό, στη στρατηγική TUC θεωρούνται ως διαφορετικοί σύνδεσμοι.

Από τα Σχήματα 4.5 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μοντέλο ελέγχου αποτελείται από 37 σηματοδοτημένους κόμβους και 148 συνδέσμους για το πρώτο υποδίκτυο και από 20 σηματοδοτημένους κόμβους και 79 συνδέσμους για το πρώτο υποδίκτυο.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2 ορίζονται τα παρακάτω σύνολα για τα συγκεκριμένα υποδίκτυα:

– Υποδίκτυο 1:

- Το σύνολο των ελεγχόμενων σηματοδοτημένων κόμβων $J = \{1, 2, \dots, 37\}$.
- Το σύνολο των ελεγχόμενων αστικών συνδέσμων $Z = \{1, 2, \dots, 148\}$.

– Υποδίκτυο 2:

- Το σύνολο των ελεγχόμενων σηματοδοτημένων κόμβων $J = \{1, 2, \dots, 20\}$.
- Το σύνολο των ελεγχόμενων αστικών συνδέσμων $Z = \{1, 2, \dots, 79\}$.

Οι Πίνακες Π.4–Π.5 παρουσιάζουν τα στοιχεία των ελεγχόμενων κόμβων που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο ελέγχου, ενώ οι Πίνακες Π.6–Π.7 παρουσιάζουν στοιχεία που αφορούν τους συνδέσμους των υποδικτύων, τη χωρητικότητα, τη ροή κορεσμού 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.5–Π.7 προέρχονται από πραγματικές μετρήσεις στο δίκτυο του Southampton, ενώ τα ποσοστά στροφής από παλιότερη μελέτη του δικτύου με το μοντέλο SCOOT [23]. Και αυτά τα δεδομένα παρατίθενται στο Παράρτημα της εργασίας.

Αποτελέσματα διερευνήσεων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διερευνήσεων με τα οποία εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του υβριδικού αλγορίθμου στην επίλυση του προβλήματος της σηματοδότησης αστικών δικτύων. Τα αποτελέσματα αφορούν τις προσομοιώσεις που έγιναν για διαφορετικά σενάρια ζήτησης αλλά και τις συγκρίσεις που έγιναν κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου κάτω από πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας στο πεδίο εφαρμογής. Οι διερευνήσεις αφορούν τα δύο αστικά δίκτυα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.

5.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Μετά την ανάπτυξη του υβριδικού αλγορίθμου, όπως αυτός παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητά του μέσω προσομοιώσεων. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά σενάρια ζήτησης οχημάτων στις εισόδους των δικτύων και εφαρμόστηκε σαν στρατηγική ελέγχου ο υβριδικός αλγόριθμος. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα ίδια ακριβώς σενάρια ζήτησης (και ποσοστά στροφής στους κόμβους) χρησιμοποιώντας:

- πλάνα σηματοδότησης σταθερού χρόνου (Fixed-time Signal Control)
- την παλιά έκδοση της στρατηγικής TUC (με Γραμμικό-Τετραγωνικό Έλεγχο)

Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αναφέρθηκαν και στο Κεφάλαιο 2 και είναι επιγραμματικά τα εξής:

- Συνολικός χρόνος αναμονής σε οχήματα*ώρες, (TWT)
- Συνολικός χρόνος διαδρομής σε οχήματα*ώρες, (TTT)

- Συνολικός χρόνος στο δίκτυο σε οχήματα*ώρες, (TTS)
- Συνολική διανυθείσα απόσταση σε οχήματα*χιλιόμετρα, (TTD)
- Συνολική κατανάλωση καυσίμων σε οχήματα*λίτρα, (TFC)
- Συνολικές ουρές στις εισόδους του δικτύου (origins) μετά το τέλος του χρονικού ορίζοντα προσομοίωσης σε οχήματα, (TOQ)

5.1.1 Εφαρμογή στο δίκτυο των Χανίων

Οι διερευνήσεις που λαμβάνουν χώρα στο υπό μελέτη δίκτυο βασίζονται σε προσομοίωση 5 ωρών πραγματικού χρόνου με βήμα προσομοίωσης 2 sec, ενώ τα διαφορετικά επίπεδα ελέγχου που εξετάζονται είναι οι σταθερές τιμές, η παλιά έκδοση της στρατηγικής TUC (έλεγχος LQ) και η νέα έκδοση (έλεγχος LQ και BD). Η περίοδος σηματοδότησης του δικτύου είναι σταθερή (90 sec) και μεταβάλλεται η διάρκεια των φάσεων. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι δεν χρησιμοποιούνται πληροφορίες προέλευσης-προορισμών και η προσομοίωση βασίζεται στα ποσοστά στροφής των κόμβων του δικτύου, τα οποία θεωρούνται σταθερά.

Για τις προσομοιώσεις στο δίκτυο των Χανίων δημιουργήθηκαν 6 διαφορετικά σενάρια ζήτησης. Στα σενάρια αυτά δίνονται τα οχήματα που εισέρχονται σε όλες τις εισόδους του δικτύου (origins) κάθε 15 λεπτά, ενώ διαφοροποιούνται ως προς τον αριθμό των οχημάτων δηλαδή τον κυκλοφοριακό φόρτο. Το Σενάριο 1 παρουσιάζει πολύ χαμηλή ζήτηση σε όλες τις εισόδους του και δεν σχηματίζονται ιδιαίτερες ουρές στους εσωτερικούς συνδέσμους του δικτύου. Στα Σενάρια 2, 3 και 4 η ζήτηση αυξάνεται προοδευτικά και μπορεί να γίνει αισθητή η επιρροή της στρατηγικής ελέγχου στην κυκλοφοριακή συμμόρφωση των συνδέσμων. Τέλος, τα Σενάρια 5 και 6 είναι αρκετά επιβαρυμένα και παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένη ζήτηση, με σημαντικές ουρές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και σημαντικά προβλήματα συμμόρφωσης. Ο Πίνακας Π.8 του παραρτήματος δείχνει αναλυτικά για κάθε είσοδο του δικτύου και για κάθε χρονική περίοδο (των 15 λεπτών) τον αριθμό των οχημάτων/λωρίδα που επιλέχτηκε για το Σενάριο ζήτησης 4.

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση για όλα τα κριτήρια αξιολόγησης και για όλα τα σενάρια ζήτησης για τις σταθερές

τιμές πρασίνων. Στους Πίνακες 5.2 και 5.3 παρατίθενται τα ίδια αποτελέσματα για τις άλλες δύο εναλλακτικές, δηλαδή τη στρατηγική TUC όπως ήταν πριν την παρούσα εργασία και τη νέα έκδοση που προτείνεται.

Σενάριο Ζήτησης	TWT (veh*h)	TTT (veh*h)	TTS (veh*h)	TTD (veh*km)	TFC (veh*lt)	TOG (veh)
1	0.00	670.61	670.61	12330.44	1371.78	0.00
2	0.00	854.86	854.86	14389.51	1689.02	0.00
3	9.76	1336.70	1346.46	16439.53	2381.17	0.00
4	213.67	2210.78	2424.45	18456.00	3803.63	0.00
5	1338.78	3596.90	4935.68	19998.59	7052.97	0.00
6	2059.38	3905.61	5964.99	19821.02	8372.50	167.99

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα των σταθερών πλάνων σηματοδότησης.

Σενάριο Ζήτησης	TWT (veh*h)	TTT (veh*h)	TTS (veh*h)	TTD (veh*km)	TFC (veh*lt)	TG (veh)
1	0.00	671.38	671.38	12330.44	1372.72	0.00
2	0.00	853.05	853.05	14389.51	1686.81	0.00
3	43.82	1233.66	1277.48	16439.53	2300.60	0.00
4	444.21	1650.27	2094.48	18474.09	3428.03	0.00
5	1219.32	2182.38	3401.70	20027.86	5161.36	180.90
6	1481.19	2408.94	3890.13	20449.05	5797.18	274.59

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα της παλιάς έκδοσης της στρατηγικής TUC (LQ).

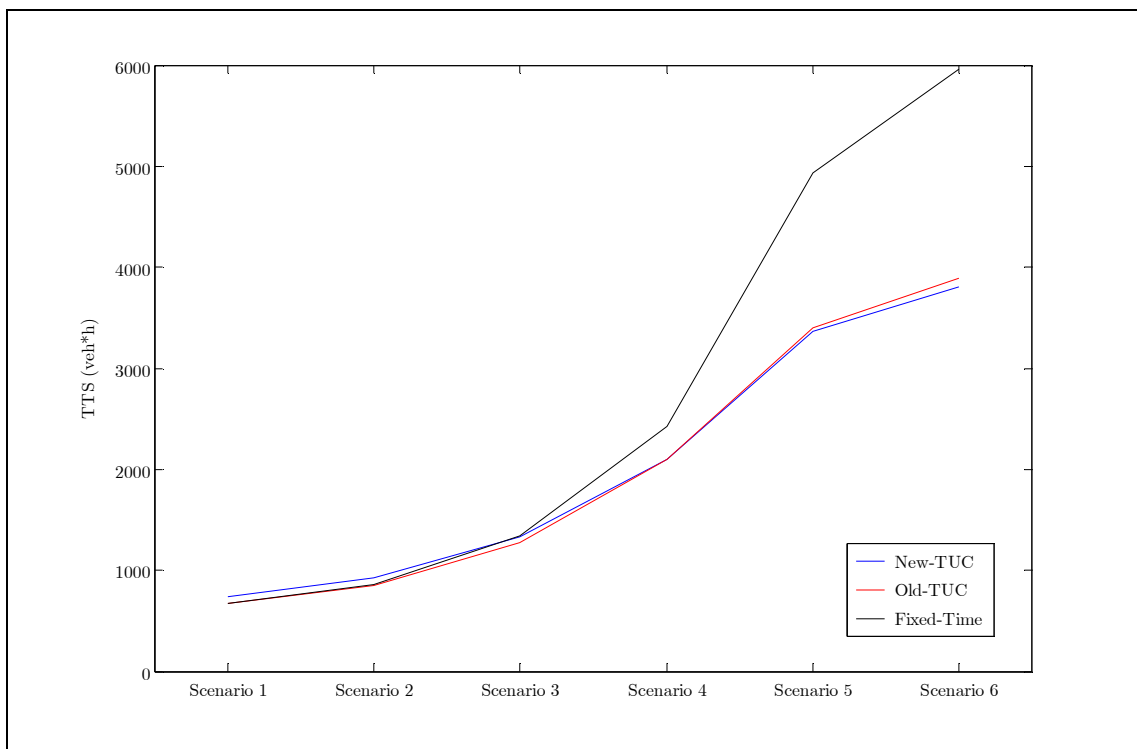
Σενάριο Ζήτησης	TWT (veh*h)	TTT (veh*h)	TTS (veh*h)	TTD (veh*km)	TFC (veh*lt)	TG (veh)
1	0.00	736.26	736.26	12325.12	1451.64	0.00
2	0.00	925.29	925.29	14386.32	1774.80	0.00
3	46.01	1284.16	1330.17	16436.54	2365.11	0.00
4	462.88	1638.47	2101.35	18446.32	3437.42	0.00
5	1385.65	1975.93	3361.58	20005.34	5121.87	187.53
6	1601.60	2198.08	3799.68	20429.60	5691.99	279.69

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα της νέας έκδοσης της στρατηγικής TUC (LQ και BD).

Οι διάρκειες των πρασίνων που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις σταθερών τιμών είναι αυτές που δίνονται στον Πίνακα Π.9 του παραρτήματος. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται ένα συγκριτικό διάγραμμα με τους χρόνους TTS, που αποτελούν και το σημαντικότερο κριτήριο αξιολόγησης για τις τρεις εναλλακτικές στρατηγικές σηματοδότησης. Τέλος, στα Σχήματα 5.2 και 5.3 φαίνεται η εξέλιξη των ουρών σε δύο από τους συνδέσμους του δικτύου για το σενάριο 6 και για όλες τις περιόδους σηματοδότησης των εναλλακτικών ελέγχων. Στο επάνω μέρος των διαγραμμάτων 5.2 και 5.3 παρουσιάζεται ποιος κανόνας εφαρμόστηκε από τον υβριδικό αλγόριθμο (BD ή LQ) σε κάθε περίοδο ελέγχου.

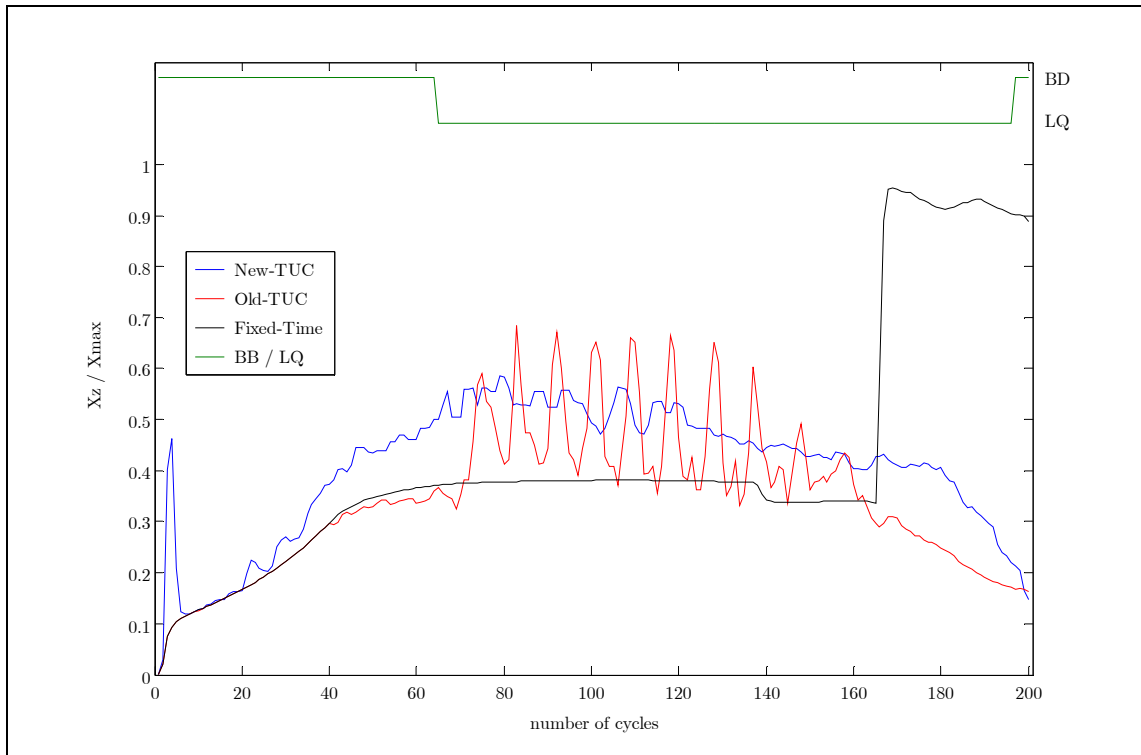
Από την εξέταση των αποτελεσμάτων των Πινάκων 5.1–5.3 και των Σχημάτων 5.1–5.3 μπορούμε συνοψίζοντας να κάνουμε τις ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Στα τρία πρώτα σενάρια η ζήτηση είναι πολύ χαμηλή και δεν έχει σημασία η στρατηγική σηματοδότησης. Τα οχήματα δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα στην κίνησή τους μέσα στο δίκτυο.
- Στα σενάρια 5 και 6 στο τέλος της προσομοίωσης υπάρχουν ουρές έξω από το δίκτυο τόσο για τον έλεγχο LQ όσο και για τον υβριδικό έλεγχο, ενώ για τη fixed-time σηματοδότηση είναι αισθητά μικρότερες (Πίνακες 5.1–5.3).

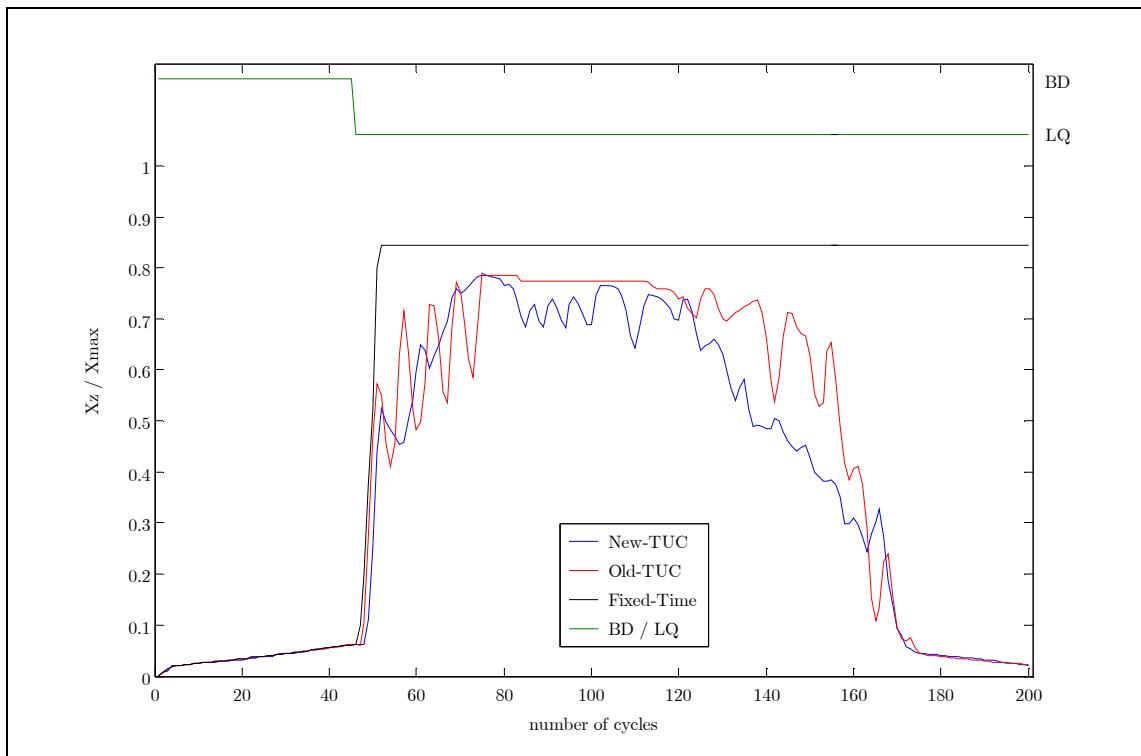


Σχήμα 5.1: Σύγκριση των TTS για τις τρεις εναλλακτικές.

Τα σχήματα 5.2–5.3 παρουσιάζουν την εκτιμώμενη τιμή των ουρών x_z , που υπολογίζεται από τη στρατηγική TUC και όχι την πραγματική τιμή.



Σχήμα 5.2: Συγκριτικό διάγραμμα των ουρών για το σύνδεσμο L8 του κόμβου j4.



Σχήμα 5.3: Συγκριτικό διάγραμμα των ουρών για το σύνδεσμο L22 του κόμβου j12.

Αυτό δείχνει το συντονισμό που προσπαθούν να επιτύχουν οι στρατηγικές ελέγχου σε επίπεδο δικτύου (σε αντίθεση με τη σταθερή σηματοδότηση), καθώς οι συνθήκες κυκλοφορίας στο δίκτυο είναι κορεσμένες. Μειώνουν τις διάρκειες των πρασίνων στις εισόδους, κρατώντας έτσι οχήματα έξω από το δίκτυο, προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα έντονης συμφόρησης στους εσωτερικούς συνδέσμους του δικτύου.

- Για τα σενάρια προσομοίωσης 4, 5 και 6 οι χρόνοι TTS είναι αισθητά χαμηλότεροι (μέχρι και 35% στο σενάριο 6) για τις περιπτώσεις που εφαρμόζεται έλεγχος (LQ ή LQ+BD). Το ίδιο ισχύει και για τα υπόλοιπα κριτήρια απόδοσης.
- Ωστόσο, τα αποτελέσματα για τα κριτήρια απόδοσης της παλιάς TUC και του υβριδικού αλγορίθμου είναι παρόμοια. Αυτό οφείλεται στη βελτιστοποίηση που έχει γίνει στις ονομαστικές τιμές πρασίνων g^N που χρησιμοποιεί ο έλεγχος LQ από τις υπεύθυνες αρχές για το αστικό δίκτυο των Χανίων.
- Όσον αφορά την εξέλιξη των ουρών στους συνδέσμους του δικτύου και εκεί τα αποτελέσματα για την περίπτωση των σταθερών πλάνων σηματοδότησης είναι πολύ χειρότερα. Αντίθετα, στην περίπτωση που εφαρμόζεται έλεγχος αποφεύγονται οι μεγάλες ουρές στους συνδέσμους του δικτύου, καθώς επιβαρύνουν το αντικειμενικό κριτήριο της βελτιστοποίησης.
- Στα Σχήματα 5.2 και 5.3 φαίνεται η εξέλιξη των ουρών για δύο από τους συνδέσμους του δικτύου. Μετά από προσεκτική μελέτη όλων των ουρών του δικτύου το συμπέρασμα ήταν πως κάποιες ουρές τις διαχειρίζεται καλύτερα η παλιά-TUC ενώ κάποιες άλλες η νέα-TUC. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν πως λόγω του συνδυασμού των κανόνων LQ και BD κάποιοι σύνδεσμοι ευνοούνται ενώ κάποιοι άλλοι “τιμωρούνται”, με το συνολικό αποτέλεσμα σε επίπεδο κόμβου να είναι περίπου το ίδιο.

5.1.2 Εφαρμογή στο δίκτυο του Southampton

Για τις προσομοιώσεις στο οδικό δίκτυο του Southampton δημιουργήθηκαν επίσης 6 σενάρια ζήτησης στα οποία προσδιορίζεται ο αριθμός των οχημάτων/ώρα/λωρίδα σε όλες τις εισόδους των δύο υποδικτύων. Το πρώτο σενάριο είναι το

πιο “ελαφρύ”, ενώ η ζήτηση αυξάνεται σταδιακά στα επόμενα σενάρια φτάνοντας στα 5 και 6 τα οποία εισάγουν στο δίκτυο μεγάλο αριθμό οχημάτων προκαλώντας έντονα φαινόμενα κυκλοφοριακής συμφόρησης στους περισσότερους συνδέσμους. Ο Πίνακας Π.10 του παραρτήματος παρουσιάζει για το Σενάριο 6 τον αριθμό των οχημάτων/ώρα/λωρίδα για κάθε είσοδο του δικτύου και για όλο το χρονικό ορίζοντα της προσομοίωσης.

Οι διερευνήσεις στο υπό μελέτη δίκτυο βασίζονται σε προσομοίωση 7 ωρών πραγματικού χρόνου με βήμα προσομοίωσης 1 sec. Και στο Southampton εξετάζονται οι τρεις εναλλακτικές σηματοδότησης που εξετάστηκαν και στα Χανιά, δηλαδή η προσομοίωση με σταθερές τιμές πρασίνων, ο έλεγχος LQ της στρατηγικής TUC και ο υβριδικός έλεγχος που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία.

Τα αποτελέσματα για όλα τα κριτήρια απόδοσης φαίνονται στους Πίνακες 5.4–5.6 με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στους χρόνους TTS της κάθε προσομοίωσης. Ένα συγκριτικό διάγραμμα των χρόνων TTS παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4, ενώ τέλος στα Σχήματα 5.5 και 5.6 παρατίθεται η εξέλιξη των ουρών σε δύο συνδέσμους του δικτύου καθ’ όλο το χρονικό ορίζοντα της προσομοίωσης για το σενάριο 6. Στον οριζόντιο άξονα των οχημάτων 5.5–5.6 αναπαρίσταται ο αριθμός των περιόδων προσομοίωσης (κύκλων), οι οποίοι είναι σταθεροί και ίσοι με 110 sec. Στο πάνω τμήμα των διαγραμμάτων παρουσιάζεται ποιος κανόνας εφαρμόστηκε από τον υβριδικό αλγόριθμο (BD ή LQ) σε κάθε περίοδο σηματοδότησης.

Από την εξέταση των Πινάκων 5.4–5.6 και των Σχημάτων 5.4–5.6 μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η διαφορά στο δίκτυο αυτό είναι αισθητή σχεδόν για όλα τα σενάρια και για όλα τα κριτήρια αξιολόγησης. Ο υβριδικός έλεγχος στο Southampton παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα και από τον κανόνα LQ, καθώς οι τιμές των πρασίνων g^N που χρησιμοποιήθηκαν στο δίκτυο αυτό δεν έχουν βελτιστοποιηθεί όπως στην περίπτωση των Χανίων.
- Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή σηματοδότησης σταθερών τιμών πρασίνων είναι λογικό να δημιουργούν μεγαλύτερη κυκλοφοριακή συμφόρηση από αυτά των άλλων δύο εναλλακτικών, αφού

Σενάριο Ζήτησης	TWT (veh*h)	TTT (veh*h)	TTS (veh*h)	TTD (veh*km)	TFC (veh*lt)	TQ (veh)
1	0.00	1338.99	1338.99	9126.36	2043.35	0.00
2	20.85	1922.19	1943.05	10859.42	2858.23	2.69
3	111.65	2878.40	2990.05	12950.63	4230.04	31.15
4	541.79	4579.15	5120.94	16184.43	6979.05	100.55
5	1227.91	5486.75	6714.66	18190.93	9020.36	274.30
6	2329.90	6612.33	8942.23	20610.70	11857.01	593.15

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα των σταθερών πλάνων σηματοδότησης.

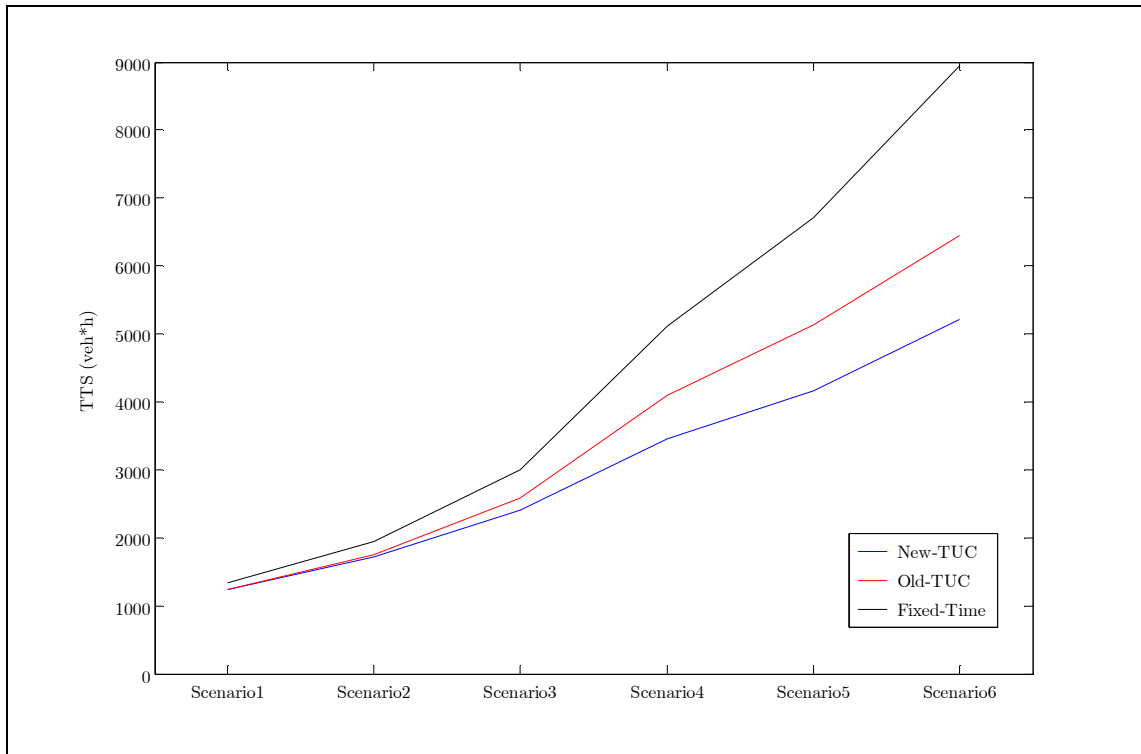
Σενάριο Ζήτησης	TWT (veh*h)	TTT (veh*h)	TTS (veh*h)	TTD (veh*km)	TFC (veh*lt)	TQ (veh)
1	0.00	1248.15	1248.15	9160.06	1934.03	0.00
2	0.00	1754.35	1754.35	10936.91	2631.38	0.00
3	0.00	2578.78	2578.78	13098.16	3734.22	0.00
4	0.00	4103.95	4103.95	16526.39	5748.85	0.00
5	85.37	5039.72	5125.09	18603.32	7088.45	17.55
6	431.74	6013.00	6444.75	21405.57	8826.15	144.89

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα της παλιάς έκδοσης της στρατηγικής TUC (LQ).

Σενάριο Ζήτησης	TWT (veh*h)	TTT (veh*h)	TTS (veh*h)	TTD (veh*km)	TFC (veh*lt)	TQ (veh)
1	0.00	1242.56	1242.56	9156.68	1927.06	0.00
2	0.00	1710.31	1710.31	10934.88	2577.56	0.00
3	0.00	2402.52	2402.52	13105.62	3519.52	0.00
4	0.00	3451.79	3451.79	16793.98	4965.23	0.00
5	0.00	4160.56	4160.56	19191.56	5937.59	0.00
6	140.48	5081.26	5221.75	22120.66	7364.34	63.90

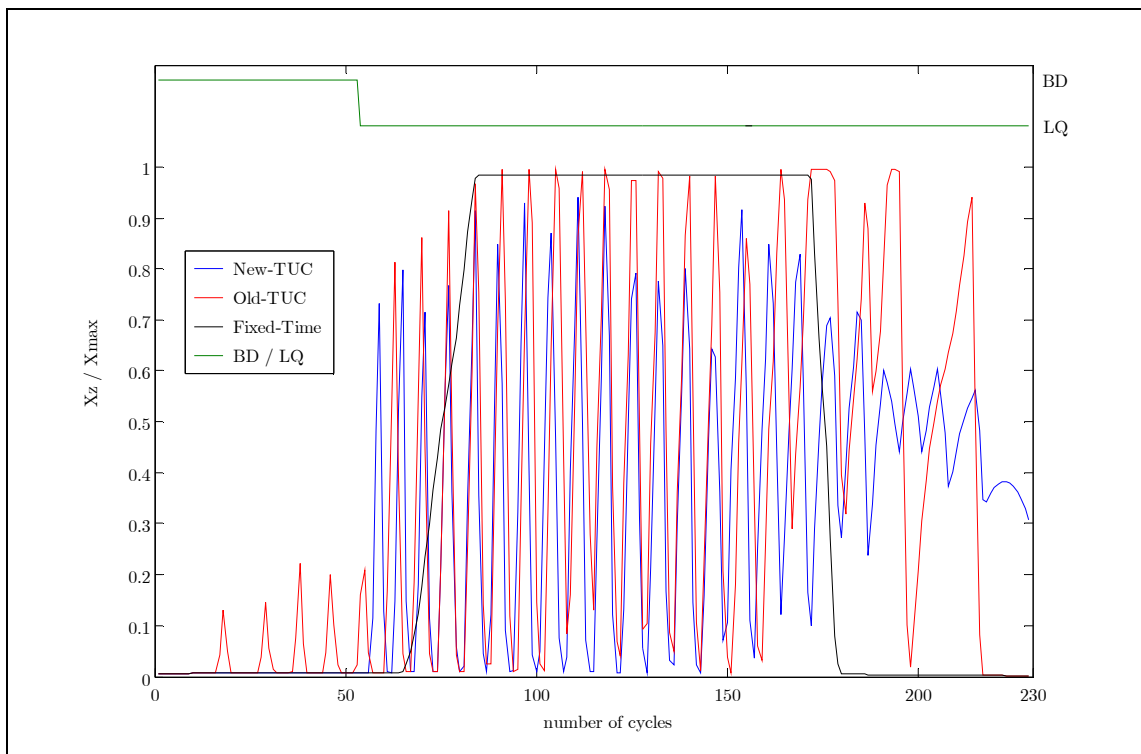
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα της νέας έκδοσης της στρατηγικής TUC (LQ και BD).

δεν χρησιμοποιούν κανένα κανόνα ελέγχου και δεν έχουν καμίας μορφής ανάδραση με το σύστημα. Στην περίπτωση δε που δεν εφαρμοστούν βελτιστοποιημένες ονομαστικές τιμές πρασίνου μπορούν να οδηγήσουν σε καταστρεπτικά αποτελέσματα, δημιουργώντας τεράστιες ουρές στο δίκτυο.

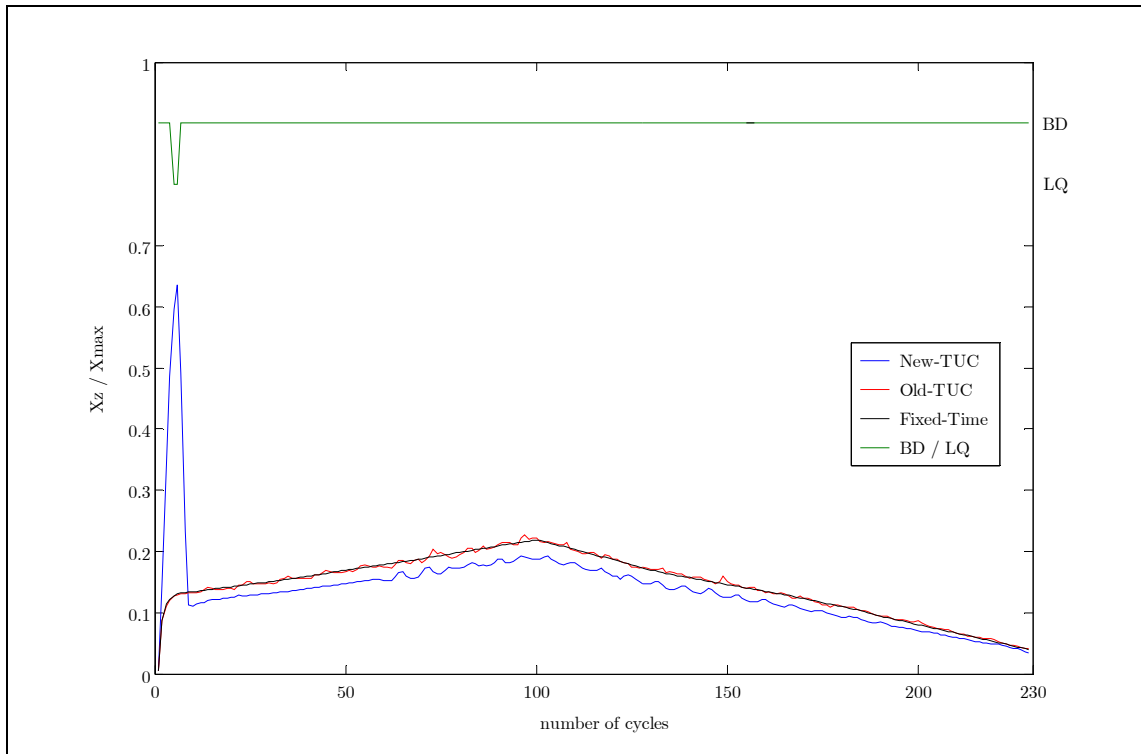


Σχήμα 5.4: Σύγκριση των TTS για τις τρεις εναλλακτικές.

Τα σχήματα 5.2–5.3 παρουσιάζουν την εκτιμώμενη τιμή των ουρών x_z , που υπολογίζεται από τη στρατηγική TUC και όχι την πραγματική τιμή.



Σχήμα 5.5: Συγκριτικό διάγραμμα των ουρών για το σύνδεσμο L34 του κόμβου j8.



Σχήμα 5.6: Συγκριτικό διάγραμμα των ουρών για το σύνδεσμο L12 του κόμβου j4.

- Το γεγονός αυτό φαίνεται και από τις συνολικές ουρές στις εισόδους του δικτύου (origins) στο τέλος των προσομοιώσεων, οι οποίες σε αυτή την περίπτωση είναι μεγαλύτερες για την περίπτωση εφαρμογής σηματοδότησης σταθερού χρόνου.
- Η νέα-TUC παρουσιάζει 41,6% βελτίωση σε σχέση με τη fixed-time σηματοδότηση και 19% βελτίωση σε σχέση με την παλιά-TUC στο χρόνο TTS για το σενάριο ζήτησης 6 (πιο φορτωμένο σενάριο). Τα αντίστοιχα ποσοστά για το σενάριο 5 είναι 38% και 18,8%.
- Για τις ουρές των συνδέσμων παρατηρήθηκε το ίδιο φαινόμενο με το δίκτυο των Χανίων, με τη σηματοδότηση σταθερού χρόνου να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συμφόρηση στο δίκτυο και τις άλλες δύο εναλλακτικές ελέγχου να παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά, με παρόμοια όμως συνολικά αποτελέσματα.
- Τέλος, αξίζει να παρατηρηθεί η εξέλιξη της ουράς στο σύνδεσμο L34 που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5. Η ουρά μεγαλώνει συνεχώς μέχρι που φτάνει σχεδόν τη μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια (με μια μεγάλη τιμή στη

διάρκεια του πρασίνου) σχεδόν μηδενίζεται κ.ο.κ. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί και σε παλαιότερη εφαρμογή της TUC στο δίκτυο του Southampton σε πραγματικές συνθήκες. Η διαχείριση αυτή της ουράς από τη στρατηγική ελέγχου, με μια πρώτη ματιά, δείχνει να μην είναι και τόσο λογική. Ωστόσο, η πολιτική αυτή της βελτιστοποίησης μπορεί να ερμηνευθεί από τη θέση του φωρατή στο συγκεκριμένο σύνδεσμο, ο οποίος βρίσκεται ακριβώς στο τέλος του συνδέσμου.

5.2 Εφαρμογή του αλγορίθμου σε πραγματικές συνθήκες

Η προσθήκη που έγινε στην παρούσα εργασία στην στρατηγική TUC ήταν ο κανόνας ελέγχου Εξισορρόπησης της Ζήτησης και η δημιουργία μιας υβριδικής μορφής ελέγχου. Μετά τη διερεύνηση της απόδοσης του υβριδικού αλγορίθμου μέσω προσομοιώσεων και τα θετικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, αποφασίστηκε να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου και σε πραγματικές συνθήκες. Οι διερευνήσεις έλαβαν χώρα στο αστικό δίκτυο των Χανίων, στο οποίο υπήρχαν ήδη εγκατεστημένες όλες οι απαραίτητες υποδομές για την εφαρμογή της στρατηγικής TUC (κεντρικός Η/Υ ελέγχου, φωρατές στους συνδέσμους, επικοινωνία του κεντρικού Η/Υ με τους τοπικούς ελεγκτές κ.λπ.).

Τα Χανιά έχουν συνολικά 28 κόμβους που ελέγχονται με φωτεινή σηματοδότηση από την εταιρία Siemens Greece (SAE), ενώ οι υποδομές τους θεωρούνται από τις πιο σύγχρονες στην Ευρώπη. Το σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιούν είναι το TASS [37], το οποίο επιλέγει με βάση μετρήσεις πραγματικού χρόνου ένα προϋπολογισμένο πλάνο από μια βιβλιοθήκη αποθηκευμένων πλάνων. Ένας MIGRA CENTRAL H/Y της Siemens με λειτουργικό σύστημα WINDOWS NT παρακολουθεί καθημερινά τους αστικούς κόμβους και σε γενικές γραμμές παρέχει τα παρακάτω:

- Πλήρη επιτήρηση των κόμβων (δυσλειτουργίες, διακοπή λειτουργίας κ.λπ.).
- Πλήρη συντονισμό όλων των αστικών κόμβων.
- Αλλαγή των σχεδίων ελέγχου σηματοδότησης σύμφωνα με την στρατηγική TASS ή την στρατηγική TUC.

Η Siemens Greece έχει καταφέρει την επιτυχή εφαρμογή της στρατηγικής TUC σε τμήματα του δικτύου των Χανίων. Αυτή η εφαρμογή λειτουργεί από τον Ιούνιο του 2001 παράλληλα με το υπάρχον UTC σύστημα και λόγω των καλών αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της στρατηγικής TUC, η Siemens Greece αποφάσισε να χρησιμοποιήσει αυτή τη μεθοδολογία, η οποία επεκτάθηκε και ελέγχει σήμερα 16 κόμβους του δικτύου.

Το κύριο χαρακτηριστικό του συστήματος TUC είναι η μεγαλύτερη λειτουργική ανεξαρτησία σε σχέση με το υπάρχον MIGRA UTC σύστημα. Τα κύρια πλεονεκτήματα της ανεξαρτησίας του συστήματος TUC είναι:

- Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του η επιρροή του πάνω στο υπάρχον UTC σύστημα είναι πολύ μικρή.
- Το σύστημα TUC και το υπάρχον UTC σύστημα μπορούν να λειτουργήσουν παράλληλα αν και μόνο το ένα από τα δύο θα είναι on-line κάποια δεδομένη χρονική στιγμή.
- Η μεταφορά από το ένα σύστημα στο άλλο μπορεί να γίνει πολύ εύκολα.
- Το σύστημα TUC μπορεί να εγκατασταθεί με πολύ λίγες τροποποιήσεις σε άλλα υπάρχοντα UTC συστήματα από διαφορετικούς κατασκευαστές.

Η νέα έκδοση της TUC εγκαταστάθηκε στον κεντρικό Η/Υ ελέγχου του τμήματος φωτεινής σηματοδότησης και εφαρμόστηκε πειραματικά στο δίκτυο των Χανίων (σε εναλλαγή με το υπάρχον σύστημα TASS) για μια περίοδο αρκετών μηνών. Έγιναν συγκρίσεις για την απόδοση των δύο συστημάτων κάτω από παρόμοιες συνθήκες κυκλοφοριακού φόρτου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην §5.2.3.

5.2.1 Κριτήριο για τη σύγκριση των συστημάτων TUC και TASS

Για να συγκριθούν οι δύο στρατηγικές ελέγχου TUC και TASS για την απόδοσή τους σε πραγματικό χρόνο στο δίκτυο των Χανίων έπρεπε να ποσοτικοποιηθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συνολικού δικτύου μέσω κάποιου κριτηρίου. Το κριτήριο αυτό στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι η μέση ταχύτητα στους

συνδέσμους του δικτύου, η οποία υπολογίζεται για κάθε ώρα και περιγράφει την απόδοση του κάθε συστήματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο οι δύο στρατηγικές ελέγχου της κυκλοφορίας μπορούν να αξιολογηθούν ως προς την αποτελεσματικότητά τους και να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα για το ποιά στρατηγική αποδίδει καλύτερα.

Η μέση ταχύτητα σε κάποιον σύνδεσμο z υπολογίζεται εύκολα, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις ροής $q_z(k)$ και ποσοστού κατάληψης $o_z(k)$ του συνδέσμου που παρέχονται από τους φωρατές σε πραγματικό χρόνο, σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους [28]:

- Ο Συνολικός Χρόνος Παραμονής (TTS) των οχημάτων στον σύνδεσμο z για τη διάρκεια μιας ώρας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (σε veh*h):

$$TTS = \sum_k \left[\frac{o_z(k) \cdot L_z \cdot \lambda_z \cdot T(k)}{\Lambda} \right] \quad (5.1)$$

όπου $o_z(k)$ το ποσοστό κατάληψης του συνδέσμου z κατά τον k κύκλο εφαρμογής της στρατηγικής, όπως αυτός μετρήθηκε από τον αντίστοιχο φωρατή, L_z και λ_z το μήκος και ο αριθμός των λωρίδων του συνδέσμου z αντίστοιχα και Λ το μέσο μήκος οχημάτων (5m).

- Η Συνολική Διανυθείσα Απόσταση (TTD) των οχημάτων στον σύνδεσμο z για τη διάρκεια μιας ώρας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (σε veh*km):

$$TTD = \sum_k [q_z(k) \cdot L_z \cdot T(k)] \quad (5.2)$$

όπου $q_z(k)$ είναι η ροή του συνδέσμου z κατά τον k κύκλο εφαρμογής της στρατηγικής, όπως αυτή μετρήθηκε από τον αντίστοιχο φωρατή.

- Η μέση ταχύτητα του συνδέσμου για τη διάρκεια της ώρας αυτής δίνεται από τη σχέση (σε km/h):

$$w_z = \frac{TTD}{TTS} \quad (5.3)$$

Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί πως η μέση ταχύτητα σε επίπεδο συνδέσμου ή κόμβου ή και ολόκληρου του δικτύου δεν είναι πάντα αντιπροσωπευτική, καθώς εξαρτάται εκτός από τη στρατηγική ελέγχου και από άλλους παράγοντες όπως

βλάβες φωρατών, κατανομή της κυκλοφορίας κ.α. Ωστόσο, όταν οι χρονικές περίοδοι οι οποίες συγκρίνονται αφορούν πανομοιότυπες κυκλοφοριακές συνθήκες και τα δεδομένα των φωρατών είναι αξιόπιστα, τότε αποτελεί κριτήριο για την απόδοση της εφαρμοζόμενης στρατηγικής ελέγχου.

5.2.2 Δυσκολίες που παρουσιάστηκαν κατά την υλοποίηση

Τα επίπεδα ελέγχου που εφαρμόστηκαν στο δίκτυο των Χανίων ήταν ο Έλεγχος της Διάρκειας των Φάσεων (Split Control), ο Έλεγχος της Διάρκειας Περιόδου (Cycle Control) και ο Έλεγχος της Χρονικής Διαφοράς (Offset Control). Τις πρώτες μέρες εφαρμογής της στρατηγικής TUC στα Χανιά παρουσιάστηκαν διάφορες δυσκολίες που είχαν να κάνουν με την υλοποίηση του αλγορίθμου στο συγκεκριμένο δίκτυο. Κατ' αρχάς για την εφαρμογή του συστήματος πρέπει πρώτα να καθοριστούν οι τιμές σε διάφορες παραμέτρους, οι οποίες αφορούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε δικτύου. Επειδή η στρατηγική TUC είχε εφαρμοστεί ξανά και μάλιστα σχετικά πρόσφατα στο δίκτυο των Χανίων [8, 10], οι περισσότερες από τις παραμέτρους είχαν διερευνηθεί και οριστεί κατάλληλα. Ωστόσο χρειάστηκαν μερικές ημέρες έως ότου να καθοριστούν (fine-tune) όλες οι παράμετροι για την καλύτερη απόδοση του συστήματος.

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται συνοπτικά (επειδή ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας) ένα πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε με την περίοδο σηματοδότησης του δικτύου. Ο κανόνας ελέγχου που χρησιμοποιεί η στρατηγική TUC για τον υπολογισμό του κύκλου εφαρμόζεται στα Χανιά κάθε 10 λεπτά και είναι ο ακόλουθος:

$$C(k) = C^N + K^c [\sigma(k) - \sigma^N] \quad (5.4)$$

$C(k)$: διάρκεια περιόδου

C^N : ονομαστική διάρκεια περιόδου

K^c : παράμετρος που αφορά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δικτύου

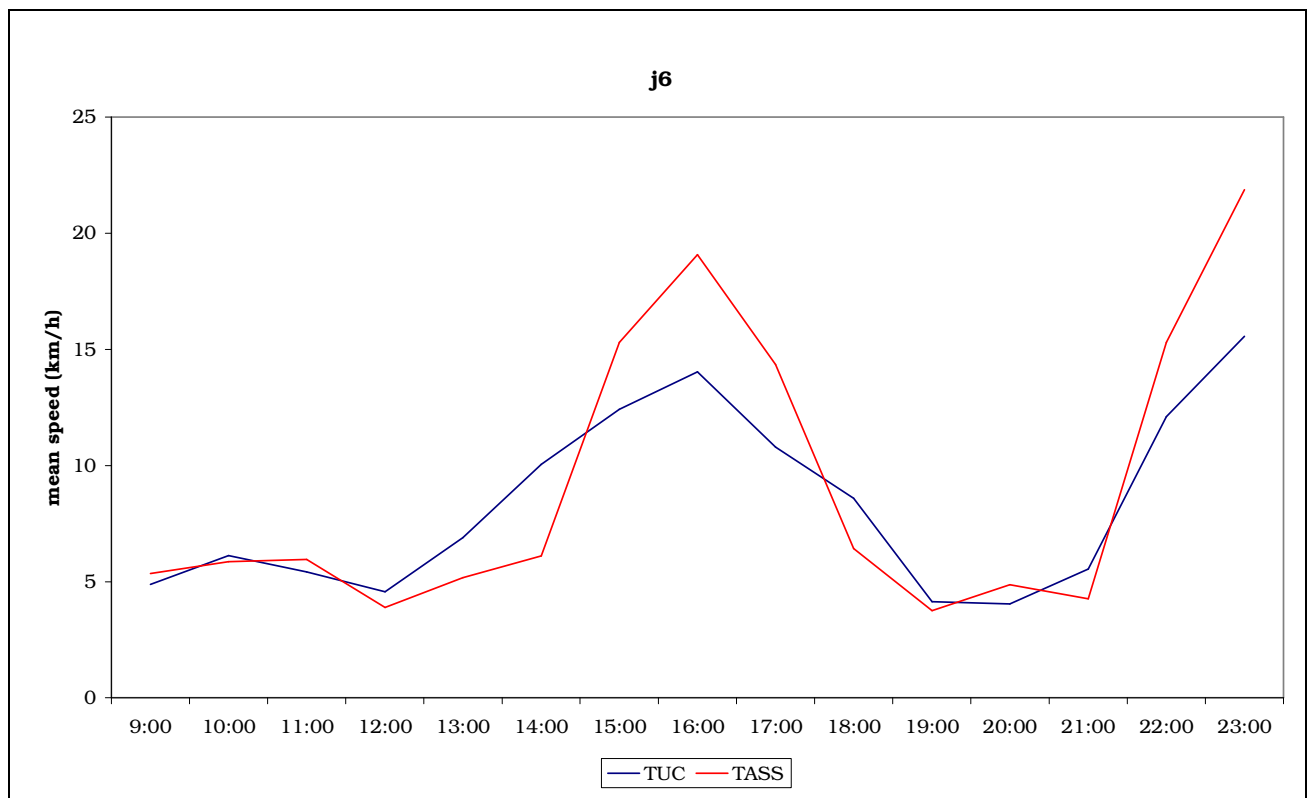
$\sigma(k)$: μέσος όρος φόρτου των συνδέσμων με τη μεγαλύτερη συμφόρηση, που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του κύκλου

σ^N : ονομαστικός μέσος όρος φόρτου

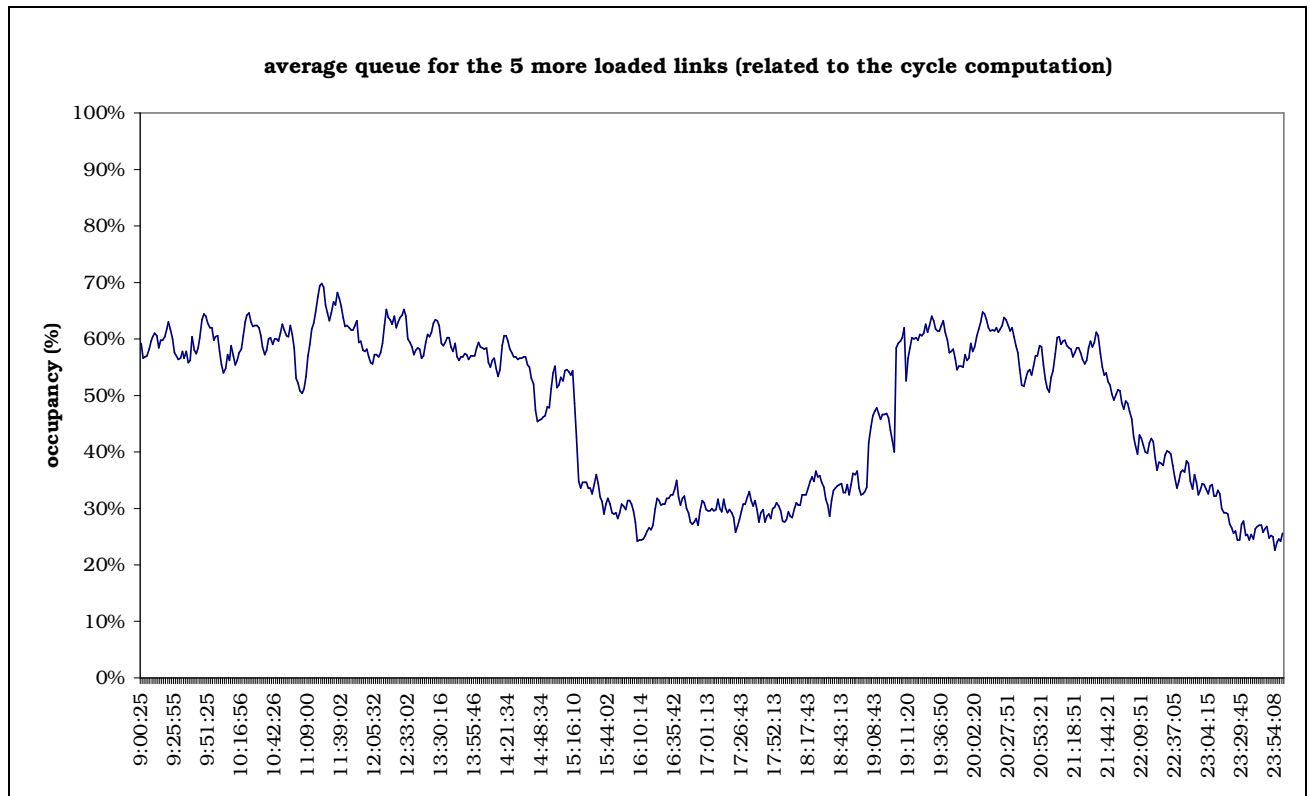
k : διακριτό βήμα ελέγχου (περίοδος ελέγχου: 10 λεπτά)

Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η σύγκριση της μέσης ταχύτητας για τον κόμβο j6 για ολόκληρη την ημέρα της Παρασκευής 23/09/2005 (που στα Χανιά εφαρμοζόταν η TUC) με την Παρασκευή 16/09/2005 (που εφαρμοζόταν το σύστημα TASS). Επίσης στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται ο μέσος όρος του ποσοστού κατάληψης των 5 πιο φορτωμένων συνδέσμων καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Οι σύνδεσμοι αυτοί είναι αυτοί που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό της περιόδου C του δικτύου (σύμφωνα με την (5.4)).

Αυτό που μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι πως η στρατηγική TUC παρουσιάζει πολύ καλή απόδοση όταν η ζήτηση είναι υψηλή (μεγαλύτερη μέση ταχύτητα από το TASS), ενώ η απόδοσή της πέφτει για χαμηλές τιμές ζήτησης (μικρότερη μέση ταχύτητα από το TASS). Όταν δηλαδή στον κόμβο j6 υπάρχουν λίγα οχήματα (και παράλληλα μεγάλη τιμή μέσης ταχύτητας) το σύστημα TASS δρα καλύτερα, ενώ αντίθετα η TUC φαίνεται να πλεονεκτεί σε καταστάσεις με μεγαλύτερο κυκλοφοριακό φόρτο (όπου αναλογικά και η μέση ταχύτητα του κόμβου ελλατώνεται).



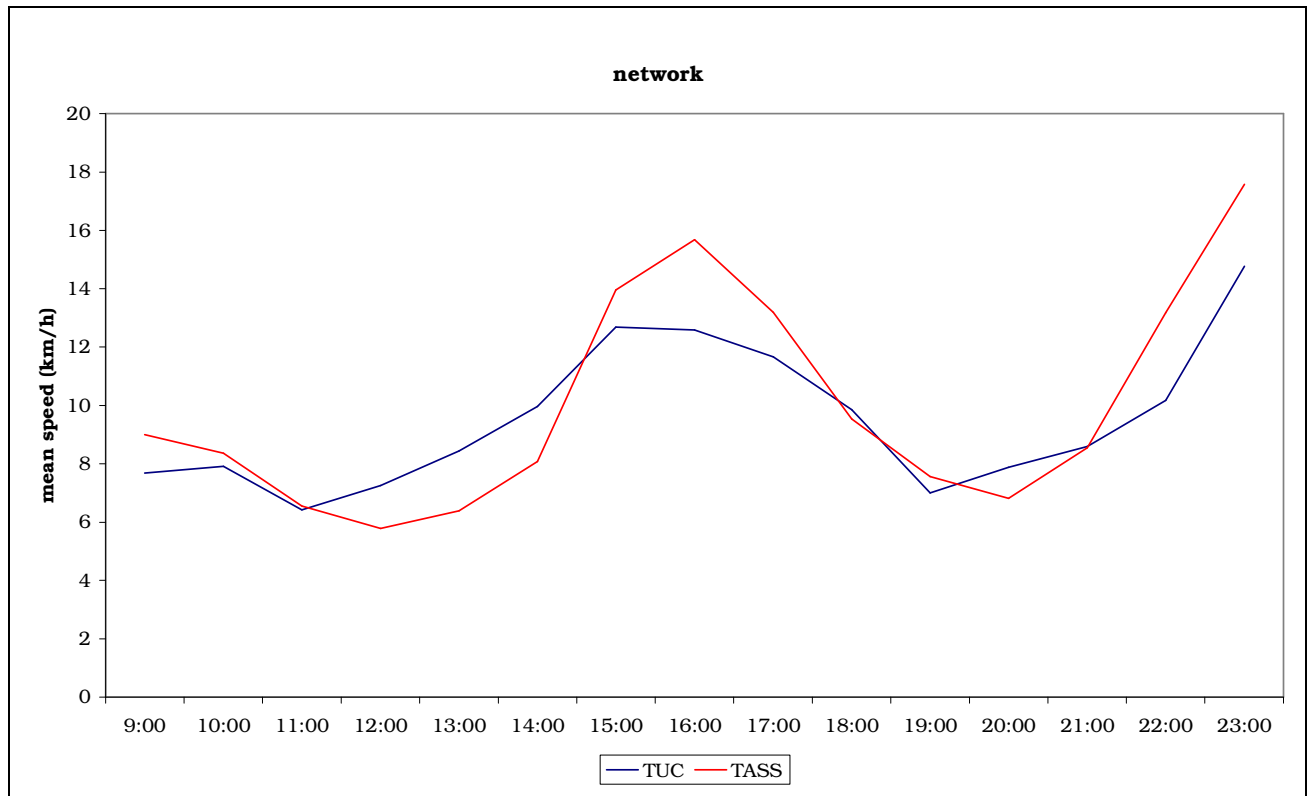
Σχήμα 5.7: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ταχύτητας τα για τον κόμβο j6.



Σχήμα 5.8: Μέσος όρος ποσοστού κατάληψης των 5 πιο φορτωμένων συνδέσμων.

Ύστερα από προσεκτική μελέτη στο εργαστήριο όλων των μετρήσεων για τις συγκεκριμένες μέρες είδαμε πως το φαινόμενο αυτό παρουσιαζόταν σχεδόν σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Η σύγκριση της μέσης ταχύτητας, δηλαδή, είχε την ίδια μορφή και για τη συνολική σύγκριση ολόκληρου του δικτύου (Σχήμα 5.9). Έτσι η TUC ήταν καλύτερη τις ώρες του μεγάλου κυκλοφοριακού φόρτου (πρωί και απόγευμα), αλλά υστερούσε του TASS τις ώρες χαμηλής ζήτησης (μεσημέρι και αργά το βράδυ). Άλλωστε η συγκεκριμένη μέρα δεν αποτελούσε μεμονωμένο παράδειγμα, καθώς το αρνητικό αυτό φαινόμενο εμφανιζόταν σχεδόν σε όλες τις ημέρες εφαρμογής του συστήματος TUC.

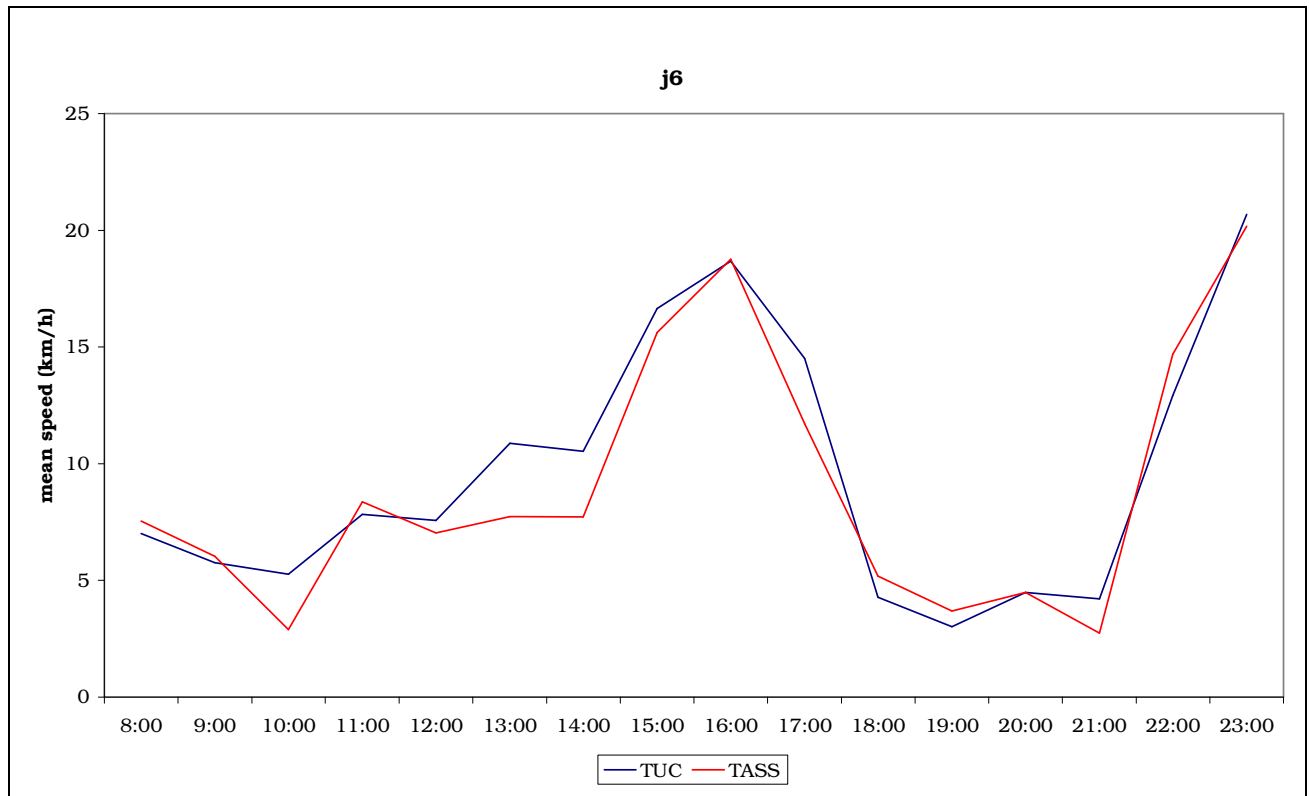
Η εξήγηση του αρνητικού αυτού και ταυτόχρονα περίεργου φαινομένου είναι απλή. Οι παράμετροι που υπάρχουν στη σχέση (5.4) και αφορούν τον υπολογισμό της διάρκειας της περιόδου σηματοδότησης της στρατηγικής TUC δεν είχαν οριστεί σωστά και η στρατηγική εφάρμοζε στο δίκτυο μεγαλύτερο κύκλο απ' ότι χρειαζόταν. Συγκρίνοντας τους κύκλους που εφάρμοζε η TUC στη διάρκεια μιας ημέρας με τους αντίστοιχους κύκλους του TASS είδαμε πως ήταν αισθητά μεγαλύτεροι. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να αυξάνονται οι καθυστερήσεις



Σχήμα 5.9: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ταχύτητας τα για ολόκληρο το δίκτυο.

της ώρες μη αιχμής και η TUC να παρουσιάζει μικρότερες μέσες ταχύτητες στους συνδέσμους. Αντίθετα τις ώρες αιχμής οι μεγάλοι κύκλοι αύξαναν τη χωρητικότητα των κόμβων και διευκόλυναν τη διέλευση των οχημάτων. Γι' αυτό το λόγο το πρόβλημα έπρεπε να αντιμετωπιστεί με προσοχή και λαμβάνοντας υπόψη το αντίστοιχο θεωρητικό υπόβαθρο και την εμπειρία από αντίστοιχες εφαρμογές, καθώς η αυθαίρετη μείωση του κύκλου θα μπορούσε να οδηγήσει σε αντίθετα από τα επιθυμητά αποτελέσματα και να επιδεινώσει ακόμα περισσότερο τα πράγματα.

Μετά από στοχευμένα πειράματα και βελτιστοποίηση των τιμών των παραμέτρων s και x (οι τιμές μειώθηκαν), ο κύκλος του δικτύου που εφαρμόζε η στρατηγική μειώθηκε και η ροή της κυκλοφορίας βελτιώθηκε. Οι ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο των Χανίων, επιτρέπουν την ομαλή ροή των οχημάτων στους περισσότερους από τους υπό μελέτη κόμβους με σχετικά μικρούς κύκλους σηματοδότησης (60–80 sec τις ώρες μη αιχμής και 90–100 sec τις ώρες αιχμής). Στο Σχήμα 5.10 φαίνεται ένα συγκριτικό διάγραμμα της μέσης ταχύτητας για τον κόμβο j6 ένα μήνα αργότερα. Η ημέρα εφαρμογής της TUC που παρουσιάζεται



Σχήμα 5.10: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ταχύτητας τα για τον κόμβο j6.

είναι η Τρίτη 25/10/2005 ενώ για το TASS μια εβδομάδα πριν, η Τρίτη 18/10/2005. Στο γράφημα αυτό βλέπουμε πως η TUC ανεβάζει και αυτή τη μέση ταχύτητα του κόμβου περίπου στα 20km/h το μεσημέρι (λόγω της μείωσης του κύκλου), ενώ τα αποτελέσματα είναι καλύτερα σχεδόν για όλη τη διάρκεια της ημέρας.

5.2.3 Αποτελέσματα από την εφαρμογή στο δίκτυο των Χανίων σε πραγματικό χρόνο

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις συγκρίσεις που έγιναν μεταξύ των συστημάτων TUC και TASS για την αποτελεσματικότητά τους στην αντιμετώπιση του προβλήματος της φωτεινής σηματοδότησης στην πόλη των Χανίων. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η νέα έκδοση της TUC, με την υβριδική μορφή ελέγχου, εφαρμόστηκε στο δίκτυο των Χανίων για αρκετούς μήνες με μεγάλη επιτυχία. Η τελική αξιολόγηση όμως των δύο συστημάτων έλαβε χώρα στο τέλος του διαστήματος εφαρμογής της TUC, στις αρχές του καλοκαιριού

του 2006. Από όλες τις μέρες που συλλέχθηκαν δεδομένα από το κέντρο ελέγχου έπρεπε να αποκλειστούν αυτές οι οποίες παρουσίαζαν κάποια ιδιαιτερότητα (π.χ. βροχή, πορεία στο κέντρο της πόλης, έργα στους δρόμους κ.λπ.), έτσι ώστε οι μέρες που θα μείνουν για σύγκριση να είναι όσο το δυνατόν πιο κατάλληλες.

Επίσης, τα αποτελέσματα της τελικής αξιολόγησης αφορούν μόνο τους 8 πρώτους κόμβους του δικτύου των Χανίων (j1–j8, Σχήμα 4.2), που αποτελούν το κέντρο της πόλης. Στους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου υπήρχε κάποιο τεχνικό πρόβλημα που αφορούσε στην υλοποίηση του συστήματος και όχι στην στρατηγική ελέγχου TUC. Έτσι, σε συνεργασία με την αρμόδια Δημοτική Αρχή που είναι υπεύθυνη για τη σηματοδότηση της πόλης αποφασίστηκε η εφαρμογή του συστήματος TUC στους 8 αυτούς κόμβους, ενώ οι υπόλοιποι 8 ελέγχονταν από το σύστημα TASS.

Οι δύο στρατηγικές συγκρίνονται για τις ίδιες ημέρες και ώρες της εβδομάδος και μάλιστα κοντινών μεταξύ τους εβδομάδων, προκειμένου να υπάρχει μια ομοιομορφία στην κατάσταση των συγκρινόμενων κυκλοφοριακών συνθηκών. Στον Πίνακα 5.7 της επόμενης σελίδας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκρίσεων για τις μέρες που απέμειναν μετά τον αποκλεισμό των ημερών που δεν μπορούσαν να συγκριθούν. Για κάθε μέρα, είτε εφαρμόζεται το σύστημα TUC είτε το TASS, παρουσιάζονται οι ώρες εφαρμογής, τα συνολικά TTS και TTD για όλους τους συνδέσμους του δικτύου, η μέση ταχύτητα του δικτύου, καθώς και η ποσοστιαία διαφορά που προκύπτει από τη σύγκριση των δύο συστημάτων.

Επίσης, στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα, για τις ίδιες μέρες και ώρες, χωρίς όμως να συμπεριλαμβάνονται τα δεδομένα του κόμβου j3 (είναι δηλαδή τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των κόμβων j1–j2 και j4–j8). Ο Πίνακας αυτός, παρατίθεται εδώ, γιατί μετά από την προσεκτική ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε πως τα δεδομένα του κόμβου j3 παρουσίαζαν μεγάλες διακυμάνσεις (από μέρα σε μέρα), γεγονός που δεν τα καθιστούσε αξιόπιστα. Υπήρχαν μέρες που το σύστημα TUC ήταν πολύ καλύτερο από το TASS και αντίστροφα, ενώ οι διαφορές στις μέσες ταχύτητες ήταν τόσο μεγάλες που δεν μπορούσαν να αποδοθούν στην εφαρμοζόμενη σηματοδότηση.

Ώρες εφαρμογής	TUC				Σύγκριση απόδοσης*	TASS			
		TTD	TTS	MS		MS	TTS	TTD	
9:00-00:00	Πέμπτη 25/05	46449.48	4029.95	11.53	9.13%	10.56	4404.04	46514.32	Πέμπτη 08/06
7:00-00:00	Παρασκευή 26/05	51709.90	4599.87	11.24	23.06%	9.13	5704.57	52110.56	Παρασκευή 02/06
					21.52%	9.25	5506.07	50935.92	Παρασκευή 09/06
7:00-00:00	Σάββατο 27/05	50651.04	3801.08	13.33	24.50%	10.70	4851.53	51928.73	Σάββατο 03/06
					8.27%	12.31	4003.04	49267.66	Σάββατο 10/06
7:00-00:00	Κυριακή 28/05	40098.26	2567.33	15.62	12.08%	13.94	3087.68	43029.60	Κυριακή 04/06
					0.19%	15.59	2633.93	41060.18	Κυριακή 11/06
9:00-00:00	Τρίτη 30/05	46708.14	4165.68	11.21	21.69%	9.21	4888.49	45043.00	Τρίτη 06/06
8:00-00:00	Τρίτη 13/06	48182.15	4988.13	9.66	3.42%	9.34	5145.95	48065.14	Τρίτη 06/06
8:00-00:00	Τετάρτη 14/06	46819.69	4344.20	10.78	9.34%	9.86	4868.76	47990.79	Τετάρτη 31/05
					-1.88%	10.98	4413.81	48479.35	Τετάρτη 07/06

*Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης ταχύτητας: (TUC-TASS)*100%/TASS

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα συγκρίσεων της απόδοσης των στρατηγικών TUC και TASS.

Ώρες εφαρμογής	TUC				Σύγκριση απόδοσης*	TASS			
		TTD	TTS	MS		MS	TTS	TTD	
9:00-00:00	Πέμπτη 25/05	39769.13	3604.88	11.03	1.18%	10.90	3703.81	40385.44	Πέμπτη 08/06
7:00-00:00	Παρασκευή 26/05	44125.56	4093.50	10.78	9.42%	9.85	4711.70	46415.30	Παρασκευή 02/06
					10.32%	9.77	4564.40	44600.85	Παρασκευή 09/06
7:00-00:00	Σάββατο 27/05	43429.96	3332.57	13.03	13.45%	11.49	4037.41	46376.41	Σάββατο 03/06
					-0.71%	13.13	3299.84	43311.23	Σάββατο 10/06
7:00-00:00	Κυριακή 28/05	34625.27	2138.88	16.19	8.50%	14.92	2550.58	38054.88	Κυριακή 04/06
					-9.86%	17.96	2030.33	36463.76	Κυριακή 11/06
9:00-00:00	Τρίτη 30/05	39992.00	3658.42	10.93	20.70%	9.06	4309.34	39027.20	Τρίτη 06/06
8:00-00:00	Τρίτη 13/06	42360.43	4415.91	9.59	4.63%	9.17	4537.34	41598.91	Τρίτη 06/06
8:00-00:00	Τετάρτη 14/06	41880.27	3484.95	12.02	19.28%	10.08	4163.63	41949.90	Τετάρτη 31/05
					2.78%	11.69	3678.38	43007.59	Τετάρτη 07/06

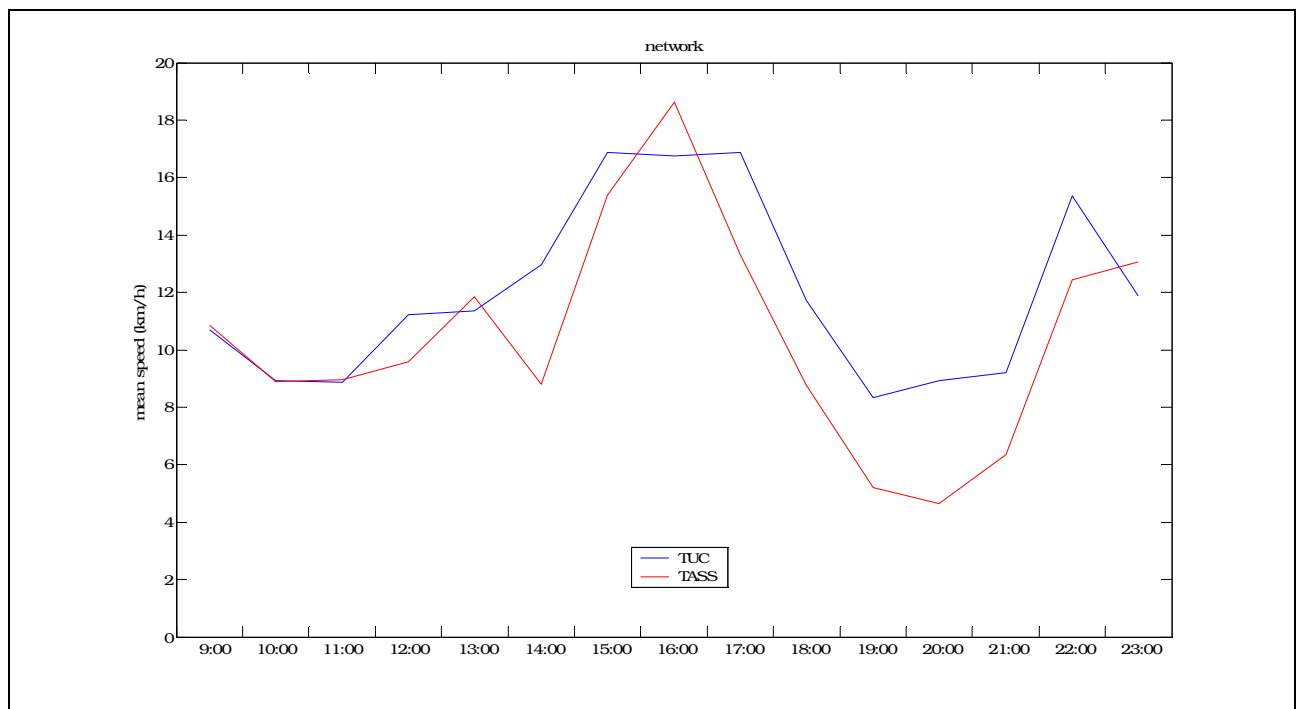
*Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης ταχύτητας: (TUC-TASS)*100%/TASS

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα συγκρίσεων της απόδοσης των στρατηγικών TUC και TASS.

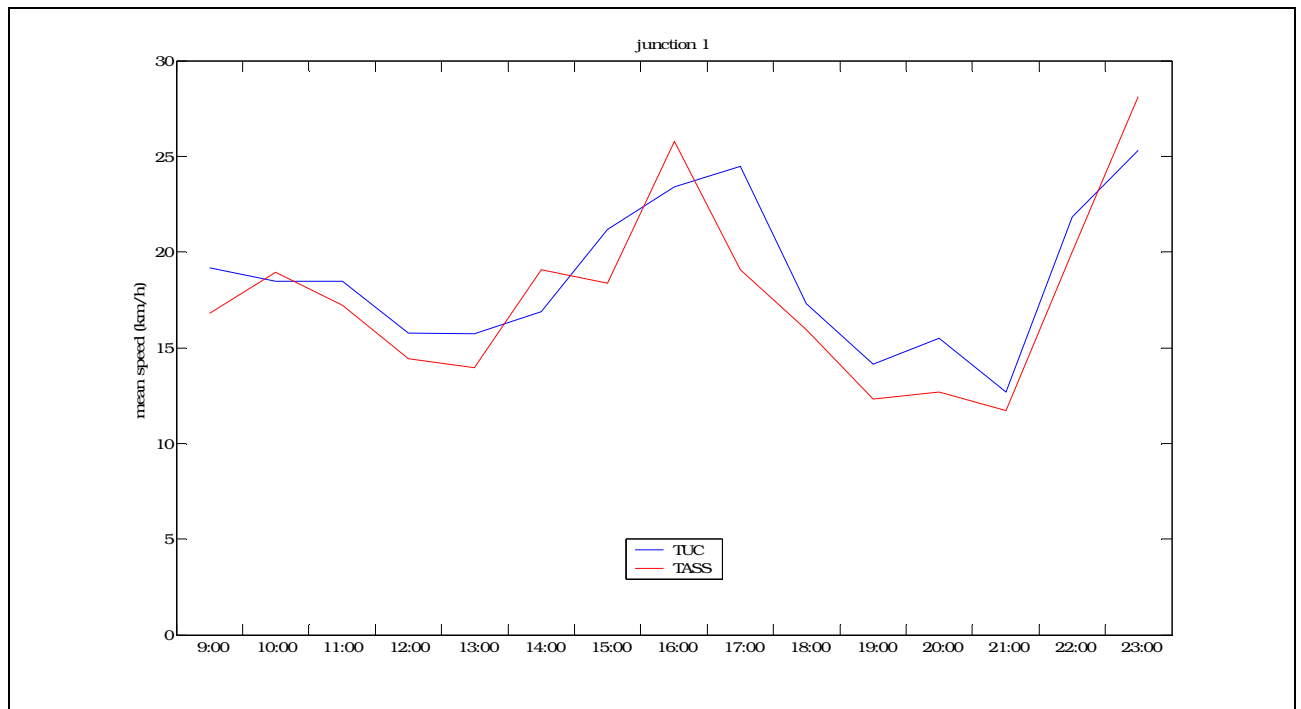
Όπως παρατηρείται και από τα στοιχεία των Πινάκων 5.7–5.8 οι μετρήσεις των φωρατών του κόμβου j3 επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική αξιολόγηση των συστημάτων TUC και TASS, ενώ οφείλονται σε κάποιο παράγοντα που δεν έχει σχέση με το εφαρμοζόμενο σύστημα (πιθανότατα σε ενέργειες της Δημοτικής Αστυνομίας, ή σε αστοχία των φωρατών). Το φαινόμενο αυτό παρουσιάστηκε μόνο στον συγκεκριμένο κόμβο και οφείλεται πιθανώς στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του συνδέσμου L48 του κόμβου (την οδό Κυδωνίας). Ο σύνδεσμος αυτός είναι ένας από τους κεντρικότερους και μεγαλύτερους δρόμους της πόλης, και πιθανά παράνομα παρκαρίσματα μπορούν να έχουν καταστρεπτικά αποτελέσματα στην ροή των οχημάτων και συνεπακόλουθα στη μέση ταχύτητα του συνδέσμου.

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται επιλεκτικά κάποια σχήματα με συγκρίσεις των μέσων ταχυτήτων για τα συστήματα TUC και TASS. Παρόμοια διαγράμματα υπάρχουν για όλες τις μέρες αξιολόγησης και αφορούν τον κάθε κόμβο ξεχωριστά, αλλά και ολόκληρο το εξεταζόμενο δίκτυο. Τα Σχήματα 5.11–5.19 που παρουσιάζονται εδώ αφορούν τις παρακάτω ημέρες αξιολόγησης:

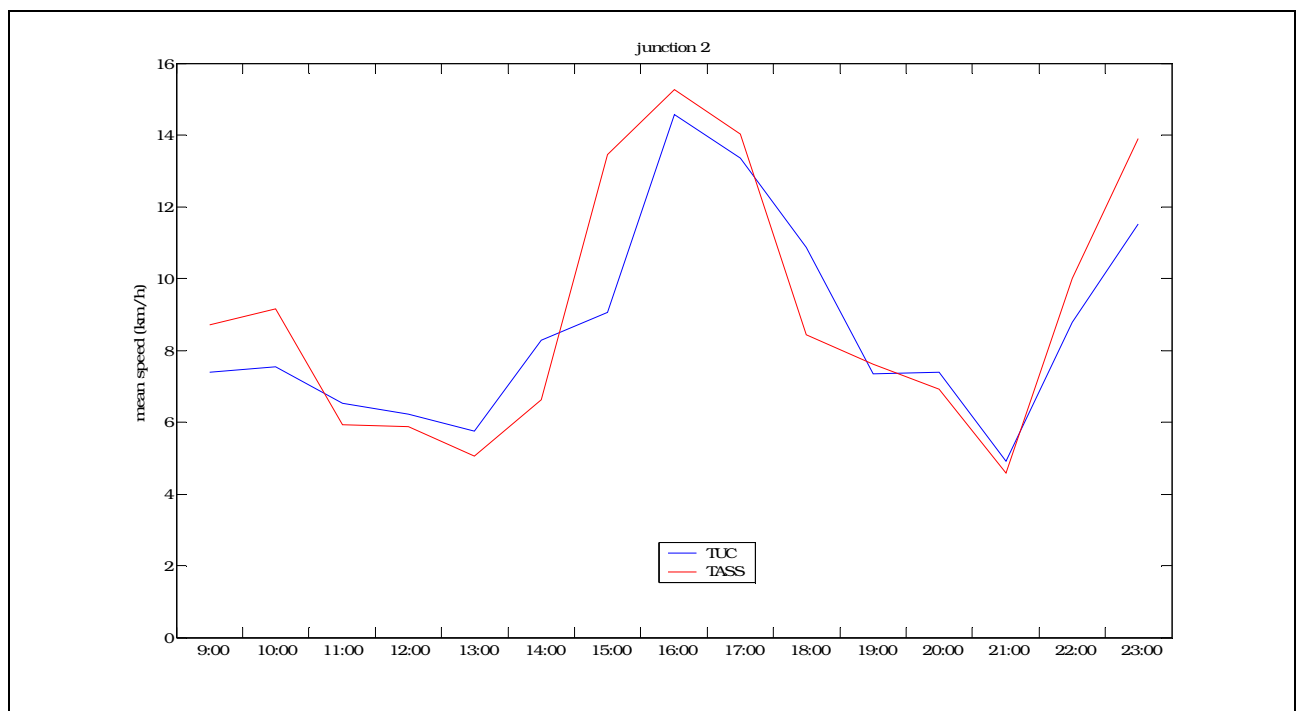
- σύγκριση της Πέμπτης 25/05/2006 (TUC) με την Πέμπτη 08/06/2006 (TASS) και
- σύγκριση της Τρίτης 30/05/2006 (TUC) με την Τρίτη 06/06/2006 (TASS).



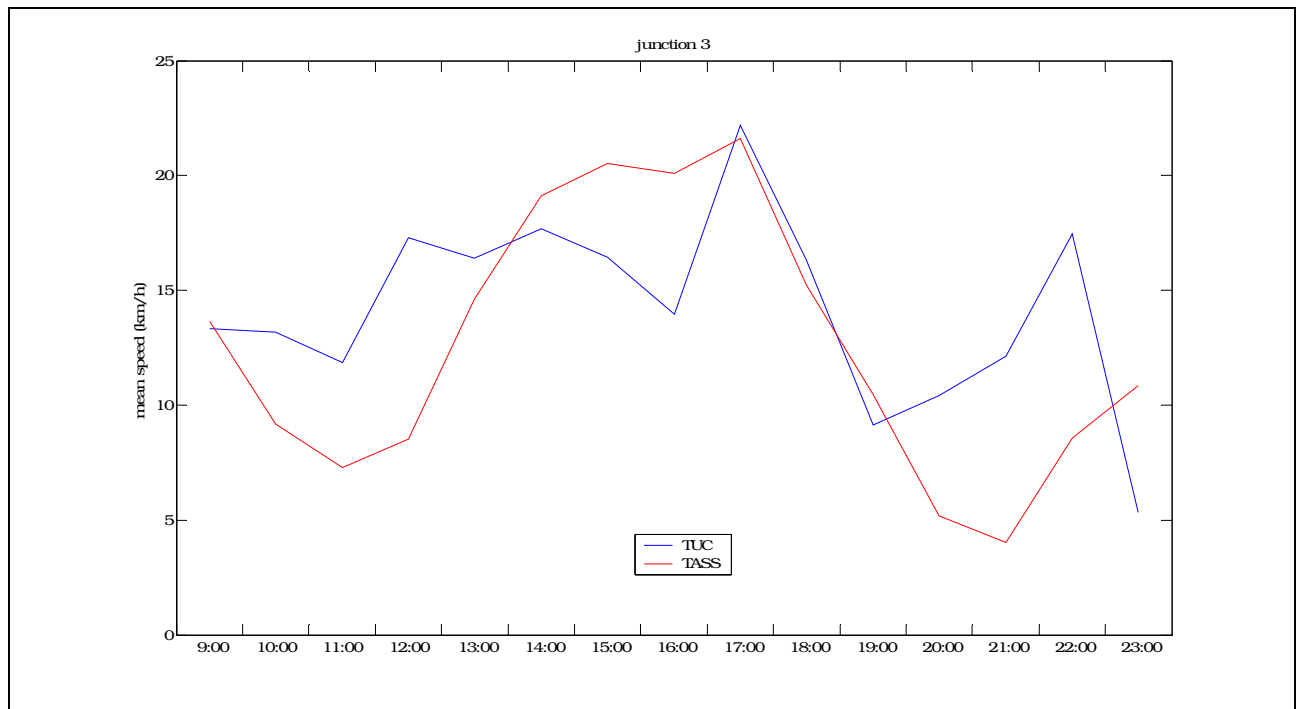
Σχήμα 5.11: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ταχύτητας τα για ολόκληρο το δίκτυο.



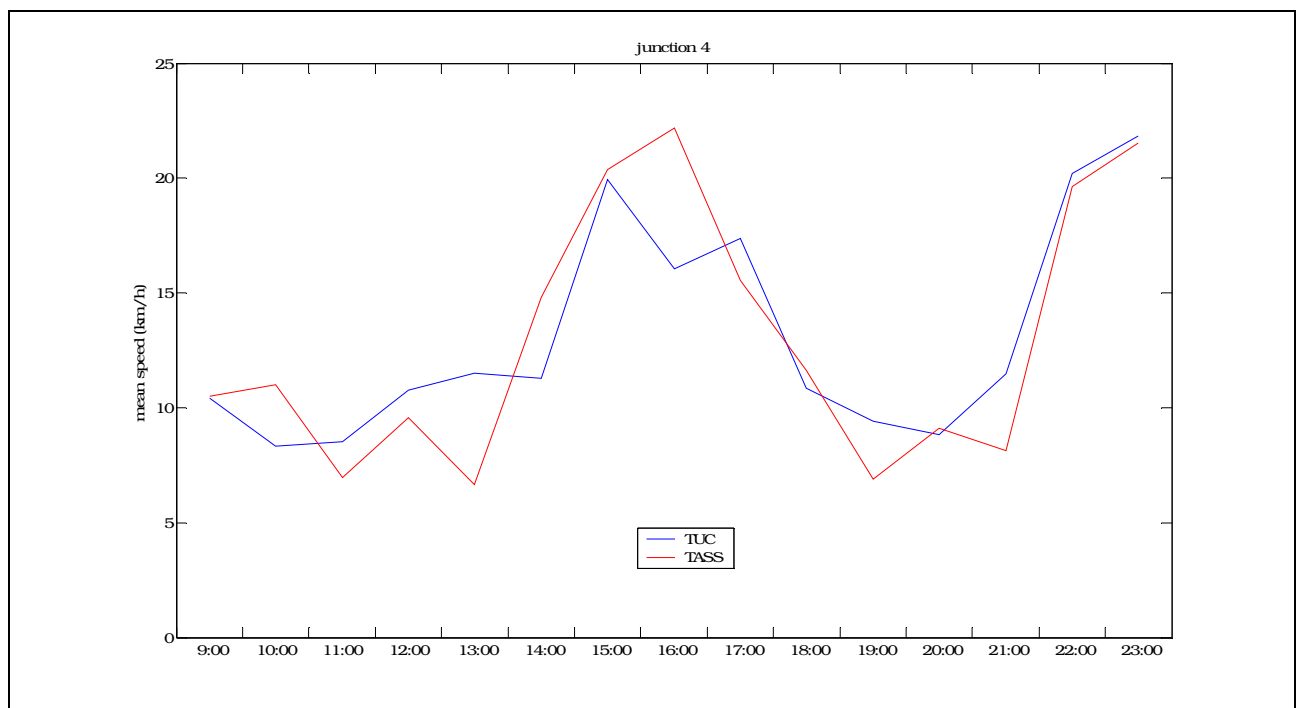
Σχήμα 5.12: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ταχύτητας τα για τον κόμβο j1.



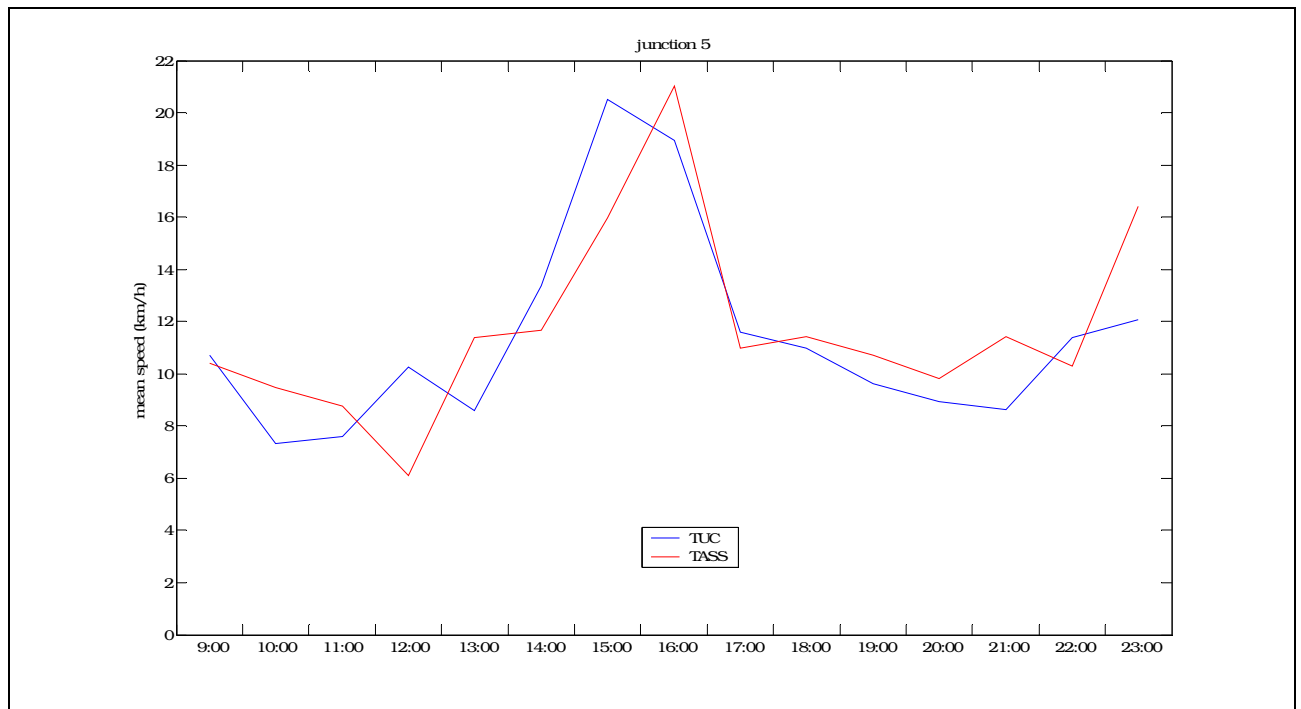
Σχήμα 5.13: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ταχύτητας τα για τον κόμβο j2.



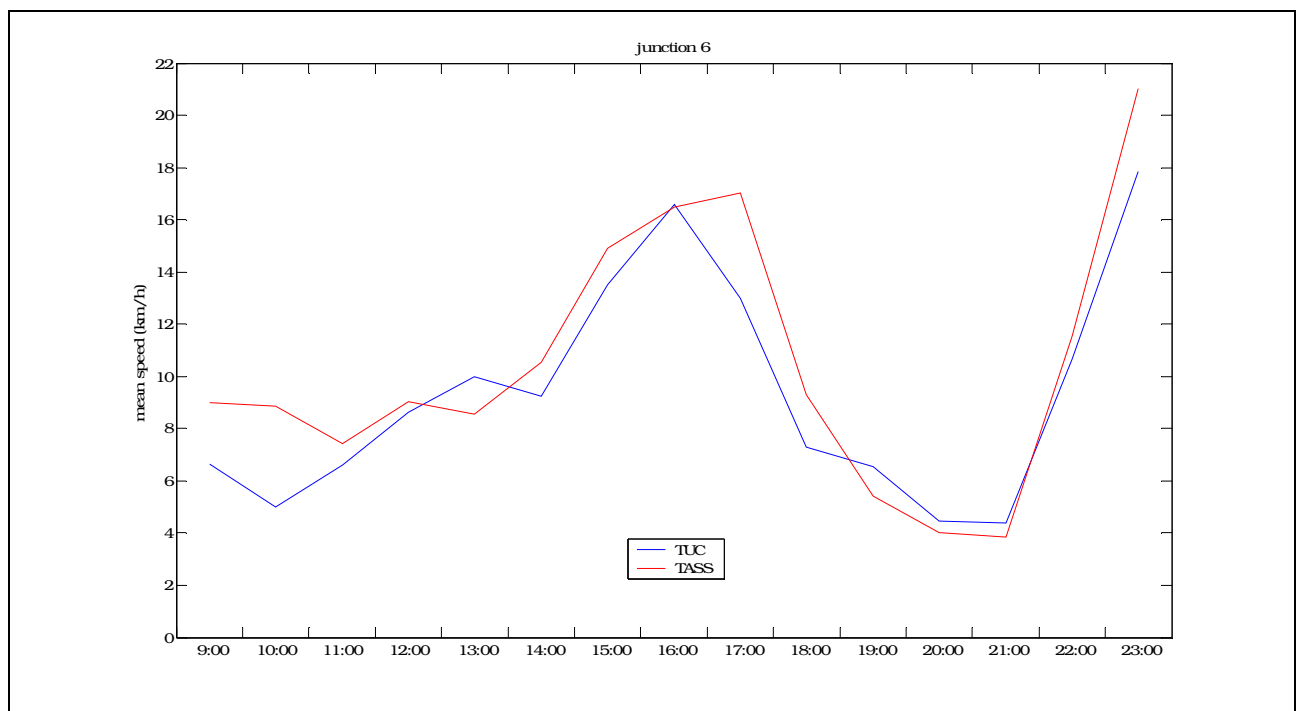
Σχήμα 5.14: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ταχύτητας τα για τον κόμβο j3.



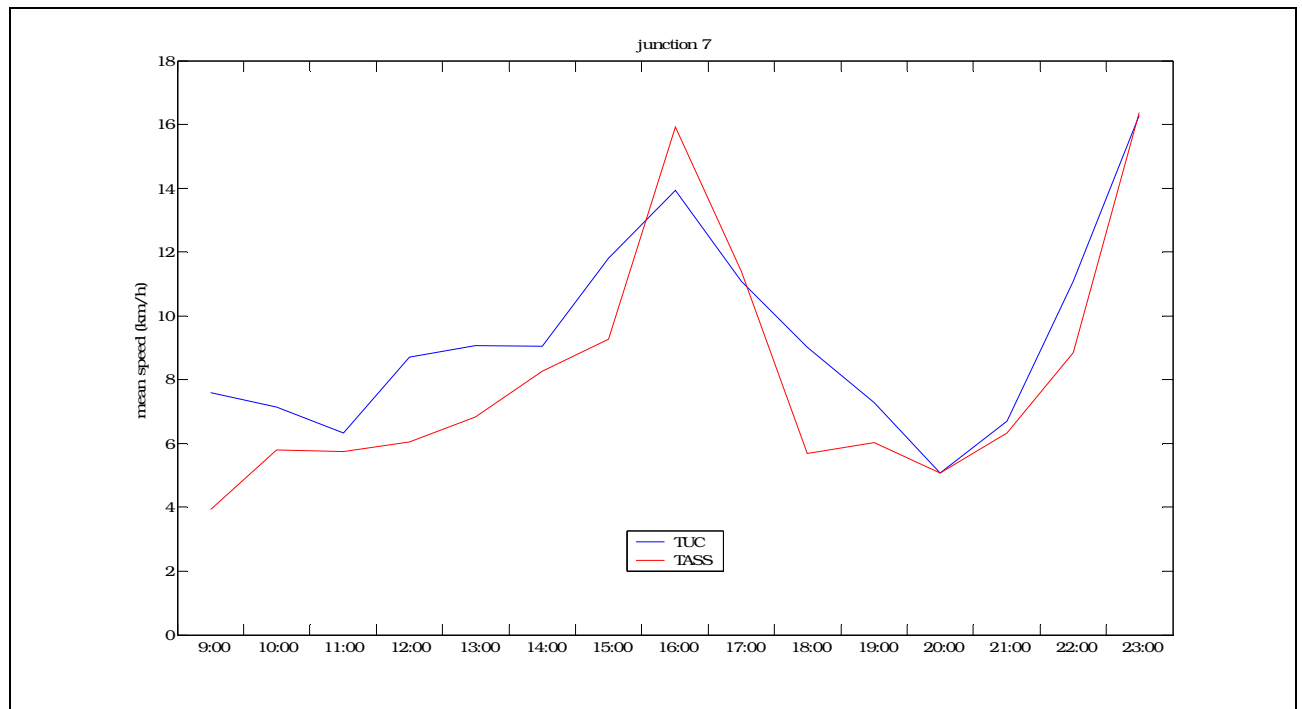
Σχήμα 5.15: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ταχύτητας τα για τον κόμβο j4.



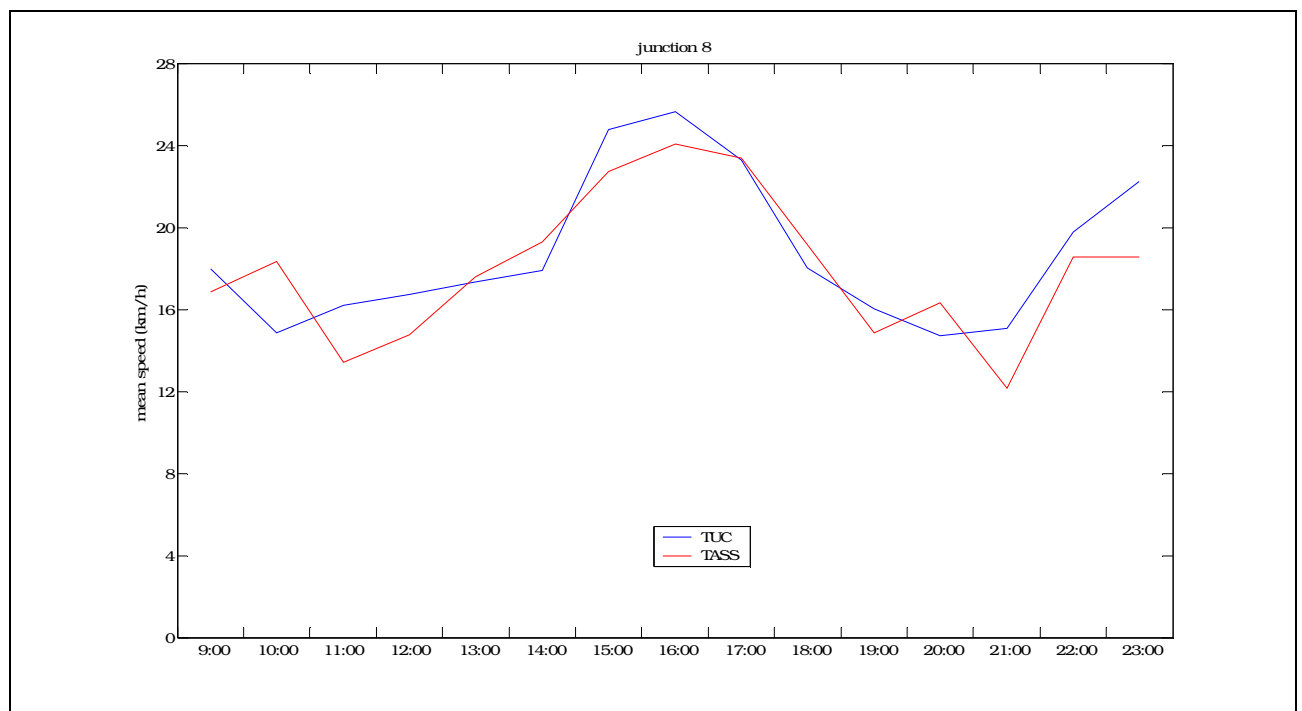
Σχήμα 5.16: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ταχύτητας τα για τον κόμβο j5.



Σχήμα 5.17: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ταχύτητας τα για τον κόμβο j6.



Σχήμα 5.18: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ταχύτητας τα για τον κόμβο j7.

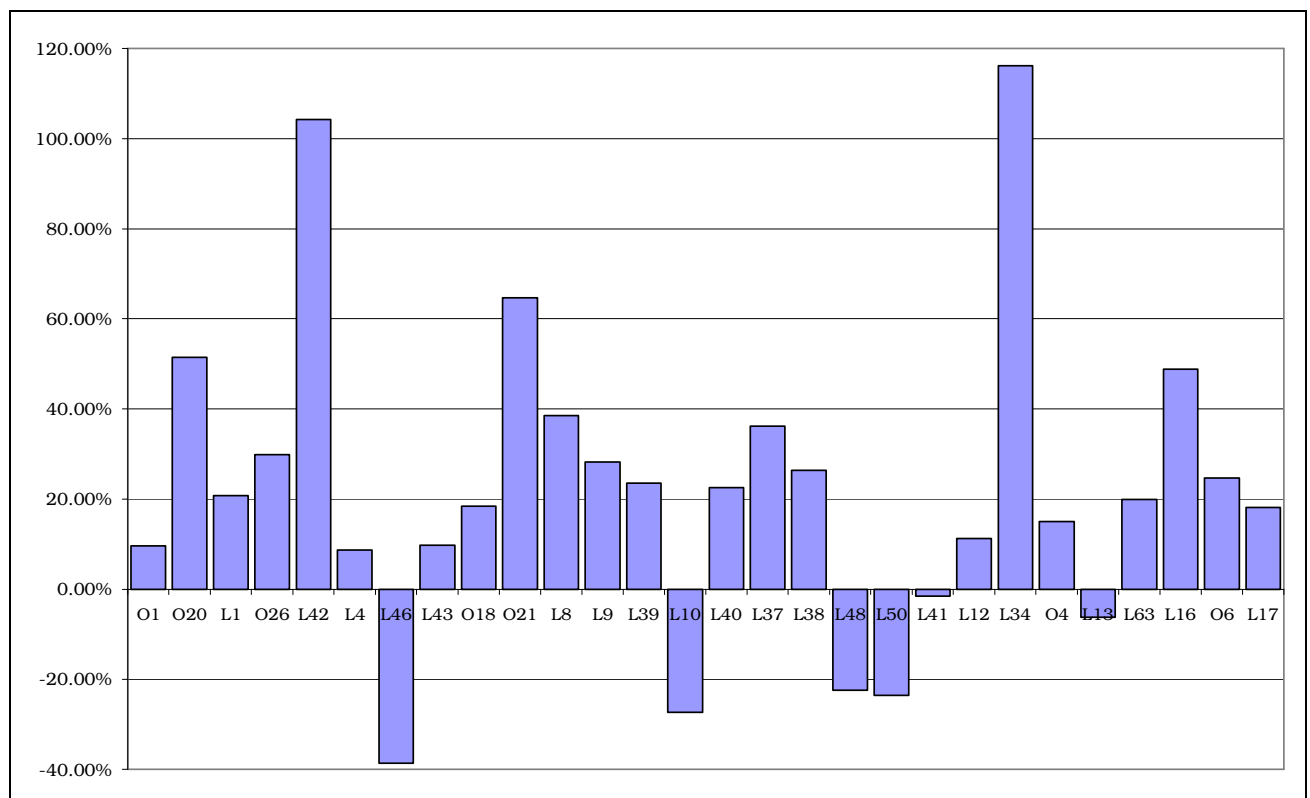


Σχήμα 5.19: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης ταχύτητας τα για τον κόμβο j8.

Στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζεται ένα συγκριτικό διάγραμμα με την ποσοστιαία μεταβολή της μέσης ταχύτητας σε κάθε σύνδεσμο του δικτύου. Θετικό ποσοστό σημαίνει μεγαλύτερη μέση ταχύτητα για τη στρατηγική TUC. Τα ποσοστά αυτά έχουν προκύψει από τη σύγκριση των μετρήσεων των φορατών για ολόκληρη την ημέρα (8:00–00:00) της Τετάρτης 31/05/2006 (TUC) με τις αντίστοιχες ώρες της Τετάρτης 14/06/2006 (TASS).

Μετά την λεπτομερή εξέταση των αποτελεσμάτων των Πινάκων 5.7–5.8 και των Σχημάτων 5.11–5.20, καθώς και των υπόλοιπων συγκρίσεων, τα οποία δεν μπορούν να παρουσιαστούν στο παρόν κείμενο λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η στρατηγική TUC παρουσιάζει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και αυξάνει τη μέση ταχύτητα του δικτύου στις περισσότερες από τις μέρες εφαρμογής της. Κατά μέσο όρο, παρατηρείται μια αύξηση της μέσης ταχύτητας του δικτύου κατά 10%.
- Συνήθως, οι μέρες που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ζήτηση (TTD) έχουν και



Σχήμα 5.20: Ποσοστό μεταβολής της μέσης ταχύτητας των συνδέσμων (TUC).

μεγαλύτερη μέση ταχύτητα, ανεξάρτητα από το σύστημα ελέγχου που είναι σε λειτουργία. Ωστόσο, υπάρχουν μέρες που συγκρίνονται τα συστήματα TUC και TASS για παρόμοιες ζητήσεις (TTD) και η στρατηγική TUC παρουσιάζει μεγαλύτερη μέση ταχύτητα δικτύου. Αυτό σημαίνει πως ελέγχει με καλύτερο τρόπο τις διάρκειες πρασίνων των σηματοδοτών.

- Η στρατηγική TUC παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα τις ώρες αιχμής, όταν δηλαδή υπάρχει μεγάλη συμφόρηση, γεγονός το οποίο έχει παρατηρηθεί και σε παλαιότερα πειράματα. Ο κανόνας ελέγχου που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή (BD) αφορά την κατάσταση μη κορεσμένων συνθηκών, ωστόσο το δυνατό σημείο της στρατηγικής παραμένει η απόδοσή της όταν υπάρχει μεγάλη ζήτηση.
- Όταν υπάρχει χαμηλή ζήτηση, για παράδειγμα τις Κυριακές, τα αποτελέσματα TUC και TASS είναι παρόμοια και δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στις μέσες ταχύτητες (βλέπε Πίνακες 5.7–5.8). Τις Κυριακές τα αποτελέσματα για το TASS είναι ελαφρώς καλύτερα, γεγονός όμως που οφείλεται στο βελτιστοποιημένο σταθερό offset (χρονική διαφορά στις κύριες αρτηρίες). Αυτό φαίνεται όταν η ζήτηση αυξάνεται και η στρατηγική TUC που έχει μεταβαλλόμενο σε πραγματικό χρόνο offset συμπεριφέρεται καλύτερα.
- Τα αποτελέσματα του κόμβου j3 επηρεάζουν τα συνολικά αποτελέσματα του δικτύου, αλλά όχι υπέρ του ενός συστήματος ή του άλλου. Υπάρχουν μέρες που στον κόμβο αυτό το σύστημα TUC είναι πολύ καλύτερο από το TASS και το αντίστροφο. Αν εξαιρεθεί από την αξιολόγηση ο κόμβος j3 η στρατηγική TUC παραμένει και πάλι καλύτερη από το TASS (κατά μέσο όρο).
- Η στρατηγική TUC αυξάνει τη μέση ταχύτητα στους περισσότερους συνδέσμους του δικτύου των Χανίων (Σχήμα 5.20). Ωστόσο, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή και στη σημαντικότητα των συνδέσμων, καθώς κάποιοι από τους συνδέσμους που το TASS έχει μεγαλύτερη μέση ταχύτητα είναι πολύ σημαντικοί για την κυκλοφοριακή κατάσταση της πόλης. Οι σύνδεσμοι L10, L46, L48 στους οποίους το TASS παρουσιάζει μεγαλύτερη μέση ταχύτητα στο Σχήμα 5.20 είναι στρατηγικοί σύνδεσμοι για το κυκλοφορικό της πόλης και πρέπει να προσεχτούν περαιτέρω.

- Παρόλο που στη νέα TUC δεν υπάρχουν ονομαστικές τιμές πρασίνων g^N , ο νέος κανόνας ελέγχου φαίνεται ότι υπολογίζει αρκετά καλές τιμές για τις διάρκειες των πρασίνων της πόλης, αφού η απόδοση της στρατηγικής είναι καλή. Επίσης, το γεγονός ότι τα g^N αλλάζουν με το χρόνο και δεν είναι σταθερά φαίνεται να επιδρά θετικά.
- Το σύστημα ελέγχου TUC μπορεί να εφαρμοστεί στα Χανιά σαν ανεξάρτητη στρατηγική ελέγχου και να συνεισφέρει θετικά στην κυκλοφοριακή αποσυμφόρηση της πόλης.
- Η εφαρμογή του συστήματος στα Χανιά μπορεί να αποφέρει μεγάλο οικονομικό κέρδος στην κοινωνία των Χανίων, καθώς εκτός από το κυκλοφοριακό, συμβάλει θετικά και σε άλλους κοινωνικούς, οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

6.1 Σύνοψη

Κατά την διάρκεια των δυο περασμένων δεκαετιών, υπήρξε μια αξιοσημείωτη αύξηση του ενδιαφέροντος και της έρευνας σχετικά με την επίλυση σοβαρών προβλημάτων κυκλοφοριακής συμφόρησης, ως αποτέλεσμα της εκθετικής αύξησης του αριθμού των οχημάτων και της αναγνώρισης του γεγονότος ότι τα προβλήματα υπερφόρτωσης δεν μπορούν να λύνονται επ' αόριστο με τη συνεχή αύξηση των υποδομών των δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, έγινε κατανοητή η ανάγκη της επαρκούς και αποτελεσματικής χρήσης των υπάρχοντων υποδομών μέσω της ανάπτυξης και υλοποίησης σύγχρονων μορφών ελέγχου.

Όσον αφορά στη ρύθμιση σηματοδότησης αστικών δικτύων, είναι φανερό ότι διαφορετικά σχέδια σηματοδότησης, που ανταποκρίνονται όλα εξ' ίσου στην ανάγκη ασφαλούς ροής, μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερη ή χειρότερη αποτελεσματικότητα της κυκλοφοριακής ροής. Εξάλλου, ο προσδιορισμός του βέλτιστου σχεδίου κυκλοφορίας αποτελεί συνάρτηση πολλών στατικών και δυναμικών παραγόντων ενός συγκεκριμένου δικτύου. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαία η αναζήτηση του συστήματος ελέγχου που θα προσδιορίζει αυτόματα το βέλτιστο σχέδιο σηματοδότησης ως συνάρτηση αυτών των παραγόντων.

Η παρούσα διατριβή επικεντρώθηκε στην επέκταση του ήδη υπάρχοντος συστήματος ελέγχου TUC, το οποίο επιλύει το πρόβλημα ρύθμισης της φωτεινής σηματοδότησης για ευρεία δίκτυα με τυχαία τοπολογία και χαρακτηριστικά. Αναπτύχθηκε ένας καινούριος κανόνας ελέγχου για συνθήκες ακόρεστης κυκλοφορίας, ο κανόνας Εξισορρόπησης της Ζήτησης, και προστέθηκε στο

λογισμικό της TUC. Επίσης, δημιουργήθηκε ένας υβριδικός αλγόριθμος ελέγχου και η στρατηγική έχει πλέον τη δυνατότητα είτε να δουλεύει όπως παλιότερα (εφαρμόζοντας τον έλεγχο LQ), είτε να εφαρμόζει τον νέο υβριδικό έλεγχο (κανόνες LQ και BD).

Η αποτελεσματικότητα του υβριδικού αλγορίθμου εξετάστηκε στα αστικά οδικά δίκτυα των Χανίων και του Southampton μέσω προσομοιώσεων, αλλά και με εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο στα Χανιά. Τα αποτελέσματα των διερευνήσεων αυτών είναι αρκετά ικανοποιητικά και δείχνουν πως η νέα στρατηγική TUC είναι μια εύρωστη και αξιόπιστη στρατηγική ελέγχου. Παρά τον πολύ μικρό κόπο και χρόνο που απαιτήθηκε για την εγκατάσταση και την κανονική λειτουργία του συστήματος, μπόρεσε να ανταγωνιστεί και να αποδώσει καλύτερα από το ήδη υπάρχον σύστημα TASS, το οποίο έχει δουλευτεί και βελτιστοποιηθεί για το δίκτυο των Χανίων για αρκετά χρόνια.

Τα αποτελέσματα των διερευνήσεων αυτών έδειξαν επίσης, ότι σε πολλές περιπτώσεις εκπλήσσουν τον σχεδιαστή καθώς και τον αναγκάζουν σε μια εκ των υστέρων επεξήγηση τους. Αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι η βελτιστοποίηση δίνει λύσεις που ο ανθρώπινος νους δυσκολεύεται να συλλάβει. Η προσεκτική επεξήγηση των αποτελεσμάτων αυτών, συχνά δίνει την δυνατότητα στον σχεδιαστή επέκτασης, κατανόησης ή και διόρθωσης των μεθόδων που χρησιμοποιούνται οι οποίες είναι αποτέλεσμα της εμπειρίας.

Η συνεισφορά της παρούσας διατριβής στο πεδίο των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου αστικής κυκλοφορίας συνοψίζεται στα εξής σημεία:

- Η στρατηγική TUC παράγει καλύτερες τιμές πρασίνων, καθώς οι τιμές των ονομαστικών τιμών πρασίνων δεν είναι πλέον στατικές, αλλά μεταβάλλονται σύμφωνα με τις κυκλοφοριακές συνθήκες.
- Επίλυση του προβλήματος μεγιστοποίησης της χωρητικότητας ενός κόμβου, για τους κόμβους που δεν έχουν μεγάλη συμφόρηση, σε πραγματικό χρόνο.
- Δυνατότητα εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας με τυχαία τοπολογία και χαρακτηριστικά, χωρίς να απαιτείται ο καθορισμός των ονομαστικών τιμών πρασίνων.

6.2 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 του ελέγχου της σηματοδότησης αστικών δικτύων. Ζητήματα στα οποία μπορεί να στραφεί η μελλοντική έρευνα είναι:

- Τροποποίηση του Γραμμικού–Τετραγωνικού κανόνα ελέγχου της στρατηγικής TUC, ώστε να λαμβάνει υπόψη τους σταθερούς χρόνους πρασίνου e_z του κάθε συνδέσμου z που υπάρχουν στη σχέση (2.10) της §2.2.2.
- Περαιτέρω μελέτη και πιθανή βελτίωση του υβριδικού αλγορίθμου ελέγχου, πως θα γίνεται δηλαδή η αλλαγή από τον ένα κανόνα στον άλλο.
- Εφαρμογή της υβριδικής στρατηγικής ελέγχου και σε άλλα δίκτυα μεγάλης κλίμακας με τυχαία τοπολογία και χαρακτηριστικά.
- Σύγκριση σε πραγματικό χρόνο της νέας TUC (υβριδικός έλεγχος) με την παλιά έκδοση (Γραμμικός–Τετραγωνικός έλεγχος).

Βιβλιογραφία

- [1] B. Abdulhai, R. Pringle, and G. Karakoulas, *Reinforcement Learning for ITS: Introduction and a Case Study on Adaptive Traffic Signal Control*, Proc. of the 80th Transportation Research Board Annual Meeting (Washington, D.C., U.S.A.), January 7–11 2001.
- [2] G. Abu-Lebdeh and R. F. Benekohal, *Development of Traffic Control and Queue Management Procedures for Oversaturated Arterials*, Transportation Research Record 1603 (1997), 119–127.
- [3] G. C. D'Ans and D. C. Gazis, *Optimal Control of Oversaturated Store-and-forward Transportation Networks*, Transportation Science 10 (1974), 1–19.
- [4] M. C. Bell, G. Scemama, and L. J. Iccetson, *CLAIRE—An Expert System for Congestion Management*, Proc. of the DRIVE Conference (Brussels, Belgium), 1991, pp. 596–614.
- [5] C. Bielefeldt and F. Busch, *MOTION—A New On-line Model for Urban Traffic Signal Control*, Proc. of the 7th IFAC/IFORS Symposium on Transportation Systems: Theory and Applications of Advanced Technology (Tianjin, China), 1994, pp. 603–607.
- [6] F. Boillot, J.M. Blosseville, J.B. Lesort, V. Motyka, M. Papageorgiou, and S. Sellam, *Optimal Signal Control of Urban Traffic Networks*, Proc. of the 6th IEE International Conference on Road Traffic Monitoring and Control (London, England), 1992, pp. 75–79.
- [7] E. J. Davison and Ü. Özgüner, *Decentralized Control of Traffic Networks*, IEEE Transactions on Automatic Control 28 (1983), 677–688.
- [8] C. Diakaki, M. Papageorgiou, *Integrated Modelling and Control of Corridor Traffic Networks Using the METACOR Modelling Tool*, Internal Report 1996-8, Technical University of Crete, Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Chania, Greece, 1996.

-
- [9] C. Diakaki, *Integrated Control of Traffic Flow in Corridor Road Networks*, Ph.D. Thesis, Technical University of Crete, Department of Production Engineering and Management, Chania, Greece, 1999.
- [10] C. Diakaki, V. Dinopoulou, K. Aboudolas, M. Papageorgiou, *Final System Development Report*, Deliverable 9.2, Project SMART NETS (IST-2000-28090), European Community under the “Information Society Technology” Programme (1998-2002), Brussels, Belgium, 2002.
- [11] V. Dinopoulou, G. Kalogiannis, M. Papageorgiou, C. Koufogiannakis, G. Marinakis, *Demonstrator for Chania*, Deliverable 10.1, Project SMART NETS (IST-2000-28090), European Community under the “Information Society Technology” Programme (1998-2002), Brussels, Belgium, 2002.
- [12] F. Dion and S. Yagar, *Real-time Control of Signalised Networks—Different Approaches for Different Needs*, Proc. of the 8th IEE International Conference on Road Traffic Monitoring and Control (Savoy Place, London, England), 1996, pp. 56–60.
- [13] Dynamic Systems and Simulation Laboratory, *The TUC Strategy—Software and Input Files*, Technical University of Crete, Department of Production Engineering and Management, Chania, Greece.
- [14] J. L. Farges, J. J. Henry, and J. Tufal, *The PRODYN Real-Time Traffic Algorithm*, Proc. of the 4th IFAC Symposium on Transportation Systems (Baden-Baden, Germany), 1983, pp. 307–312.
- [15] B. Friedrich and O. Ernhöfer, *Adaptive Signal Control Method BALANCE Traffic and Control Models*, Proc. of the 7th ITS World Congress (Turin, Italy), 2000.
- [16] N. H. Gartner, *OPAC: A Demand-Responsive Strategy for Traffic Signal Control*, Transportation Research Record 906 (1983), 75–84.
- [17] N. H. Gartner, F. J. Pooran, and C. M. Andrews, *Implementation of the OPAC Adaptive Control Strategy in a Traffic Signal Network*, Proc. of the 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (Oakland (CA), U.S.A.), August 25–29 2001.

- [18] N. H. Gartner, C. Stamatiadis, and P. J. Tarnoff, *Development of Advanced Traffic Signal Control Strategies for Intelligent Transportation Systems: Multilevel Design*, Transportation Research Record 1494 (1994), 98–105.
- [19] D. C. Gazis, *Optimum Control of a System of Oversaturated Intersections*, Operation Research 12 (1964), 815–831.
- [20] D. C. Gazis and R. B. Potts, *The Oversaturated Intersection*, Proc. of the 2nd International Symposium on Traffic Theory (London, UK), 1963, pp. 221–237.
- [21] R. L. Gordon, R. A. Reiss, H. Haenel, E. R. Case, R. L. French, A. Mohaddes, and R. Wolcott, *Traffic Control Systems Handbook*, FHWA-SA-95-032, Federal Highway Administration, Washington, DC, U.S.A., 1996.
- [22] J. J. Henry, J. L. Farges, and J. L. Gallego, *Neuro-fuzzy Techniques for Traffic Control*, Control Engineering Practice 6 (1998), 755–761.
- [23] P. B. Hunt, D. L. Robertson, R. D. Bretherton, and M. C. Royle, *The SCOOT On-Line Traffic Signal Optimisation Technique*, Traffic Engineering & Control 23 (1982), 190–199.
- [24] H. Ishidara and T. Fukuda, *Proposal of New Traffic Signal System using Emotional Algorithm*, Proc. of the 2000 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (Dearborn, USA), 2000, pp. 370–375.
- [25] J. C. Jurvillier, *Simulation de temps de parcours et modèle de consommation sur une autoroute urbaine*, Technical report, Institute National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, DART, Arcueil, France, 1982.
- [26] A. Kessaci, J. L. Farges, and J.J. Henry, *Upper Level for Real Time Urban Traffic Control Systems*, Preprints of the 11th IFAC World Congress (Tallinn, Estonia), vol. 10, 1990, pp. 226–229.
- [27] K. J. Kim and M. G. H. Bell, *Development of an Integrated Traffic Control Strategy for both Urban Signalised and Motorway Networks*, Proc. of the 1st Meeting of the EURO Working Group on Urban Traffic and Transportation (Landshut, Germany), 1992.

- [28] E. Kosmatopoulos, C. Bielefeldt, H. Condie, *Evaluation Results Chania*, Deliverable 18, Project SMART NETS (IST-2000-28090), European Community under the “Information Society Technology” Programme (1998-2002), Brussels, Belgium, 2004.
- [29] J. H. Lim, S. H. Hwang, I. H. Suh, and Z. Bien, *Hierarchical Optimal Control of Oversaturated Urban Networks*, International Journal of Control 33 (1981), 727–737.
- [30] S. M. Lin, *A Distributed Optimum Signal Scheme for Dynamic Traffic Control*, Proc. of 2001 Transportation Research Board Annual Meeting (Washington, D.C., U.S.A.), November 20 2000.
- [31] H. Liu and M. Kuwahara, *An Approach on Network Traffic Signal Control under the Real-time and Oversaturated Flow Condition*, Proc. of the 2001 Transportation Research Board Annual Meeting (Washington, D.C., U.S.A.), November 20 2000.
- [32] P. R. Lowrie, SCATS: *The Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System—Principles, Methodology, Algorithms*, Proc. of the IEE International Conference on Road Traffic Signalling (London, England), 1982, pp. 67–70.
- [33] V. Manikonda, R. Levy, G. Satapathy, D. J. Lovell, P. C. Chang, and A. Teittinen, *Autonomous Agents for Traffic Simulation and Control*, Proc. of the 2001 Transportation Research Board Annual Meeting (Washington, D.C., U.S.A.), November 20 2000.
- [34] V. Mauro and C. Di Taranto, *UTOPIA*, Proc. of the 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, Communications on Transportations (Paris, France), 1989, pp. 245–252.
- [35] P. G. Michalopoulos and G. Stephanopoulos, *Oversaturated Signal Systems with Queue Length Constraints—I: Single Intersection*, Transportation Research 11 (1977), 413–421.

-
- [36] P. G. Michalopoulos and G. Stephanopoulos, *Oversaturated Signal Systems with Queue Length Constraints—II: System of Intersections*, Transportation Research 11 (1977), 423–428.
- [37] MIGRA Central, *TASS—Verkehrsabhängige Signalprogrammawahl*, Planungshandbuch, Siemens AG I&S ITS, München, 1999.
- [38] P. Mirchandani and L. Head, *RHODES—A Real-time Traffic Signal Control System: Architecture, Algorithms, and Analysis*, TRISTAN (Triennial Symposium on Transportation Analysis) (San Juan, Puerto Rico), vol. 2, 1998.
- [39] E. L. Muñoz-Marrero and G. Beauchamp-Bàez, *Design of a Fuzzy Logic Based Traffic Controller for an Arterial Street*, TRISTAN (Triennial Symposium on Transportation Analysis) (San Juan, Puerto Rico), vol. 2, 1998.
- [40] I. Nainar, M. Mohammadian, and J. Millar, *Adaptive Control of Traffic Signals using Fuzzy Logic and Genetic Algorithms*, Proc. of the 4th International Conference of Control, Automation, Robotics, and Vision (Singapore), 1996, pp. 573–577.
- [41] M. Papageorgiou, *Applications of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modelling and Control*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1983.
- [42] M. Papageorgiou, *Optimal Control as a Source of Intelligent Behaviour*, Proc. of the 12th IEEE International Symposium on Intelligent Control (Istanbul, Turkey), 1997, pp. 383–389.
- [43] M. Papageorgiou, *Automatic Control Methods in Traffic and Transportation*, Operations Research and Decision Aid Methodologies in Traffic and Transportation Management (P. Toint, M. Labbe, K. Tanczos, and G. Laporte, eds.), Springer Verlag, New York, 1998, pp. 46–83.
- [44] M. Papageorgiou, *Traffic Control*, Handbook of Transportation Engineering (R.W. Hall, ed.), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999, pp. 233–267.

- [45] E. S. Park, J.H. Lim, I.H. Suh, and Z. Bien, *Hierarchical Optimal Control of Urban Traffic Networks*, International Journal of Control 40 (1984), 813–829.
- [46] A. K. Rathi, *A Control Scheme for High Traffic Density Sectors*, International Journal of Control 22B (1988), 81–101.
- [47] S. Sen and K. L. Head, *Controlled Optimization of Phases at an Intersection*, Transportation Science 31 (1997), no. 1, 5–17.
- [48] M. G. Singh and H. Tamura, *Modelling and Hierarchical Optimisation of Oversaturated Urban Traffic Networks*, International Journal of Control 20 (1974), 269–280.
- [49] J. C. Spall and D. C. Chin, *Traffic-responsive Signal Timing for System-wide Traffic Control*, Transportation Science 5C (1997), 269–280.

Παράρτημα

Στο Παράρτημα αυτό παρατίθενται οι πίνακες με τα στοιχεία των δικτύων που μελετήθηκαν. Παρουσιάζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις διερευνήσεις, και αναφέρονται στους σηματοδοτούμενους κόμβους των δικτύων των Χανίων και του Southampton, καθώς σε όλους τους συνδέσμους. Επίσης, παρατίθενται και δύο από τα σενάρια ζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις, ένα για τα Χανιά και ένα για το Southampton.

Κόμβος	Σύνολο φάσεων	Περίοδος	Χαμένος χρόνος	Ελάχιστος χρόνος πρασίνου				Μέγιστος χρόνος πρασίνου			
				$g_{j,i}(\text{sec})$				$g_{j,i}(\text{sec})$			
j	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 Π1: 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).

Κόμβος	Σύνολο φάσεων	Περίοδος	Χαμένος χρόνος	Ελάχιστος χρόνος πρασίνου				Μέγιστος χρόνος πρασίνου			
				$g_{j,i}(\text{sec})$				$g_{j,i}(\text{sec})$			
z	F_z	$C_j(\text{sec})$	$L_j(\text{sec})$	$i = 1$	$i = 1$	$i = 1$	$i = 1$	$i = 1$	$i = 1$	$i = 1$	$i = 1$
1	{1, 2}	110	34	7	7	—	—	69	69	—	—
2	{1, 2, 3}	110	21	7	7	7	—	75	75	75	—
3	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
4	{1, 2, 3}	110	38	7	7	7	—	58	58	58	—
5	{1, 2, 3}	110	21	7	7	7	—	75	75	75	—
6	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
7	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
8	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
9	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
10	{1, 2, 3}	110	29	7	7	7	—	67	67	67	—
11	{1, 2, 3}	110	26	7	7	7	—	70	70	70	—
12	{1, 2, 3}	110	19	7	4	7	—	80	77	80	—
13	{1, 2, 3, 4}	110	46	7	7	8	8	41	41	42	42
14	{1, 2, 3, 4}	110	22	7	7	7	7	67	67	67	67
15	{1, 2, 3}	110	44	7	3	7	—	56	52	56	—
16	{1, 2, 3, 4}	110	37	7	7	7	7	52	52	52	52
17	{1, 2}	110	35	7	7	—	—	68	68	—	—
18	{1, 2, 3}	110	23	7	7	7	—	73	73	73	—
19	{1, 2, 3}	110	20	7	7	7	—	76	76	76	—

Πίνακας Π4: Περιγραφή της σηματοδότησης των κόμβων του δικτύου του Southampton (Region 1, 1/2).

Κόμβος	Σύνολο φάσεων	Περίοδος	Χαμένος χρόνος	Ελάχιστος χρόνος πρασίνου				Μέγιστος χρόνος πρασίνου			
				$g_{j,i}(\text{sec})$				$g_{j,i}(\text{sec})$			
z	F_z	$C_j(\text{sec})$	$L_j(\text{sec})$	$i=1$	$i=1$	$i=1$	$i=1$	$i=1$	$i=1$	$i=1$	$i=1$
20	{1, 2, 3}	110	26	7	7	7	—	70	70	70	—
21	{1, 2}	110	15	7	7	—	—	88	88	—	—
22	{1, 2, 3}	110	26	7	7	7	—	70	70	70	—
23	{1, 2}	110	16	7	7	—	—	87	87	—	—
24	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
25	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
26	{1, 2, 3}	110	20	7	7	7	—	76	76	76	—
27	{1, 2, 3}	110	17	7	3	7	—	83	79	83	—
28	{1, 2, 3, 4}	110	33	11	12	11	10	44	45	44	43
29	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
30	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
31	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
32	{1, 2}	110	71	7	7	—	—	32	32	—	—
33	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
34	{1, 2, 3}	110	41	7	7	7	—	55	55	55	—
35	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
36	{1, 2, 3, 4}	110	40	7	7	7	7	49	49	49	49
37	{1, 2, 3}	110	29	7	10	7	—	64	67	64	—

Πίνακας Π4: Περιγραφή της σηματοδότησης των κόμβων του δικτύου του Southampton (Region 1, 2/2).

Κόμβος	Σύνολο φάσεων	Περίοδος	Χαμένος χρόνος	Ελάχιστος χρόνος πρασίνου $g_{j,i}(\text{sec})$				Μέγιστος χρόνος πρασίνου $g_{j,i}(\text{sec})$			
z	F_z	$C_j(\text{sec})$	$L_j(\text{sec})$	$i = 1$	$i = 1$	$i = 1$	$i = 1$	$i = 1$	$i = 1$	$i = 1$	$i = 1$
1	{1, 2, 3}	110	22	7	7	7	—	74	74	74	—
2	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
3	{1, 2, 3}	110	21	7	7	7	—	75	75	75	—
4	{1, 2, 3}	110	19	7	4	7	—	80	77	80	—
5	{1, 2}	110	33	7	7	—	—	70	70	—	—
6	{1, 2, 3}	110	36	7	7	7	—	60	60	60	—
7	{1, 2, 3}	110	19	17	7	10	—	74	64	67	—
8	{1, 2, 3, 4}	110	28	7	3	7	7	65	61	65	65
9	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
10	{1, 2, 3, 4}	110	32	7	7	7	7	57	57	57	57
11	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
12	{1, 2}	110	17	7	7	—	—	86	86	—	—
13	{1}	110	25	7	—	—	—	85	—	—	—
14	{1, 2, 3}	110	21	7	3	7	—	79	75	79	—
15	{1, 2}	110	14	7	7	—	—	89	89	—	—
16	{1, 2, 3}	110	21	7	7	7	—	75	75	75	—
17	{1, 2}	110	12	7	7	—	—	91	91	—	—
18	{1, 2, 3}	110	25	7	7	7	—	71	71	71	—
19	{1, 2}	110	10	7	7	—	—	93	93	—	—
20	{1, 2, 3}	110	33	7	7	7	—	63	63	63	—

Πίνακας Π5: Περιγραφή της σηματοδότησης των κόμβων του δικτύου του Southampton (Region 2).

Σύνδεσμος	Μήκος	Αριθμός λωρίδων	Χωρητικότητα	Ροή κορεσμού	Απόσταση φωρατή από το Stopline
z	L_z	λ_z	$x_{z,max}(veh)$	$s_z(veh/h)$	(m)
1	500	1	83	1940	90
2	140	1	23	1940	100
3	120	1	20	1940	100
4	120	1	20	1940	100
5	240	1	40	1940	237
6	250	1	42	1940	190
7	460	1	77	1940	175
8	460	1	77	1940	175
9	200	1	33	1940	169
10	200	1	33	1940	169
11	710	1	118	1940	112
12	240	1	40	1940	108
13	360	1	60	1940	125
14	380	1	63	1940	125
15	360	1	60	2080	140
16	360	1	60	2080	140
17	300	2	100	4020	300
18	100	1	17	1940	80
19	120	2	40	4020	100
20	360	2	120	4020	150
21	520	1	87	4020	60
22	140	2	47	4020	130
23	520	2	173	4020	110
24	210	2	70	4020	210
25	400	1	67	1940	140
26	40	2	13	4020	20
27	40	1	7	2080	20
28	40	2	13	4020	20
29	710	1	118	1940	58
30	50	2	17	4020	50
31	50	2	17	4020	40
32	100	1	17	1940	40
33	100	1	17	2080	40
34	160	2	53	4020	110
35	160	1	27	2080	110
36	160	2	53	4020	110
37	42	1	7	1940	42
38	90	2	30	4020	45
39	80	1	13	2080	35
40	80	2	27	4020	45
41	200	3	100	6100	180
42	350	1	58	1940	95
43	40	1	7	1940	20
44	40	2	13	4020	20
45	40	2	13	4160	20
46	40	1	7	1940	20
47	300	1	50	1940	240
48	300	1	50	2080	240
49	280	1	47	4020	240
50	70	1	12	2080	25

Πίνακας Π6: Περιγραφή των συνδέσμων του δικτύου του Southampton (Region 1, 1/3).

Σύνδεσμος	Μήκος	Αριθμός λωρίδων	Χωρητικότητα	Ροή κορεσμού	Απόσταση φωρατή από το Stopline
z	L_z	λ_z	$x_{z,max}(veh)$	$s_z(veh/h)$	(m)
51	70	1	12	1940	25
52	120	1	20	1940	80
53	125	1	21	1940	77
54	125	1	21	2080	70
55	140	1	23	2080	80
56	140	1	23	1940	80
57	500	1	83	1940	75
58	500	1	83	2040	30
59	200	1	33	4020	52
60	200	1	33	9980	200
61	270	1	45	1940	250
62	270	2	90	4020	250
63	160	2	53	4020	110
64	300	2	100	4160	300
65	270	3	135	6100	220
66	150	2	50	4160	150
67	280	2	93	4020	230
68	260	1	43	2080	210
69	260	2	87	4020	210
70	160	1	27	1940	85
71	120	2	40	4020	120
72	250	2	83	4020	200
73	250	1	42	2080	200
74	250	1	42	2080	200
75	250	2	83	4020	200
76	60	2	20	4020	60
77	100	1	17	1940	60
78	200	2	67	4020	90
79	200	1	33	2080	90
80	150	1	25	2080	120
81	150	2	50	4020	120
82	150	1	25	1940	35
83	150	1	25	2080	35
84	100	2	33	4020	60
85	100	2	33	4020	70
86	100	1	17	1940	40
87	250	2	83	4020	210
88	210	1	35	2080	180
89	210	2	70	4020	180
90	60	2	20	4020	50
91	105	2	35	4020	105
92	105	1	18	2080	105
93	140	2	47	4020	100
94	10	1	2	1940	10
95	140	1	23	2080	140
96	140	2	47	4020	140
97	300	2	100	4020	240
98	170	2	57	4020	140
99	130	1	22	2080	130

Πίνακας Π6: Περιγραφή των συνδέσμων του δικτύου του Southampton (Region 1, 2/3).

Σύνδεσμος	Μήκος	Αριθμός λωρίδων	Χωρητικότητα	Ροή κορεσμού	Απόσταση φωρατή από το Stopline
z	L_z	λ_z	$x_{z,max}(veh)$	$s_z(veh/h)$	(m)
100	130	1	22	4020	130
101	180	2	60	4020	100
102	150	1	25	4020	110
103	150	1	25	2080	110
104	140	1	23	2080	100
105	140	1	23	1940	100
106	50	1	8	1940	35
107	130	2	43	4020	110
108	80	1	13	1940	60
109	170	1	28	1940	105
110	170	2	57	4160	105
111	200	1	33	2080	65
112	200	2	67	4020	65
113	55	2	18	4020	30
114	55	2	18	4020	30
115	60	2	20	4020	30
116	60	2	20	4020	30
117	90	2	30	6100	54
118	40	1	7	1940	20
119	40	1	7	4160	20
120	40	2	13	1940	40
121	120	1	20	1940	100
122	80	1	13	4020	50
123	80	1	13	1940	50
124	230	1	38	1940	160
125	80	1	13	1940	50
126	400	1	67	1940	175
127	120	1	20	4020	110
128	150	1	25	1940	105
129	90	1	15	1940	50
130	80	1	13	1940	70
131	120	1	20	1940	100
132	270	1	45	1940	120
133	70	1	12	1940	50
134	80	1	13	1940	50
135	250	1	42	1940	210
136	270	2	90	4020	235
137	300	1	50	4160	170
138	300	1	50	4020	170
139	190	5	158	10260	160
140	40	2	13	4020	20
141	40	1	7	2080	20
142	40	2	13	4020	20
143	170	2	57	4020	80
144	40	1	7	1940	20
145	170	2	57	6100	150
146	100	1	17	1940	100
147	40	1	7	1940	20
148	380	2	127	6100	350

Πίνακας Π6: Περιγραφή των συνδέσμων του δικτύου του Southampton (Region 1, 3/3).

Σύνδεσμος	Μήκος	Αριθμός λωρίδων	Χωρητικότητα	Ροή κορεσμού	Απόσταση φωρατή από το Stopline
z	L_z	λ_z	$x_{z,\max}(veh)$	$s_z(veh/h)$	(m)
1	375	1	81	4020	350
2	375	1	81	2080	350
3	100	2	33	4020	75
4	210	2	70	4020	150
5	210	2	70	4020	180
6	240	2	80	4020	70
7	240	2	80	4020	160
8	150	1	25	4020	90
9	100	1	17	1940	90
10	540	2	180	4020	477
11	520	2	173	4020	485
12	40	2	13	1940	20
13	450	2	156	4020	425
14	450	1	156	2080	425
15	450	2	150	4020	410
16	180	1	30	1940	32
17	80	1	13	1940	45
18	340	1	57	4020	280
19	300	2	100	4020	280
20	50	1	8	1940	45
21	100	2	33	4020	100
22	100	2	42	4020	70
23	100	1	42	2080	70
24	100	2	33	4020	80
25	150	1	25	4160	150
26	150	1	25	1940	150
27	620	2	206	4020	400
28	820	1	137	2080	400
29	600	2	200	4020	400
30	200	1	100	1940	170
31	200	2	100	4160	170
32	220	1	37	1940	170
33	100	1	17	4020	80
34	40	1	7	2080	20
35	40	1	7	1940	20
36	50	1	8	4020	20
37	60	1	10	1940	25
38	170	1	28	1940	120
39	130	1	22	4020	20
40	160	1	27	1940	20

Πίνακας Π7: Περιγραφή των συνδέσμων του δικτύου του Southampton (Region 2, 1/2).

Σύνδεσμος	Μήκος	Αριθμός λωρίδων	Χωρητικότητα	Ροή κορεσμού	Απόσταση φωρατή από το Stopline
z	L_z	λ_z	$x_{z,max}(veh)$	$s_z(veh/h)$	(m)
41	580	1	97	1940	200
42	60	1	10	4020	55
43	180	1	30	1940	55
44	40	1	6	1940	20
45	100	1	16	1940	80
46	100	2	33	4020	80
47	200	2	50	4020	60
48	140	1	23	2080	90
49	720	1	240	4020	700
50	460	1	77	4020	100
51	120	1	39	1940	90
52	120	1	39	2080	90
53	120	1	20	4020	100
54	140	1	23	4020	100
55	560	2	187	4160	150
56	160	2	53	4160	122
57	160	2	53	4020	120
58	40	1	7	1940	20
59	180	1	30	4020	90
60	200	1	33	4020	170
61	190	1	32	1940	160
62	320	1	53	1940	100
63	280	1	47	1940	240
64	280	1	47	1940	240
65	280	1	47	1940	255
66	45	1	8	1940	45
67	320	1	53	1940	65
68	300	1	50	1940	30
69	370	1	62	1940	350
70	100	1	17	1940	90
71	340	1	57	1940	320
72	340	1	57	1940	250
73	100	1	17	1940	100
74	60	2	20	4020	60
75	60	1	10	1940	60
76	60	1	10	1940	60
77	300	1	50	1940	100
78	300	1	50	1940	100
79	940	1	157	4020	740

Πίνακας Π7: Περιγραφή των συνδέσμων του δικτύου του Southampton (Region 2, 2/2).

	01	02	03	04	06	07	08	09	010	011	013	014	015	016	018	020	021	022	023	024	025	026
8:00	90	18	5	77	27	45	18	9	27	72	36	198	27	18	9	45	13	117	4	77	27	27
8:15	131	24	13	84	41	72	23	23	63	117	43	234	45	54	14	77	27	120	9	86	72	32
8:30	180	32	20	91	56	99	27	38	99	162	52	288	72	99	18	117	54	123	15	95	122	36
8:45	243	39	28	99	71	135	32	54	144	216	64	360	105	153	23	171	90	126	22	108	180	41
9:00	315	50	39	109	90	180	38	72	198	270	79	427	142	225	30	225	148	129	30	124	279	45
9:15	333	59	52	119	99	189	58	90	225	279	99	466	180	237	40	234	167	145	40	144	289	54
9:30	342	79	57	129	108	198	77	99	218	324	119	545	198	275	56	243	207	149	50	180	299	63
9:45	360	89	60	149	117	207	87	108	275	333	149	555	207	305	40	252	247	168	59	225	320	72
10:00	369	91	68	158	126	216	97	117	295	342	158	545	225	320	89	261	257	175	67	253	347	81
10:15	378	99	78	168	144	225	97	126	297	369	238	536	270	256	95	270	247	188	69	270	333	90
10:30	387	103	78	158	135	234	87	135	360	378	277	526	252	234	69	315	237	194	79	225	323	104
10:45	378	115	68	149	126	225	77	108	315	369	356	486	216	224	59	333	227	198	89	198	297	112
11:00	360	119	59	142	120	216	74	99	306	315	257	456	198	198	50	315	217	194	79	180	278	90
11:15	351	122	52	139	101	198	68	90	252	270	198	417	180	180	46	288	207	188	59	162	277	72
11:30	342	122	49	132	91	180	68	81	180	225	178	387	178	135	40	279	187	178	50	153	257	63
11:45	333	99	47	119	81	162	58	72	135	207	158	377	168	90	30	225	167	168	30	144	218	54
12:00	270	79	44	111	63	135	58	63	90	180	139	357	119	77	30	225	158	165	20	140	207	59
12:15	180	69	32	109	61	126	39	54	72	153	119	347	99	49	20	135	148	152	10	130	180	45
12:30	162	59	21	99	45	90	32	36	63	135	99	338	59	28	16	90	128	139	9	117	81	44
12:45	117	40	20	89	36	63	29	27	36	90	59	238	50	21	14	54	118	135	8	90	45	41
13:00	72	23	5	79	20	45	20	7	27	72	40	198	30	20	10	45	13	129	4	79	30	40

Πίνακας Π8: Ζήτηση (σε οχήματα/ώρα/λωρίδα) στις εισόδους του δικτύου των Χανίων για το σενάριο 4.

	Στάδιο	Ονομαστικές τιμές πρασίνων (sec)
j1	1	30
	2	7
	3	30
j2	4	46
	5	12
j3	6	50
	7	16
j4	8	55
	9	9
	10	7
j5	11	29
	12	21
	13	15
j6	14	41
	15	8
	16	8
j7	17	17
	18	14
	19	22
j8	20	21
	21	11
	22	10
	23	16

	Στάδιο	Ονομαστικές τιμές πρασίνων (sec)
j9	24	32
	25	23
j10	26	36
	27	17
	28	18
j11	29	29
	30	16
	31	21
j12	32	30
	33	18
	34	9
j13	35	20
	36	36
j14	37	50
	38	10
j16	39	48
	40	10
j17	41	48
	42	26

Πίνακας Π9: Ονομαστικές τιμές πρασίνων για τους κόμβους του δικτύου των Χανίων.

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12	O13	O14	O15	O16	O17	O18	O19	O20	O21	O22
8:00	21	21	21	21	21	21	21	21	66	78	21	21	39	39	21	21	21	5	21	21	21	21
9:00	26	26	26	26	26	26	26	26	78	90	26	26	51	51	26	26	26	7	26	26	26	26
10:00	32	32	32	32	32	32	32	32	90	105	32	32	66	66	32	32	32	11	32	32	32	32
11:00	39	39	39	39	39	39	39	39	105	118	39	39	78	78	39	39	39	13	39	39	39	39
12:00	28	28	28	28	28	28	28	28	83	96	28	28	60	60	28	28	28	11	28	28	28	28
13:00	21	21	21	21	21	21	21	21	62	75	21	21	41	41	21	21	21	7	21	21	21	21
14:00	13	13	13	13	13	13	13	13	41	55	13	13	23	23	13	13	13	5	13	13	13	13
15:00	5	5	5	5	5	5	5	5	21	34	5	5	11	11	5	5	5	2	5	5	5	5
	O23	O24	O25	O26	O27	O28	O29	O30	O31	O32	O33	O34	O35	O36	O37	O38	O39	O40	O41	O42	O43	O44
8:00	21	39	21	21	11	21	21	21	11	11	11	21	21	21	21	21	21	21	21	39	21	39
9:00	26	46	26	26	13	26	26	26	13	13	13	26	26	26	26	26	26	26	26	46	26	46
10:00	32	55	32	32	16	32	32	32	16	16	16	32	32	32	32	32	32	32	32	55	32	55
11:00	39	62	39	39	18	39	39	39	18	18	18	39	39	39	39	39	39	39	39	62	39	62
12:00	28	49	28	28	13	28	28	28	13	13	13	28	28	28	28	28	28	28	28	49	28	49
13:00	21	36	21	21	11	21	21	21	11	11	11	21	21	21	21	21	21	21	21	36	21	36
14:00	13	23	13	13	7	13	13	13	7	7	7	13	13	13	13	13	13	13	13	23	13	23
15:00	5	11	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	11	5	11
	O45	O46	O47	O48	O49	O50	O51	O52	O53	O54	O55	O56	O57	O58	O59	O60	O61	O62	O63	O64	O65	O66
8:00	21	11	21	21	39	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	39	21	21	21	21	21
9:00	26	13	26	26	46	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	46	26	26	26	26	26
10:00	32	16	32	32	55	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	55	32	32	32	32	32
11:00	39	18	39	39	62	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	62	39	39	39	39	39
12:00	28	13	28	28	49	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	49	28	28	28	28	28
13:00	21	11	21	21	36	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	36	21	21	21	21	21
14:00	13	7	13	13	23	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	23	13	13	13	13	13
15:00	5	5	5	5	11	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	11	5	5	5	5	5

Πίνακας Π110: Ζήτηση (σε οχήματα/ώρα/λωρίδα) στις εισόδους του δικτύου του Southampton για το σενάριο 6.