



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Προσομοίωση της κυκλοφορίας του αστικού δικτύου των
Χανίων με χρήση του μικροσκοπικού προσομοιωτή AIMSUN
και εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου φωτεινής
σηματοδότησης TUC.**

ΑΝΥΦΑΝΤΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Καθηγητής ΗΛΙΑΣ ΚΟΣΜΑΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2007

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
1.1 Έλεγχος κυκλοφορίας	2
1.2 ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	3
1.2.1 Μοντέλα και στρατηγικές ελέγχου	3
1.2.2 Μικροσκοπικά και Μακροσκοπικά μοντέλα	5
2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	6
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
2.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ	8
2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕΣΩ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΩΝ	10
2.4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΣΤΙΚΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ	12
2.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	14
3 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΤΥC	15
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
3.2 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ ΤΥC	15
3.3 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ ΤΥC	22
4 Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ AIMSUN	24
4.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ AIMSUN	24
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	24
4.2.1 Car-Following Model	26
4.2.2 Two-lanes car-following model	27
4.2.3 Μοντέλο αλλαγής λωρίδας κυκλοφορίας (Lane-changing model)	27
4.3 ΑΣΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΝΙΩΝ	29
4.3.1 Καθορισμός Φωτεινής Σηματοδότησης Κόμβων	30
4.3.2 Φωρατές	30
4.3.3 Καθορισμός Σεναρίων Ζήτησης	31
4.3.4 Καθορισμός Συμβάντων (Incidents)	33
5 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ LQ	34
5.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ	34
5.2 ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ – ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΣ Έλεγχος (LQ)	40
6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ LQ ΣΤΟ ΟΔΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ	43
6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	43
6.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΑ ΧΑΝΙΑ	45
6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ LQ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ	48
6.3.1 Απαιτούμενα δεδομένα	48
6.3.2 Μοντελοποίηση του δικτύου για την εφαρμογή της στρατηγικής	48
6.3.3 Εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου στο υπό μελέτη δίκτυο	63
7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	65
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	65
7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	66
8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	70
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	71

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Έλεγχος κυκλοφορίας

Οι οδικές μεταφορές αντιμετωπίζουν ολοένα και αυξανόμενα προβλήματα καθώς η κινητικότητα των ανθρώπων και των αγαθών ακολουθεί σταθερά αυξητική πορεία. Το αποτέλεσμα είναι κυκλοφοριακές συμφορήσεις να παρουσιάζονται πλέον όχι μόνο στις μεγάλες πόλεις αλλά και στις μικρότερες, όπως επίσης και σε αυτοκινητοδρόμους υψηλής χωρητικότητας, με επακόλουθα την αύξηση του απαιτούμενου χρόνου ταξιδιού, τη μειωμένη οδική ασφάλεια, την αυξημένη κατανάλωση καυσίμων και τη σοβαρή ατμοσφαιρική ρύπανση. Η συνεχής επέκταση της υπάρχουσας υποδομής δεν μπορεί πλέον να εξαλείψει πλήρως την κυκλοφοριακή συμφόρηση και τις αρνητικές συνέπειες της για λόγους οικονομικούς, οικολογικούς ή και απλά έλλειψης χώρου.

Μια εναλλακτική και εφικτή προσέγγιση προς την επίλυση των κυκλοφοριακών προβλημάτων, η οποία δέχθηκε ισχυρή ώθηση με 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. Η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας των επικοινωνιών και των υπολογιστών καθώς και του Αυτόματου Ελέγχου και των μεθοδολογιών Βελτιστοποίησης αποτέλεσαν αρωγούς στην προσπάθεια αυτή.

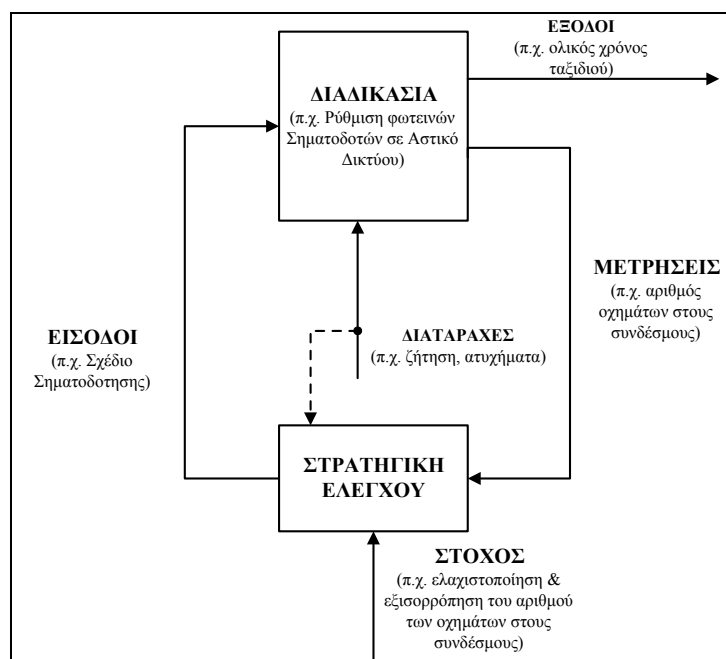
Η παρούσα διπλωματική εργασία σκοπό έχει τη σχεδίαση του οδικού δικτύου των Χανίων, τη δημιουργία σεναρίων ζήτησης με ή χωρίς συμβάντα και τη διερεύνηση της εφαρμογής του Γραμμικού–Τετραγωνικού Ελέγχου της στρατηγικής TUC (Traffic–Responsive Urban Control) στο οδικό δίκτυο των Χανίων. Η στρατηγική TUC 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 προτεινόμενες μεθόδους η στρατηγική TUC

επιτρέπει τη χρήση αποτελεσματικών μεθόδων βελτιστοποίησης και ελέγχου, με εύκολη εφαρμογή στο δίκτυο, απλή εγκατάσταση και συντήρηση, καθώς και μικρές απαιτήσεις όσον αφορά τις αναγκαίες μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο.

1.2 Χρήσιμοι ορισμοί

1.2.1 Μοντέλα και στρατηγικές ελέγχου

Γενικά, **μαθηματικό μοντέλο** μιας διαδικασίας είναι η αναπαράσταση της διαδικασίας με χρήση μαθηματικών εξισώσεων. Αυτές οι εξισώσεις 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. Από την άλλη πλευρά, μια **στρατηγική ελέγχου** είναι ένας αλγόριθμος που αυτόματα αποφασίζει τον τρόπο με τον οποίο θα επηρεαστεί η διαδικασία προς μια επιθυμητή κατεύθυνση. Μια στρατηγική ελέγχου χρησιμοποιεί μετρήσεις **πραγματικού χρόνου** (real-time) από την διαδικασία για να υπολογίσει (σε real-time) κατάλληλες **εισόδους ελέγχου** έτσι ώστε να επιτευχθούν προκαθορισμένοι **στόχοι** παρά την επίδραση μη-μετρήσιμων ή και μη-προβλέψιμων **διαταραχών** (Σχήμα 1-1).



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση εφαρμογής ελέγχου σε μια διαδικασία

Η διαθεσιμότητα μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν επαρκώς φαινόμενα κυκλοφορίας είναι μια σημαντική προϋπόθεση για την συστηματική εφαρμογή της σύγχρονης θεωρίας ελέγχου σε προβλήματα ελέγχου κυκλοφορίας. Η εκτίμηση των κυκλοφοριακών μεταβλητών και η ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών ελέγχου δεν είναι δυνατή χωρίς μια επαρκή γνώση των “φυσικών” νόμων που διέπουν το σύστημα της κυκλοφορίας.

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 πιο ασφαλής και εύκολη προσέγγιση συγκριτικά με την απευθείας διερεύνηση στρατηγικών ελέγχου σε πραγματικές συνθήκες.

Η μοντελοποίηση της κυκλοφοριακής ροής οδικών δικτύων πέραν της χρησιμότητας κατά την διαδικασία ανάπτυξης στρατηγικών ελέγχου, χρησιμεύει και σε άλλους τομείς όπως:

- Αξιολόγηση της επίδρασης γεγονότων που οδηγούν στην μείωση της χωρητικότητας του δικτύου (π.χ. εργασίες, ατυχήματα ή επεισόδια), την αύξηση της ζήτησης κ.τ.λ.
- Αξιολόγηση της επίδρασης νέων κατασκευών, σύγκριση εναλλακτικών λύσεων.
- Βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη και επιτήρηση της κυκλοφορίας σε περίπλοκα οδικά δίκτυα.

1.2.2 Μικροσκοπικά και Μακροσκοπικά μοντέλα

Γενικά, τα μοντέλα κυκλοφοριακής ροής μπορούν να χωριστούν σε δυο κύριες κατηγορίες (Parageorgiou, 1983) ανάλογα με το επίπεδο λεπτομέρειας που χρησιμοποιείτε για την περιγραφή των κυκλοφοριακών φαινομένων. Οι δυο αυτές κατηγορίες είναι οι ακόλουθες:

- Μικροσκοπικά μοντέλα
- Μακροσκοπικά μοντέλα

Τα **μικροσκοπικά μοντέλα** θεωρούν κάθε όχημα και τον οδηγό του ως ένα μεμονωμένο ρυθμιστή απόστασης. Μπορούν να θεωρήσουν το ίδιο ακόμη και για μια ολόκληρη σειρά από οχήματα που ακολουθούν το ένα το άλλο σε μια απλή λωρίδα. Τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψη τον χρόνο αντίδρασης των οδηγών στα εξωτερικά ερεθίσματα. Κάθε τέτοιο ερέθισμα για τον οδηγό μπορεί να τον οδηγήσει στην μείωση ή την αύξηση της ταχύτητας του οχήματος, πατώντας το φρένο ή το γκάζι, για να διατηρηθεί στην ροή των οχημάτων. Επιπρόσθετα, τα μικροσκοπικά μοντέλα προσπαθούν να περιγράψουν την αλλαγή λωρίδας, την συμπεριφορά του οδηγού σε μεταβολές και κινήσεις με ελιγμούς για την αποφυγή εμποδίων πάντοτε στο ατομικό επίπεδο του οχήματος.

Τα **μακροσκοπικά μοντέλα** θεωρούν την κυκλοφοριακή ροή ως ένα "ρευστό" με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Μια τέτοια προσέγγιση συνεπάγεται των 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.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιείται το μικροσκοπικό μοντέλο AIMSUN. Ο προσομοιωτής AIMSUN είναι ένας μικροσκοπικός προσομοιωτής κυκλοφορίας οδικών δικτύων στον οποίο αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό για την υλοποίηση της στρατηγικής TUC.

2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Δρόμοι και αστική κυκλοφορία υπάρχουν από την εποχή που υπάρχουν αστικές περιοχές. Επί αιώνες, η αστική κυκλοφορία αποτελούνταν από πεζούς, υποζύγια και ζωοκίνητα τροχοφόρα. Αν και ο συσσωρευμένος αριθμός των ανωνύμων θυμάτων της αστικής κυκλοφορίας μέχρι τον εικοστό αιώνα πιθανότατα δεν ήταν αμελητέος, η **ασφάλεια** της αστικής κυκλοφορίας εντοπίστηκε και αντιμετωπίστηκε ως ουσιαστικό πρόβλημα μετά την εμφάνιση μηχανοκίνητων τροχοφόρων και ιδιαίτερα του αυτοκινήτου.

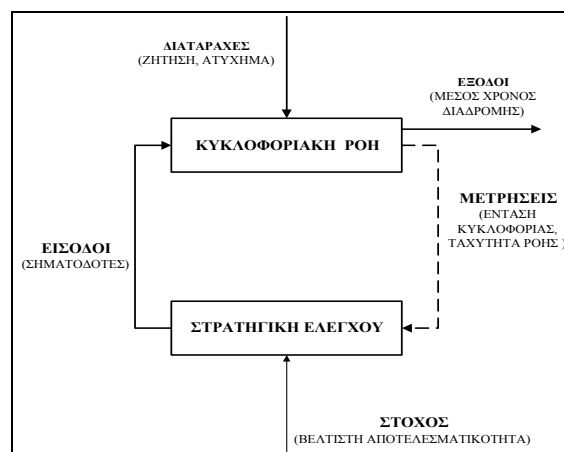
Οι πρώτοι ανθρωπίνοι ρυθμιστές κυκλοφορίας αντικαταστάθηκαν σταδιακά από αυτομάτους ηλεκτρικούς σηματοδότες. Στόχος και των μεν και των δε ήταν καταρχήν η ασφαλής διέλευση ανταγωνιστικών ρευμάτων ιδιαίτερα σε σημεία διασταυρώσεων:

- ασφαλής διασταύρωση ρευμάτων οχημάτων
- ασφαλής διασταύρωση οχημάτων και πεζών.

Με την εκθετική όμως αύξηση του αριθμού των αυτοκινήτων κατέστη σαφές ότι η ρύθμιση της κυκλοφορίας επιδρά όχι μόνο στην **ασφάλεια** αλλά και στην **αποτελεσματικότητα** της ροής, με την έννοια της μέσης διάρκειας διαδρομής εντός του αστικού δικτύου. Με άλλα λόγια, διαφορετικά σχέδια ρύθμισης της κυκλοφορίας, που ανταποκρίνονται όλα εξ ίσου στην ανάγκη **ασφαλούς ροής**, μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερη ή χειρότερη **αποτελεσματικότητα της ροής**, δηλαδή σε μεγαλύτερη ή μικρότερη μέση διάρκεια διαδρομής. Υπάρχει επομένως ένα συγκεκριμένο βέλτιστο σχέδιο ρύθμισης το οποίο οδηγεί στην ελάχιστη δυνατή μέση διάρκεια διαδρομής και βέβαια το ουσιαστικό πρόβλημα της ρύθμισης κυκλοφορίας αστικών περιοχών εντοπίζεται στον προσδιορισμό του βέλτιστου αυτού σχεδίου.

Το βέλτιστο σχέδιο κυκλοφορίας αποτελεί συνάρτηση πολλών παραγόντων όπως γεωμετρικές και οδικές συνθήκες, κυκλοφοριακή ζήτηση, είδος των οχημάτων, συμπεριφορά των οδηγών κ.λ.π. Ως εκ τούτου θα αποτελούσε υπεραπλούστευση να θεωρήσουμε ότι υπάρχει ένα σταθερό και αμετάβλητο βέλτιστο σχέδιο ακόμη και για ένα συγκεκριμένο οδικό δίκτυο. Αν όμως το σχέδιο κυκλοφορίας υπόκειται σε αλλαγές ανάλογες με τις επικρατούσες συνθήκες, πρέπει να αναζητήσουμε την ή τις **στρατηγικές ελέγχου** που θα προσδιορίζουν αυτόματα το βέλτιστο σχέδιο κυκλοφορίας σε συνάρτηση αυτών των συνθηκών.

Το πρόβλημα λοιπόν ανάγεται στην ανάπτυξη ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου για την επίλυση του οποίου η θεωρία αυτομάτου ελέγχου και βελτιστοποίησης προσφέρει μια ευρεία κλίμακα επιτυχημένων μεθόδων και αλγορίθμων. Το Σχήμα 2-1 τοποθετεί το γενικό πρόβλημα ως ένα **ελεγχόμενο σύστημα**, του οποίου η αποτελεσματικότητα, όπως εκφράζεται από τις **εξόδους** (π.χ. μέσος χρόνος διαδρομής), επηρεάζεται από καθοριζόμενες **εισόδους** (π.χ. σχέδιο σηματοδότησης) και από ανεξάρτητες **διαταραχές** (π.χ. ζήτηση, ατύχημα, τριβή ροής). Ο ρόλος της **στρατηγικής ελέγχου** έγκειται λοιπόν στον προσδιορισμό σχεδίων σηματοδότησης βάσει συγκεκριμένων **μετρήσεων** της κυκλοφοριακής ροής έτσι ώστε να επιτευχθεί ο **προκαθορισμένος στόχος** (π.χ. ελάχιστος μέσος χρόνος διαδρομής) υπό οποιεσδήποτε **συνθήκες διαταραχών**.



Σχήμα 2.1: Αυτόματος Έλεγχος Κυκλοφοριακής Ροής

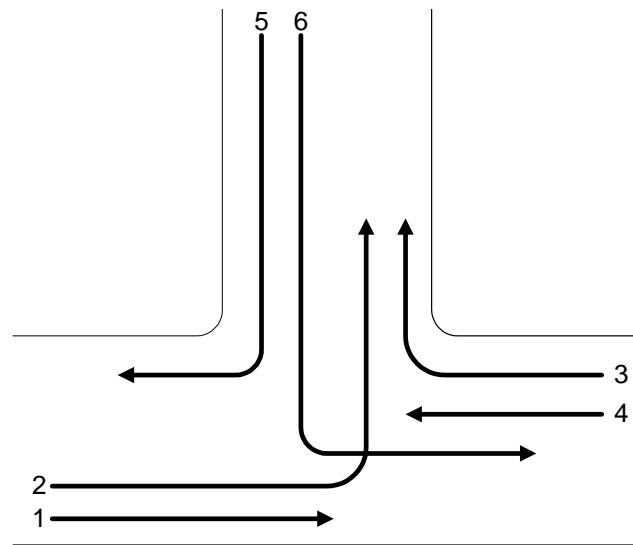
2.2 Κατάταξη συστημάτων ρύθμισης κυκλοφορίας

Τα συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας αστικών περιοχών, τα οποία βρίσκονται σήμερα σε εφαρμογή ή υπό ανάπτυξη, μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τα εξής τρία κριτήρια (Παπαγεωργίου, 1996):

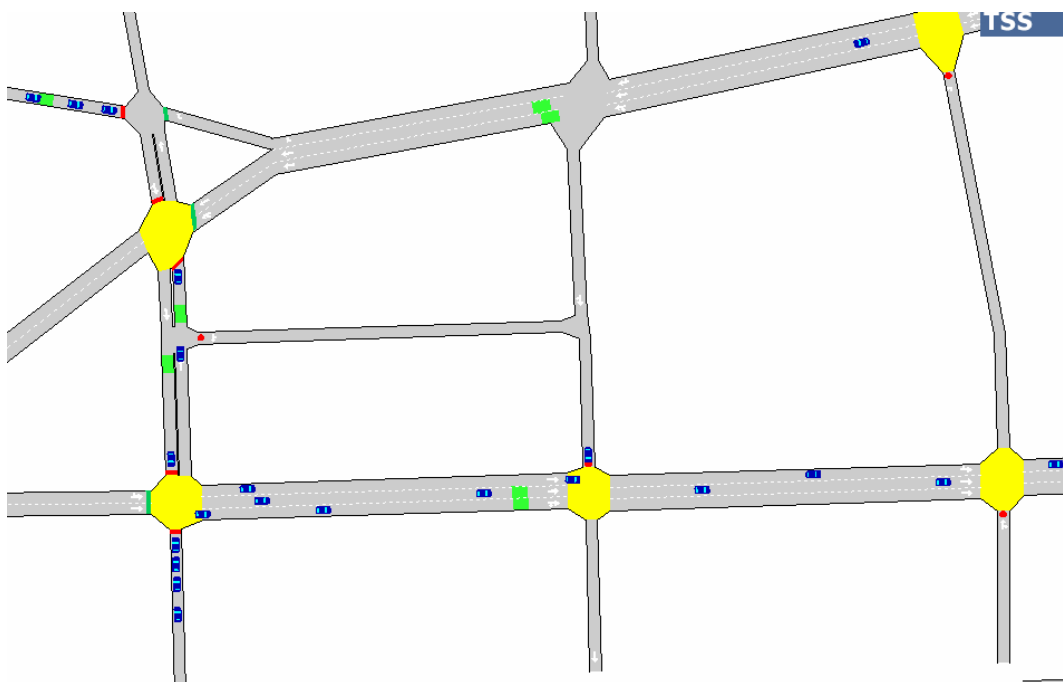
1. Συστήματα **σταθερού χρόνου** (fixed-time) λειτουργούν καθημερινά κατά τον ίδιο τρόπο, σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο ημερήσιο πρόγραμμα. Το ημερήσιο πρόγραμμα αναπτύσσεται εκ των προτέρων (off-line) βάσει ιστορικών ή προσωρινών μετρήσεων έτσι ώστε να οδηγήσει σε βέλτιστη αποτελεσματικότητα. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των συστημάτων σταθερού χρόνου πηγάζει από το γεγονός ότι οι συνθήκες κυκλοφορίας αλλάζουν: ζήτηση, ατυχήματα, καιρικές συνθήκες υπόκεινται σε βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες αλλαγές που απαιτούν αντίστοιχες αλλαγές του σχεδίου ελέγχου κυκλοφορίας.

Μια εν δυνάμει βελτίωση μπορεί να αναπτυχθεί μέσω **στρατηγικών πραγματικού χρόνου ή κυκλοφοριακής απόκρισης** (real-time ή traffic responsive), που προσαρμόζουν τις αποφάσεις τους στις επικρατούσες συνθήκες κυκλοφορίας βασιζόμενες σε αντίστοιχες πραγματικές (και όχι μόνο ιστορικές) μετρήσεις. Για την παροχή πραγματικών μετρήσεων απαιτείται η μόνιμη εγκατάσταση κατάλληλων φωρατών (ή άλλων διατάξεων) ενώ για την παραγωγή ιστορικών μετρήσεων αρκούν είτε η προσωρινή εγκατάσταση φωρατών είτε και μετρήσεις με παρατηρητές.

2. **Μεμονωμένα** συστήματα περιορίζουν το πεδίο λειτουργίας τους σε μια μόνο διασταύρωση (Σχήμα 2-2) με στόχο την ελαχιστοποίηση της μέσης καθυστέρησης των οχημάτων στη διασταύρωση αυτή. Η υλοποίηση μεμονωμένων συστημάτων ελέγχου είναι δυνατή με την επιτόπια εγκατάσταση κατάλληλων αναλογικών ή ψηφιακών ηλεκτρικών κυκλωμάτων ή, σε σύγχρονα συστήματα, κατάλληλα προγραμματισμένων μικροϋπολογιστών.



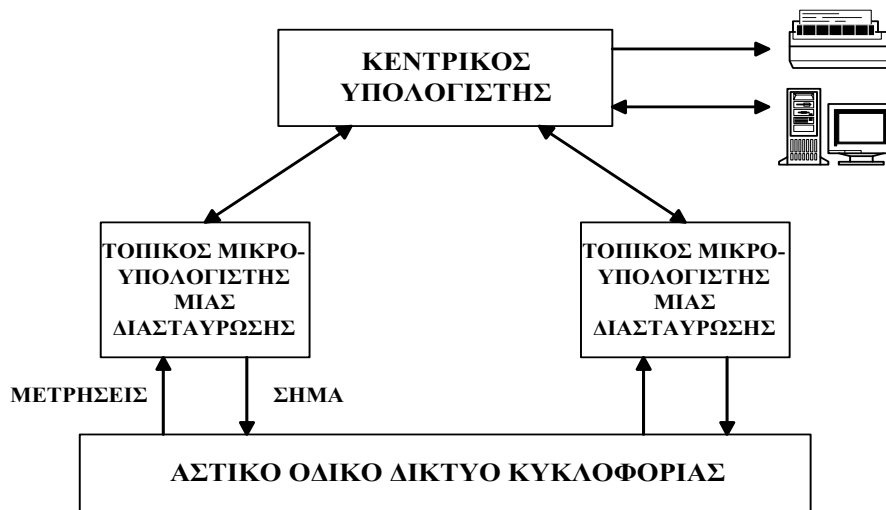
Σχήμα 2.2: Μεμονωμένη διασταύρωση με ανταγωνιστικά ρεύματα κυκλοφορίας



Σχήμα 2.3: Οδικό δίκτυο περιοχής

Η υλοποίηση συντονισμένων συστημάτων απαιτεί, ιδιαίτερα στην περίπτωση συστημάτων πραγματικού χρόνου, την εγκατάσταση μιας ιεραρχικής δομής υπολογιστών αποτελούμενης από δύο ή και περισσότερες ιεραρχικές βαθμίδες. Στην κατώτατη βαθμίδα βρίσκονται μικροϋπολογιστές, υπεύθυνοι για τον έλεγχο μιας διασταύρωσης και στην ανώτατη ένας κεντρικός

υπολογιστής πλαισιωμένος από οπτικές, αρχειοθετικές και εκτυπωτικές μονάδες (Σχήμα 2-4).



Σχήμα 2.4: Ιεραρχικό σύστημα ελέγχου κυκλοφορίας

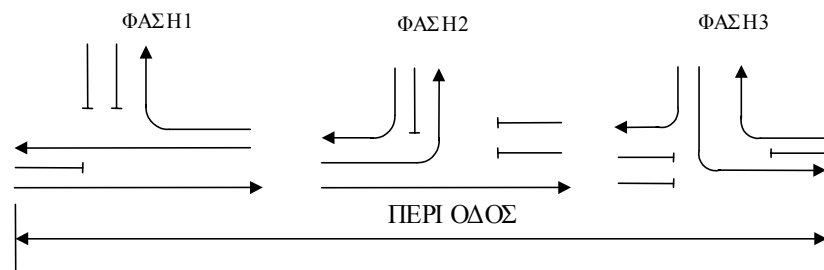
3. Στην περίπτωση **ακόρεστης** κυκλοφορίας η ζήτηση είναι χαμηλότερη από την κυκλοφοριακή ικανότητα μιας διασταύρωσης ή ενός δικτύου. Η κυκλοφοριακή ικανότητα εξαρτάται από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου αλλά και από την εφαρμοζόμενη στρατηγική ελέγχου.

Στην αντίθετη περίπτωση της **κορεσμένης** κυκλοφορίας παρατηρούμε φαινόμενα προσωρινής αποθήκευσης οχημάτων επί των οδών. 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 την σοβαρή μείωση της κυκλοφοριακής ικανότητας. Η ρύθμιση ακόρεστης κυκλοφορίας απαιτεί συχνά διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου από την ρύθμιση κορεσμένης κυκλοφορίας.

2.3 Τρόποι ελέγχου κυκλοφορίας μέσω σηματοδοτών

Ο έλεγχος της κυκλοφορίας μέσω σηματοδοτών επιτυγχάνεται με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους:

Ο **πρώτος** τρόπος έγκειται στο καθορισμό της σύστασης των **φάσεων** (stages) κυκλοφορίας σε κάθε διασταύρωση (δηλαδή στην επιλογή των κυκλοφοριακών ρευμάτων που δέχονται πράσινο ή κόκκινο σήμα σε κάθε φάση), καθώς και στον αριθμό των φάσεων. Εννοείται ότι τα κυκλοφοριακά ρεύματα που δέχονται συγχρόνως πράσινο σήμα σε μια φάση δεν πρέπει να είναι ανταγωνιστικά. Δυο κυκλοφορικά ρεύματα θεωρούνται ανταγωνιστικά αν η σύγχρονη διέλευση αμφοτέρων δημιουργεί πρόβλημα ασφάλειας στη διασταύρωση. Το Σχήμα 2-5 δίνει ένα παράδειγμα καθορισμού φάσεων για τη διασταύρωση του Σχήματος 2-2. Ο αριθμός των εναλλακτικών καθορισμών φάσεων αυξάνει με την αύξηση της πολυπλοκότητας της διασταύρωσης.



Σχήμα 2.5: Παράδειγμα καθορισμού των φάσεων

Ο **δεύτερος** και ίσως σημαντικότερος τρόπος έγκειται στον προσδιορισμό της σχετικής **διάρκειας** κάθε φάσης (split). Η σχετική διάρκεια ισούται με την διάρκεια της φάσης δια την διάρκεια της κυκλοφοριακής περιόδου.

Ο **τρίτος** τρόπος έγκειται στην μεταβολή της διάρκειας της κυκλοφοριακής **περιόδου** (cycle) η οποία είναι ίση με το άθροισμα της διάρκειας κάθε φάσης συν τις διάρκειες των ενδιάμεσων μεταβατικών σταδίων (κίτρινο σήμα). Η αύξηση της διάρκειας της κυκλοφοριακής περιόδου οδηγεί συνήθως, υπό σταθερές συνθήκες, στην αύξηση της κυκλοφοριακής ικανότητας της διασταύρωσης λόγω της σχετικής μείωσης των μεταβατικών σταδίων.

Ο **τέταρτος** τρόπος αναφέρεται μόνο σε συντονισμένα συστήματα και αφορά στην **χρονική μετατόπιση** (offset) μεταξύ της έναρξης των περιόδων γειτονικών διασταυρώσεων. Ο σωστός καθορισμός της χρονικής μετατόπισης

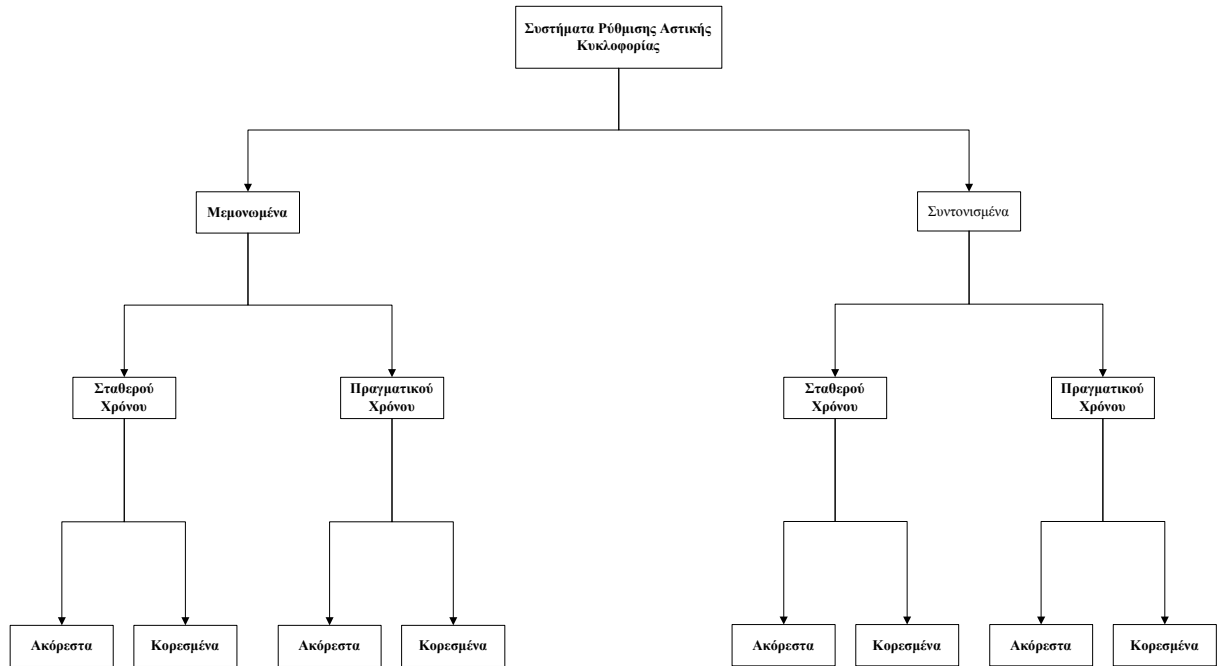
είναι επί παραδείγματι απαραίτητος για τη δημιουργία του λεγόμενου πράσινου κύματος κατά μήκος μιας οδικής αρτηρίας.

2.4 Στρατηγικές ελέγχου αστικής κυκλοφορίας

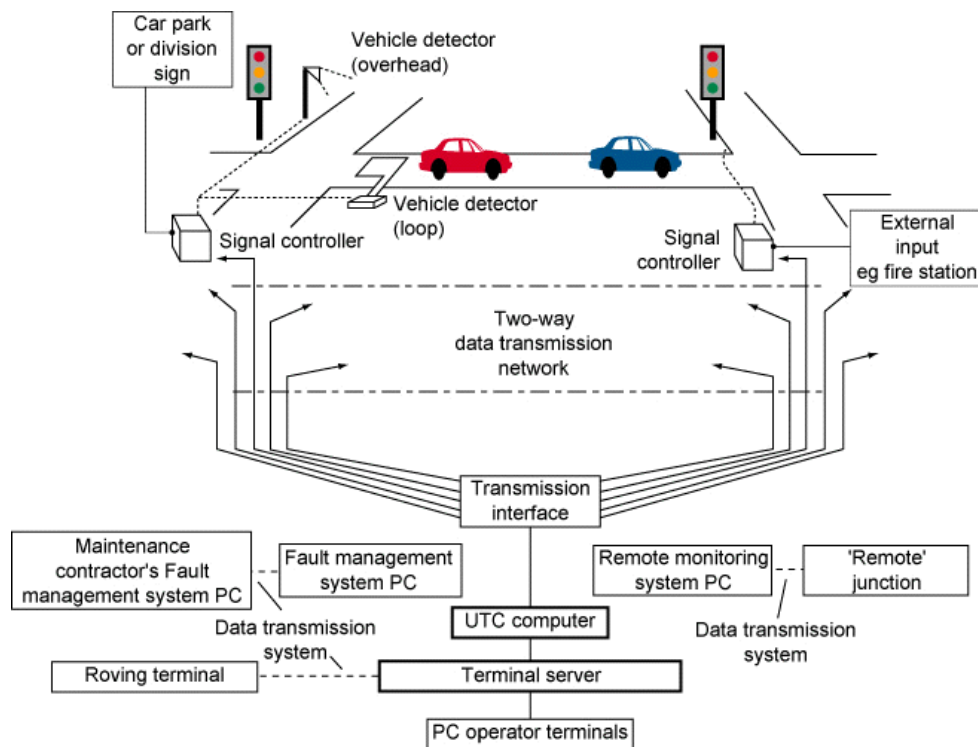
Ο συνδυασμός των προαναφερθέντων τριών κριτηρίων κατάταξης επιτρέπει την ταξινόμηση των στρατηγικών κυκλοφοριακού ελέγχου σε οκτώ διαφορετικές κατηγορίες, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 2-6 της επόμενης σελίδας.

Οι στρατηγικές **συντονισμένων συστημάτων πραγματικού χρόνου** αποτελούν ίσως την σημαντικότερη κατηγορία κυκλοφοριακού ελέγχου. Στην κατηγορία αυτή και ειδικότερα για τα **συντονισμένα ακόρεστα συστήματα πραγματικού χρόνου** έχουμε τα συστήματα SCOOT (Hunt, *et al.*, 1982) και SCAT (Lowrie, 1982). Το SCOOT στηρίζεται στο μαθηματικό πρότυπο ενός συντονισμένου, ακόρεστου συστήματος σταθερού χρόνου του TRANSYT και επιχειρεί την προσαρμογή της διάρκειας των φάσεων, της διάρκειας της κυκλοφοριακής περιόδου και της χρονικής μετατόπισης γειτονικών διασταυρώσεων στις επικρατούσες συνθήκες κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας μετρήσεις πραγματικού χρόνου. Η προσαρμογή αυτή επιτυγχάνεται μέσω ενός ευρετικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης ο οποίος μεταβάλλει σε πραγματικό χρόνο σταδιακά την σηματορύθμιση του δικτύου με στόχο την συνολική μείωση των καθυστερήσεων.

Το Σχήμα 2.7 της επόμενης σελίδας παρουσιάζει την βασική δομή του SCOOT το οποίο στις περιπτώσεις εφαρμογής του έχει συχνά βελτιώσει τις καθυστερήσεις κατά ένα διψήφιο ποσοστό σε σχέση με το TRANSYT.



Σχήμα 2.6: Ταξινόμηση συστημάτων ρύθμισης και ελέγχου αστικής κυκλοφορίας



Σχήμα 2.7: Βασική δομή του SCOOT

Μια σειρά σύγχρονων και φιλόδοξων προγραμμάτων της ίδιας κατηγορίας είναι τα UTOPIA (Mauro and Di Taranto, 1989), PROLYN (Farges, *et al.*, 1983) και OPAC (Gartner, 1983). Κοινό χαρακτηριστικό και των τριών στρατηγικών είναι η

επίλυση σε πραγματικό χρόνο πολύπλοκων, μη γραμμικών, δυναμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, γεγονός που οδηγεί σε υψηλή αποτελεσματικότητα αλλά απαιτεί προηγμένη τεχνολογία υπολογιστών ώστε να αντιμετωπιστεί ο υπολογιστικός φόρτος σε πραγματικό χρόνο. Στην κατηγορία αυτή ανήκει επίσης και το σύστημα ελέγχου ADONIS.

Τέλος, στην κατηγορία των συντονισμένων κορεσμένων συστημάτων πραγματικού χρόνου ανήκουν τα συστήματα CRONOS (Boillot, *et al.*, 1992), Hierarchical PRODYN, CLAIRE και SAGE. Γενικά τα συστήματα αυτά λαμβάνουν υπόψη τις ουρές, το μήκος τους και το ενδεχόμενο μπλοκάρισμα άλλων διασταυρώσεων. Το CRONOS βασίζεται σε απλοποιημένους αλγορίθμους βελτιστοποίησης όπου ο υπολογιστικός φόρτος αυξάνει πολυωνυμικά και το Hierarchical PRODYN είναι η διαμόρφωση του PRODYN με ιεραρχικά υψηλότερα επίπεδα για συντονισμό με ευρετικό τρόπο (όχι συστηματική βελτιστοποίηση).

2.5 Εισαγωγή στην προτεινόμενη μεθοδολογία

Η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου αστικών δικτύων ανήκει και αυτή στην κατηγορία των **συντονισμένων συστημάτων πραγματικού χρόνου** και είναι βασισμένη στην πρωτοποριακή εργασία των Gazis και Potts (1963). Στην εργασία αυτή προτείνεται η μαθηματική μοντελοποίηση αποθήκευσης-και-πρώθησης (store-and-forward) που περιγράφει τη διαδικασία της κυκλοφοριακής ροής με τέτοιο τρόπο, που επιτρέπει τη χρήση μεθοδολογιών βελτιστοποίησης και Αυτομάτου Ελέγχου πολυωνυμικής πολυπλοκότητας, οι οποίες με την σειρά τους επιτρέπουν την ανάπτυξη συντονισμένων στρατηγικών ελέγχου για μεγάλης κλίμακας οδικά δίκτυα. Η μεθοδολογία που προτείνεται στην παρούσα εργασία, βασίζεται σε αυτή τη μαθηματική μοντελοποίηση και χρησιμοποιεί γνωστές μεθόδους της θεωρίας Αυτομάτου Ελέγχου για τον σχεδιασμό (off-line) και τη εφαρμογή (on-line) ενός πολυμεταβλητού ρυθμιστή για το συντονισμένο έλεγχο, σε πραγματικό χρόνο αστικών δικτύων.

3 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ TUC

3.1 Εισαγωγή

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

Η στρατηγική TUC αποτελείται από πέντε τμήματα:

1. Έλεγχος διάρκειας φάσεων (Split Control).

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. 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.

Η στρατηγική TUC τροποποιεί μόνο τα μεταβλητά στάδια και πιο συγκεκριμένα τη διάρκεια του πρασίνου των μη σταθερών σταδίων με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε στάδιο να έχει τουλάχιστον ένα ελάχιστο πράσινο για κάθε κύκλο, χωρίς όμως να επηρεάζονται η περίοδος και η διαφορά έναρξης των πρασίνων μεταξύ διαδοχικών διασταυρώσεων που αποτελούν τμήματα αρτηρίας (η τιμή τους πρέπει να παραμένει σταθερή).

Ο κανόνας ελέγχου 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. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές της κατάστασης x_z των συνδέσμων, που αντιπροσωπεύουν το πόσο φορτωμένος από αυτοκίνητα είναι ο κάθε σύνδεσμος, 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 κανόνα ελέγχου, απαιτείται η ύπαρξη των μετρήσεων x_z όλων των συνδέσμων $z \in Z$ σε πραγματικό χρόνο. Εντούτοις, το πλήθος των οχημάτων δεν υπολογίζεται συνήθως απευθείας, εκτός αν υπάρχουν συστήματα οπτικής ανίχνευσης οχημάτων, αλλά εμμέσως μέσω της χρήσης φωρατών.

2. Έλεγχος διάρκειας περιόδου (Cycle Control).

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.

Η τροποποίηση της διάρκειας περιόδου είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος επηρεασμού των κυκλοφοριακών συνθηκών του δικτύου. Μεγαλύτερη περίοδος αυξάνει την χωρητικότητα της διασταύρωσης γιατί η αναλογία των χαμένων χρόνων γίνεται μικρότερη. Από την άλλη μεριά μπορεί όμως να αυξήσει την καθυστέρηση εξαιτίας των μεγαλύτερων χρόνων αναμονής κατά τη διάρκεια του κόκκινου.

Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα, ο σκοπός του ελέγχου της διάρκειας της περιόδου είναι η αύξηση της χωρητικότητας των διασταυρώσεων τόσο όσο απαιτείται για την ελαχιστοποίηση των μέγιστων παρατηρούμενων επιπέδων κορεσμού στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής ενός απλού αλγορίθμου με ανατροφοδότηση ο οποίος χρησιμοποιεί ως κριτήριο για την αυξομείωση της περιόδου το τρέχον μέγιστο επίπεδο κορεσμού ενός προκαθορισμένου ποσοστού των συνδέσμων του δικτύου. Ο έλεγχος της διάρκειας της περιόδου εκτελείται για κάθε T_c διάστημα, όπου είτε ισχύει

$T_C = m_C T_S$ με $m_C \geq 1$ και ακέραιος, είτε το T_C είναι σταθερό. Στην περίπτωση που εφαρμόζεται και έλεγχος χρονικής διαφοράς, τότε τα δύο διαστήματα (της περιόδου και της χρονικής διαφοράς) πρέπει να είναι ίσα μεταξύ τους και μεγαλύτερα από το διάστημα του ελέγχου της διάρκειας των φάσεων.

3. Έλεγχος χρονικής διαφοράς (Offset Control).

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 αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η δημιουργία ενός πράσινου κύματος σε μία αρτηρία. Ο καθορισμός αυτής της διαφοράς πρέπει να λαμβάνει υπόψη την πιθανή ύπαρξη ουρών.

Ο έλεγχος της χρονικής διαφοράς έναρξης των πρασίνων διαδοχικών διασταυρώσεων βασίζεται στις ακόλουθες υποθέσεις:

- Αρχικά η χρονική διαφορά προσδιορίζεται για αρτηρίες μίας κατεύθυνσης που δεν διασταυρώνονται. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι οι αρτηρίες ορίζονται ως μία προκαθορισμένη συνέχεια από συνδέσμους που δεν αντιστοιχούν κατ' ανάγκη σε φυσικές αρτηρίες του δικτύου.
- Στην περίπτωση αρτηριών διπλής κατεύθυνσης, η χρονική αυτή διαφορά προσδιορίζεται για κάθε κατεύθυνση ξεχωριστά και η συνολική διαφορά που θα εφαρμοστεί είναι ένας σταθμισμένος μέσος των δύο αυτών χρονικών διαφορών. Εναλλακτικά, η περισσότερο βεβαρημένη κατεύθυνση θα μπορούσε να καθορίσει τη συνολική χρονική διαφορά.
- Στην περίπτωση αρτηριών που διασταυρώνονται, η στρατηγική TUC θεωρεί μία ταξινόμηση των αρτηριών ανάλογα με την σχετική τους σημαντικότητα όσον αφορά τον προσδιορισμό της χρονικής διαφοράς, και ο έλεγχος εκτελείται για κάθε αρτηρία ξεκινώντας από αυτήν που έχει ταξινομηθεί ως πρώτη. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στα σημεία διασταυρώσεως των αρτηριών. Η

προαναφερθείσα ταξινόμηση των αρτηριών πραγματοποιείται από τις αρχές του δικτύου.

Η στρατηγική εκτελεί τον έλεγχο της χρονικής διαφοράς με ένα αποκεντρωμένο τρόπο, δηλαδή για διαδοχικά ζεύγη διασταυρώσεων μέσα σε προκαθορισμένες αρτηρίες. Για κάθε ζεύγος ο καθορισμός της χρονικής διαφοράς τροποποιεί τον χρόνο έναρξης του συγκεκριμένου βασικού σταδίου της πρώτη διασταύρωσης, όπου αυτό το στάδιο καθορίζεται μοναδικά από την σύνθεση της αρτηρίας.

4. Παροχή προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς (Public Transport Priority).

Το τμήμα αυτό της στρατηγικής αποσκοπεί στην παροχή προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς μέσω κατάλληλης τροποποίησης των αποτελεσμάτων των προηγούμενων τμημάτων της στρατηγικής TUC.

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις μέσω των οποίων η στρατηγική TUC μπορεί να παρέχει προτεραιότητα στα μέσα μαζικής μεταφοράς:

- Κατάλληλη απόδοση βαρών στις μετρήσεις που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο της διάρκειας των φάσεων με σκοπό να συμπεριληφθούν τα μέσα μαζικής μεταφοράς.
- Εκτέλεση ενός επιπρόσθετου τμήματος το οποίο να τροποποιεί τοπικά (σε κάθε διασταύρωση ξεχωριστά) τις ληφθείσες αποφάσεις με σκοπό την παροχή προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς.

Η πρώτη προσέγγιση είναι κατάλληλη για δίκτυα με πολλές διασταυρούμενες γραμμές μέσων μαζικής μεταφοράς και συχνή κίνηση των μέσων αυτών στο δίκτυο. Η εκτέλεση είναι εύκολη και βασικά αναγκάζει τον αλγόριθμο του ελέγχου της διάρκειας των φάσεων να ευνοεί την κίνηση των μέσων μαζικής μεταφοράς. Η παροχή προτεραιότητας δεν γίνεται με τον κλασσικό τρόπο δηλαδή με την τροποποίηση της κατάστασης της σηματοδότησης με σκοπό ένα συγκεκριμένο μέσο μαζικής μεταφοράς να αποκτήσει προτεραιότητα. Εντούτοις, έχει το πλεονέκτημα, συγκρινόμενο με τη δεύτερη προσέγγιση, να αποφεύγει τη δημιουργία σημαντικών διαταραχών στις ληφθείσες αποφάσεις. Για την

εφαρμογή της πρώτης προσέγγισης η στρατηγική TUC πρέπει απλά να γνωρίζει το πλήθος των οχημάτων μαζικής μεταφοράς μέσα στο δίκτυο. Αυτός ο αριθμός χρησιμοποιείται για την κατάλληλη απόδοση βαρών στις μετρήσεις που χρησιμοποιούνται από τη στρατηγική, με αποτέλεσμα να αναγκάζεται ο έλεγχος της διάρκειας των φάσεων να ευνοεί τους συνδέσμους που έχουν αξιοσημείωτες κινήσεις οχημάτων μαζικής μεταφοράς.

Η δεύτερη προσέγγιση παρέχει προτεραιότητα με τον κλασσικό τρόπο της απευθείας τροποποίησης της κατάστασης σηματοδότησης όταν έχουμε μέσα μαζικής μεταφοράς. Δεν χρησιμοποιείται όμως σε δίκτυα με πολλές διασταυρούμενες γραμμές μέσω μαζικής μεταφοράς και συχνής κίνησης των μέσων αυτών στο δίκτυο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι θα ήταν υπερβολικά δύσκολη η τροποποίηση της κατάστασης σηματοδότησης τόσες πολλές φορές ώστε να εξυπηρετούνται τα μέσα μαζικής μεταφοράς.

Σύμφωνα με τη δεύτερη προσέγγιση εάν ένα όχημα μαζικής μεταφοράς ανιχνευθεί σε ένα σύνδεσμο, η κατάσταση της σηματοδότησης τροποποιείται αυτόματα έτσι ώστε το όχημα να περάσει τη διασταύρωση το νωρίτερο δυνατόν. Γενικά, η τροποποίηση αυτή μπορεί να περιλαμβάνει επέκταση της διάρκειας του πράσινου, επέκταση της διάρκειας των σταδίων, εισαγωγή νέων σταδίων, αποφυγή ορισμένων σταδίων κ.α. Στη στρατηγική TUC η προτεραιότητα παρέχεται μόνο με επέκταση της διάρκειας του πράσινου ή με ανάκληση σταδίων καθώς όλες οι άλλες μέθοδοι παρουσιάζουν ανυπέβλητες δυσκολίες σε υπερκορεσμένες συνθήκες.

5. Επεξεργασία δεδομένων (Data Processing).

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.

Για την εκτέλεση των ελέγχων διάρκειας φάσεων, περιόδου και χρονικής διαφοράς καθώς και της παροχής προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς, απαιτείται το πλήθος των οχημάτων $x_z \forall z \in Z$ να είναι διαθέσιμο σε πραγματικό χρόνο. Καθώς τα διαστήματα ελέγχου της στρατηγικής TUC είναι σχετικά μεγάλα (π.χ. $T_s \geq C_j \forall j \in J$), αυτά τα στοιχεία ανακλούν τις μέσες κυκλοφοριακές συνθήκες και όχι τις περιοδικές αυξομειώσεις που οφείλονται για παράδειγμα στο πράσινο / κόκκινο της φωτεινής σηματοδότησης.

Επομένως :

- Ο αριθμός των οχημάτων που χρησιμοποιείται από τον έλεγχο διάρκειας των φάσεων είναι οι μέσες τιμές που αντιστοιχούν στο προηγούμενο διάστημα ελέγχου T_s .
- Ο αριθμός των οχημάτων που χρησιμοποιείται από τον έλεγχο περιόδου, χρονικής διαφοράς και της παροχής προτεραιότητας σε μέσα μαζικής μεταφοράς είναι ο αριθμός οχημάτων που προέκυψε από τον έλεγχο της διάρκειας των φάσεων κατά τη διάρκεια του τελευταίου διαστήματος ελέγχου T_s .

Με αυτόν τον τρόπο όλα τα τμήματα της στρατηγικής TUC βασίζουν τις αποφάσεις τους στις πιο πρόσφατες παρατηρούμενες κυκλοφοριακές συνθήκες.

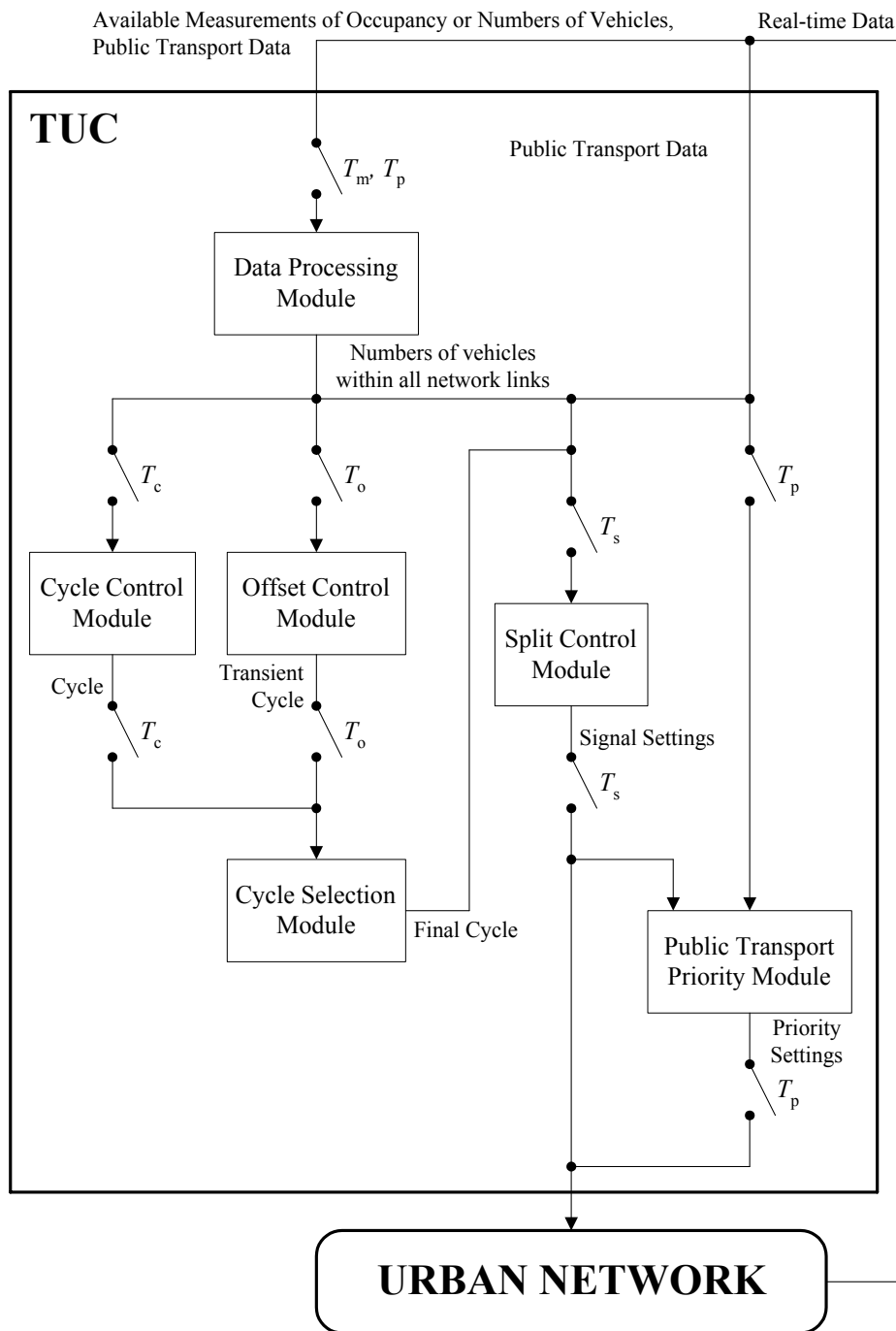
Αν είναι διαθέσιμο ένα προηγμένο σύστημα οπτικής ανίχνευσης, ο αριθμός των οχημάτων μπορεί να συλλεχθεί απευθείας. Εντούτοις, στην πλειοψηφία των πρακτικών εφαρμογών, χρησιμοποιούνται οι παραδοσιακοί μαγνητικοί ανιχνευτές, φωρατές. Απλοί φωρατές μετρούν την κατάληψη και τον κυκλοφοριακό φόρτο για μία μόνο λωρίδα, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και για περισσότερες λωρίδες. Παρόλα αυτά οι φωρατές δεν μετρούν απευθείας τον αριθμό των οχημάτων μέσα σε ένα σύνδεσμο, κάτι που μόνο με προηγμένα συστήματα οπτικής ανίχνευσης μπορούμε να έχουμε. Στην περίπτωση των φωρατών ο απαιτούμενος αριθμός οχημάτων υπολογίζεται με έμμεσο τρόπο.

Η έλλειψη τιμών σε πραγματικό χρόνο για ορισμένους συνδέσμους εξαιτίας της μη ύπαρξης φωρατών ή άλλων προβλημάτων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της αποτελεσματικότητας της στρατηγικής αν δεν παρθούν κατάλληλα μέτρα για την αντιμετώπιση τους. Για την αποφυγή τέτοιων ανεπιθύμητων καταστάσεων πραγματοποιείται αντικατάσταση των δεδομένων που δεν υπάρχουν.

Για κάθε σύνδεσμο z όπου δεν υπάρχουν πραγματικές μετρήσεις, το πλήθος των οχημάτων x_z μπορεί να θεωρηθεί ίσο με μία σταθμισμένη μέση τιμή των διαθέσιμων αριθμών οχημάτων των άλλων συνδέσμων που προσεγγίζουν την ίδια διασταύρωση. Αν δεν υπάρχουν στοιχεία για κανένα σύνδεσμο που προσεγγίζει τη διασταύρωση τότε το $x_z(k)$ μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το $x_z(k-1)$ για όλους τους συνδέσμους που προσεγγίζουν αυτή τη διασταύρωση.

3.3 Γραφική αναπαράσταση της δομής της στρατηγικής TUC

Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζεται μία γραφική αναπαράσταση της δομής της στρατηγικής TUC και του τρόπου σύνδεσης και λειτουργίας των επιμέρους τμημάτων της, δηλαδή του ελέγχου διάρκειας των φάσεων, του ελέγχου διάρκειας της περιόδου, του ελέγχου της χρονικής διαφοράς, του τμήματος της παροχής προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς και τέλος του τμήματος της επεξεργασίας των στοιχείων.



Σχήμα 3.1: Γραφική αναπαράσταση της στρατηγικής TUC

4 Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ AIMSUN

4.1 Βασικά Χαρακτηριστικά AIMSUN

Ο προσομοιωτής AIMSUN είναι ένας μικροσκοπικός προσομοιωτής κυκλοφορίας οδικών δικτύων. Χρειάζεται για τη λειτουργία του ένα σενάριο προσομοίωσης και ένα σύνολο παραμέτρων που καθορίζουν το πείραμα. Το σενάριο αποτελείται από ένα σχέδιο οδικού δικτύου, δεδομένα κυκλοφοριακής ζήτησης, δεδομένα κυκλοφοριακού ελέγχου και σχέδια μέσων μαζικής μεταφοράς. Τα δεδομένα ζήτησης και κυκλοφοριακού ελέγχου μπορεί να είναι είτε σταθερά, είτε και να αλλάζουν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Επίσης ο προσομοιωτής AIMSUN διαθέτει ένα ειδικό λογισμικό που ονομάζεται GETRAM Extensions. Αυτό διαθέτει μια βιβλιοθήκη από αρχεία τύπου dll μέσω των οποίων μπορούμε να προσθέσουμε – προγραμματίζοντας κατάλληλα σε γλώσσα προγραμματισμού C - οποιαδήποτε πολιτική ή στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης επιθυμούμε, πέρα από αυτές που διαθέτει ο προσομοιωτής από μόνος του. Κατά αυτόν τον τρόπο, αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό για την υλοποίηση στο AIMSUN της στρατηγικής TUC.

4.2 Μοντελοποίηση της Κίνησης των Οχημάτων

Τα οχήματα, κατά τη διάρκεια του ταξιδιού τους μέσα στο δίκτυο, συνεχώς αναθεωρούν κάποιες από τις παραμέτρους τους σύμφωνα με τα μοντέλα συμπεριφοράς των οχημάτων που είναι ενσωματωμένα στον προσομοιωτή. Αυτά τα μοντέλα είναι το μοντέλο αλλαγής λωρίδας κυκλοφορίας (car changing model) και το car following model. Οι οδηγοί προσπαθούν να οδηγούν με βάση την επιθυμητή ταχύτητα σε όλα τα τμήματα του δικτύου, αλλά το περιβάλλον (π.χ. τα προπορευόμενα οχήματα, φανάρια, πινακίδες κλπ) είναι τελικά αυτό που καθορίζει τη συμπεριφορά τους.

Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης είναι χωρισμένος σε μικρά χρονικά διαστήματα (βήματα προσομοίωσης Δt). Για λόγους απλοποίησης και ευκολίας, όπως συμβαίνει σε όλους σχεδόν τους μικροσκοπικούς προσομοιωτές, το βήμα της προσομοίωσης ισούται με το χρόνο αντίδρασης του οδηγού. Ο χρόνος αυτός μπορεί να ανήκει στο διάστημα ($1.25 \geq \Delta t \geq 0,5$), αλλά θα ήταν σωστότερο να ανήκει στο ($0.80 \geq \Delta t \geq 0,65$). Από προσομοιώσεις επιλέξαμε στο 1.00 ως την πιο κατάλληλη και ρεαλιστική τιμή.

Το βήμα προσομοίωσης μπορεί να επηρεάσει επίσης και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως π.χ. το ποσοστό κατάληψης του δικτύου. Όσο μικρότερο είναι το βήμα της προσομοίωσης τόσο μεγαλύτερα ποσοστά κατάληψης παίρνουμε. Αυτό συμβαίνει επειδή οι οδηγοί γίνονται πιο ευέλικτοι, αφού έχουν μικρότερο χρόνο αντίδρασης. Μπορούν να οδηγούν πιο κοντά στα προπορευόμενα οχήματα, να εκμεταλλεύονται τα κενά στις λωρίδες καλύτερα, να επιταχύνουν νωρίτερα κλπ.

Σε κάθε βήμα προσομοίωσης, η θέση και η ταχύτητα κάθε οχήματος αναθεωρείται με βάση τον παρακάτω αλγόριθμο:

```
if (είναι απαραίτητη η αλλαγή λωρίδας) then
    Εφαρμογή του Lane-Changing Model
endif
```

```
if (το όχημα δεν έχει αλλάξει λωρίδα) then
    Εφαρμογή του Car-Following-Model
endif
```

Εφόσον έχει γίνει ενημέρωση για την κατάσταση όλων των οχημάτων στο τρέχων βήμα, εισέρχονται στο δίκτυο τα νέα οχήματα όπως είχε προγραμματιστεί και υπολογίζονται οι επόμενοι χρόνοι άφιξης οχημάτων.

4.2.1 Car-Following Model

Το Car-Following model που χρησιμοποιείται από το AIMSUN περιέχει δύο συστατικά, την επιτάχυνση και την επιβράδυνση των οχημάτων. Η επιτάχυνση έχει να κάνει με την πρόθεση ενός οδηγού να επιτύχει την επιθυμητή για αυτόν ταχύτητα, ενώ η επιβράδυνση έχει να κάνει με τους περιορισμούς που εμπιέρονται στο σύστημα ή περιορισμούς που δημιουργούνται από τα προπορευόμενα οχήματα, όταν αυτά προσπαθούν να προσεγγίσουν τη δική τους επιθυμητή ταχύτητα.

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να αποκτήσει ένα όχημα (n) κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου (t , t+T) δίνεται από τη σχέση:

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2,5a(n)T \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)} \right) \sqrt{0,025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}} \quad (4.1)$$

όπου:

$V(n, t)$ είναι η ταχύτητα του οχήματος n τη χρονική στιγμή t

$V^*(n)$ είναι η επιθυμητή ταχύτητα του οχήματος n

$a(n)$ είναι η μέγιστη επιτάχυνση του οχήματος n

T είναι ο χρόνος αντίδρασης του οδηγού που ισούται με το βήμα προσομοίωσης

Από την άλλη, η μέγιστη ταχύτητα στην οποία μπορεί να φτάσει το ίδιο αυτοκίνητο (n) κατά τη διάρκεια της ίδιας περιόδου (t , t+T), όσο αφορά τα δικά του χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς που δέχεται από το πρώτο προπορευόμενο όχημα (leader vehicle) δίνεται από την σχέση:

$$V_b(n, t + T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2 T^2 - d(n) \left[2\{x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)\} - V(n, t)T - \frac{V(n-1, t)^2}{d'(n-1)} \right]} \quad (4.2)$$

Όπου:

$d(n) < 0$ είναι η μέγιστη επιθυμητή επιβράδυνση του οχήματος n

$x(n, t)$ είναι η θέση του οχήματος n τη χρονική στιγμή t

$s(n)$ είναι το μήκος του οχήματος n

$d'(n-1)$ είναι μια εκτίμηση της επιθυμητής επιβράδυνσης του οχήματος n

Τελικά η ταχύτητα του οχήματος n κατά τη διάρκεια $(t, t+T)$, είναι η μικρότερη από τις δύο που υπολογίστηκαν παραπάνω.

$$V(n,t+T) = \min \{ V_a(n,t+T), V_b(n,t+T) \} \quad (4.3)$$

Άρα η θέση του οχήματος n στη συγκεκριμένη λωρίδα κυκλοφορίας ενημερώνεται αυτόματα, από την εισαγωγή της ταχύτητας του στην καταστατική εξίσωση:

$$X(n,t+T) = x(n,t) + V(n,t+T)T \quad (4.4)$$

4.2.2 Two-lanes car-following model

Στόχος μας εδώ είναι να μοντελοποιήσουμε την επιρροή των παρακείμενων λωρίδων κυκλοφορίας στο car-following model. Όταν ένα όχημα κινείται σε ένα τμήμα του δικτύου, ορίζουμε την επιρροή που μπορεί να έχει στο όχημα, ένας συγκεκριμένος αριθμός οχημάτων (N) της δεξιάς λωρίδας που έχουν χαμηλότερη ταχύτητα από αυτό. Βασικά το μοντέλο αυτό καθορίζει μια νέα μέγιστη επιθυμητή ταχύτητα που θα χρησιμοποιηθεί από το μοντέλο της ενότητας 4.2.1.

Το μοντέλο αρχικά υπολογίζει τη μέση ταχύτητα των N οχημάτων που κινούνται κατάντη του οχήματος μας στην πιο αργή λωρίδα. Παίρνουμε υπόψη μόνο τα οχήματα αυτά που κινούνται μέχρι μια συγκεκριμένη μέγιστη απόσταση από το όχημα. Αν σε αυτήν την απόσταση κινούνται λιγότερα από N οχήματα, τότε για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας συμπεριλαμβάνουμε και την ταχύτητα του οχήματος μας.

4.2.3 Μοντέλο αλλαγής λωρίδας κυκλοφορίας (Lane-changing model)

Η αλλαγή λωρίδας κυκλοφορίας, μοντελοποιείται σαν διαδικασία ανάλυσης αποφάσεων. Εδώ αναλύονται η «αναγκαιότητα», η «επιθυμία» και η «εφικτότητα» αλλαγής λωρίδας. Το μοντέλο αλλαγής λωρίδας (Lane-changing model) είναι ένα μοντέλο αποφάσεων που προσεγγίζει την συμπεριφορά του οδηγού με τον ακόλουθο τρόπο:

- Κάθε φορά που γίνεται η επανεκτίμηση της κατάστασης ενός οχήματος, ζητείται να δοθεί μια απάντηση, στην ερώτηση: «είναι απαραίτητο να γίνει αλλαγή λωρίδας»; Η απάντηση αυτή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η εφικτότητα στροφής στη συγκεκριμένη λωρίδα, η απόσταση μέχρι την επόμενη στροφή και η κυκλοφοριακή κατάσταση της λωρίδας. Η κυκλοφοριακή κατάσταση μετράται με βάση την ταχύτητα και την ουρά που πιθανόν έχει σχηματιστεί. Όταν ένας οδηγός πηγαίνει πιο αργά από ότι επιθυμεί, προσπαθεί να προσπεράσει το προπορευόμενο όχημα και όταν κινείται με αρκετή ταχύτητα προσπαθεί να κινηθεί σε πιο αργή λωρίδα.
- Αν η απάντηση στην προηγούμενη ερώτηση είναι θετική, τότε πρέπει να απαντηθούν δύο ακόμα ερωτήσεις:

- *Είναι επιθυμητή η αλλαγή λωρίδας;*

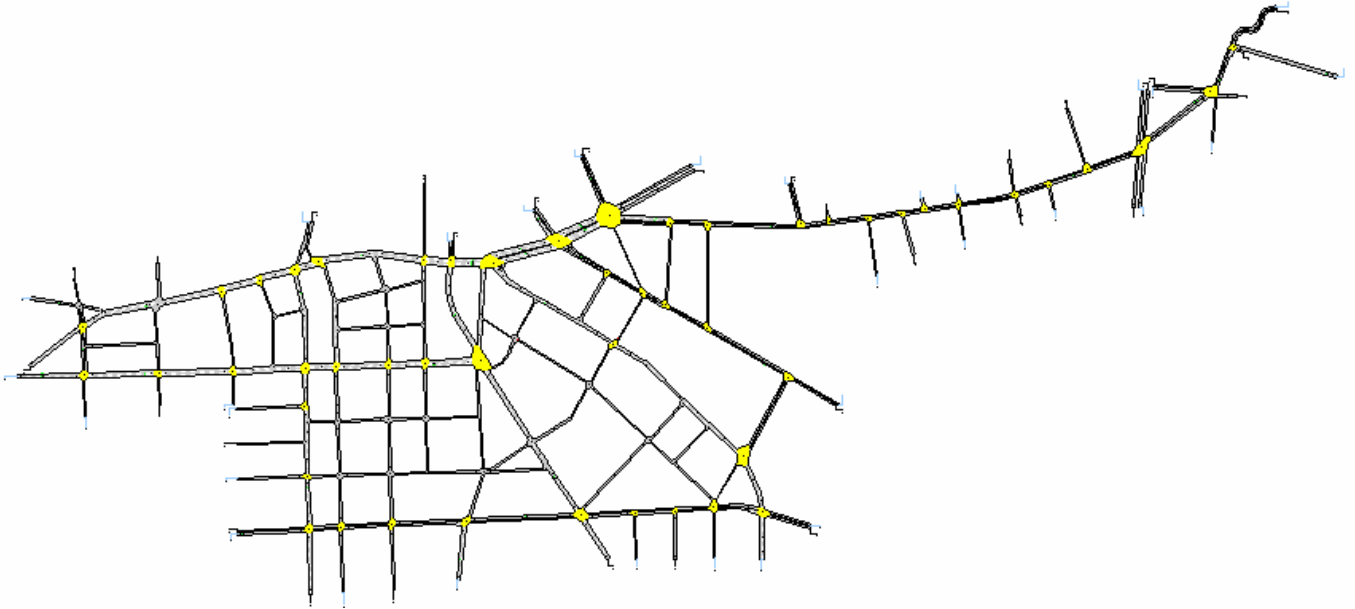
Εδώ ελέγχεται το αν μια ενδεχόμενη αλλαγή λωρίδας, θα μπορούσε να βελτιώσει την κυκλοφοριακή κατάσταση του οδηγού. Αυτή η βελτίωση υπολογίζεται βάση της ταχύτητας και της απόστασης. Εάν η ταχύτητα στην μελλοντική λωρίδα είναι μεγαλύτερη από την τωρινή ή αν το μήκος της ουράς είναι αρκετά μικρότερο, τότε είναι επιθυμητή η αλλαγή λωρίδας.

- *Είναι εφικτή η αλλαγή λωρίδας;*

Εδώ πιστοποιείται το εάν υπάρχει αρκετό κενό, ώστε να γίνει η αλλαγή λωρίδας με ασφάλεια. Υπολογίζονται οι επιβραδύνσεις που χρειάζεται να ασκηθούν από το όχημα που αλλάζει λωρίδα, από το μελλοντικό ανάντη και κατόντη όχημα και εάν είναι εφικτές με βάση τις ικανότητες των οχημάτων και την κυκλοφοριακή κατάσταση της μελλοντικής λωρίδας, η αλλαγή θεωρείται εφικτή.

4.3 Αστικό δίκτυο Χανίων

Το αστικό δίκτυο των Χανίων για να μελετηθεί από τον προσομοιωτή AIMSUN σχεδιάστηκε με το βοηθητικό πρόγραμμα TEDI.



Σχήμα 4.1: Αστικό δίκτυο των Χανίων.

Αποτελείται από 71 αστικούς συνδέσμους (links) και 16 σηματοδοτούμενους κόμβους (junctions). Οι σύνδεσμοι δημιουργούνται με την βοήθεια του TEDI με απλό τρόπο και υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του αριθμού των λωρίδων κάθε συνδέσμου καθώς και της απαραίτητης καμπυλότητας αυτών για όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική προσέγγιση του δικτύου. Επίσης καθορίζεται η κατεύθυνση κάθε συνδέσμου και εισάγονται τα δεδομένα των ποσοστών στροφής (turning rates) από τα οποία θα εξαρτάται η κίνηση των οχημάτων κατά την προσομοίωση. Για τους κόμβους χρησιμοποιείται η επιλογή "yellow box" ώστε τα οχήματα να μην σταματάνε μέσα σε έναν κόμβο αν κάποιος από τους συνδέσμους του είναι μπλοκαρισμένος. Αναλυτικότερα θα ασχοληθούμε με το αστικό δίκτυο των Χανίων σε επόμενο κεφάλαιο.

4.3.1 Καθορισμός Φωτεινής Σηματοδότησης Κόμβων

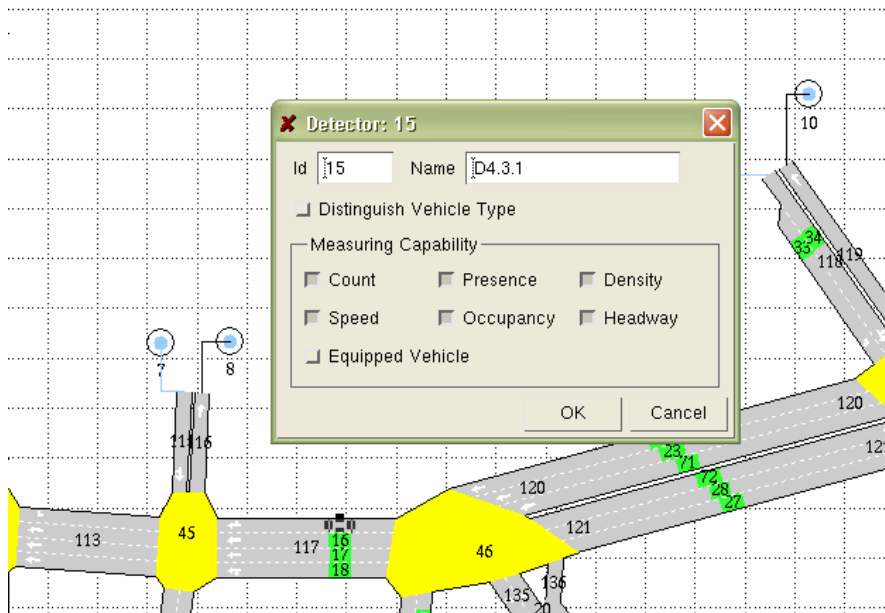
Για τον καθορισμό του πλάνου φωτεινής σηματοδότησης του αστικού δικτύου των Χανίων ώστε να χρησιμοποιηθεί από τον προσομοιωτή AIMSUN έγινε μέσω του βοηθητικού προγράμματος TEDΙ εισαγωγή των παρακάτω δεδομένων:

- Σειρά φάσεων (επιτρεπτές κινήσεις)
- Διάρκεια φάσεων
- Περίοδος
- Χρονική μετατόπιση

Για σύστημα πραγματικού χρόνου απαιτείται ειδική μέριμνα για την χρησιμοποίηση των παραπάνω δεδομένων. Η σηματοδότηση του δικτύου των Χανίων επεξηγείται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

4.3.2 Φωρατές

Οι φωρατές (detectors) τοποθετήθηκαν στο αστικό δίκτυο των Χανίων που σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα TEDΙ βάση δεδομένων που παρέχονται από τις υπεύθυνες αρχές του δικτύου. Τα δεδομένα αυτά περιέχουν τον αριθμό των φωρατών που έχει κάθε σύνδεσμος και την απόσταση τους από το αντίστοιχο φανάρι. Η λειτουργία των φωρατών έγκειται στην καταγραφή συγκεκριμένων δεδομένων όπως η ταχύτητα, ο αριθμός και η κατάληψη(occupancy) των οχημάτων που διέρχονται ή βρίσκονται από πάνω τους. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται από τον προσομοιωτή AIMSUN για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται όλα τα δεδομένα τα οποία μετράει ένας φωρατής(count, presence, density, speed, occupancy, headway).



Εικόνα 4.1: Εισαγωγή φωρατών στο δίκτυο

4.3.3 Καθορισμός Σεναρίων Ζήτησης

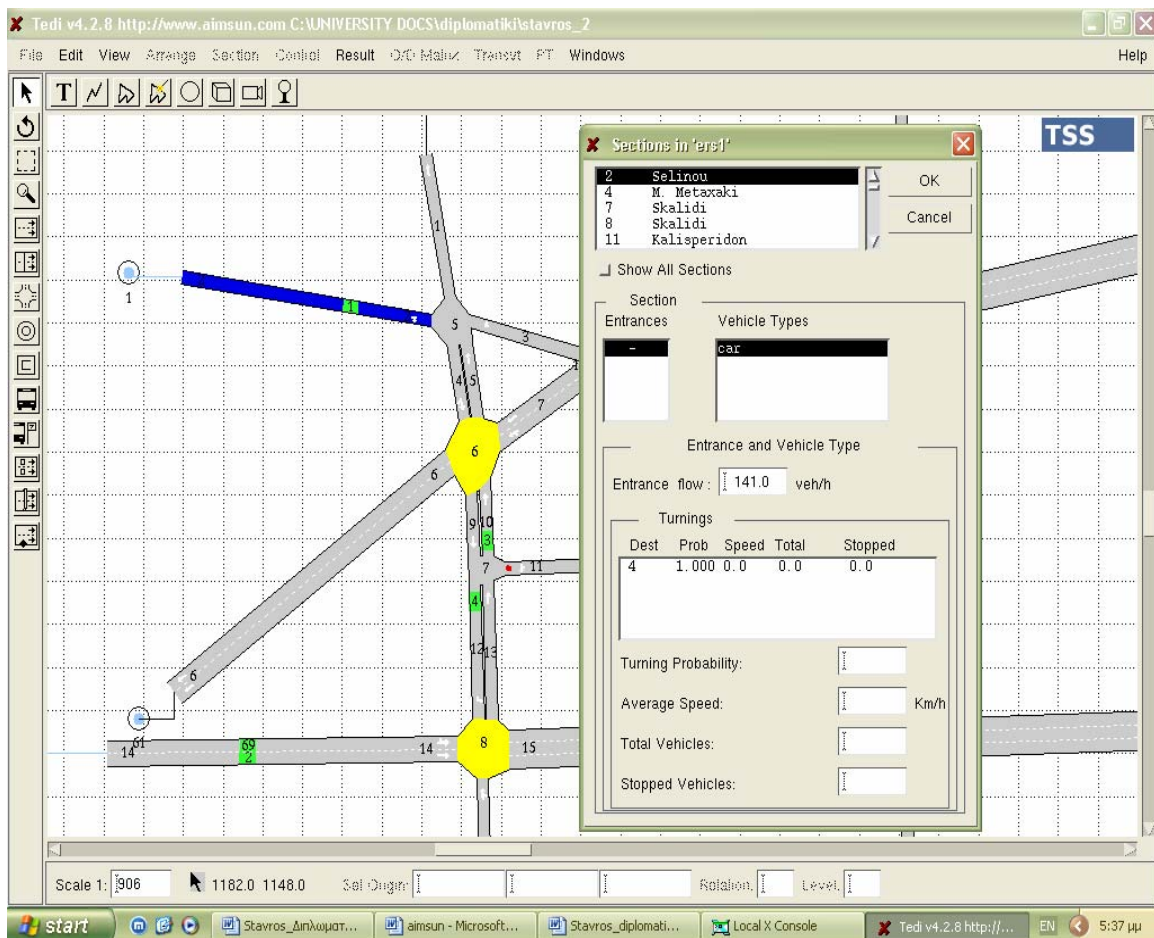
Στην παρούσα εργασία καθορίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν δυο σενάρια ζήτησης υπό την μορφή αριθμητικών φύλλων EXCEL. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αριθμητικά δεδομένα ενός σεναρίου ζήτησης.

	01	02	03	04	06	07	08	09	010	011	014	015	016	018	020	021	022	024	025	026	013+023
1	26	7	2	3	3	34	3	11	7	4	77	39	65	8	44	13	17	21	23	9	24
2	47	10	11	7	7	58	13	25	36	23	111	50	85	17	71	59	47	42	47	19	83
3	74	24	25	12	12	75	26	35	46	79	196	78	103	25	87	87	72	77	59	29	118
4	128	48	36	14	22	103	39	43	76	105	232	102	139	32	96	112	101	95	100	45	177
5	135	65	46	19	33	119	51	58	125	171	283	128	171	44	120	130	121	121	145	58	246
6	141	88	35	22	39	124	66	70	205	237	337	161	194	55	136	149	136	153	196	66	341
7	185	77	46	17	30	111	55	61	188	224	319	151	184	41	120	136	124	130	170	53	312
8	188	88	37	23	39	124	64	70	205	237	334	161	195	53	136	147	136	152	193	66	341
9	227	79	48	19	29	109	51	58	199	223	312	155	182	40	119	134	122	126	169	52	321
10	235	89	39	22	37	121	66	69	202	237	337	162	194	50	134	149	135	150	190	64	337
11	227	78	47	18	25	110	55	55	188	221	310	151	180	38	118	136	121	124	168	50	309
12	235	87	38	22	39	124	63	70	205	237	335	161	194	53	136	147	136	148	196	66	341
13	227	78	46	18	29	117	52	61	199	222	312	151	183	44	121	135	122	125	175	53	321
14	236	88	35	24	38	123	66	71	205	235	336	162	196	53	133	145	133	150	196	65	338
15	226	79	45	18	29	109	55	63	188	223	310	153	179	45	120	134	118	131	176	52	306
16	235	86	37	22	37	124	64	70	200	237	337	161	194	55	137	147	136	153	190	66	336
17	218	75	46	17	27	115	51	59	187	220	315	150	181	41	125	130	124	124	168	58	311
18	191	88	35	23	39	121	63	70	205	234	336	160	193	55	136	149	135	150	190	66	340
19	177	79	29	18	29	108	50	63	188	224	312	153	180	41	127	136	120	125	168	53	308
20	147	69	18	15	25	94	40	54	136	180	283	124	171	34	114	112	100	113	132	46	236
21	109	45	11	12	19	84	26	45	76	105	230	100	135	22	99	92	85	92	113	34	161
22	87	29	7	10	11	76	18	35	46	75	185	75	110	14	71	77	63	79	60	20	109
23	57	11	6	9	9	65	11	21	35	53	101	51	85	11	56	60	45	43	37	11	80
24	25	9	2	7	5	34	2	10	9	23	75	38	67	7	43	35	22	22	24	8	31

Πίνακας 4.1: Σενάριο ζήτησης.

Η πρώτη γραμμή του πίνακα παρουσιάζει τις εισόδους του δικτύου, ενώ η πρώτη στήλη τις περιόδους (διάρκειας 5 λεπτών) από τις οποίες αποτελείται ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης. Επομένως, κάθε σενάριο ζήτησης περιλαμβάνει τον αριθμό των οχημάτων που εισέρχονται στο δίκτυο κάθε 5 λεπτά. Τα 2 σενάρια που δημιουργήθηκαν, είναι παρόμοια με αυτά προηγούμενων διερευνήσεων που έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης με χρήση του μακροσκοπικού προσομοιωτή METACOR με σκοπό την διερεύνηση της αποτελεσματικότητας εφαρμογής της στρατηγικής TUC στο δίκτυο των Χανίων. Η μορφή τους μεταβλήθηκε για ποιο ρεαλιστική προσέγγιση στο AIMSUN.

Με τη χρήση του βοηθητικού προγράμματος TEDI πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των δεδομένων στον προσομοιωτή AIMSUN.



Εικόνα 4.2: Εισαγωγή δεδομένων στο TEDI.

Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων στο TEDΙ. Η διαδικασία αυτή - η οποία επαναλαμβάνεται για κάθε μια από τις περιόδους στις οποίες έχουμε χωρίσει τον συνολικό χρόνο προσομοίωσης - περιγραφικά είναι η εξής: στο πάνω μέρος του dialog box επιλέγουμε τις εισόδους του δικτύου (κάθε φορά η επιλεγμένη είσοδος χρωματίζεται μπλε). Στο κέντρο του dialog box στο σημείο που αναγράφεται ο όρος **entrance flow** τοποθετούμε τον αριθμό των οχημάτων που εισέρχονται στο δίκτυο από την συγκεκριμένη είσοδο σε κάθε χρονική περίοδο.

4.3.4 Καθορισμός Συμβάντων (Incidents)

Η κίνηση των οχημάτων σε ένα αστικό οδικό δίκτυο επηρεάζεται από παράγοντες, όπως οι συχνές στάσεις των αστικών λεωφορείων και τα διπλοπακάρια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, σύνδεσμοι με δύο και τρεις λωρίδες κυκλοφορίας να έχουν στην πραγματικότητα για μεγάλο χρονικό διάστημα μόνο μία λωρίδα κυκλοφορίας διαθέσιμη.

Για να μπορέσουμε να προσομοιώσουμε αυτό το φαινόμενο, εισάγουμε μέσω του βοηθητικού προγράμματος TEDΙ συμβάντα (Incidents), που μπορεί να περιλαμβάνουν κλείσιμο μιας ή περισσότερων λωρίδων για κάποιο χρονικό διάστημα, παρκάρισμα αυτοκινήτων, κλπ. Το TEDΙ μας δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε σε ποια ή ποιες λωρίδες κυκλοφορίας ενός συνδέσμου θα εμφανίζεται το συμβάν (Incident), τι ποσοστό της λωρίδας κυκλοφορίας θα καταλαμβάνει, τη χρονική στιγμή που θα εμφανίζεται και τη διάρκεια παρουσίας του.

5 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ LQ

5.1 Βασικές Αρχές

Ένα αστικό δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί σε ένα διάγραμμα με τους συνδέσμους $z \in Z$ και τους κόμβους $j \in J$. Σύμφωνα με την μοντελοποίηση αποθήκευσης και προώθησης, τα οχήματα ταξιδεύουν κατά μήκος ενός συνδέσμου για κάποιο σταθερό χρόνο και συσσωρεύονται στο τέλος του συνδέσμου αν η εισροή του συνδέσμου είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη εκροή. Η εκροή ενός συνδέσμου προωθείται σύμφωνα με το εφαρμοζόμενο έλεγχο σηματοδότησης.

Θεωρούμε ένα ελεγχόμενο σηματοδοτούμενο κόμβο j ορίζοντας I_j και O_j τους συνδέσμους εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Υποθέτουμε ότι όλες οι επιτρεπτές κινήσεις ενός συνδέσμου εισόδου λαμβάνουν ταυτοχρόνως προτεραιότητα (right-of-way (r.o.w.)). Επιπλέον υποθέτουμε τα ακόλουθα:

- Η διάρκεια του κύκλου C_j και ο συνολικός χαμένος χρόνος L_j του κόμβου j έχουν σταθερές τιμές. Για απλότητα υποθέτουμε ότι $C_j = C$ για όλους τους κόμβους $j \in J$.
- Οι χρονικές μετατοπίσεις (offsets) είναι σταθερές (π.χ. το ξεκίνημα της κύριας φάσης για κάθε κύκλο είναι σταθερό).
- Ο έλεγχος των σηματοδοτών του κόμβου j βασίζεται σε σταθερό αριθμό φάσεων που ανήκουν στο σύνολο F_j επίσης, ως v_z ορίζεται το σύνολο των φάσεων στις οποίες έχει προτεραιότητα ο σύνδεσμος z .
- Οι ροές κορεσμού (saturation flows) S_z , $z \in I_j$ είναι γνωστές.
- Τα ποσοστά στροφής (turning rates) για κάθε κίνηση $t_{z,w}$, $z \in I_j$, $w \in O_j$, έχουν σταθερές τιμές και είναι γνωστά.

Για κάθε κόμβο j ισχύει ο περιορισμός:

$$\sum_{i \in F_j} g_{j,i} + L_j = C \quad (5.1)$$

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

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

$$g_{j,i} \geq g_{j,i,\min}, \quad \forall i \in F_j \quad (5.2)$$

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

$$g_{j,i} \leq g_{j,i,\max}, \quad \forall i \in F_j \quad (5.3)$$

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

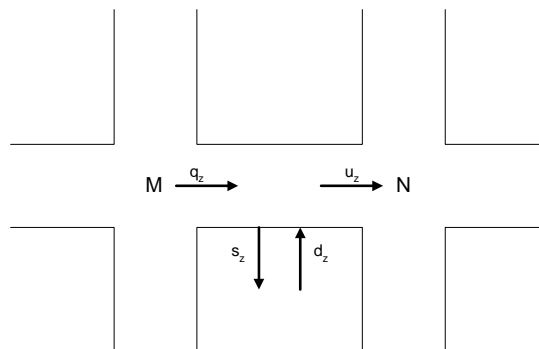
Θεωρείστε τον σύνδεσμο z που συνδέει δυο κόμβους M, N τέτοιος ώστε $z \in O_M$ και $z \in I_N$ (Σχήμα 5.1). Η δυναμική του συνδέσμου z διατυπώνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \cdot [q_z(k) - s_z(k) + d_z(k) - u_z(k)] \quad (5.4)$$

όπου x_z είναι ο αριθμός των οχημάτων στον σύνδεσμο z , q_z και u_z η εισροή και εκροή αντίστοιχα στον ίδιο σύνδεσμο κατά την διάρκεια $[kT, (k+1)T]$, με T τον διάστημα ελέγχου και $k = 1, 2, \dots$ είναι ο δείκτης διακριτού χρόνου. Τέλος d_z και s_z είναι η ζήτηση και η ροή εξόδου του συνδέσμου z , αντίστοιχα. Για την ροή εξόδου ισχύει ο παρακάτω τύπος:

$$s_z(k) = t_{z,0} \cdot q_z(k) \quad (5.5)$$

όπου τα ποσοστά στροφής $t_{z,0}$ θεωρούνται σταθερά και γνωστά.



Σχήμα 5.1: Ένας αστικός σύνδεσμος

Υποθέτουμε ότι η ζήτηση της ροής είναι σταθερή και ίση με d_z . Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (5.5) παίρνω από την εξίσωση (5.4):

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \cdot [(1 - t_{z,0})q_z(k) + d_z(k) - u_z(k)] \quad (5.6)$$

Η εισροή στον σύνδεσμο z δίνεται ως:

$$q_z(k) = \sum_{w \in I_M} t_{w,z} \cdot u_w(k) \quad (5.7)$$

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

Θεωρώντας μια χρονική περίοδο T , αν το x_z είναι αρκετά μεγάλο στους κατάντη συνδέσμους, τότε η εκροή u_z ενός συνδέσμου είναι ίση με την ροή κορεσμού S_z αν ο σύνδεσμος έχει προτεραιότητα και ίση με το μηδέν διαφορετικά.

Εν τούτοις, αν το διάστημα T επιλεγεί μεγαλύτερο ή ίσο από τον χρόνο του κύκλου C , η παρακάτω μέση τιμή ισχύει για την εκροή:

$$u_z(k) = \frac{S_z \cdot G_z(k)}{C} \quad (5.8)$$

όπου G_z είναι ο ενεργός χρόνος πρασίνου του συνδέσμου z , και υπολογίζεται ως:

$$G_z(k) = \sum_{i \in v_z} g_{N,i}(k) + e_z \quad (5.9)$$

όπου e_z σταθερά που μπορεί να πάρει αρνητικές ή θετικές τιμές. Στην περίπτωση που ο σύνδεσμος z δέχεται προτεραιότητα σε περισσότερες από μια γειτονική φάση, 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, 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 0.

Αντικαθιστώντας τις (5.7), (5.8) και (5.9) στην (5.6) παράγουμε την εξίσωση (5.10):

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \cdot \left[(1-t_{z,0}) \sum_{w \in I_M} t_{w,z} \frac{S_w \left(\sum_{i \in V_w} g_{M,i} + e_w \right)}{C} + d_z(k) - \frac{S_z \left(\sum_{i \in V_z} g_{N,i} + e_z \right)}{C} \right] \quad (5.10)$$

Στην περίπτωση που ο z είναι σύνδεσμος προέλευσης, τότε η εισροή του q_z δεν υφίσταται, επειδή δεν υπάρχουν ανάντη σύνδεσμοι οι οποίοι να διοχετεύουν τις δικές τους εκροές στο σύνδεσμο z (δες Σχήμα 5.2α). Αντί αυτού, ο σύνδεσμος z δέχεται μια εξωτερική ζήτηση η οποία μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι μετρήσιμη ή προβλέψιμη. Για το λόγο αυτό, η εισροή του συνδέσμου μπορεί να θεωρηθεί ως διαταραχή D_z και κατά συνέπεια η εξίσωση (5.6) γίνεται:

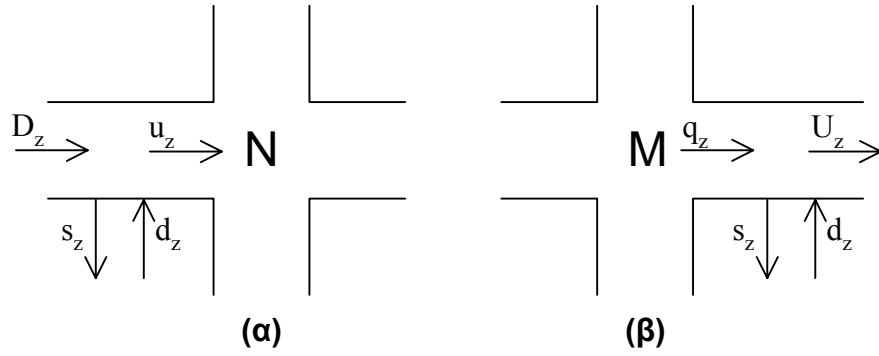
$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \cdot \left[(1-t_{z,0}) D_z(k) + d_z - u_z(k) \right] \quad (5.11)$$

η οποία οδηγεί στην ακόλουθη καταστατική εξίσωση σε αντικατάσταση της(5.10):

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \cdot \left[(1-t_{z,0}) D_z(k) + d_z(k) - \frac{S_z \left(\sum_{i \in V_z} g_{N,i}(k) + e_z \right)}{C} \right] \quad (5.12)$$

Στην περίπτωση που ο z είναι σύνδεσμος προορισμού, τότε έχει μια εκροή (δες Σχήμα 5.2β) η οποία μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι μετρήσιμη ή προβλέψιμη. Για το λόγο αυτό, η εκροή του συνδέσμου μπορεί να θεωρηθεί ως διαταραχή U_z και κατά συνέπεια η εξίσωση (5.6) γίνεται:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \left[(1-t_{z,0}) q_z(k) + d_z(k) - U_z(k) \right] \quad (5.13)$$



Σχήμα 5.2: Σύνδεσμος προέλευσης (α) και προορισμού (β)

Η σχέση (5.13) οδηγεί στην ακόλουθη καταστατική εξίσωση σε αντικατάσταση της εξίσωσης (5.10):

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \left[(1-t_{z,0}) \sum_{w \in I_M} t_{w,z} \frac{S_w \left(\sum_{i \in V_w} g_{M,i} + e_w \right)}{C} + d_z(k) - U_z(k) \right] \quad (5.14)$$

Υποθέτουμε την ύπαρξη των σταθερών μη-κορεσμένων ονομαστικών τιμών ζήτησης d_z^N , D_z^N και της εκροής προορισμού U_z^N .

Επιπλέον, υποθέτουμε $x_z^N = 0$, όπου x_z^N είναι ορισμένες ονομαστικές τιμές του x_z . Η εκδοχή σταθερής κατάστασης της (5.10) διατυπώνεται:

$$0 = T \left[(1-t_{z,0}) \sum_{w \in I_M} t_{w,z} \frac{S_w \left(\sum_{i \in V_w} g_{M,i}^N + e_w \right)}{C} + d_z^N - \frac{S_z \left(\sum_{i \in V_z} g_{N,i}^N + e_z \right)}{C} \right] \quad (5.15)$$

όπου $g_{j,i}^N$ είναι ονομαστικές του $g_{j,i}$. Αφαιρώντας την εξίσωση σταθερής κατάστασης (5.15) από την (5.10) παίρνω την παρακάτω καταστατική εξίσωση:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \left[(1-t_{z,0}) \sum_{w \in I_M} t_{w,z} \frac{S_w \sum_{i \in V_w} \Delta g_{M,i}(k)}{C} + \Delta d_z(k) - \frac{S_z \sum_{i \in V_z} \Delta g_{N,i}(k)}{C} \right] \quad (5.16)$$

όπου $\Delta g_{j,i} = g_{j,i} - g_{j,i}^N$ και $\Delta d_z = d_z - d_z^N$.

Η εξίσωση (5.16) μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και στην περίπτωση των προηγούμενων δύο ειδικών τύπων συνδέσμου, δηλαδή των συνδέσμων προέλευσης και των συνδέσμων προορισμού, λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις (5.12) και (5.14) αντίστοιχα. Στην περίπτωση των συνδέσμων προέλευσης η (5.16) γίνεται:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \left[(1 - t_{z,0}) \Delta D_z(k) + \Delta d_z(k) - \frac{S_z \sum_{i \in V_z} \Delta g_{N,i}(k)}{C} \right] \quad (5.17)$$

όπου $\Delta D_z = D_z - D_z^N$, ενώ στην περίπτωση των συνδέσμων προορισμού, η (5.16) γίνεται:

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \left[(1 - t_{z,0}) \sum_{w \in I_M} t_{w,z} \frac{S_w \sum_{i \in V_w} \Delta g_{M,i}(k)}{C} + \Delta d_z(k) - \Delta U_z(k) \right] \quad (5.18)$$

όπου $\Delta U_z = U_z - U_z^N$.

Εφαρμόζοντας τις (5.16) και (5.18) σε ένα αυθαίρετο δίκτυο σηματοδοτημένων κόμβων $j \in J$, έχουμε την παρακάτω καταστατική εξίσωση (σε διανυσματική μορφή) που περιγράφει την εξέλιξη του συστήματος στο χρόνο:

$$x(k+1) = A \cdot x(k) + B \cdot \Delta g(k) + T \cdot \Delta d(k) + C \cdot \Delta D(k) + E \cdot \Delta U(k) \quad (5.19)$$

όπου $x \in R^n$ είναι το διάνυσμα του αριθμού των οχημάτων x_z στους συνδέσμους $z \in Z$, $g \in R^m$ είναι το διάνυσμα $\Delta g_{j,i} = g_{j,i} - g_{j,i}^N \quad \forall i \in F_j, \quad \forall j \in J$, $A = I_{n \times n}$ και $B \in R^{n \times m}$ είναι το διάνυσμα ελέγχου και οι πίνακες εισόδου, αντίστοιχα. Επίσης, d είναι το διάνυσμα $\Delta d_z = d_z - d_z^N$ και T είναι ο αντίστοιχος πίνακας διαταραχών, D είναι το διάνυσμα των ΔD_z που ορίζεται μόνο στην περίπτωση των συνδέσμων προέλευσης μέσω του πίνακα διαταραχών C και U είναι το διάνυσμα των ΔU_z που ορίζεται μόνο στην περίπτωση των συνδέσμων προορισμού μέσω του πίνακα διαταραχών E . Σε αντίθεση με άλλες εφαρμογές της μοντελοποίησης αποθήκευσης-και-προώθησης, στην παραπάνω διατύπωση το x_z δηλώνει τον αριθμό των οχημάτων αντί το μήκος της ουράς στον σύνδεσμο z .

5.2 Γραμμικός – Τετραγωνικός Έλεγχος (LQ)

Το μαθηματικό μοντέλο δοσμένο από την (5.19) περιγράφει την δυναμική της κυκλοφοριακής ροής, θεωρώντας την επίδραση των διαταραχών Δd_z , ΔD_z και ΔU_z . Η εφαρμογή της μεθοδολογίας του Γραμμικού-Τετραγωνικού Ελέγχου σε προβλήματα ελέγχου, λαμβάνει υπόψη την παρουσία διαταραχών, οδηγώντας σε κανόνες ελέγχου που προβλέπουν ενδεχόμενες μελλοντικές διαταραχές στην εξέλιξη του ελέγχου. Για την εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο τέτοιων κανόνων ελέγχου απαιτείται η ακριβής πρόβλεψη των διαταραχών, γεγονός που δεν είναι εύκολο να γίνει στην περίπτωση της αστικής κυκλοφορίας. Για το λόγο αυτό, στην εξίσωση (5.19) αφαιρούνται οι όροι των διαταραχών θεωρώντας $\Delta d(k) = \Delta D(k) = \Delta U(k) = 0$.

Η εξάλειψη των διαταραχών από την (5.19) οδηγεί στην ακόλουθη καταστατική εξίσωση:

$$x(k+1) = A \cdot x(k) + B \cdot \Delta g(k) \quad (5.20)$$

η οποία θεωρεί μόνο τις μεταβλητές κατάστασης x και τις μεταβλητές ελέγχου g .

Θεωρούμε το τετραγωνικό κριτήριο που διατυπώνει τον αντικειμενικό στόχο για τον έλεγχο της αστικής κυκλοφορίας με την γενική μορφή:

$$\mathfrak{J} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\|x(k)\|_Q^2 + \|\Delta g(k)\|_R^2 \right] \quad (5.21)$$

όπου $Q \in R^{n \times n}$ και $R \in R^{m \times m}$ θετικά ημιορισμένοι διαγώνιοι πίνακες βάρους. Ο πρώτος όρος στην (5.21) είναι υπεύθυνος για την ελαχιστοποίηση και εξισορρόπηση (δηλ. εξίσωση) του αριθμού των αυτοκινήτων στους συνδέσμους εισόδου. Για το σκοπό αυτό, τα διαγώνια στοιχεία του Q ορίζονται ίσα με το αντίστροφο του μέγιστου επιτρεπτού αριθμού αυτοκινήτων στους αντίστοιχους συνδέσμους. Επίσης, η επιλογή του πίνακα βάρους R μπορεί να επηρεάσει το μέγεθος της αντίδρασης του ελέγχου. Για το λόγο αυτό η επιλογή του πίνακα R πραγματοποιείται μέσω μιας διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος έτσι ώστε να επιτευχθεί μια ικανοποιητική συμπεριφορά ελέγχου για ένα δοσμένο δίκτυο.

Η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης (5.20), (5.21) μέσω Γραμμικού – Τετραγωνικού Ελέγχου δίνεται από τον κανόνα ελέγχου:

$$g(k) = g^N - L \cdot x(k) \quad (5.22)$$

όπου g^N είναι το διάνυσμα με τις ονομαστικές τιμές των ενεργών χρόνων πρασίνου $g_{j,i}$, $\forall i \in F_j$, $\forall j \in J$ και $L \in R^{m \times n}$ είναι ο πίνακας ελέγχου που εξαρτάται από τους πίνακες του προβλήματος βελτιστοποίησης A, B, Q και R και έχει μικρή ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων κυκλοφορίας (όπως ποσοστά στροφής, ροές κορεσμού κ.τ.λ.) (Diakaki, 1999).

Ο πίνακας ελέγχου L είναι ίσος με την επίλυση του προβλήματος που ορίζεται από το σύστημα των παρακάτω εξισώσεων πινάκων για $L(k \rightarrow \infty)$:

$$L(k) = [B^T P(k-1)B + R]^{-1} B^T P(k-1)A \quad (5.23)$$

$$P(k) = [ABL(k)]^T P(k-1)[A - BL(k)] + Q + L(k)^T RL(k) \quad (5.24)$$

το οποίο επιλύεται ξεκινώντας από την αρχική κατάσταση $P(0) = 0$.

Επειδή η μεθοδολογία του Γραμμικού – Τετραγωνικού Ελέγχου δεν λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη των περιορισμών ένας κατάλληλος αλγόριθμος τροποποιεί την διάρκεια των πρασίνων που υπολογίζονται ώστε να ικανοποιούν τους περιορισμούς (5.1)-(5.3).

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι ο ρυθμιστής ανάδρασης-κατάστασης (5.22) απαιτεί διαθέσιμες μετρήσεις για όλες τις μεταβλητές κατάστασης σε πραγματικό χρόνο. Ο αριθμός των οχημάτων x_z συνήθως όμως δεν είναι μετρήσιμος σε πραγματικό χρόνο. Για το λόγο αυτό, όταν ο αριθμός οχημάτων x_z δεν είναι μετρήσιμος, μετρήσεις κατάληψης o_z , διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο (in real-time), μετασχηματίζονται (προσέγγιση) σε αριθμό οχημάτων μέσω κατάλληλων μη γραμμικών συναρτήσεων $x_z = f_z(o_z(k))$ (Diakaki, 1999).

Ο κανόνας ελέγχου (5.22) απαιτεί την διαθεσιμότητα των ονομαστικών τιμών g^N . Σε μερικές περιπτώσεις όμως, οι ονομαστικές τιμές των πράσινων δεν είναι

γνωστές, ούτε και υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστούν. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο κανόνας ελέγχου (5.22) μπορεί να εργασθεί με την ακόλουθη μορφή χωρίς να χρησιμοποιούνται οι ονομαστικές τιμές g^N :

$$g(k) = g(k-1) - L \cdot [x(k) - x(k-1)] \quad \mathbf{(5.25)}$$

Ο κανόνας ελέγχου (5.25) παράγεται από την αφαίρεση της (5.22) για τον περίοδο ελέγχου $k-1$ από την (5.22) για τον περίοδο ελέγχου k

6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ LQ ΣΤΟ ΟΔΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ

6.1 Περιγραφή του προβλήματος και του δικτύου

Για να εξετάσουμε την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής ελέγχου LQ, η οποία αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5, θα γίνει εφαρμογή της στο αστικό οδικό δίκτυο των Χανίων. Τα αποτελέσματα των διερευνήσεων με προσομοίωση αυτής της εφαρμογής θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Τα Χανιά, που βρίσκονται στο βορειοδυτικό τμήμα της Κρήτης είναι η πρωτεύουσα του νομού Χανίων και καλύπτουν μια έκταση 11 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Οι κάτοικοι της πόλης είναι 60.000 αλλά την καλοκαιρινή περίοδο ξεπερνούν τους 100.000. Το Δημοτικό Συμβούλιο της πόλης, που είναι υπεύθυνο για τη ρύθμιση της φωτεινής σηματοδότησης έχει δημιουργήσει ένα ειδικό τμήμα για τον σκοπό αυτό.

Το 1982 στα Χανιά υπήρχαν μόνο 9 κόμβοι με ελεγχόμενη φωτεινή σηματοδότηση, οι οποίοι ελέγχονταν μέσω ενός συστήματος (τύπου AY) της εταιρίας Siemens. Το 1990 οι σηματοδοτούμενοι κόμβοι έγιναν δεκαπέντε και συνέχιζαν να ελέγχονται από το ίδιο σύστημα. Το 1999 οι ελεγχόμενοι με φωτεινή σηματοδότηση κόμβοι αυξήθηκαν σε 25, ενώ ο έλεγχος τους γινόταν και πάλι από την εταιρία Siemens μέσω όμως ενός καινούριου συστήματος ("τύπου M"). Σήμερα, στα Χανιά υπάρχουν συνολικά 28 κόμβοι που ελέγχονται με φωτεινή σηματοδότηση ενώ το τμήμα που είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο τους αριθμεί 11 υπαλλήλους, οι περισσότεροι από τους οποίους είναι τεχνικοί.

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, ζημιές, διακοπή λειτουργίας κ.λ.π.).
- Πλήρη συντονισμό όλων των αστικών κόμβων.

- Αλλαγή των σχεδίων ελέγχου σηματοδότησης σύμφωνα με την στρατηγική TASS ή την στρατηγική TUC.

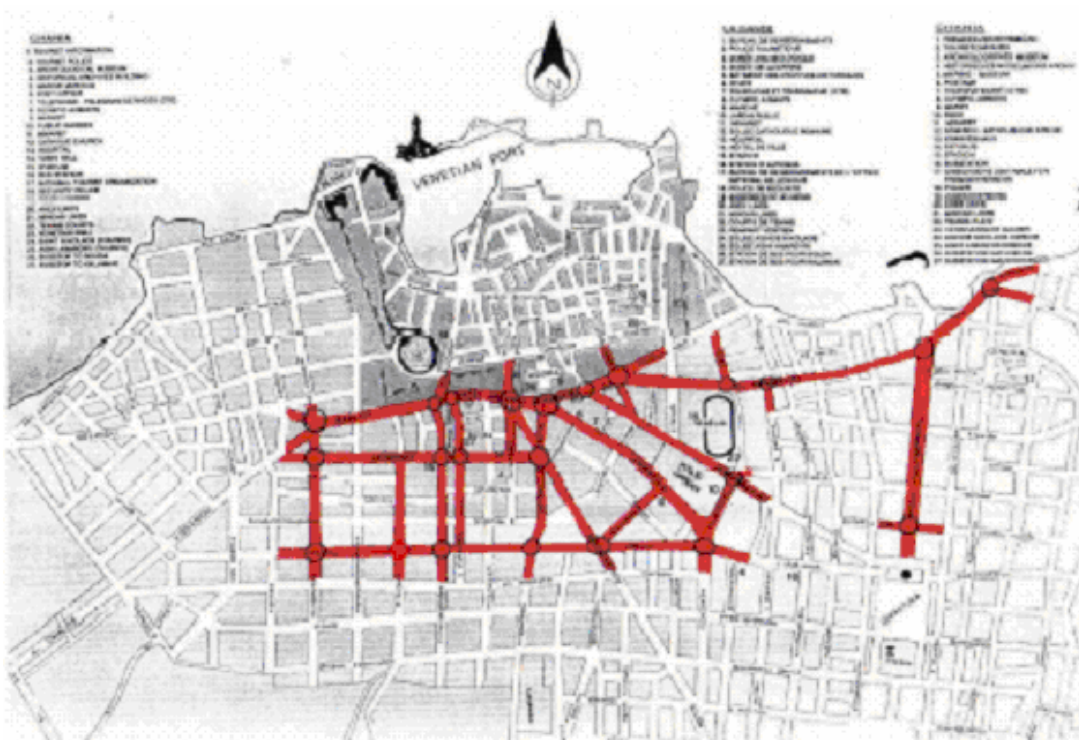
Η SIEMENS GREECE (SAE) έχει καταφέρει την επιτυχή εφαρμογή της στρατηγικής TUC τμήματα του δικτύου των Χανίων. Αυτή η εφαρμογή λειτουργεί από τον Ιούνιο του 2001 παράλληλα με το υπάρχον UTC σύστημα και λόγω των καλών αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της στρατηγικής TUC, η SIEMENS GREECE αποφάσισε να χρησιμοποιήσει αυτή τη μεθοδολογία, η οποία επεκτάθηκε για ολόκληρο το ελεγχόμενο δίκτυο.

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.

Το Σχήμα 6.1 της επόμενης σελίδας δείχνει έναν απλοποιημένο χάρτη του υπό μελέτη δικτύου που έχει μήκος περίπου 8 Km και αποτελείται από 22 ελεγχόμενους κόμβους. Οι περισσότεροι από τους συνδέσμους στο δίκτυο αυτό 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.

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.



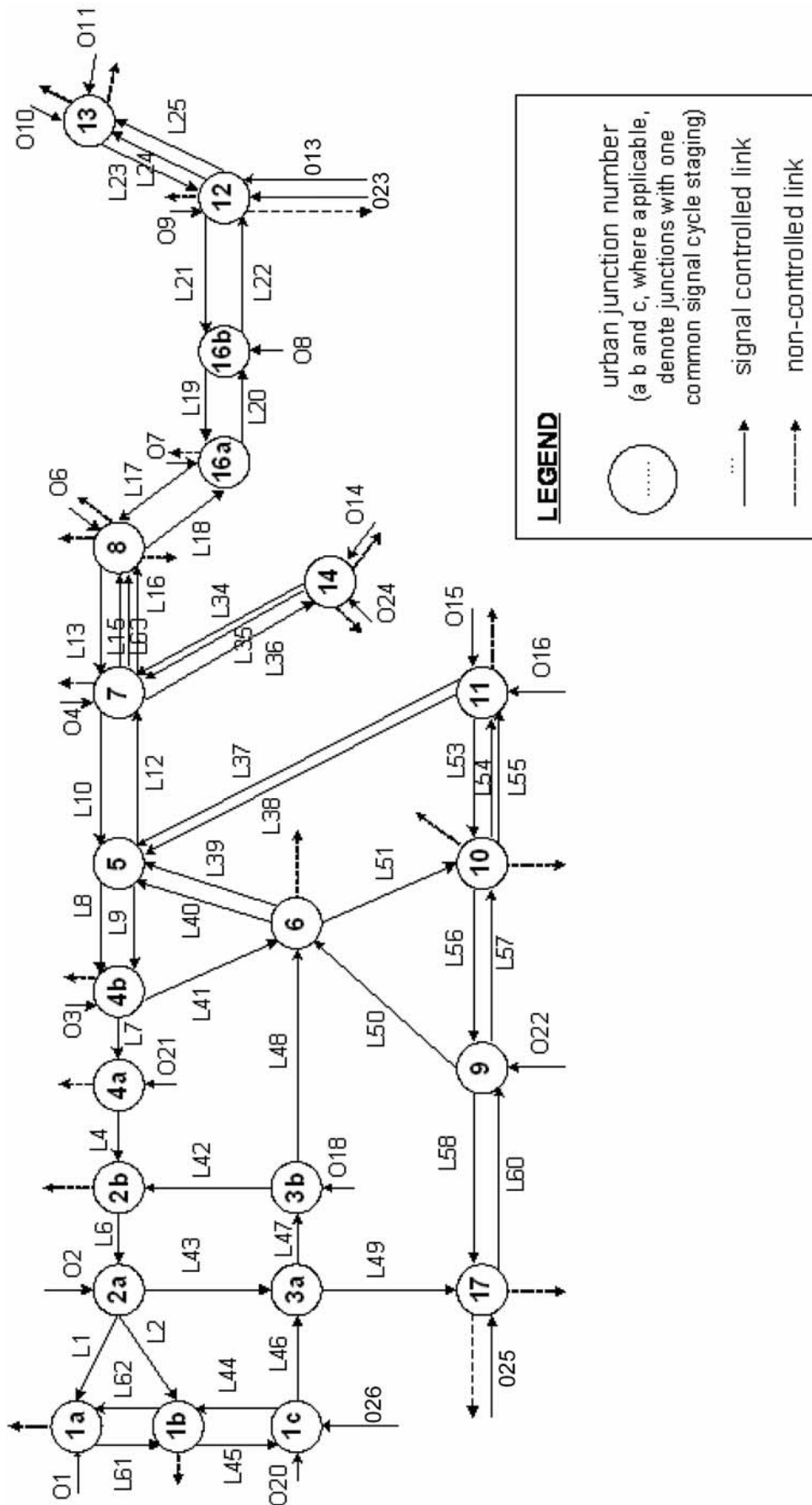
Σχήμα 6.1: Το αστικό δίκτυο των Χανίων

6.2 Χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας στα Χανιά

Οι κόμβοι κυκλοφορίας στους οποίους πρόκειται να εφαρμοστεί η στρατηγική LQ παρατίθενται παρακάτω, ενώ η τοποθεσία τους παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-2 της επόμενης σελίδας.

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 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.



Σχήμα 6.2: Σχηματικός χάρτης του δικτύου των Χανίων

6.3 Εφαρμογή της στρατηγικής LQ στο δίκτυο των Χανίων

Στην παρούσα εργασία η εφαρμογή της στρατηγικής LQ του συστήματος TUC θα περιοριστεί στον έλεγχο της διάρκειας των φάσεων των συνδέσμων του δικτύου. Δηλαδή δεν θα εξεταστεί ο έλεγχος της διάρκειας της περιόδου, ο έλεγχος της χρονικής διαφοράς έναρξης πρασίνου διαδοχικών διασταυρώσεων και η παροχή προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς.

6.3.1 Απαιτούμενα δεδομένα

Για την εφαρμογή στο δίκτυο της στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5, απαιτείται να γνωρίζουμε τα ακόλουθα δεδομένα:

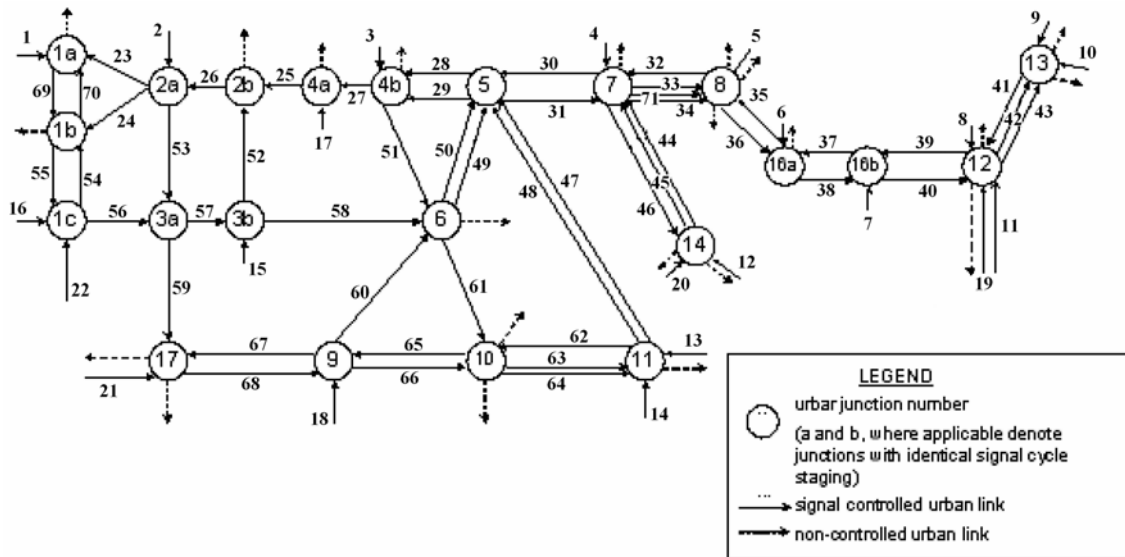
- Για τους αστικούς συνδέσμους (links) απαιτούνται η χωρητικότητα (storage capacity), η ροή κορεσμού (saturation flow), τα ποσοστά στροφής (turning rates) και οι φάσεις κατά τις οποίες τα οχήματα έχουν δικαίωμα κυκλοφορίας (r.o.w.).
- Για τους αστικούς κόμβους (junctions) απαιτούνται η περίοδος (cycle), ο χαμένος χρόνος (lost time), ο αριθμός των σταδίων (stages) και οι ελάχιστοι χρόνοι πρασίνων για κάθε σύνδεσμο του κόμβου.

6.3.2 Μοντελοποίηση του δικτύου για την εφαρμογή της στρατηγικής

Στο Σχήμα 6-3 παρουσιάζεται σχηματικά το μοντέλο ελέγχου που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου στο αστικό δίκτυο των Χανίων. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στα ακόλουθα:

- 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 63 και 64, 47 και 48, 49 και 50, 11 και 19, 42 και 43, καθώς και η τριάδα των συνδέσμων 33, 34 και 71 αποτελούν διαφορετικές προσεγγίσεις ίδιων δρόμων επειδή δε λαμβάνουν

ταυτοχρόνως προτεραιότητα. Για το λόγο αυτό, στη στρατηγική TUC θεωρούνται διαφορετικοί σύνδεσμοι.



Σχήμα 6.3: Σχηματική αναπαράσταση του TUC μοντέλου ελέγχου του δικτύου

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6-3 το μοντέλο ελέγχου αποτελείται από 16 σηματοδοτούμενους κόμβους και 71 συνδέσμους. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ορίζονται τα παρακάτω σύνολα για το συγκεκριμένο δίκτυο:

- Το σύνολο των σηματοδοτημένων κόμβων $J = \{1, 2, 3, \dots, 16\}$
- Το σύνολο των ελεγχόμενων αστικών συνδέσμων $Z = \{1, 2, 3, \dots, 71\}$

Ο Πίνακας 6-1 παρουσιάζει όλες τις παραμέτρους των συνδέσμων του δικτύου, δηλαδή το μήκος, τον αριθμό των λωρίδων, τη χωρητικότητα, τη ροή κορεσμού και τα χαρακτηριστικά ανίχνευσης (δηλ. τον κωδικό του φωρατή και τη θέση του φωρατή στο σύνδεσμο). Ο Πίνακας 6-2 παρουσιάζει λεπτομερώς τα στοιχεία των ελεγχόμενων κόμβων που χρησιμοποιούνται από τη στρατηγική ελέγχου. Ο Πίνακας 6-3 παρουσιάζει τον κόμβο με τον οποίο συνδέεται ο κάθε σύνδεσμος καθώς και τις φάσεις (stages) κατά τις οποίες έχει δικαίωμα κυκλοφορίας (r.o.w.). Τέλος, ο Πίνακας 6-4 παρουσιάζει τα ποσοστά στροφής και εξόδου για κάθε σύνδεσμο.

Τα στοιχεία των Πινάκων 6-1-6-4 έχουν προέλθει από δεδομένα που παρέχονται από τις αρχές που είναι υπεύθυνες για το δίκτυο των Χανίων.

Όνομα Συνδέσμου	Μήκος	Αριθμός Λωρίδων	Χωρητικότητα Συνδέσμου	Ροή Κορεσμού	ID Φωρατή	Απόσταση Φωρατή από το Stopline
	(μέτρα)		(οχήματα)	(οχήματα/ώρα)		(μέτρα)
O1	66	1	13	1800	31	21
O2	50	1	10	1800	39	50
O3	50	1	10	1800	38	50
O4	80	2	30	3600	41	40
O6	90	1	22	1800	42	40
O7	100	1	20	1800	43	30
O8	60	1	12	1800	44	3
O9	80	1	16	1600	45	40
O10	200	1	40	1900	46	100
O11	400	1	80	2000	47	190
O13	100	1	20	1850	34	65
O14	160	1	32	1800	48	80
O15	120	1	24	1800	21	65
O16	170	2	68	3600	49	85
O18	120	1	24	1800	29	56
O20	150	2	60	3600	30	60
O21	100	1	20	1575	28	82
O22	200	2	80	3600	50	90
O23	100	1	20	1650	57	65
O24	118	1	24	1800	23	50
O25	305	1	61	1800	24	96
O26	100	1	20	1800	51	40
L1	300	1	60	1800	14	95
L2	300	2	120	2500	15	95
L4	110	2	44	3600	52	90
L6	46	2	18	3600	37	40
L7	30	3	18	4725	36	25
L8	40	3	14	4725	7	30
L9	40	1	8	1800	8	30
L10	60	3	36	5400	5	44
L12	60	2	24	3600	4	50
L13	64	2	26	3600	3	40
L15	64	1	13	1800	1	33
L16	64	1	13	1800	2	33
L17	248	2	100	3600	53	110

L18	248	2	100	3600	13	40
L19	90	1	18	1800	35	20
L20	90	1	18	1800	18	20
L21	384	1	77	1800	17	50
L22	384	1	77	2150	54	90
L23	190	1	38	2200	55	90
L24	190	1	20	1950	56	60
L25	190	1	20	2400	56	60
L34	360	1	38	1575	16	40
L35	360	2	144	3150	16	40
L36	360	1	72	1575	27	40
L37	540	1	108	1800	58	90
L38	540	1	108	1800	58	90
L39	118	1	24	1800	6	40
L40	118	1	24	1800	59	40
L41	106	2	42	3600	60	50
L42	126	1	25	1800	12	70
L43	138	2	55	3600	9	92
L44	60	1	12	1800	32	17
L45	50	1	10	1800	33	33
L46	312	2	124	3600	10	220
L47	30	3	18	5400	11	20
L48	188	2	75	3600	61	90
L49	220	2	88	3600	26	54
L50	210	1	42	1800	62	54
L51	224	2	90	3600	63	90
L53	244	1	49	1800	20	150
L54	244	1	25	1800	64	98
L55	244	1	25	1800	64	98
L56	140	1	28	1800	65	70
L57	140	1	28	1800	19	70
L58	222	1	35	1575	25	115
L60	222	1	35	1575	22	105
L61	14	1	3	1125	40	5
L62	14	1	2	1125	32	5
L63	64	1	25	1800	1	33

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά των συνδέσεων του δικτύου

	Στάδιο	Αρχική ονομαστική τιμή πρασίνου	Βέλτιστη ονομαστική τιμή πρασίνου (Σενάριο 1)	Βέλτιστη ονομαστική τιμή πρασίνου (Σενάριο 2)	Ενδιάμεσοι χρόνοι (intergreen)
j1	1	35	30	29	7
	2	14	7	11	6
	3	18	30	27	10
j2	4	46	46	46	22
	5	12	12	12	10
j3	6	53	50	50	11
	7	13	16	16	13
j4	8	57	55	55	11
	9	7	9	9	3
	10	7	7	7	5
j5	11	35	29	29	3
	12	8	21	21	10
	13	22	15	15	12
j6	14	37	41	41	12
	15	10	8	8	10
	16	10	8	8	11
j7	17	25	17	17	15
	18	12	14	14	6
	19	16	22	22	16
j8	20	30	21	21	5
	21	9	11	11	7
	22	7	10	10	17
	23	12	16	16	3
j9	24	34	32	32	26
	25	21	23	23	9
j10	26	44	36	36	6
	27	13	17	17	5
	28	14	18	18	8
j11	29	46	29	29	10
	30	8	16	16	4
	31	12	21	21	10
j12	32	24	30	30	8
	33	15	18	18	18
	34	18	9	9	7
j13	35	20	20	20	24
	36	36	36	36	10
j14	37	48	50	50	13
	38	12	10	10	17
j16	39	50	48	48	21
	40	8	10	10	11
j17	41	51	48	48	8
	42	23	26	26	8

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά των σηματοδοτούμενων κόμβων του δικτύου

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι οι ενδιάμεσοι χρόνοι (intergreen) είναι οι χρόνοι που μεσολαβούν για την μετακίνηση από το ένα στάδιο στο επόμενο (μαζί με το πορτοκαλί). Επίσης για όλους του κόμβους του δικτύου ισχύουν τα παρακάτω:

Ελάχιστη τιμή πρασίνου (για όλες τις φάσεις)	7 sec
Χρόνος περιόδου (cycle time)	90 sec

	Φάση	ID Σταδίου		
		A	B	C
j	1	0	0	1
	2	1	1	0
	3	0	0	1
	4	1	1	0
	5	0	0	1
	6	1	0	0
	7	0	1	0
j2	1	1	0	
	2	0	1	
	3	1	0	
	4	0	1	
j3	1	0	1	
	2	1	0	
	3	1	0	
	4	0	1	
j4	1	1	0	0
	2	0	1	1
	3	1	0	0
	4	1	0	0
	5	0	0	1
j5	1	1	0	0
	2	1	1	0
	3	0	1	0
	4	0	0	1
	5	0	0	1
j6	1	1	0	0
	2	0	1	0
	3	0	0	1
j7	1	1	0	0
	2	1	0	0
	3	0	1	0
	4	0	0	1
	5	0	0	1

	Φάση	ID Σταδίου			
		A	B	C	D
j8	1	1	1	1	0
	2	0	1	0	0
	3	0	1	1	0
	4	0	0	1	0
	5	1	0	0	1
j9	1	0	1		
	2	0	1		
	3	1	0		
j10	1	0	0	1	
	2	1	0	0	
	3	0	1	0	
j11	1	1	0	0	
	2	0	1	1	
	3	0	1	0	
	4	0	0	1	
j12	1	1	0	1	
	2	0	0	1	
	3	0	0	1	
	4	1	0	0	
	5	0	1	0	
j13	1	1	1		
	2	1	1		
	3	1	0		
	4	1	0		
j14	1	1	0		
	2	1	0		
	3	0	1		
j16	1	0	1		
	2	1	0		
	3	0	1		
	4	1	0		
	5	1	0		
j17	1	1	0		
	2	0	1		
	3	0	1		

- 1** Ο σύνδεσμος παίρνει δικαίωμα κυκλοφορίας (r.o.w.) σε αυτό το στάδιο.
- 0** Ο σύνδεσμος δεν παίρνει δικαίωμα κυκλοφορίας (r.o.w.) σε αυτό το στάδιο.
- Το συγκεκριμένο στάδιο δεν υπάρχει για αυτό τον κόμβο.
- Φάση** Φάση που αντιστοιχεί στον σύνδεσμο της TUC.

Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά του ελέγχου σηματοδότησης των συνδέσμων του δικτύου

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 6.4: Ποσοστά στροφής και εξόδου για κάθε σύνδεσμο του δικτύου (μέρος 1/4)

	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0.08	0.32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0	0	0.05	0.1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.75	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0.12	0.48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0.95	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0.1	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.3	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.95	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.85
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.85	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0.5	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.95	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0.1	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0.1	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 6.4: Ποσοστά στροφής και εξόδου για κάθε σύνδεσμο του δικτύου (μέρος 2/4)

	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0.5	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0.73	0	0	0.02	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0.99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.81	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08	0.22	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0.34	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0.95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.55	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0.95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0.21	0.48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0.78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0.2	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.45	0.45	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.75	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 6.4: Ποσοστά στροφής και εξόδου για κάθε σύνδεσμο του δικτύου (μέρος 3/4)

	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	exit
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0.45	0	0	0	0	0	0.3	0.25	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.7	0	0	0	0
22	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0.7	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
55	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0.9	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0	0	0.12	0.28	0.1	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18	0.42	0	0	0	0	0	0	0	0
67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
69	0.95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 6.4: Ποσοστά στροφής και εξόδου για κάθε σύνδεσμο του δικτύου
(μέρος 4/4)

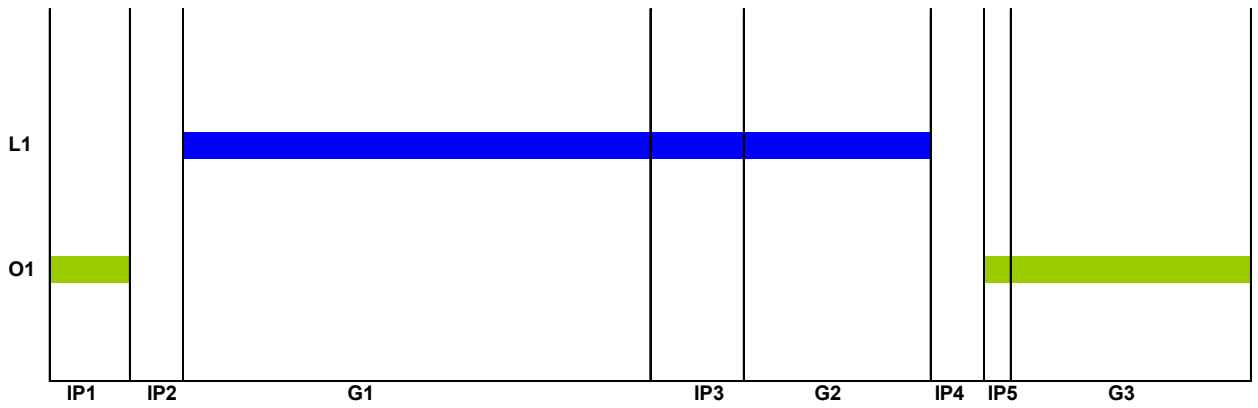
Η περίοδος κάθε σηματοδοτούμενου κόμβου αποτελείται από δυο γεγονότα:

- stages
- ενδιάμεσοι χρόνοι (intergreen)

Stage είναι η μεταβαλλόμενη χρονική περίοδος κατά την οποία 1 ή περισσότερες φάσεις λαμβάνουν πράσινο. Ενδιάμεσος χρόνος (intergreen) είναι η σταθερή χρονική περίοδος κατά την οποία 1 ή περισσότερες φάσεις λαμβάνουν πράσινο. Και στις δύο περιπτώσεις η έναρξη του stage ή του intergreen ορίζεται ως η χρονική στιγμή που ξεκινάν ή τελειώνουν 1 ή περισσότερες φάσεις και η λήξη τους ορίζεται ως η επόμενη χρονική στιγμή που ξεκινάν ή τελειώνουν 1 ή περισσότερες φάσεις. Επειδή η περίοδος κάθε κόμβου πρέπει να παραμένει σταθερή αν ένα stage αυξηθεί ή μειωθεί τότε κάποιο άλλο πρέπει να μεταβληθεί αντίστοιχα.

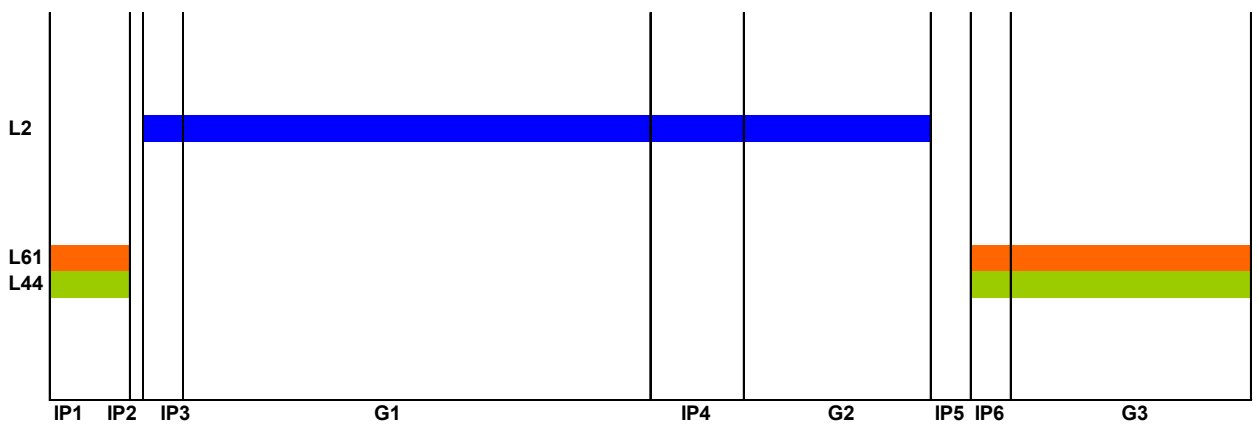
Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η περίοδος ($T=90\text{sec}$) των κόμβων 1a, 1b, 1c, 5, 6 και 7 του αστικού δικτύου των Χανίων και πως διαιρείται στα αντίστοιχα stages και intergreen(IP). Επίσης φαίνεται σε ποιο σημείο της περιόδου κάθε κόμβου παίρνουν πράσινο οι σύνδεσμοι που τον αποτελούν.

JUNCTION 1a



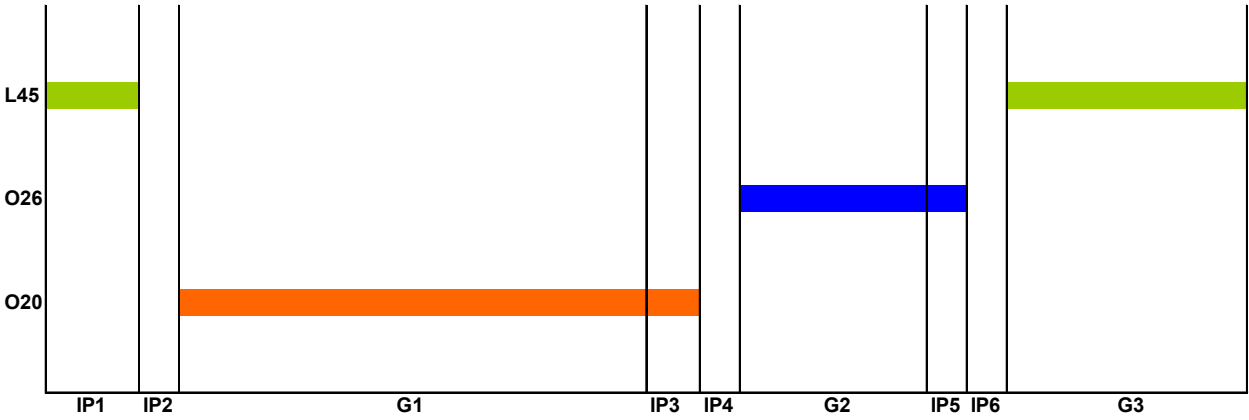
IP1	IP2	G1	IP3	G2	IP4	IP5	G3
6sec	4sec	35sec	7sec	14sec	4sec	2sec	18sec

JUNCTION 1b



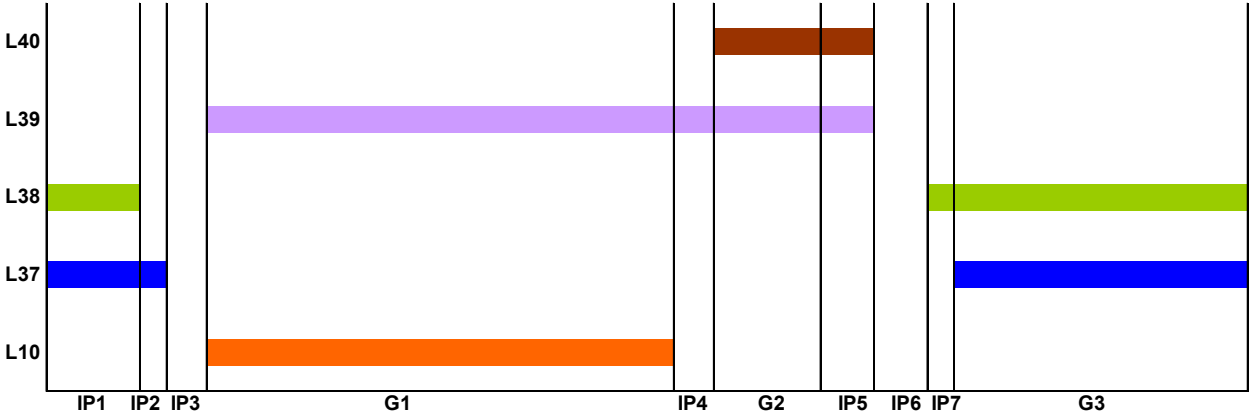
IP1	IP2	IP3	G1	IP4	G2	IP5	IP6	G3
6sec	1sec	3sec	35sec	7sec	14sec	3sec	3sec	18sec

JUNCTION 1c



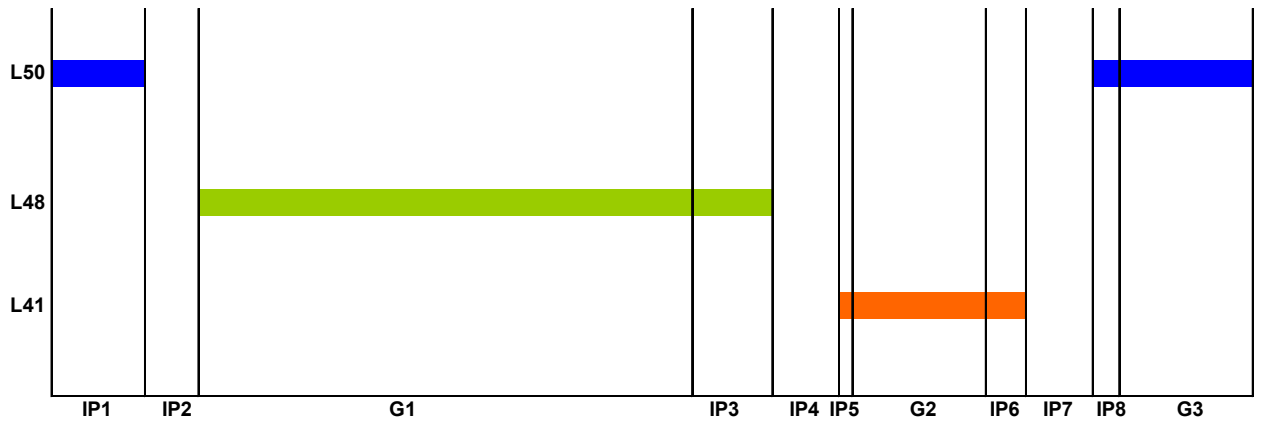
IP1	IP2	G1	IP3	IP4	G2	IP5	IP6	G3
7sec	3sec	35sec	4sec	3sec	14sec	3sec	3sec	18sec

JUNCTION 5



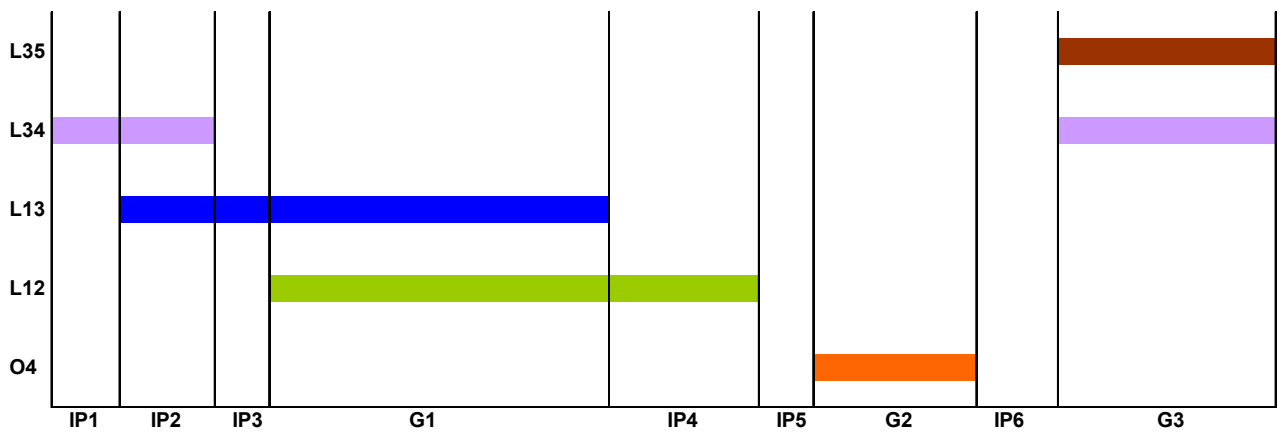
IP1	IP2	IP3	G1	IP4	G2	IP5	IP6	IP7	G3
7sec	2sec	3sec	35sec	3sec	8sec	4sec	4sec	2sec	22sec

JUNCTION 6



IP1	IP2	G1	IP3	IP4	IP5	G2	IP6	IP7	IP8	G3
7sec	4sec	37sec	6sec	5sec	1sec	10sec	3sec	5sec	2sec	10sec

JUNCTION 7



IP1	IP2	IP3	G1	IP4	IP5	G2	IP6	G3
5sec	7sec	4sec	25sec	11sec	4sec	12sec	6sec	16sec

6.3.3 Εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου στο υπό μελέτη δίκτυο

Για την εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου LQ στο υπό μελέτη δίκτυο απαιτείται να καθοριστούν οι παρακάτω παράμετροι ελέγχου, οι οποίοι απορρέουν από τον κανόνα ελέγχου που εφαρμόζεται:

- ο πίνακας ελέγχου L ,
- οι περιορισμοί ελέγχου.

Για τον υπολογισμό του πίνακα L για τον κανόνα ελέγχου (5.35), αρκεί όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 5.3 ο υπολογισμός του πίνακα ελέγχου \tilde{L} . Ο πίνακας ελέγχου \tilde{L} υπολογίζεται βάση των πινάκων $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{Q}$, και \tilde{R} . Τα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό του πίνακα ελέγχου δίδονται στους Πίνακες 6-1–6-4. Οι πίνακες R και S υπολογίζονται με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος (μέσω προσομοιώσεων). Η διατύπωση του προβλήματος ελέγχου LQI περιλαμβάνει:

- 113 μεταβλητές κατάστασης όπου
 - 71 αντιστοιχούν στον αριθμό των οχημάτων στους συνδέσμους $z \in Z$ και
 - 42 νέες μεταβλητές αντιστοιχούν στους ολοκληρωτές y (μια μεταβλητή για κάθε μεταβλητή ελέγχου) του συγκεκριμένου προβλήματος.
- 42 μεταβλητές ελέγχου που αντιστοιχούν στους ενεργούς χρόνους πρασίνων για όλες τις φάσεις κάθε κόμβου $j \in J$.

Από τα δεδομένα του δικτύου των Χανίων, οι ακόλουθοι επαυξημένοι πίνακες προσδιορίζονται για την εφαρμογή του Γραμμικού–Τετραγωνικού–Ολοκληρωτικού Ελέγχου (δες Παράγραφο 5.3):

- Ο πίνακας \tilde{A} αποτελείται από τους υποπίνακες $A \in R^{71 \times 71}, H \in R^{42 \times 71}, I \in R^{42 \times 42}$ και $0 \in R^{71 \times 42}$ και έχει διαστάσεις 113×113 .
- Ο πίνακας \tilde{B} αποτελείται από τους υποπίνακες $B \in R^{71 \times 42}$ και $0 \in R^{42 \times 42}$ και έχει διαστάσεις 113×42 .

- Ο πίνακας \tilde{Q} αποτελείται από τους υποπίνακες $Q \in R^{71 \times 71}$, $S \in R^{42 \times 42}$, $0 \in R^{42 \times 71}$ και $0 \in R^{71 \times 42}$ και έχει διαστάσεις 113×113 . Τα διαγώνια στοιχεία του Q είναι ίσα με το αντίστροφο της χωρητικότητας σε κάθε σύνδεσμο και τα στοιχεία του S υπολογίζονται με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος (μέσω προσομοιώσεων).
- Ο πίνακας \tilde{R} είναι έχει διαστάσεις 42×42 και τα διαγώνια στοιχεία του υπολογίζονται και αυτά με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος (μέσω προσομοιώσεων).

Οι πίνακες ελέγχου L_1 και L_2 προέρχονται από τον πίνακα ελέγχου \tilde{L} (δες Παράγραφο 5.3). Η ευαισθησία τους σε αλλαγές κυκλοφοριακών παραμέτρων όπως ποσοστά στροφής και ροές κορεσμού έχει αποδειχθεί πως είναι μικρή (Diakaki, 1999), πράγμα που συμβαίνει και στην περίπτωση του πίνακα ελέγχου L της στρατηγικής LQ.

7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αξιολόγηση του Γραμμικού-Τετραγωνικού έλεγχου της στρατηγικής TUC μέσω της εκτέλεσης προσομοιώσεων. Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται δυο σενάρια ζήτησης που αναλύθηκαν στην παράγραφο 4.3.3 και γίνονται συγκρίσεις μεταξύ τους και με τη σηματοδότηση σταθερού χρόνου (Fixed-time Signal Control). Τα κριτήρια που επιλέγονται για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι η μέση ταχύτητα των οχημάτων στο δίκτυο (H.Speed) και ο αριθμός των οχημάτων που εισήλθαν στο δίκτυο κατά την προσομοίωση (Travel) και αφορούν το δίκτυο συνολικά αλλά και τους 4 κόμβους (junction 1,5,6,7) που εξετάζονται μεμονωμένα. Οι διερευνήσεις που λαμβάνουν χώρα στο υπό μελέτη δίκτυο βασίζονται σε προσομοίωση 2 ωρών πραγματικού χρόνου με βήμα προσομοίωσης 1 sec.

Ο παράγοντας importance-factor - ο οποίος μπορεί να πάρει διαφορετική τιμή για κάθε αστικό σύνδεσμο - χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση του δικτύου. Αυξάνοντας την τιμή του importance-factor ενός συνδέσμου, αυξάνεται και η χρονική περίοδος που λαμβάνει πράσινο. Αρχικά δόθηκε η τιμή 1 στον importance-factor όλων των συνδέσμων και εν συνεχεία μεταβάλλοντας την τιμή του για τους συνδέσμους των υπό μελέτη κόμβων (junction 1,5,6,7) καταλήξαμε στην πιο ικανοποιητική λύση.

Οι προσομοιώσεις των δυο σεναρίων ζήτησης κατατάσσονται σε 2 κατηγορίες , με συμβάντα (incidents) και χωρίς. Κάθε κατηγορία χωρίζεται σε 3 υποκατηγορίες. Στην πρώτη υποκατηγορία γίνεται χρήση της σηματοδότησης σταθερού χρόνου (Fixed-time Signal Control), στη δεύτερη της στρατηγικής TUC με τιμή 1 στον importance-factor όλων των συνδέσμων, ενώ στην τρίτη υποκατηγορία χρησιμοποιείται ξανά η στρατηγική TUC όπου η τιμή του importance-factor για τους συνδέσμους των υπό μελέτη κόμβων (junction 1,5,6,7) είναι η καλύτερη δυνατή.

7.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του πρώτου σεναρίου ζήτησης, παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν:

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 1		Υποκατηγορία 1	Υποκατηγορία 2	Υποκατηγορία 3
Travel (km)	Δίκτυο	5525.4	6154.9	6832.8
H.speed (km/h)	Δίκτυο	8	12.1	13.2
	Junction 1	7.27	10.96	11.72
	Junction 5	4.49	12.63	13.53
	Junction 6	2.05	12.7	13.40
	Junction 7	4.68	7.94	10.12

Πίνακας 7.1 :Αποτελέσματα προσομοιώσεων της 1^{ης} κατηγορίας (χωρίς συμβάντα)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 2		Υποκατηγορία 1	Υποκατηγορία 2	Υποκατηγορία 3
Travel (km)	Δίκτυο	5176.5	6123.5	6644.6
H.speed (km/h)	Δίκτυο	7.7	11.4	12.6
	Junction 1	3.98	10.2	11.34
	Junction 5	5.17	12.06	12.86
	Junction 6	2.63	12.37	13.10
	Junction 7	4.43	7.35	9.80

Πίνακας 7.2 :Αποτελέσματα προσομοιώσεων της 2^{ης} κατηγορίας (με συμβάντα)

Στη συνέχεια παραθέτονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του δεύτερου σεναρίου ζήτησης:

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 1		Υποκατηγορία 1	Υποκατηγορία 2	Υποκατηγορία 3
Travel (km)	Δίκτυο	4680.5	8251.2	8738.4
H.speed (km/h)	Δίκτυο	5.9	8.9	10.2
	Junction 1	3.17	7.60	8.80
	Junction 5	4.56	8.40	9.94
	Junction 6	2.23	8.05	8.89
	Junction 7	3.30	7.10	7.70

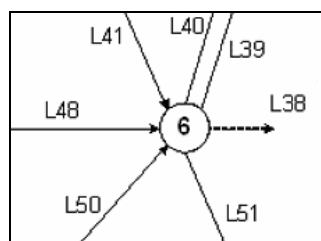
Πίνακας 7.3 :Αποτελέσματα προσομοιώσεων της 1^{ης} κατηγορίας (χωρίς συμβάντα)

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 2 (με συμβάντα)		Υποκατηγορία 1	Υποκατηγορία 2	Υποκατηγορία 3
Travel (km)	Δίκτυο	5104.1	7986.2	8326.6
H.speed (km/h)	Δίκτυο	4.8	8.1	9.2
	Junction 1	1.87	5.72	6.25
	Junction 5	2.75	6.62	7.65
	Junction 6	1.22	7.65	8.29
	Junction 7	3.07	5.66	6.93

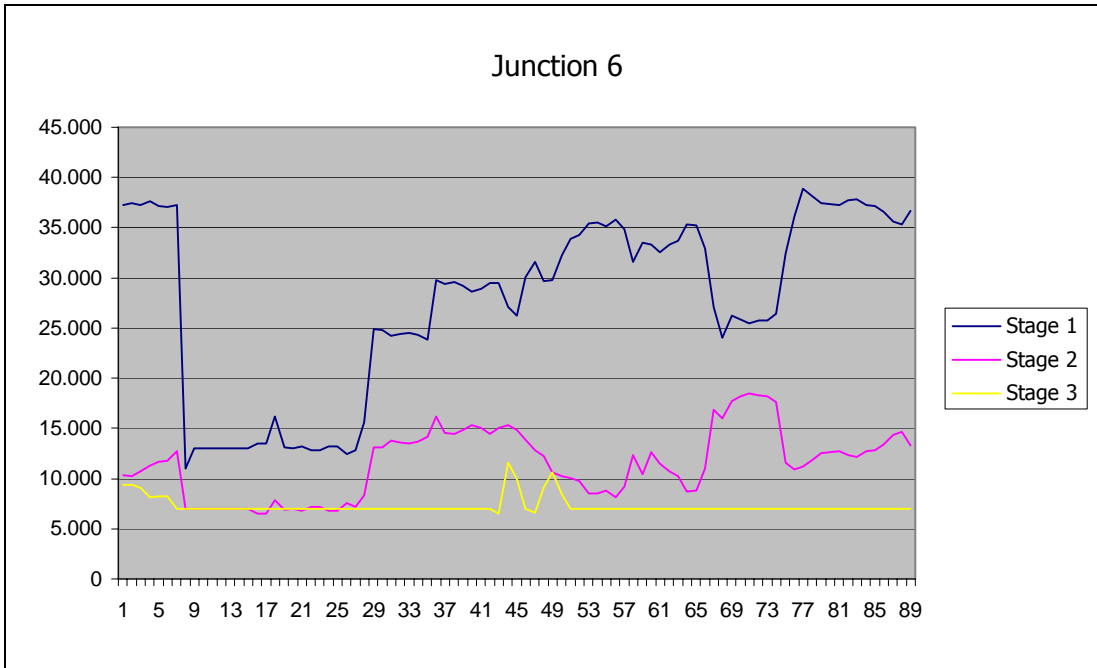
Πίνακας 7.4 :Αποτελέσματα προσομοιώσεων της 2^{ης} κατηγορίας (με συμβάντα)

Από τους πίνακες 7.1-7.4 παρατηρούμε ότι οι τιμές των κριτηρίων αξιολόγησης (H.speed, Travel) είναι εμφανώς μεγαλύτερες στις υποκατηγορίες 2 και 3, σε σχέση με τις τιμές της υποκατηγορίας 1. Αυτό αποδεικνύει ότι η στρατηγική TUC υπερτερεί της σηματοδότησης σταθερού χρόνου (Fixed-time Signal Control), ακόμα και στην περίπτωση που η τιμή του importance factor των συνδέσμων δεν είναι η βέλτιστη. Επίσης, από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της 1^{ης} και 2^{ης} κατηγορίας προκύπτει το συμπέρασμα ότι η παρουσία incidents επηρεάζει αρνητικά την απόδοση του οδικού δικτύου, καθώς οι τιμές των κριτηρίων αξιολόγησης είναι μικρότερες στην δεύτερη κατηγορία.

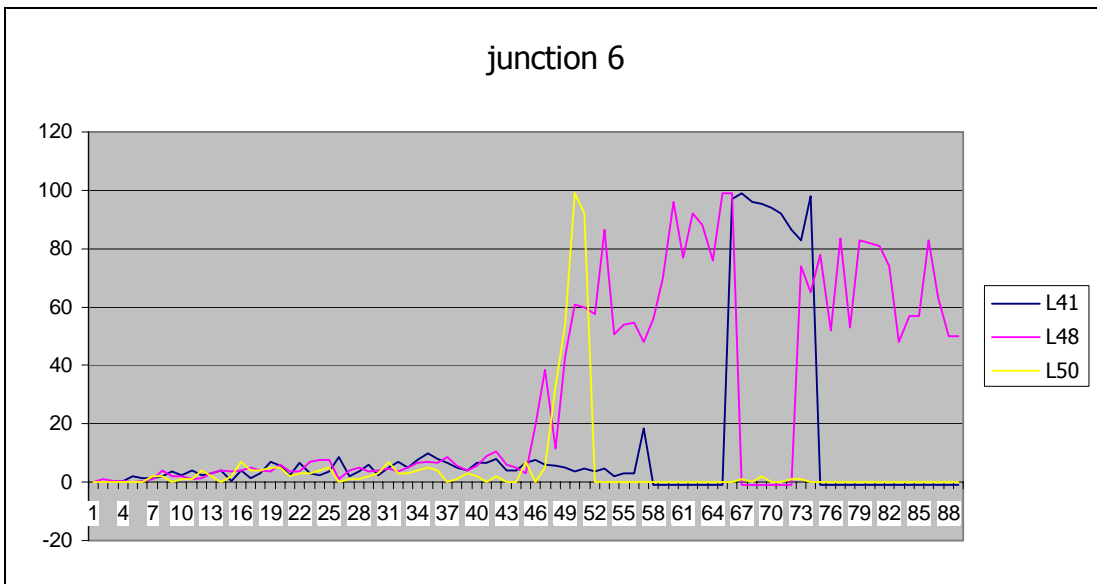
Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά δυο διαγράμματα για τον κόμβο 6 του οδικού δικτύου των Χανίων. Στο πρώτο παρουσιάζονται οι ενεργοί χρόνοι πράσινου για τον κόμβο 6 και στο δεύτερο διάγραμμα το ποσοστό κατάληψης των αστικών συνδέσμων που καταλήγουν σε αυτόν. Τα διαγράμματα αυτά προκύπτουν από προσομοίωση του δεύτερου σεναρίου με χρήση συμβάντων (incidents) και εισαγωγή των βέλτιστων τιμών του importance-factor των συνδέσμων του δικτύου.



Σχήμα 7.1: Αστικός κόμβος 6



Γράφημα 7.1 Συγκριτικό διάγραμμα των ενεργών χρόνων πρασίνου για τον κόμβο 6 του δικτύου.



Γράφημα 7.2 Ποσοστό κατάληψης (occupancy) των οδών Κυδωνίας (L48), Αποκορώνου (L41) και Περίδου (L50)

Από τα παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι η στρατηγική TUC λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο αφού ανταποκρίνεται άμεσα σε οποιαδήποτε αύξηση του ποσοστού κατάληψης (occupancy) ενός συνδέσμου αυξάνοντας την χρονική περίοδο που λαμβάνει πράσινο. Επίσης βλέπουμε ότι γίνεται διάκριση μεταξύ

σημαντικών και μη σημαντικών συνδέσμων – ανάλογα με την τιμή του importance-factor - αφού η αύξηση του ποσοστού κατάληψης (occupancy) ενός συνδέσμου δεν συνοδεύεται πάντα από αύξηση του ενεργού χρόνου πράσινου.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία είχε ως σκοπό της την προσομοίωση του οδικού δικτύου των Χανίων με χρήση του μικροσκοπικού προσομοιωτή AIMSUN, τη δημιουργία σεναρίων ζήτησης με ή χωρίς συμβάντα και την διερεύνηση της εφαρμογής της στρατηγικής TUC στο δίκτυο των Χανίων καθώς και την βελτιστοποίηση της τροποποιώντας τις κατάλληλες παραμέτρους.

Η δημιουργία σεναρίων ζήτησης με συμβάντα και η εισαγωγή τους στον προσομοιωτή AIMSUN έδειξε πως τα διπλοπαρκαρίσματα και οι στάσεις λεωφορείων και άλλων οχημάτων επηρεάζουν αρνητικά την κυκλοφοριακή ροή του οδικού δικτύου των Χανίων δημιουργώντας συχνά έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση.

Επιπρόσθετα η εφαρμογή της στρατηγικής TUC στο δίκτυο των Χανίων έδειξε πως υπερτερεί του σεναρίου σηματοδότησης σταθερού χρόνου (Fixed-time Signal Control), ακόμα και χωρίς βελτιστοποίηση. Χαρακτηριστικά, η εφαρμογή της στρατηγικής TUC στην περίπτωση προσομοίωσης του δεύτερου σεναρίου ζήτησης με παρουσία συμβάντων, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης ταχύτητας του δικτύου κατά 69%. Στη βελτιστοποιημένη εκδοχή της στρατηγικής TUC, η μέση ταχύτητα αυξάνεται κατά 91%. Πέρα από την αύξηση των μέσων ταχυτήτων των οχημάτων στο δίκτυο, η εφαρμογή της στρατηγικής TUC και στις δύο περιπτώσεις (βελτιστοποιημένη και μη), επιτρέπει την είσοδο περισσότερων οχημάτων στο αστικό δίκτυο των Χανίων σε σχέση με τη σηματοδότηση σταθερού χρόνου. Συγκεκριμένα, στην προαναφερθείσα περίπτωση προσομοίωσης, ο αριθμός των οχημάτων αυξήθηκε κατά 56% στη μη βελτιστοποιημένη εκδοχή της στρατηγικής TUC και κατά 63% στη βελτιστοποιημένη εκδοχή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Diakaki C., Papageorgiou M. (1996). *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.

Diakaki C. (1999). *Integrated Control of Traffic Flow in Corridor Road Networks*, PhD Dissertation, Technical University of Crete, Department of Production Engineering and Management, Chania, Greece.

Diakaki C., Dinopoulou V., Aboudolas K., Papageorgiou M. (2002). *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.

Dinopoulou V., Kalogiannis G., Papageorgiou M., Koufogiannakis C., Marinakis G. (2002). *Demonstrator for Chania*, Deliverable 10.1, Project SMART NETS (IST-2000-28090), European Community under the "Information Society Technology" Programme (1998-2002), Brussels, Belgium.

Dynamic Systems and Simulation Laboratory, *The TUC Strategy Software and Input Files*, Technical University of Crete, Department of Production Engineering and Management, Chania, Greece.

Papageorgiou, M. (1983). *Applications of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modelling and Control*, Springer Verlag, Berlin, New York, Tokyo.

Αμπουντώλας, Κ. (1999). *Ρύθμιση της φωτεινής σηματοδότησης με τη χρήση Γραμμικού-Τετραγωνικού-Ολοκληρωτικού Ελέγχου*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά.

Κούβελος, Α. (2004). *Ρύθμιση της φωτεινής σηματοδότησης της πόλης των Χανίων με τη χρήση Γραμμικού-Τετραγωνικού-Ολοκληρωτικού Ελέγχου*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά.

Πρωτόπαππα, Μ. (2003). *Η στρατηγική TUC και η εφαρμογή της στο δίκτυο του Σαουθάμπτον*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά.