



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ρύθμιση της φωτεινής σηματοδότησης της πόλης των Χανίων με τη χρήση
Γραμμικού–Τετραγωνικού–Ολοκληρωτικού Ελέγχου**

ΚΟΥΒΕΛΑΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Καθηγητής ΜΑΡΚΟΣ ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ

ΧΑΝΙΑ 2004

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1 ΈΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ	5
1.2 ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	6
1.2.1 Μοντέλα και στρατηγικές ελέγχου	6
1.2.2 Μικροσκοπικά και Μακροσκοπικά μοντέλα.....	7
1.3 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	9
1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	9
2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	11
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
2.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ	12
2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕΣΩ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΩΝ.....	15
2.4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΣΤΙΚΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ	16
2.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	18
3 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΤUC.....	19
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
3.2 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ ΤUC	19
3.3 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ ΤUC.....	25
4 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ METACOR	27
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	27
4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ METACOR.....	28
4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	29
4.3.1 Μοντελοποίηση των αστικών συνδέσεων	29
4.3.2 Μοντελοποίηση των αστικών διασταυρώσεων.....	30
4.4 ΤΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	31
5 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ LQI	33
5.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ	33
5.2 ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ – ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ (LQ)	38
5.3 ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ – ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΣ – ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ (LQI)	40
5.4 ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΑ ΕΛΕΓΧΟΥ LQI.....	42
5.5 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ	43
6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ LQI ΣΤΟ ΟΔΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ	46
6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	46
6.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΑ ΧΑΝΙΑ	48

6.3	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ LQI ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ	50
6.3.1	Απαιτούμενα δεδομένα.....	50
6.3.2	Μοντελοποίηση του δικτύου για την εφαρμογή της στρατηγικής.....	50
6.3.3	Εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου στο υπό μελέτη δίκτυο	61
6.4	Η ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ STAGE/LINK.....	62
6.5	ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ ΒΑΡΟΥΣ	63
6.6	ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ METACOR	64
6.6.1	Αρχείο Περιγραφής Δικτύου (<i>Network Description File - NWD</i>)	64
6.6.2	Αρχείο Ποσοστών Στροφής (<i>Turning Rates File – TRN</i>).....	64
6.6.3	Αρχείο Περιγραφής Διασταυρώσεων (<i>Junction Description File – JDF</i>)	65
6.6.4	Αρχείο Θέσης Φωρατών (<i>Detector Location File – DET</i>).....	65
6.6.5	Αρχείο Περιγραφής της στρατηγικής TUC (<i>TUC Description File – TUC</i>)	65
6.6.6	Αρχείο Σύνδεσης Διασταυρώσεων μεταξύ METACOR και TUC (<i>Connection of Metacor and TUC Junctions File – JTUC</i>)	66
6.6.7	Αρχείο Ζήτησης (<i>Locations / Demands File – MSD</i>).....	66
6.6.8	Αρχείο Σταδίων (<i>Stages File – STG</i>)	66
6.6.9	Αρχείο Ελέγχου (<i>Control File – CTR</i>)	67
7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	68
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	68
7.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΜΙΚΡΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	69
7.2.1	Αποτελέσματα για τον κανόνα ελέγχου LQI	69
7.2.2	Αποτελέσματα για τον κανόνα ελέγχου LQ και για τα <i>fixed-time</i> σχέδια ελέγχου	74
7.2.3	Συμπεράσματα από την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου LQI στο μικρό δίκτυο	75
7.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΟΛΟΚΛΗΡΟ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ.....	78
7.3.1	Αποτελέσματα για τον κανόνα ελέγχου LQI	79
7.3.2	Αποτελέσματα για τον κανόνα ελέγχου LQ και για τα <i>fixed-time</i> σχέδια ελέγχου	82
7.3.3	Συμπεράσματα από την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου LQI στο αστικό δίκτυο των Χανίων	89
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΙΛΟΓΟΣ	92
8.1	ΣΥΝΟΨΗ	92
8.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	94
8.3	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	95
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	96
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	97

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας οφείλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης κύριο Μάρκο Παπαγεωργίου για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκειά της. Επίσης, την ερευνήτρια κυρία Μαργαρίτα Πρωτόπαππα για την εξίσου πολύτιμη βοήθεια της και τις γνώσεις που μου παρείχε, καθώς και τον Λέκτορα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης κύριο Ηλία Κοσματόπουλο. Τέλος, θα ήταν παράληψη να μην ευχαριστήσω τον ερευνητή κύριο Αμπουντώλα Κωνσταντίνο και τον Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης κύριο Απόστολο Κότσιαλο για τη βοήθεια και τη συμπαράστασή τους.

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.

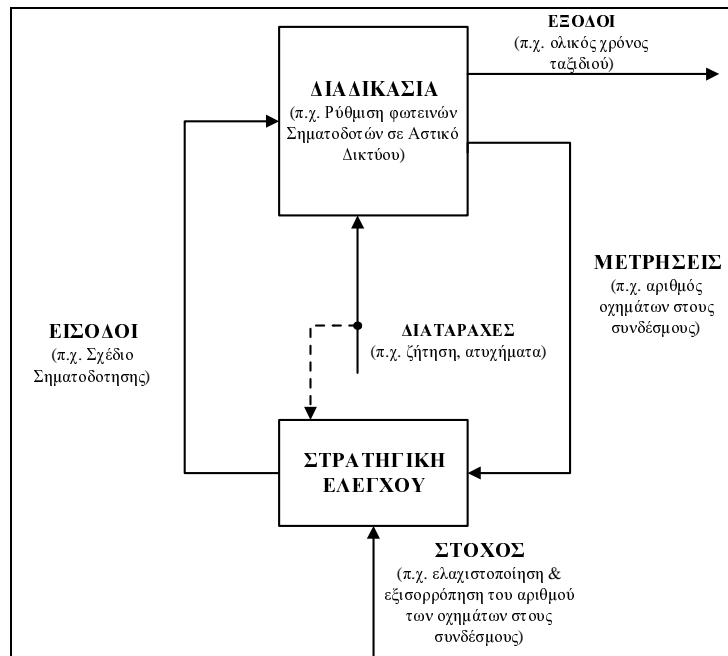
Μια εναλλακτική και εφικτή προσέγγιση προς την επίλυση των κυκλοφοριακών προβλημάτων, η οποία δέχθηκε ισχυρή ώθηση με τις αλματώδεις εξελίξεις στην τεχνολογία των επικοινωνιών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών (τηλεματική), είναι η ορθολογική και πλήρης αξιοποίηση και χρήση της υπάρχουσας υποδομής μέσω 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 διερεύνηση της εφαρμογής του Γραμμικού–Τετραγωνικού–Ολοκληρωτικού 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 (Papageorgiou, 1983) ανάλογα με το επίπεδο λεπτομέρειας που χρησιμοποιείτε για την περιγραφή των κυκλοφοριακών φαινομένων. Οι δυο αυτές κατηγορίες είναι οι ακόλουθες:

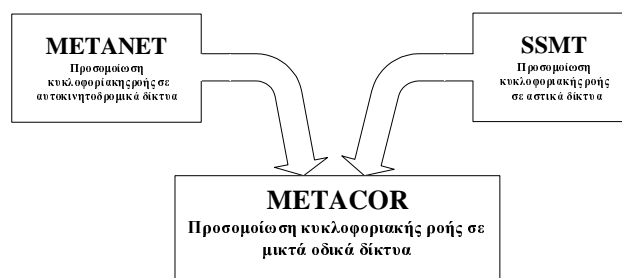
- Μικροσκοπικά μοντέλα
- Μακροσκοπικά μοντέλα

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 μακροσκοπικό μοντέλο METACOR (Diakaki and Papageorgiou, 1996). Το METACOR είναι ένα εργαλείο μοντελοποίησης και προσομοίωσης μεικτών οδικών δικτύων τυχαίας τοπολογίας και χαρακτηριστικών. Μεικτά οδικά δίκτυα είναι τα δίκτυα που περιλαμβάνουν αυτοκινητοδρόμους και αστικά δίκτυα καθώς και τους δρόμους σύνδεσης αυτών. Το METACOR προήλθε από την επέκταση και ενοποίηση δυο άλλων εργαλείων (Σχήμα 1-2):

- του METANET που προσομοιώνει δίκτυα αυτοκινητοδρόμων και
- του SSMT που προσομοιώνει αστικά δίκτυα.



Σχήμα 1-2: Σχηματική παρουσίαση της ανάπτυξης του μοντέλου METACOR

1.3 Στόχοι της εργασίας

Η στρατηγική Γραμμικού – Τετραγωνικού ελέγχου (LQ) της TUC μεταβάλλει τους χρόνους πρασίνου στους φωτεινούς σηματοδότες γύρω από τις ονομαστικές τιμές αυτών και εφαρμόζεται ήδη με επιτυχία στο αστικό δίκτυο των Χανίων. Ως εκ τούτου, για την υλοποίηση της στρατηγικής LQ, είναι απαραίτητη η γνώση των ονομαστικών τιμών πρασίνου στους φωτεινούς σηματοδότες του δικτύου. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της λειτουργίας μιας εναλλακτικής μορφής του κανόνα ελέγχου LQ, ώστε η TUC να μη χρειάζεται τις ονομαστικές τιμές. Η στρατηγική αυτή είναι ο Γραμμικός – Τετραγωνικός – Ολοκληρωτικός έλεγχος (LQI), ο οποίος περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια της εργασίας, ενώ παράλληλα διερευνάται (μέσω προσομοιώσεων) κατά πόσο είναι δυνατή η εφαρμογή του στο δίκτυο της πόλης των Χανίων και ποια είναι τα αποτελέσματα της εφαρμογής του σε σύγκριση με αυτά του ελέγχου LQ.

1.4 Δομή της εργασίας

Η δομή της εργασίας έχει ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια παρουσίαση των συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας αστικών δικτύων. Τα συστήματα αυτά κατατάσσονται με βάση τρία θεμελιώδη χαρακτηριστικά, ως σταθερού ή πραγματικού χρόνου, μεμονωμένα ή συντονισμένα και συστήματα ακόρεστης ή κορεσμένης κυκλοφορίας. Έμφαση δίνεται στα συντονισμένα συστήματα πραγματικού χρόνου που αποτελούν και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Επίσης, γίνεται μια εισαγωγή στην προτεινόμενη μεθοδολογία για τον έλεγχο κυκλοφορίας αστικών δικτύων.
- Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια περιληπτική αναφορά στη στρατηγική TUC και στα επιμέρους τμήματά της.
- Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το METACOR ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση οδικών δικτύων, καθώς και τα κριτήρια απόδοσης που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των προσομοιώσεων.
- Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η στρατηγική ελέγχου αστικής κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο LQI. Αρχικά, γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές αρχές της στρατηγικής καθώς και στις υποθέσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για την

- ανάπτυξη της, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις ελέγχου.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται το οδικό δίκτυο των Χανίων με αναλυτικά γραφήματα και αναλύεται η υλοποίηση της στρατηγικής LQI στο δίκτυο αυτό.
- Στο Κεφάλαιο 7 παραθέτονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το δίκτυο των Χανίων για τα δύο σενάρια ζήτησης και για τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις του κανόνα ελέγχου που διερευνήθηκαν. Επίσης, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της στρατηγικής LQI με αυτά των στρατηγικών LQ και σταθερού χρόνου (fixed-time), καθώς και διερεύνηση της συμπεριφοράς και της αποτελεσματικότητας της στρατηγικής.
- Στο Κεφάλαιο 8 γίνεται σύνοψη της παρούσας εργασίας και εκτίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν, καθώς και οι επεκτάσεις που μπορούν να γίνουν στο μέλλον.
- Τέλος, στο Παράρτημα παρατίθενται οι τρεις πίνακες ελέγχου (L , L_x , L_y) που είναι απαραίτητοι για την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου LQI. Οι πίνακες αυτοί αποτελούν μια τυχαία τριάδα, καθώς για τις διερευνήσεις που έγιναν στο δίκτυο των Χανίων κατασκευάστηκαν πολλοί τέτοιοι πίνακες ελέγχου.

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 ανθρώπινοι 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:

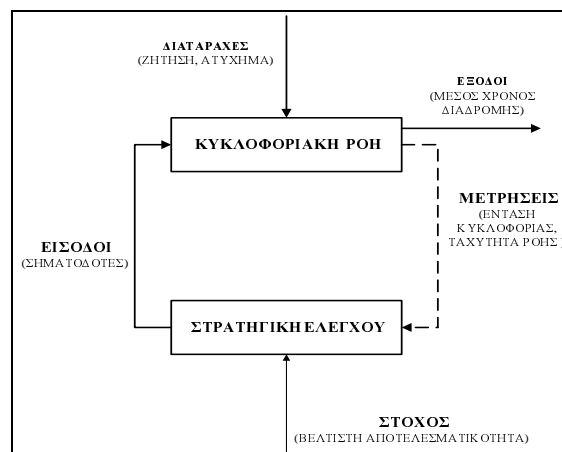
- ασφαλής διασταύρωση ρευμάτων οχημάτων
- ασφαλής διασταύρωση οχημάτων και πεζών.

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

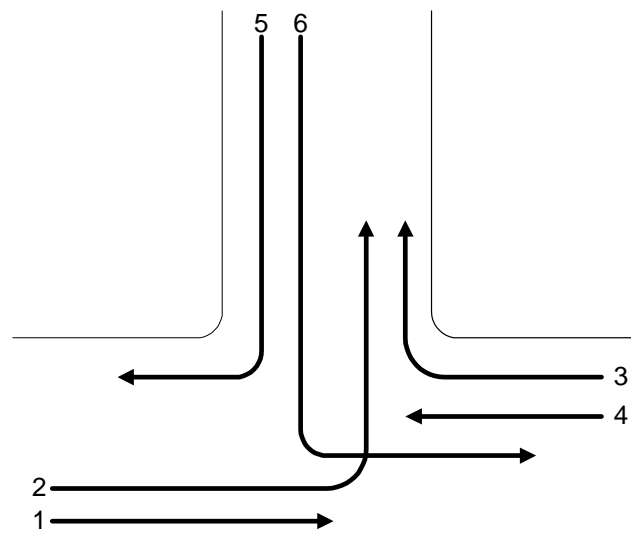
Τα συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας αστικών περιοχών, τα οποία βρίσκονται σήμερα σε εφαρμογή ή υπό ανάπτυξη, μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τα εξής τρία κριτήρια (Παπαγεωργίου, 1996):

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

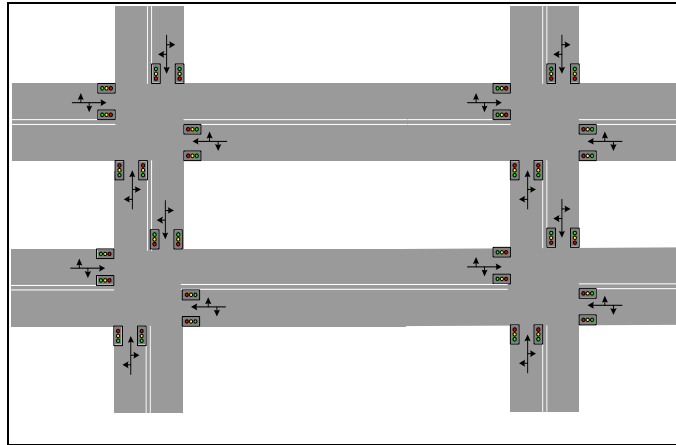
προσωρινών μετρήσεων έτσι ώστε να οδηγήσει σε βέλτιστη αποτελεσματικότητα. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των συστημάτων σταθερού χρόνου πηγάζει από το γεγονός ότι οι συνθήκες κυκλοφορίας αλλάζουν: ζήτηση, ατυχήματα, καιρικές συνθήκες υπόκεινται σε βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες αλλαγές που απαιτούν 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.



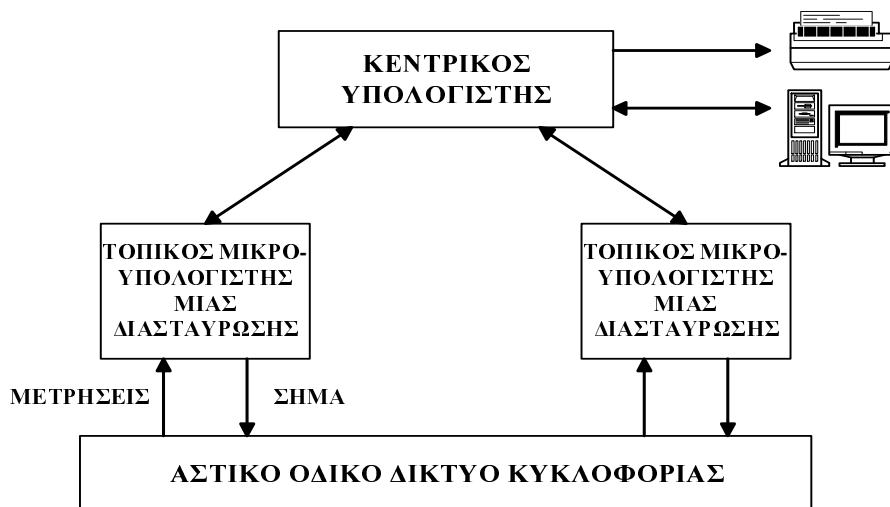
Σχήμα 2-2: Μεμονωμένη διασταύρωση με ανταγωνιστικά ρεύματα κυκλοφορίας



Σχήμα 2-3: Οδικό δίκτυο περιοχής

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των μεμονωμένων συστημάτων πηγάζει από το γεγονός ότι το άθροισμα μεμονωμένων βέλτιστων ρυθμίσεων ενός αριθμού γειτονικών διασταυρώσεων συνήθως δεν ισοδυναμεί με την βέλτιστη ρύθμιση του αντίστοιχου οδικού δικτύου ιδωμένου ως συνόλου. Το μειονέκτημα αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη **συντονισμένων** συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας μιας αρτηρίας ή του οδικού κυκλώματος μιας περιοχής (Σχήμα 2-3).

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

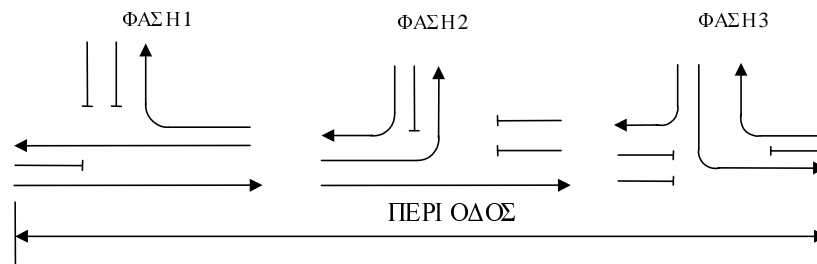
3. Στην περίπτωση **ακόρεστης** κυκλοφορίας η ζήτηση είναι χαμηλότερη από την κυκλοφοριακή ικανότητα μιας διασταύρωσης ή ενός δικτύου. Η κυκλοφοριακή ικανότητα εξαρτάται από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου αλλά και από την εφαρμοζόμενη στρατηγική ελέγχου.

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.

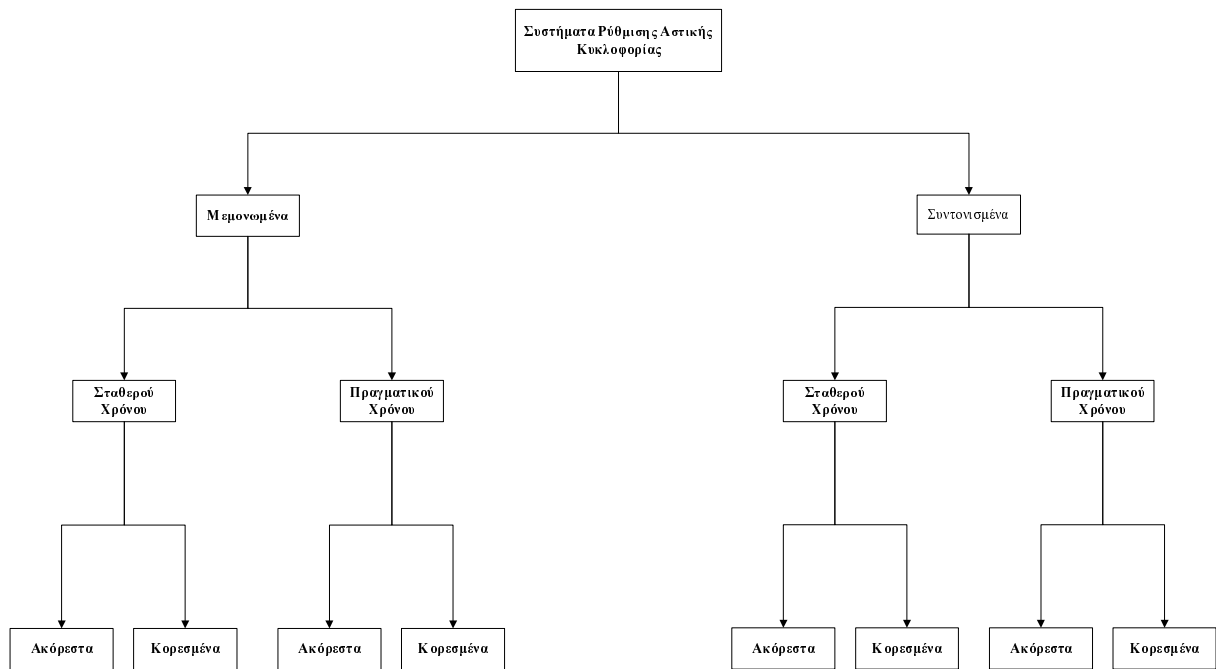
Ο **τρίτος** τρόπος έγκειται στην μεταβολή της διάρκειας της κυκλοφοριακής **περιόδου** (cycle) η οποία είναι ίση με το άθροισμα της διάρκειας κάθε φάσης συν τις διάρκειες των ενδιάμεσων μεταβατικών σταδίων (κίτρινο σήμα). Η αύξηση της διάρκειας της κυκλοφοριακής περιόδου οδηγεί συνήθως, υπό σταθερές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

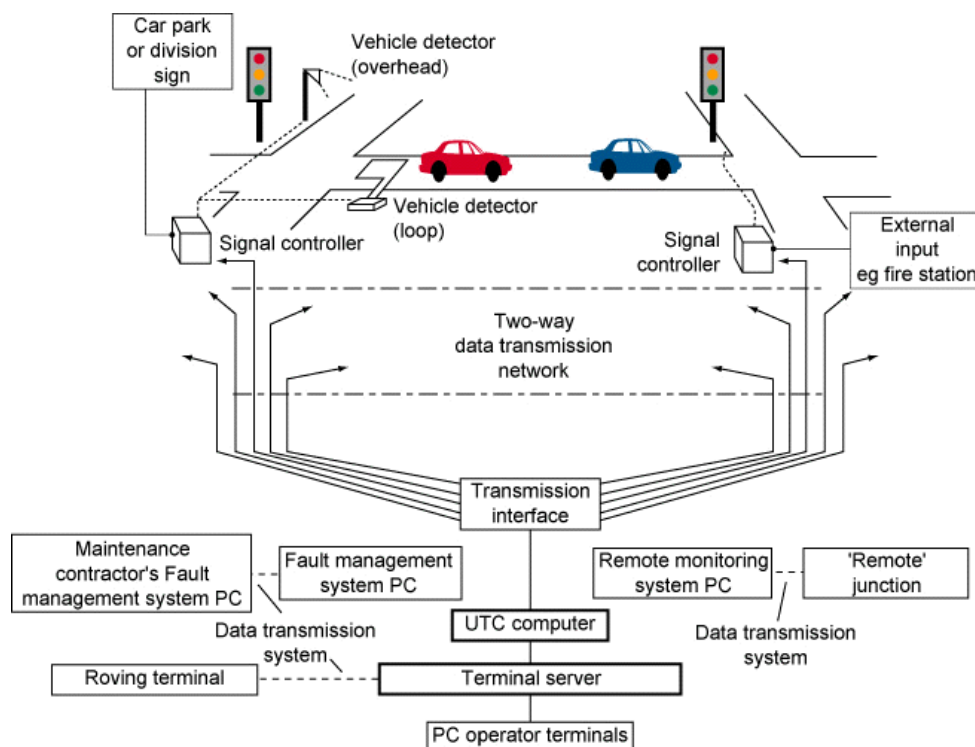
2.4 Στρατηγικές ελέγχου αστικής κυκλοφορίας

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.



Σχήμα 2-6: Ταξινόμηση συστημάτων ρύθμισης και ελέγχου αστικής κυκλοφορίας



Σχήμα 2-7: Βασική δομή του SCOOT

Το Σχήμα 2-7 της προηγούμενης 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.

Μια σειρά σύγχρονων και φιλόδοξων προγραμμάτων της ίδιας κατηγορίας είναι τα UTOPIA (Mauro and Di Taranto, 1989), PRODYN (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-προώθησης (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 πρώτης 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 μέσων 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 ανυπέρβλητες 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 βασίζονται στις αποφάσεις τους στις πιο πρόσφατες παρατηρούμενες κυκλοφοριακές συνθήκες.

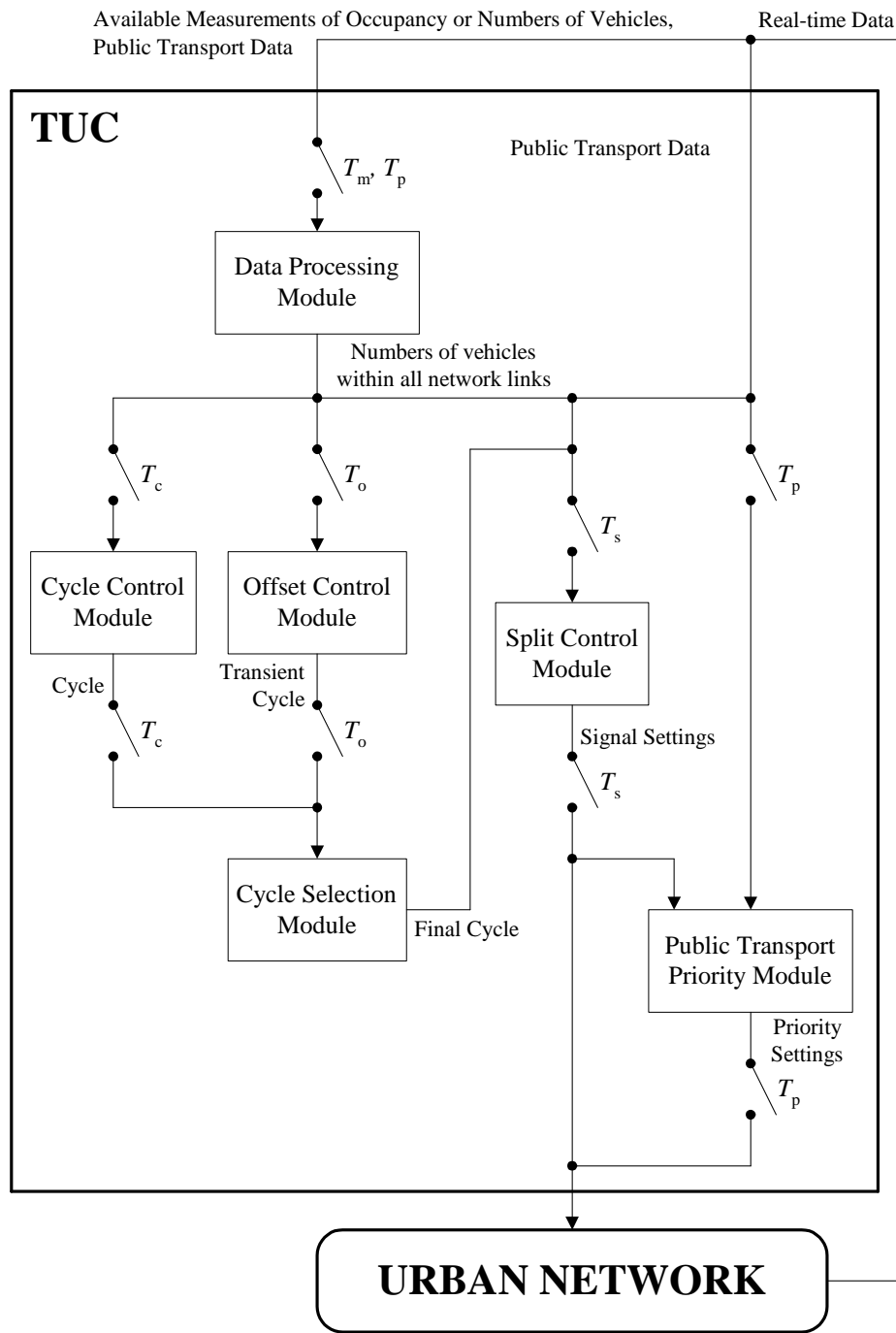
Αν είναι διαθέσιμο ένα προηγμένο σύστημα οπτικής ανίχνευσης, ο αριθμός των οχημάτων μπορεί να συλλεχθεί απευθείας. Εντούτοις, στην πλειοψηφία των πρακτικών εφαρμογών, χρησιμοποιούνται οι παραδοσιακοί μαγνητικοί ανιχνευτές, φωρατές. Απλοί φωρατές μετρούν την κατάληψη και τον κυκλοφοριακό φόρτο για μία 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 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ METACOR

4.1 Εισαγωγή

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

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

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

4.2 Περιγραφή του μοντέλου METACOR

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

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

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

Οι μεταβλητές αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια:

- **Κυκλοφοριακή πυκνότητα** $\rho_{m,i}(k)$ είναι ο αριθμός των οχημάτων στο τμήμα i του συνδέσμου m κατά το χρόνο kT δια του μήκους του τμήματος L_m εκφρασμένο σε οχήματα ανά χιλιόμετρο.
- **Μέση ταχύτητα** $v_{m,i}(k)$ είναι η μέση ταχύτητα των οχημάτων που περιλαμβάνονται στο τμήμα i του συνδέσμου m κατά το χρόνο kT εκφρασμένη σε χιλιόμετρα ανά ώρα.

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

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

- **Για τους συνδέσμους:** όνομα, αριθμός λωρίδων, μήκος, χωρητικότητα ανά λωρίδα, μέση ταχύτητα και μέγιστη πυκνότητα.
- **Για τους συνδέσμους εισόδου:** όνομα, αριθμό λωρίδων και εσωτερική χωρητικότητα ροής ανά λωρίδα.
- **Για τους συνδέσμους εξόδου:** όνομα, αριθμό λωρίδων.
- **Για τις αστικές διασταυρώσεις:** όνομα, σύνδεσμοι εισόδου και εξόδου, εσωτερικές κινήσεις και για κάθε τέτοια κίνηση την μέση ταχύτητα, το μήκος κίνησης, τη μέγιστη πυκνότητα και τις ανταγωνιστικές κινήσεις αν υπάρχουν.

4.3 Περιγραφή των εξισώσεων του μοντέλου

4.3.1 Μοντελοποίηση των αστικών συνδέσμων

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

$$\text{Εξίσωση συνέχειας:} \quad \rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m} [q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)] \quad (4.1)$$

$$\text{Εξίσωση ροής:} \quad q_{m,i}(k) = \min\{q_{ups}(k), q_{down}(k)\} \quad (4.2)$$

$$\text{Βασικό διάγραμμα:} \quad Q(\rho_{m,i}(k)) = \rho_{m,i}(k) v_{f,m} \left(1 - \frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{\max} \lambda_m} \right) \quad (4.3)$$

όπου $v_{f,m}$ είναι η μέση ελεύθερη ταχύτητα, ρ_{\max} είναι μία σταθερά που εκφράζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη κυκλοφοριακή πυκνότητα ανά λωρίδα και έχει την ίδια τιμή για όλους τους συνδέσμους, $q_{ups}(k)$ είναι η ροή που επιθυμεί να εισέλθει στον επόμενο

σύνδεσμο και $q_{down}(k)$ είναι η μέγιστη ροή που μπορεί να δεχτεί ο επόμενος σύνδεσμος. Οι δύο τελευταίες παράμετροι υπολογίζονται με τον ακόλουθο τρόπο:

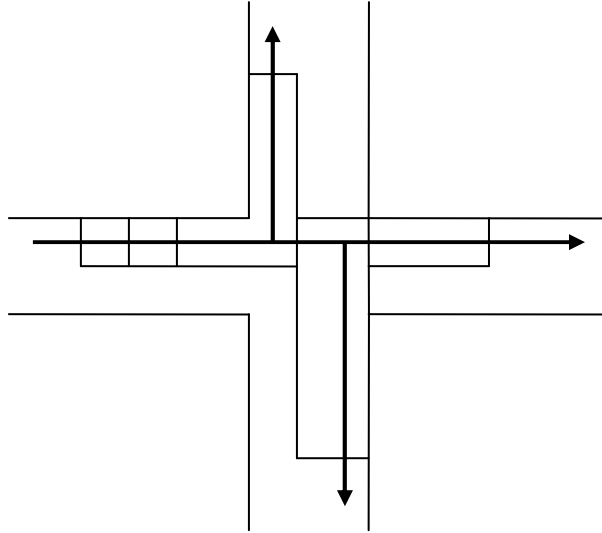
$$q_{ups}(k) = \begin{cases} Q(\rho_{m,i}(k)) & \alpha\nu \quad \rho_{m,i} \leq \rho_{\max} \lambda_m / 2 \\ Q(\rho_{\max} \lambda_m / 2) & \alpha\nu \quad \rho_{m,i} > \rho_{\max} \lambda_m / 2 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$q_{down}(k) = \begin{cases} Q(\rho_{\max} \lambda_m / 2) & \alpha\nu \quad \rho_{m,i+1} \leq \rho_{\max} \lambda_m / 2 \\ Q(\rho_{m,i+1}(k)) & \alpha\nu \quad \rho_{m,i+1} > \rho_{\max} \lambda_m / 2 \end{cases} \quad (4.5)$$

4.3.2 Μοντελοποίηση των αστικών διασταυρώσεων

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

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



Σχήμα 4-1: Οι ζώνες της διασταύρωσης

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

4.4 Τα κριτήρια απόδοσης

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

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

$$TTT = \sum_k \sum_m \sum_i [\rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m T] \quad (4.6)$$

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

$$TWT = \sum_k \sum_o [w_o(k) T] \quad (4.7)$$

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

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

$$TTS = TTT + TWT \quad (4.8)$$

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

$$TTD = \sum_k \sum_m \sum_i [q_{m,i}(k) L_m T] \quad (4.9)$$

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

$$TFC = \sum \frac{T}{100} \sum \sum \begin{cases} q_{m,i}(k) L_m \left(4.49 + \frac{122}{v_{m,i}(k)} + 0.0016 (v_{m,i}(k) - 60)^2 \right) \\ q_{m,i}(k) L_m \left(4.49 + \frac{122}{v_{m,i}(k)} \right) \end{cases} \quad (4.10)$$

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

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

5 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ LQI

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 .

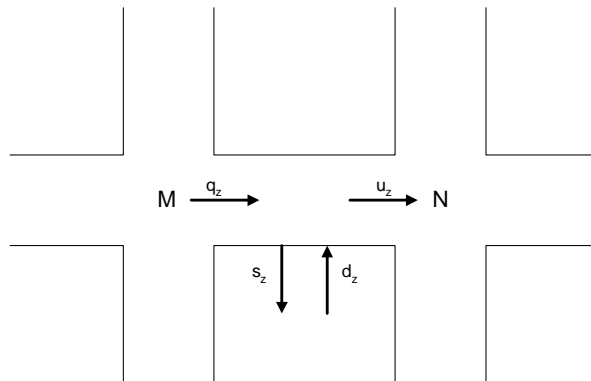
Θεωρείστε τον σύνδεσμο z που συνδέει δυο κόμβους M, N τέτοιος ώστε $z \in O_M$ και $z \in I_N$ (Σχήμα 5.1). Η δυναμική του συνδέσμου z διατυπώνεται από την παρακάτω εξίσωση:

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

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):

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

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 (4.6) γίνεται:

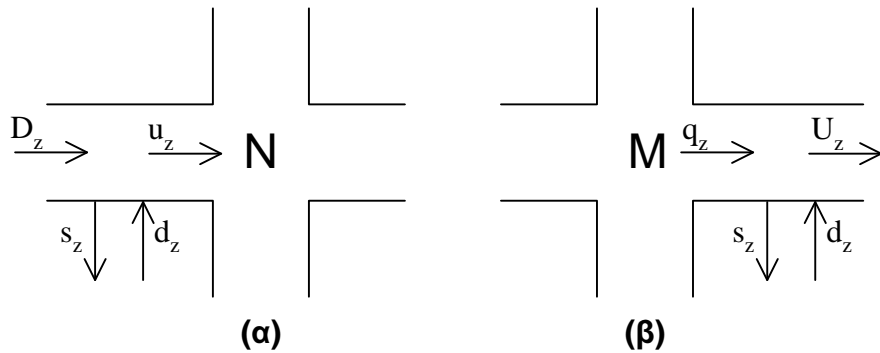
$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \cdot [(1-t_{z,0})D_z(k) + d_z - u_z(k)] \quad (5.11)$$

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:

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



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 πράσινων που υπολογίζονται ώστε να ικανοποιούν τους περιορισμούς (5.1)-(5.3) (δες παράγραφο 5.5).

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 :

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

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 .

5.3 Γραμμικός – Τετραγωνικός – Ολοκληρωτικός Έλεγχος (LQI)

Διατυπώνοντας το πρόβλημα του ελέγχου της αστικής κυκλοφορίας ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Γραμμικού-Τετραγωνικού-Ολοκληρωτικού Ελέγχου, βασισμένο στην ίδια μοντελοποίηση και με τον ίδιο αντικειμενικό στόχο όπως στην παράγραφο 5.2, μπορούμε να παράγουμε ακόμη ένα κανόνα ελέγχου ο οποίος να μην απαιτεί χρήση των ονομαστικών τιμών g^N .

Για την εφαρμογή του Γραμμικού – Τετραγωνικού – Ολοκληρωτικού Ελέγχου (Parageorgiou, 1991), η καταστατική εξίσωση (5.20) αυξάνεται με την χρήση ολοκληρωτών και γίνεται:

$$y(k+1) = y(k) + Hx(k) \quad (5.26)$$

όπου $y \in R^m$, το διάνυσμα των ολοκληρωτών και $H \in R^{m \times n}$ πίνακας που αποτελείται από 0 και 1 έτσι ώστε ένας αριθμός στοιχείων ή γραμμικός συνδυασμός στοιχείων του διανύσματος x να ολοκληρώνεται στην (5.26). Στην παρούσα εφαρμογή κάθε στοιχείο του y αντιστοιχεί στην κάθε μεταβλητή ελέγχου $g_{j,i}$ και τα στοιχεία του πίνακα H λαμβάνουν τιμές ανάλογα με τις μεταβλητές ελέγχου $g_{j,i}$ και τις μεταβλητές κατάστασης x_z σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$H(z, (j, i)) = \begin{cases} 0, & \text{if } i \notin v_z \\ 1, & \text{if } i \in v_z \end{cases} \quad (5.27)$$

Επιπλέον, το τετραγωνικό κριτήριο που διατυπώνει τον αντικειμενικό στόχο για τον έλεγχο της αστικής κυκλοφορίας επαυξάνεται και παίρνει την μορφή:

$$\mathfrak{J} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\|x(k)\|_Q^2 + \|y(k)\|_S^2 + \|\Delta g(k)\|_R^2 \right] \quad (5.28)$$

όπου S είναι ένας επιπλέον θετικά ημιορισμένος πίνακας βάρους. Ο πίνακας Q ορίζεται όπως και στο πρόβλημα του Γραμμικού-Τετραγωνικού Ελέγχου. Και σε αυτή τη περίπτωση η επιλογή των πινάκων βάρους R και S μπορεί να επηρεάσει το μέγεθος της αντίδρασης του ελέγχου. Για το λόγο αυτό, η επιλογή των πινάκων R και S πραγματοποιείται με μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος έτσι ώστε να επιτευχθεί μια ικανοποιητική συμπεριφορά ελέγχου για ένα δεδομένο δίκτυο.

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις (5.20), (5.26) και (5.28) προκύπτουν για το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου οι παρακάτω επαυξημένοι πίνακες:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ H & I \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{Q} = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & S \end{bmatrix}, \quad \tilde{R} = R, \quad (5.29)$$

όπου $\tilde{A} \in R^{(n+m) \times (n+m)}$, $\tilde{B} \in R^{(n+m) \times m}$, $\tilde{Q} \in R^{(n+m) \times (n+m)}$ και $\tilde{R} \in R^{m \times m}$.

Η ελαχιστοποίηση της (5.28) υπό τους περιορισμούς (5.20) και (5.26) οδηγεί στον ακόλουθο κανόνα ελέγχου:

$$\Delta g(k) = -\tilde{L} \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

όπου ο πίνακας ελέγχου $\tilde{L} \in R^{m \times (n+m)}$ υπολογίζεται ανάλογα με τον L από τις εξισώσεις πινάκων (5.23) και (5.24). Αντίστοιχα με τον πίνακα L και ο πίνακας \tilde{L} εξαρτάται από τους πίνακες του προβλήματος $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{Q}$ και \tilde{R} αλλά έχει μικρή ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων κυκλοφορίας (όπως ποσοστά στροφής, ροές κορεσμού κ.τ.λ.).

Αντικαθιστώντας τον πίνακα $\tilde{L} = [L_X \quad L_Y]$ στην (5.23) έχουμε:

$$\Delta g(k) = -L_X x(k) - L_Y y(k) \quad (5.31)$$

όπου οι πίνακες είναι $L_X \in R^{m \times n}$ και $L_Y \in R^{m \times m}$. Αντικαθιστώντας την (5.26) στην (5.31) λαμβάνουμε την:

$$\Delta g(k) = -L_X x(k) - L_Y y(k+1) + L_Y H x(k) \quad (5.32)$$

Η εξίσωση (5.32) για την περίοδο ελέγχου $k-1$ είναι:

$$\Delta g(k-1) = -L_X x(k-1) - L_Y y(k) + L_Y H x(k-1) \quad (5.33)$$

Αφαιρώντας την εξίσωση (5.33) από την (5.32) έχουμε:

$$g(k) = g(k-1) - L_X x(k) + (L_X - L_Y H) x(k-1) \quad (5.34)$$

Τέλος, κάνοντας τις αντικαταστάσεις $L_1 = L_X$ και $L_2 = L_X - L_Y H$ λαμβάνουμε τον κανόνα Γραμμικού – Τετραγωνικού – Ολοκληρωτικού Ελέγχου (LQI):

$$g(k) = g(k-1) - L_1 x(k) + L_2 x(k-1) \quad (5.35)$$

Παρατηρούμε ότι η εξίσωση (5.35) δεν περιέχει το διάνυσμα g^N με τις ονομαστικές τιμές των ενεργών πρασίνων.

5.4 Επέκταση του κανόνα ελέγχου LQI

Στην προηγούμενη παράγραφο καταλήξαμε στη σχέση (5.35), η οποία και αποτελεί τον κανόνα ελέγχου για τη στρατηγική LQI. Στην παράγραφο αυτή θα δώσουμε μια

εναλλακτική μορφή του κανόνα LQI, μεταβάλλοντας μια από τις παραμέτρους του. Η σχέση (5.34) της προηγούμενης σελίδας μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$g(k) = g(k-1) - L_x [x(k) - x(k-1)] - L_y Hx(k-1) \quad (5.36)$$

Στη σχέση (5.36) παρατηρούμε πως ο πίνακας L_x πολλαπλασιάζεται με τη διαφορά $x(k) - x(k-1)$, ενώ ο πίνακας L_y με το διάνυσμα $x(k-1)$. Αν υποθέσουμε ότι $x_z^N \neq 0$, όπου x_z^N είναι ορισμένες ονομαστικές τιμές του x_z , και θέσουμε $x_z^N = ax_{z,\max}$ θεωρώντας ότι στους συνδέσμους υπάρχει κάποια κίνηση και η οποία είναι τουλάχιστον ίση με τη ροή της κυκλοφορίας, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω σχέση:

$$g(k) = g(k-1) - L_x [x(k) - x(k-1)] - L_y H[x(k-1) - ax_{\max}(k)] \quad (5.37)$$

όπου a είναι μια σταθερά με τιμές από 0 έως 1 και x_{\max} είναι η μέγιστη ζήτηση (demand) που μπορεί να έχει ένας σύνδεσμος, δηλαδή η χωρητικότητά του. Οπότε το στοιχείο $x_{\max}(k)$ είναι ίσο με τη χωρητικότητα (capacity) του k-οστού συνδέσμου. Η χωρητικότητα για κάθε σύνδεσμο υπολογίζεται από τον εξής απλό τύπο:

$$capacity = \frac{\text{αριθμός λωρίδων} \times \text{μήκος}}{5m} \quad (5.38)$$

στη σχέση αυτή θεωρούμε ότι ένα αυτοκίνητο (μαζί με τις αποστάσεις) έχει μήκος 5m.

Έτσι έχουμε καταλήξει στη σχέση (5.37) η οποία χρησιμοποιείται στο Κεφάλαιο 7 σαν ένας εναλλακτικός κανόνας ελέγχου της στρατηγικής LQI. Στις προσομοιώσεις που έγιναν με αυτόν τον κανόνα ελέγχου, η τιμή της σταθεράς a επιλέχθηκε (μέσω της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος) να έχει την τιμή 0.2. Βασικό πλεονέκτημα του κανόνα αυτού είναι ότι στους υπολογισμούς των χρόνων πρασίνου $g(k)$, λαμβάνει περισσότερο υπόψη του τους συνδέσμους που είναι φορτωμένοι σε ποσοστό μεγαλύτερο του 20% της συνολικής χωρητικότητάς τους. Ο κανόνας δηλαδή δεν δίνει σημαντικό βάρος στους συνδέσμους που έχουν κίνηση μικρότερη του $0.2x_{\max}(k)$.

5.5 Αλγόριθμος ικανοποίησης των περιορισμών

Τόσο η μεθοδολογία του Γραμμικού – Τετραγωνικού Ελέγχου όσο και η μεθοδολογία του Γραμμικού – Τετραγωνικού – Ολοκληρωτικού Ελέγχου δεν λαμβάνει υπόψη την

ύπαρξη των περιορισμών πέραν της καταστατικής εξίσωσης. Για το λόγο αυτό, αφού υπολογιστούν οι νέοι χρόνοι ενεργών πρασίνων από την (5.22) ή την (5.25) ή την (5.35) ένας κατάλληλος αλγόριθμος τροποποιεί την διάρκεια τους ώστε να ικανοποιούν τους περιορισμούς (5.1) - (5.3).

Ο αλγόριθμος επιλύει για κάθε κόμβο $j \in J$ το ακόλουθο πρόβλημα (Diakaki, 1999):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Δεδομένα } G_{j,i} \text{ που απορρέουν από (5.22) ή (5.25) ή (5.35) ή (5.37)} \\ \text{Υπολόγισε } g_{j,i} \forall i \in F_j \text{ τέτοια ώστε} \\ \varphi = \sum_{i \in F_j} \frac{(g_{j,i} - G_{j,i})^2}{G_{j,i}} \rightarrow \text{Min} \\ \text{υπό} \\ g_{j,i,\min} \leq g_{j,i} \leq g_{j,i,\max} \\ \sum_{i \in F_j} g_{j,i} = C_j - L_j \end{array} \right. \quad (5.39)$$

Το πρόβλημα αυτό βελτιστοποίησης, υπολογίζει τιμές των πρασίνων $G_{j,i}$ που να είναι πάρα πολύ κοντά (με την τετραγωνική έννοια) στις τιμές των πρασίνων $g_{j,i}$ που υπολογίζονται από τον εφαρμοζόμενο κάθε φορά κανόνα ελέγχου ικανοποιώντας ταυτόχρονα όλους τους περιορισμούς.

Για κάθε κόμβο $j \in J$ ξεχωριστά εκτελούνται τα ακόλουθα βήματα για την επίλυση του προβλήματος:

1. Θέτω $B = C_j - L_j$ και $H = F_j$, όπου B και H είναι βοηθητικές μεταβλητές.
2. Υπολογίζω $A = B / \sum_{i \in H} G_{j,i}$, όπου A είναι βοηθητική μεταβλητή.
3. Υπολογίζω $g_{j,i} = G_{j,i} A$, $\forall i \in H$.
4. Ορίζω τα βοηθητικά σύνολα $P = \{i \in H : g_{j,i} > g_{j,i,\max}\}$ και $N = \{i \in H : g_{j,i} < g_{j,i,\min}\}$.
5. Αν $(P \cup N = \emptyset)$, STOP έχοντας βέλτιστη λύση.
6. Υπολογίζω τις βοηθητικές μεταβλητές $D = \sum_{i \in P} (g_{j,i} - g_{j,i,\max})$ και $d = \sum (g_{j,i,\min} - g_{j,i})$.

$$7. \text{ Av } (D \geq d) \text{ θέτω } \left\{ \begin{array}{l} g_{j,i} = g_{j,i,\max}, \forall i \in P \\ H := H - P \\ B := B - \sum_{i \in P} g_{j,i,\max} \end{array} \right\}.$$

$$8. \text{ Av } (D \leq d) \text{ θέτω } \left\{ \begin{array}{l} g_{j,i} = g_{j,i,\min}, \forall i \in N \\ H := H - N \\ B := B - \sum_{i \in N} g_{j,i,\min} \end{array} \right\}.$$

9. Av $(D \neq d)$ και $H = \emptyset$, STOP: η αποδεκτή περιοχή είναι το \emptyset σύνολο.

10. Av $(D = d)$, STOP έχοντας βέλτιστη λύση, διαφορετικά πήγαινε στο βήμα 2.

6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ LQI ΣΤΟ ΟΔΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΧΑΝΙΩΝ

6.1 Περιγραφή του προβλήματος και του δικτύου

Για να εξετάσουμε την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής ελέγχου LQI, 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 απαριθμεί 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.

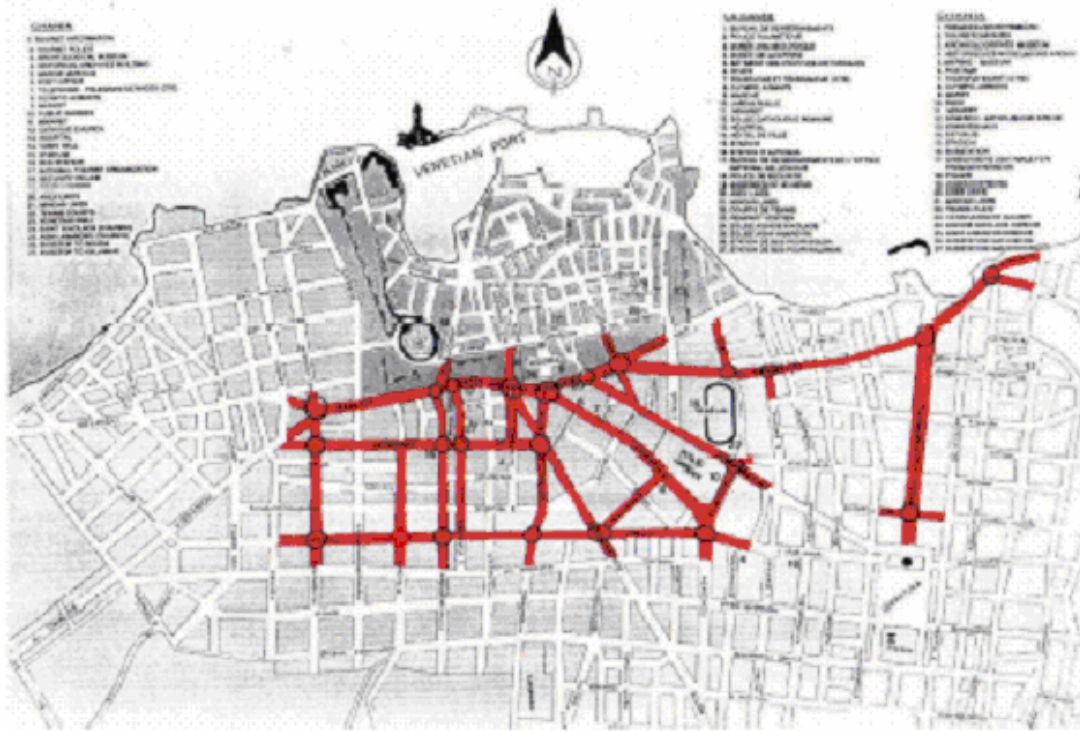
Η SIEMENS GREECE (SAE) έχει καταφέρει την επιτυχή εφαρμογή της στρατηγικής TUC τμήματα του δικτύου των Χανίων. Αυτή η εφαρμογή λειτουργεί από τον Ιούνιο του 2001 παράλληλα με το υπάρχον UTC σύστημα και λόγω των καλών αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της στρατηγικής 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.

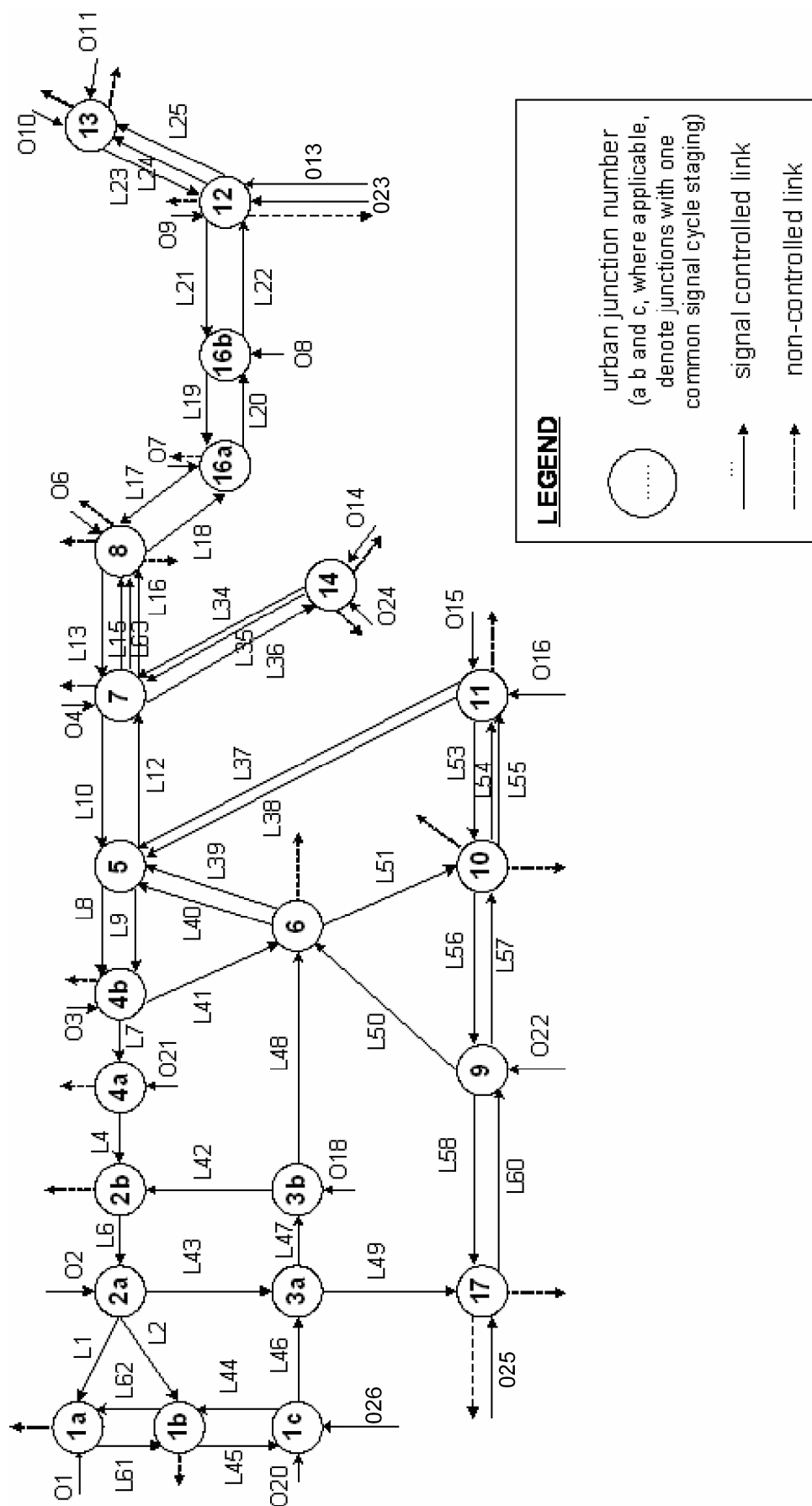


Σχήμα 6-1: Το αστικό δίκτυο των Χανίων

6.2 Χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας στα Χανιά

Οι κόμβοι κυκλοφορίας στους οποίους πρόκειται να εφαρμοστεί η στρατηγική LQI 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



Σχήμα 6-2: Σχηματικός χάρτης του δικτύου των Χανίων

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.

6.3 Εφαρμογή της στρατηγικής LQI στο δίκτυο των Χανίων

Στην παρούσα εργασία η εφαρμογή της στρατηγικής LQI 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.

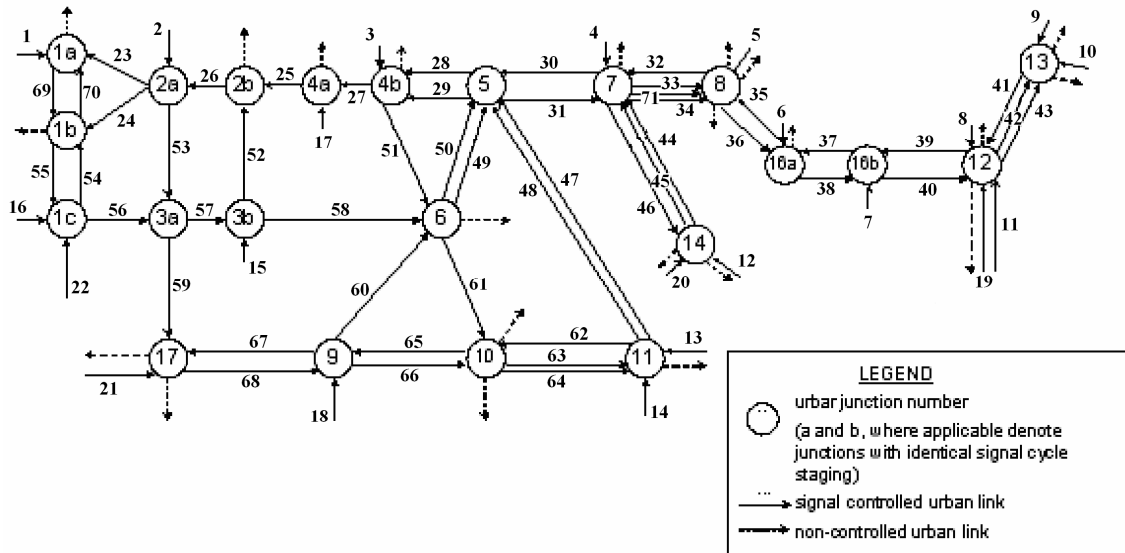
6.3.1 Απαιτούμενα δεδομένα

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:



Σχήμα 6-3: Σχηματική αναπαράσταση του TUC μοντέλου ελέγχου του δικτύου

- 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.

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 συνδέσμων 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

		ID Σταδίου		
	Φάση	A	B	C
j1	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

		ID Σταδίου			
	Φάση	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	0	0	1		4	1	0		
	5	0	0	1		j14	1	1	0	
j6	1	1	0	0			2	1	0	
	2	0	1	0			3	0	1	
	3	0	0	1		j16	1	0	1	
j7	1	1	0	0			2	1	0	
	2	1	0	0			3	0	1	
	3	0	1	0			4	1	0	
	4	0	0	1			5	1	0	
	5	0	0	1		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	0.9	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	0.15	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	0.18	0.42	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	1	0	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)

6.3.3 Εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου στο υπό μελέτη δίκτυο

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

- οι πίνακες ελέγχου L_1 και L_2 ,
- οι περιορισμοί ελέγχου.

Για τον υπολογισμό των πινάκων L_1 και L_2 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.

Τέλος, όσο αναφορά τους περιορισμούς ελέγχου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6-2 δεν ορίζονται άνω όρια για τους ενεργούς χρόνους πρασίνων. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται κατάλληλος αλγόριθμος που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 5.5 και τροποποιεί τους ενεργούς χρόνους πρασίνων.

6.4 Η εναλλακτική προσέγγιση stage/link

Όπως είδαμε και στον Πίνακα 6-2 οι 71 σύνδεσμοι (links) του δικτύου των Χανίων έχουν χωριστεί συνολικά σε 42 στάδια (stages). Τα στοιχεία αυτά του πίνακα προέρχονται από τις αρχές που είναι υπεύθυνες για το δίκτυο των Χανίων και ο διαχωρισμός των σταδίων έχει γίνει βάσει του δικαιώματος κυκλοφορίας (r.o.w.) που έχουν οι σύνδεσμοι. Οπότε ο κανόνας ελέγχου που εφαρμόζεται κάθε φορά για τον υπολογισμό των ενεργών χρόνων πρασίνων (ένας εκ των (5.22), (5.25), (5.35) και (5.37)), δίνει σαν αποτέλεσμα 42 χρόνους (έναν για κάθε στάδιο). Οι χρόνοι αυτοί αφού περάσουν από τους περιορισμούς εφαρμόζονται τελικά στο δίκτυο.

Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι να αντιστοιχίσουμε κάθε σύνδεσμο του δικτύου σε ένα στάδιο και να έχουμε συνολικά 71 συνδέσμους και 71 στάδια. Τότε ο κανόνας ελέγχου θα έχει 71 ενεργούς χρόνους πρασίνου, ενώ ο πίνακας ελέγχου L (της LQ) θα έχει διαστάσεις 71×71 (αντί για 42×71 που είχε στην αρχική προσέγγιση). Η προσέγγιση αυτή που ονομάζεται stage/link έχει εφαρμοστεί σε κάποιες από τις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο και λειτουργεί ως εξής:

1. Ορίζουμε έναν ενεργό χρόνο πρασίνου για κάθε σύνδεσμο (G_1, G_2, \dots, G_{71}).
2. Αν κάποιος σύνδεσμος παίρνει πράσινο (r.o.w.) σε περισσότερα από 1 στάδια τότε

επιλέγεται ένα από αυτά τα στάδια. Στην προσέγγιση stage/link ο συγκεκριμένος σύνδεσμος θα πάρει r.o.w. μόνο σε αυτό το στάδιο (θα πάρει όλο τον ενεργό χρόνο πρασίνου σε ένα στάδιο). Η επιλογή γίνεται ανάλογα με το ποιο είναι το κύριο στάδιο του συνδέσμου.

3. Υπολογίζουμε τους ενεργούς χρόνους πρασίνου για όλους τους συνδέσμους του 1^{ου} σταδίου του 1^{ου} κόμβου (G_1, G_2, \dots, G_n) (μέσω του κανόνα ελέγχου).
4. Για τους συνδέσμους που παίρνουν πράσινο σε περισσότερα από ένα στάδια ισχύει $G_i = G_i - G_0$, όπου G_i ο χρόνος πρασίνου για το κύριο στάδιο και G_0 το άθροισμα όλων των χρόνων πρασίνου για τα υπόλοιπα στάδια που ο σύνδεσμος έχει r.o.w..
5. Θέτουμε $g_1 = \max\{G_1, G_2, \dots, G_n\}$.
6. Εφαρμόζουμε τον ενεργό χρόνο πρασίνου g_1 σε όλους τους συνδέσμους του 1^{ου} σταδίου (αφού πρώτα περάσει από τους περιορισμούς).
7. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 3, 4, 5 για όλα τα στάδια του κόμβου.
8. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 3, 4, 5 για όλους τους κόμβους του δικτύου.

Η εναλλακτική αυτή προσέγγιση της εφαρμογής του εκάστοτε κανόνα ελέγχου, έχει σαν στόχο την εφαρμογή του μέγιστου χρόνου ενεργού πρασίνου που χρειάζεται κάποιος σύνδεσμος σε όλους τους συνδέσμους που ανήκουν στο ίδιο στάδιο με αυτόν. Απώτερος σκοπός είναι να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή αποσυμφόρηση των συνδέσμων του δικτύου.

6.5 Επιλογή των πινάκων βάρους

Ο αυξημένος πίνακας ελέγχου \tilde{L} έχει πολλά μη μηδενικά στοιχεία (δες Παράρτημα), πράγμα που σημαίνει πως στην αντίδραση του ελέγχου LQI έχουν επίδραση ακόμα και οι απομακρυσμένοι σύνδεσμοι του δικτύου, σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό. Συνεπώς, οι αποφάσεις ελέγχου σε κάθε κόμβο εξαρτώνται από τις κυκλοφοριακές συνθήκες που επικρατούν στο σύνολο σχεδόν των συνδέσμων του δικτύου.

Ένα σημαντικό ερευνητικό κομμάτι της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η επιλογή των πινάκων βάρους, μέσω των οποίων υπολογίζονται πίνακες ελέγχου για τον έλεγχο LQI που εφαρμόζει η στρατηγική μας. Με δεδομένους τους πίνακες βάρους R και S υπολογίζεται ο αυξημένος πίνακας ελέγχου \tilde{L} ο οποίος μέσω των πινάκων L_1 και L_2 επιδρά στην (5.35).

Ο αυξημένος πίνακας ελέγχου διαιρείται σε δυο υποπίνακες (δες Παράγραφο 5.3), τον πίνακα L_x που αντιστοιχεί στις μεταβλητές κατάστασης x και τον L_y που αντιστοιχεί στους ολοκληρωτές y . Μέσω αυτών των πινάκων ελέγχου, τα στοιχεία του διανύσματος x επηρεάζουν είτε σε μικρό είτε σε μεγάλο βαθμό τις αποφάσεις του ελέγχου. Η ένταση της επίδρασης εξαρτάται όχι μόνο από τις τιμές του x , αλλά επίσης και από τα αντίστοιχα στοιχεία των πινάκων ελέγχου που προσδίδουν στις τιμές του x κάποιο βάρος. Η επιλογή των κατάλληλων πινάκων βάρους είναι επομένως πολύ σημαντική, καθώς επηρεάζει αρκετά τα αποτελέσματα της στρατηγικής ελέγχου. Ένας από τους σκοπούς των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7 είναι να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τιμές για τους πίνακες βάρους R και S της στρατηγικής LQI για το συγκεκριμένο δίκτυο (καθώς διαφέρουν ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε δικτύου). Οι πίνακες αυτοί είναι διαγώνιοι και ουσιαστικά τα νούμερα που αναζητούμε για τις μεταβλητές r και s αποτελούν τα διαγώνια στοιχεία των πινάκων βάρους R και S .

6.6 Αρχεία εισόδου για το πρόγραμμα προσομοίωσης METACOR

Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφονται περιληπτικά τα αρχεία εισόδου που απαιτούνται στο μοντέλο προσομοίωσης METACOR για την εκτέλεση της στρατηγικής TUC στο δίκτυο των Χανίων.

6.6.1 Αρχείο Περιγραφής Δικτύου (Network Description File - NWD)

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει την περιγραφή του δικτύου. Αρχικά γίνεται λεπτομερής παράθεση όλων των συνδέσμων, των συνδέσμων εισόδου και των συνδέσμων εξόδου με το μήκος τους, τον αριθμό λωρίδων κυκλοφορίας και τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα. Στη συνέχεια ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή όλων των διασταυρώσεων με τις συντεταγμένες τους, τη διάρκεια της περιόδου, τον αριθμό των φάσεων, τις επιτρεπόμενες μεταβάσεις και την ταχύτητα και το μήκος αυτών.

6.6.2 Αρχείο Ποσοστών Στροφής (Turning Rates File – TRN)

Στο αρχείο αυτό και για κάθε διασταύρωση ξεχωριστά, περιγράφονται τα ποσοστά

στροφής από τους συνδέσμους εισόδου της διασταύρωσης (κατακόρυφη στήλη) προς τους συνδέσμους εξόδου της ίδιας διασταύρωσης (οριζόντια στήλη). Για κάθε διασταύρωση (junction) υπάρχει και ένας πίνακας στροφής. Όλα τα νούμερα του πίνακα αυτού είναι από 0 έως 1, καθώς πρόκειται για ποσοστά.

6.6.3 Αρχείο Περιγραφής Διασταυρώσεων (Junction Description File – JDF)

Στο αρχείο αυτό γίνεται περιγραφή των διασταυρώσεων με αναλυτική παράθεση δεδομένων όπως του αριθμού των σταδίων, του αριθμού των φάσεων, της διάρκειας πρασίνου και των νεκρών χρόνων κάθε φάσης, καθώς και των σταδίων που περιλαμβάνονται σε κάθε φάση. Στις διασταυρώσεις περιλαμβάνονται και οι διαβάσεις, δηλαδή διασταυρώσεις με σηματοδότηση για αποκλειστική διάβαση πεζών.

6.6.4 Αρχείο Θέσης Φωρατών (Detector Location File – DET)

Το αρχείο αυτό περιέχει όλες τις πληροφορίες όσον αφορά τη θέση των φωρατών δηλαδή σε ποιο σύνδεσμο περιέχονται και σε ποια απόσταση από την έναρξη της διασταύρωσης. Η παράθεση γίνεται με τη σειρά για κάθε σύνδεσμο του δικτύου ξεχωριστά, αλλά και με τη σειρά που έχουν αριθμηθεί οι φωρατές σε άλλα αρχεία όπως αυτό της περιγραφής της στρατηγικής TUC που ακολουθεί στη συνέχεια.

6.6.5 Αρχείο Περιγραφής της στρατηγικής TUC (TUC Description File – TUC)

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει όλες τις σημαντικές πληροφορίες για την εφαρμογή της στρατηγικής TUC σε όλες τις διασταυρώσεις. Εδώ περιλαμβάνονται στοιχεία όπως :

- Αριθμός κόμβων, συνολικός αριθμός σταδίων, ελάχιστη και μέγιστη περίοδος, τι έλεγχος πραγματοποιείται (διάρκειας φάσεων, διάρκειας περιόδου, χρονικής διαφοράς ή παροχής προτεραιότητας και συνδυασμός αυτών).
- Μήκος, αριθμός λωρίδων, χωρητικότητα, μέγιστη ταχύτητα, αύξων αριθμός φωρατή, απόσταση φωρατή από την αρχή της διασταύρωσης, ποσοστό στροφής για την περίπτωση όπου ο φωρατής μετράει την κατάληψη ενός συνδέσμου ο οποίος στη συνέχεια διαχωρίζεται σε περισσότερους.
- Αρτηρίες, διασταυρώσεις αρτηριών, σύνδεσμοι αρτηριών.

6.6.6 Αρχείο Σύνδεσης Διασταυρώσεων μεταξύ METACOR και TUC (Connection of Metacor and TUC Junctions File – JTUC)

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει τη σύνδεση μεταξύ των διασταυρώσεων του μοντέλου προσομοίωσης METACOR και της στρατηγικής ελέγχου TUC. Πιο συγκεκριμένα δίνει τη σύνδεση μεταξύ των διασταυρώσεων του μοντέλου προσομοίωσης (πρώτη στήλη) και της στρατηγικής (δεύτερη στήλη) και των φάσεων αυτών.

6.6.7 Αρχείο Ζήτησης (Locations / Demands File – MSD)

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει στοιχεία όσον αφορά τη ζήτηση για τους συνδέσμους εισόδου στο δίκτυο (origins). Η μορφή του είναι ένας πίνακας του οποίου οι στήλες είναι η ζήτηση σε οχήματα για κάθε σύνδεσμο εισόδου ξεχωριστά και οι γραμμές αντιστοιχούν σε διακριτές χρονικές στιγμές. Για το δίκτυο των Χανίων έχουν δημιουργηθεί δύο διαφορετικά αρχεία ζήτησης:

- **Σενάριο 1:** Το network1.msd έχει ζήτηση μειωμένη κατά 10% σε σχέση με το network2.msd σχεδόν σε όλους τους συνδέσμους εισόδου του δικτύου (origins). Παρουσιάζει κάποιες ουρές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, αλλά μηδενικές ουρές τόσο στους εσωτερικούς συνδέσμους του δικτύου όσο και στους συνδέσμους εισόδου στο τέλος αυτής.
- **Σενάριο 2:** Το network2.msd είναι αρκετά επιβαρυνόμενο και παρουσιάζει αυξημένη ζήτηση, με σημαντικές ουρές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και μηδενικές ουρές στις εισόδους του δικτύου (origins) στο τέλος αυτής.

Οι πίνακες 6.5 και 6.6 της επόμενης σελίδας δείχνουν αναλυτικά για κάθε είσοδο του δικτύου και για κάθε χρονική περίοδο τον αριθμό των οχημάτων/ώρα και ανά λωρίδα που επιλέξαμε σαν ζήτηση για τα δυο διαφορετικά σενάρια.

6.6.8 Αρχείο Σταδίων (Stages File – STG)

Το αρχείο αυτό αφορά την εναλλακτική προσέγγιση stage/link που περιγράφηκε στην Παράγραφο 6.4. Η προσέγγιση αυτή έχει 71 στάδια (ένα για κάθε σύνδεσμο του δικτύου), και στο αρχείο αυτό καθορίζεται η σχέση που έχουν τα στάδια αυτά με τα 42

στάδια της αρχικής προσέγγισης, προκειμένου να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος της προσέγγισης stage/link (Παράγραφος 6.4).

6.6.9 Αρχείο Ελέγχου (Control File – CTR)

Το τελευταίο αυτό αρχείο περιλαμβάνει σημαντικές πληροφορίες για τυχόν ατυχήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη, καθώς και το χρόνο έναρξης, το χρόνο λήξης και τη σοβαρότητα αυτών.

Όλα αυτά τα αρχεία είναι τα απαιτούμενα αρχεία εισόδου (μαζί με τους πίνακες ελέγχου της εφαρμοζόμενης στρατηγικής) που χρειάζονται από το METACOR προκειμένου να εκτελεστούν οι προσομοιώσεις και να εξαχθούν τα αρχεία των αποτελεσμάτων.

	O1	O2	O3	O4	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O13	O14	O15	O16	O18	O20	O21	O22	O23	O24	O25	O26
8:00	315	50	39	109	90	180	38	72	198	270	79	427	142	225	30	225	148	129	30	124	279	45
8:15	333	59	52	119	99	189	58	90	225	279	99	466	180	237	40	234	167	145	40	144	289	54
8:30	342	79	57	129	108	198	77	99	218	324	119	545	198	275	56	243	207	149	50	180	299	63
8:45	360	89	60	149	117	207	87	108	275	333	149	555	207	305	40	252	247	168	59	225	320	72
9:00	369	91	68	158	126	216	97	117	295	342	158	545	225	320	89	261	257	175	67	253	347	81
9:15	378	99	78	168	144	225	97	126	297	369	238	536	270	256	95	270	247	188	69	270	333	90
9:30	387	103	78	158	135	234	87	135	360	378	277	526	252	234	69	315	237	194	79	225	323	104
9:45	378	115	68	149	126	225	77	108	315	369	356	486	216	224	59	333	227	198	89	198	297	112
10:00	360	119	59	142	120	216	74	99	306	315	257	456	198	198	50	315	217	194	79	180	278	90
10:15	351	122	52	139	101	198	68	90	252	270	198	417	180	180	46	288	207	188	59	162	277	72
10:30	342	122	49	132	91	180	68	81	180	225	178	387	178	135	40	279	187	178	50	153	257	63
10:45	333	99	47	119	81	162	58	72	135	207	158	377	168	90	30	225	167	168	30	144	218	54
11:00	270	79	44	111	63	135	58	63	90	180	139	357	119	77	30	225	158	165	20	140	207	59
11:15	180	69	32	109	61	126	39	54	72	153	119	347	99	49	20	135	148	152	10	130	180	45
11:30	162	59	21	99	45	90	32	36	63	135	99	338	59	28	16	90	128	139	9	117	81	44
11:45	117	40	20	89	36	63	29	27	36	90	59	238	50	21	14	54	118	135	8	90	45	41
12:00	72	23	5	79	20	45	20	7	27	72	40	198	30	20	10	45	13	129	4	79	30	40

Πίνακας 6-5: Ζήτηση (σε οχήματα/ώρα/λωρίδα) στις εισόδους του δικτύου για το σενάριο 1

	O1	O2	O3	O4	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O13	O14	O15	O16	O18	O20	O21	O22	O23	O24	O25	O26
8:00	350	55	43	121	100	200	42	80	220	300	88	474	158	250	33	250	164	143	33	138	310	50
8:15	370	66	58	132	110	210	64	100	250	310	110	518	200	263	44	260	186	161	44	160	321	60
8:30	380	88	63	143	120	220	86	110	242	360	132	606	220	306	62	270	230	165	55	200	332	70
8:45	400	99	67	165	130	230	97	120	305	370	165	617	230	339	44	280	274	187	66	250	355	80
9:00	410	101	76	176	140	240	108	130	328	380	176	606	250	356	99	290	285	194	74	281	386	90
9:15	420	110	87	187	160	250	108	140	330	410	264	595	300	284	106	300	274	209	77	300	370	100
9:30	430	114	87	176	150	260	97	150	400	420	308	584	280	260	77	350	263	216	88	250	359	115
9:45	420	128	76	165	140	250	86	120	350	410	396	540	240	249	66	370	252	220	99	220	330	124
10:00	400	132	65	158	133	240	82	110	340	350	286	507	220	220	55	350	241	216	88	200	309	100
10:15	390	136	58	154	112	220	75	100	280	300	220	463	200	200	51	320	230	209	66	180	308	80
10:30	380	136	54	147	101	200	75	90	200	250	198	430	198	150	44	310	208	198	55	170	286	70
10:45	370	110	52	132	90	180	64	80	150	230	176	419	187	100	33	250	186	187	33	160	242	60
11:00	300	88	49	123	70	150	64	70	100	200	154	397	132	85	33	250	175	183	22	155	230	65
11:15	200	77	35	121	68	140	43	60	80	170	132	386	110	54	22	150	164	169	11	144	200	50
11:30	180	66	23	110	50	100	36	40	70	150	110	375	66	31	18	100	142	154	10	130	90	49
11:45	130	44	22	99	40	70	32	30	40	100	66	264	55	23	15	60	131	150	9	100	50	45
12:00	80	26	6	88	22	50	22	8	30	80	44	220	33	22	11	50	14	143	4	88	33	44

Πίνακας 6-6: Ζήτηση (σε οχήματα/ώρα/λωρίδα) στις εισόδους του δικτύου για το σενάριο 2

7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αξιολόγηση του Γραμμικού–Τετραγωνικού–Ολοκληρωτικού Ελέγχου της στρατηγικής TUC μέσω της εκτέλεσης προσομοιώσεων για τον έλεγχο της διάρκειας των φάσεων. Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται τα δυο σενάρια ζήτησης που αναλύθηκαν στην Παράγραφο 6.6.7 και γίνονται συγκρίσεις με τη σηματοδότηση σταθερού χρόνου (Fixed-time Signal Control) αλλά και με αυτή του Γραμμικού–Τετραγωνικού Ελέγχου. Επειδή οι προσομοιώσεις που απαιτούνται (μη γνωρίζοντας τους συντελεστές των βαρών r και s) είναι πάρα πολλές σαν αρχικό κριτήριο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων επιλέγεται ο συνολικός χρόνος παραμονής στο δίκτυο (Total Time Spent). Περαιτέρω, για τις προσομοιώσεις που παρουσιάζουν τα καλύτερα αποτελέσματα TTS εξετάζονται και άλλα κριτήρια τα οποία είναι:

- Συνολικός χρόνος αναμονής (οχήματα*ώρες)
- Συνολικός χρόνος ταξιδιού (οχήματα*ώρες)
- Συνολικός χρόνος (οχήματα*ώρες)
- Συνολική κατανάλωση καυσίμου (οχήματα*λίτρα)
- Συνολική διανυθείσα απόσταση (οχήματα*χιλιόμετρα)
- Συνολικές ουρές στο τέλος της προσομοίωσης (οχήματα)

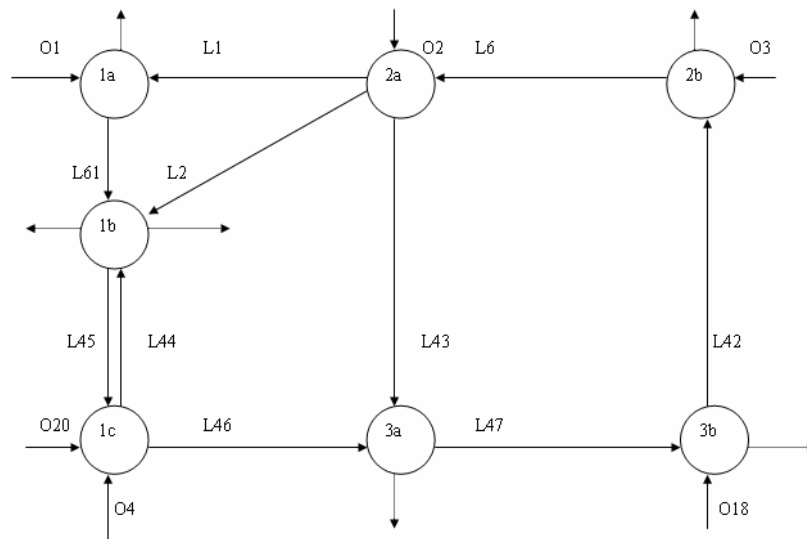
Οι διερευνήσεις που λαμβάνουν χώρα στο υπό μελέτη δίκτυο βασίζονται σε προσομοίωση 4 ωρών πραγματικού χρόνου (από 8:00 π.μ. έως 12:00 π.μ.) με βήμα προσομοίωσης 2 sec, ενώ τα επίπεδα ελέγχου που εξετάζονται είναι οι σταθερές τιμές και η διάρκεια των φάσεων. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι κατά την προσομοίωση δεν χρησιμοποιούνται πληροφορίες προέλευσης–προορισμών και η προσομοίωση βασίζεται στα ποσοστά στροφής στους κόμβους του δικτύου, τα οποία θεωρούνται σταθερά.

Όπως έχει αναφερθεί στις Παραγράφους 5.2 και 5.3 η συμπεριφορά των κανόνων ελέγχου (5.22), (5.35) και (5.37) εξαρτάται από τις τιμές των διαγώνιων στοιχείων των πινάκων R στην περίπτωση του (5.22) και R και S για τους κανόνες (5.35) και (5.37). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό αφορούν και τους τρεις κανόνες ελέγχου και έτσι είναι συνάρτηση του r για τον

κανόνα ελέγχου LQ και των r , s για τον LQI ((5.35) ή (5.37)).

7.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για το μικρό δίκτυο

Η μέθοδος LQI εφαρμόστηκε αρχικά σε ένα μικρότερο δίκτυο (ένα κομμάτι του συνολικού δικτύου) προκειμένου να διερευνηθεί η σωστή λειτουργία της και η αποτελεσματικότητά της. Η μελέτη του υποδικτύου αυτού ήταν πολύ πιο εύκολη καθώς δεν ήταν καθόλου πολύπλοκο και αν τα αποτελέσματα παρουσίαζαν κάποιο σφάλμα θα μπορούσαν να διερευνηθούν ευκολότερα από αυτά ολόκληρου του δικτύου. Το μικρό αυτό δίκτυο αποτελείται από τους κόμβους 1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 3a και 3b του συνολικού δικτύου (Σχήμα 6-2) και φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 7-1: Σχηματικός χάρτης του μικρού δικτύου (υποδίκτυο του συνολικού)

Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 7 κόμβους, 16 συνολικά συνδέσμους (10 εσωτερικούς και 6 συνδέσμους εισόδου) και 7 στάδια.

7.2.1 Αποτελέσματα για τον κανόνα ελέγχου LQI

Για την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου LQI στο μικρό δίκτυο συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 36 πίνακες ελέγχου για την αρχική προσέγγιση (διαστάσεων 7×23) και 35 πίνακες ελέγχου για την τελική προσέγγιση stage/link (διαστάσεων 16×32), οι οποίοι αντιστοιχούν σε διάφορους συνδυασμούς $\text{diag}(R)$ και $\text{diag}(S)$. Οι προσομοιώσεις

στο υποδίκτυο αυτό (Σχήμα 7-1) εκτελέστηκαν μόνο για ένα σενάριο ζήτησης και τα αποτελέσματά τους για την αρχική προσέγγιση και για τους δύο κανόνες ελέγχου (5.35) και (5.37) φαίνονται στους παρακάτω Πίνακες 7-1 και 7-2:

Αρχική Προσέγγιση - (κανόνας 5.35)						
Συνολικός χρόνος στο δίκτυο (TTS) - (οχήματα*ώρες)						
	s					
r	0.01	0.001	0.0001	0.00001	0.000001	0.0000001
0.1	1483,2434	1424,8005	1332,0460	1281,2956	2549,8259	2549,8259
0.01	1444,5090	1400,8127	1453,7929	1398,2270	1496,0998	1496,0998
0.001	1411,8847	1402,7471	1338,7367	1351,9323	1375,6879	1375,6879
0.0001	1415,7512	1402,1143	1348,2881	1276,7118	1375,4894	1375,4894
0.00001	1416,5320	1401,9993	1347,4234	1275,5026	1374,2199	1374,2199
0.000001	1416,5320	1395,9685	1347,4234	1281,7809	1374,2196	1374,2196

Πίνακας 7-1: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου *LQI* με εφαρμογή του κανόνα (5.35) για διάφορους συνδυασμούς *r* και *s*.

Αρχική Προσέγγιση - (κανόνας 5.37)						
Συνολικός χρόνος στο δίκτυο (TTS) - (οχήματα*ώρες)						
	s					
r	0.01	0.001	0.0001	0.00001	0.000001	0.0000001
0.1	1172,0029	1160,8366	1151,3157	1166,1900	1187,4254	2549,8259
0.01	1117,7506	1135,1766	1134,0236	1203,5309	1300,0871	1496,0998
0.001	1189,2137	1109,2989	1152,1015	1183,0759	1357,1377	1375,6879
0.0001	1200,8379	1103,1644	1147,3711	1189,7095	1338,0680	1375,4894
0.00001	1202,5982	1101,3357	1148,8872	1189,1113	1298,7587	1374,2199
0.000001	1201,8291	1101,0563	1147,9704	1189,1373	1298,7649	1374,2196

Πίνακας 7-2: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου *LQI* με εφαρμογή του κανόνα (5.37) για διάφορους συνδυασμούς *r* και *s*.

Στους Πίνακες 7-3 και 7-4 της επόμενης σελίδας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν για το μικρό δίκτυο, για την εναλλακτική προσέγγιση stage/link που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 6.4 και για τους δύο κανόνες ελέγχου (5.35) και (5.37).

Τελική Προσέγγιση - stage/link - (κανόνας 5.35)					
Συνολικός χρόνος στο δίκτυο (TTS) - (οχήματα*ώρες)					
	s				
r	0.001	0.0001	0.00001	0.000001	0.0000001
1	1544,4183	1499,9465	1528,7449	1708,3945	2102,0994
0.1	1549,2941	1407,9236	1579,4201	1585,1094	1506,3539
0.01	14642,866	1430,9492	1729,7007	1994,9143	2234,8892
0.001	1633,5335	1615,6494	1605,8438	1818,8988	2170,7933
0.0001	2035,5386	1998,7850	1954,5970	2091,5789	2308,2239
0.00001	2103,1974	2063,4488	2044,9101	2101,0696	2235,6474
0.000001	2112,2462	2067,1908	2046,5961	2142,6860	2253,5080

Πίνακας 7-3: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου LQI με εφαρμογή του κανόνα (5.35) και την προσέγγιση stage/link για διάφορους συνδυασμούς r και s.

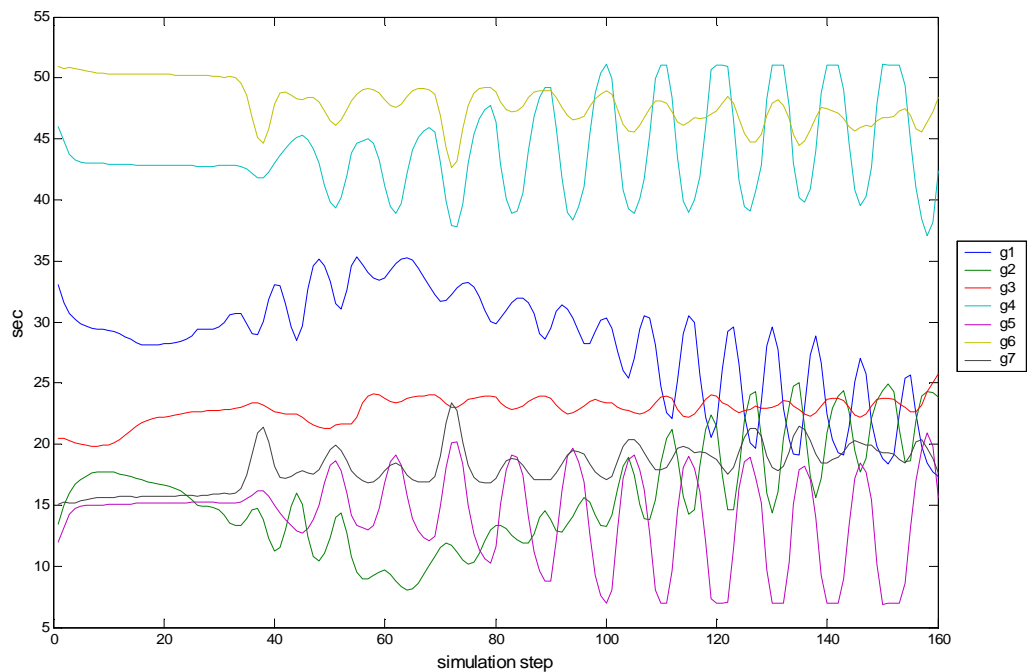
Τελική Προσέγγιση - stage/link - (κανόνας 5.37)					
Συνολικός χρόνος στο δίκτυο (TTS) - (οχήματα*ώρες)					
	s				
r	0.001	0.0001	0.00001	0.000001	0.0000001
1	1175,4102	1269,3247	1412,9645	1641,0073	2102,0994
0.1	1130,3309	1121,6664	1227,4011	1337,6427	1506,3539
0.01	1298,1683	1322,9216	1363,6735	1965,7838	2234,8892
0.001	1433,1854	1393,7981	1616,0234	2269,3875	2170,7933
0.0001	1492,7710	1506,4535	1409,2065	1971,4353	2308,2239
0.00001	1476,1702	1469,0091	1470,0094	2005,3919	2235,6474

Πίνακας 7-4: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου LQI με εφαρμογή του κανόνα (5.37) και την προσέγγιση stage/link για διάφορους συνδυασμούς r και s.

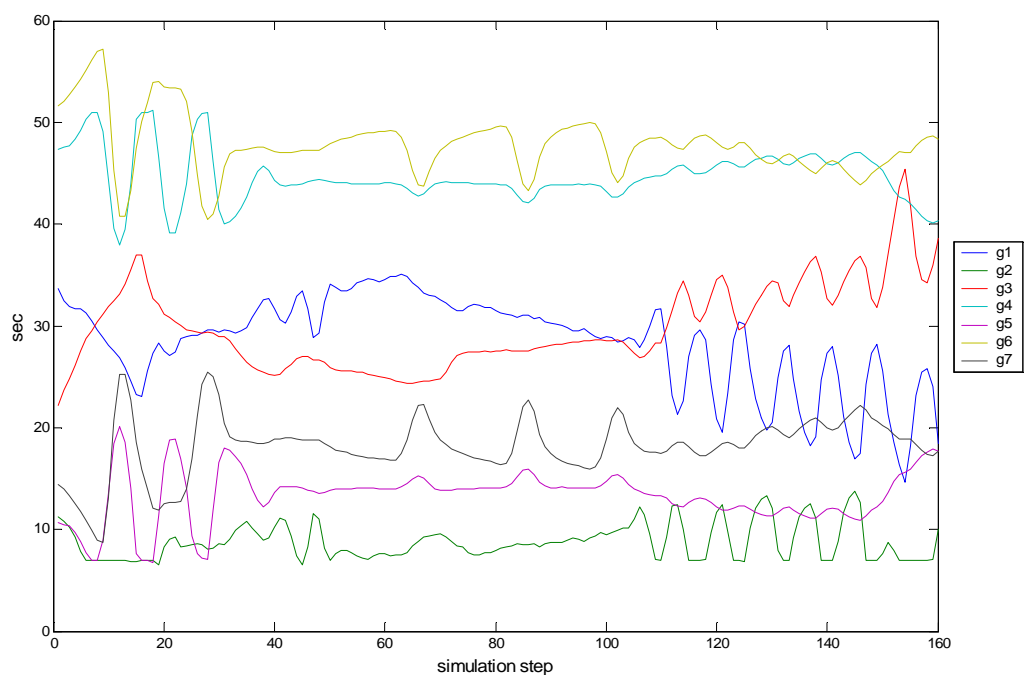
Προσομοίωση με το ελάχιστο TTS	Συνολικός Χρόνος Αναμονής (veh*h)	Συνολικός Χρόνος Ταξιδιού (veh*h)	Συνολικός Χρόνος (veh*h)	Συνολική Διανυθείσα Απόσταση (veh*km)	Συνολική Κατανάλωση Καυσίμων (veh*lt)	Συνολικές Ουρές στο τέλος (veh)
Πίνακας 7-1	663,8609	611,6417	1275,5026	8348,5230	2209,4325	0
Πίνακας 7-2	381,8660	719,1904	1101,0563	8377,5157	1910,3964	0
Πίνακας 7-3	823,3233	584,6003	1407,9236	8231,3939	2332,3654	183,9921
Πίνακας 7-4	522,4846	599,1818	1121,6664	8388,6974	2001,0305	0

Πίνακας 7-5: Κριτήρια απόδοσης για τις προσομοιώσεις με το βέλτιστο TTS

Για την προσομοίωση που παρουσιάζει τον ελάχιστο χρόνο TTS σε κάθε έναν από τους Πίνακες 7-1–7-4, παρατίθενται στον Πίνακα 7-5 της προηγούμενης σελίδας και τα υπόλοιπα κριτήρια απόδοσης που αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 7.1.

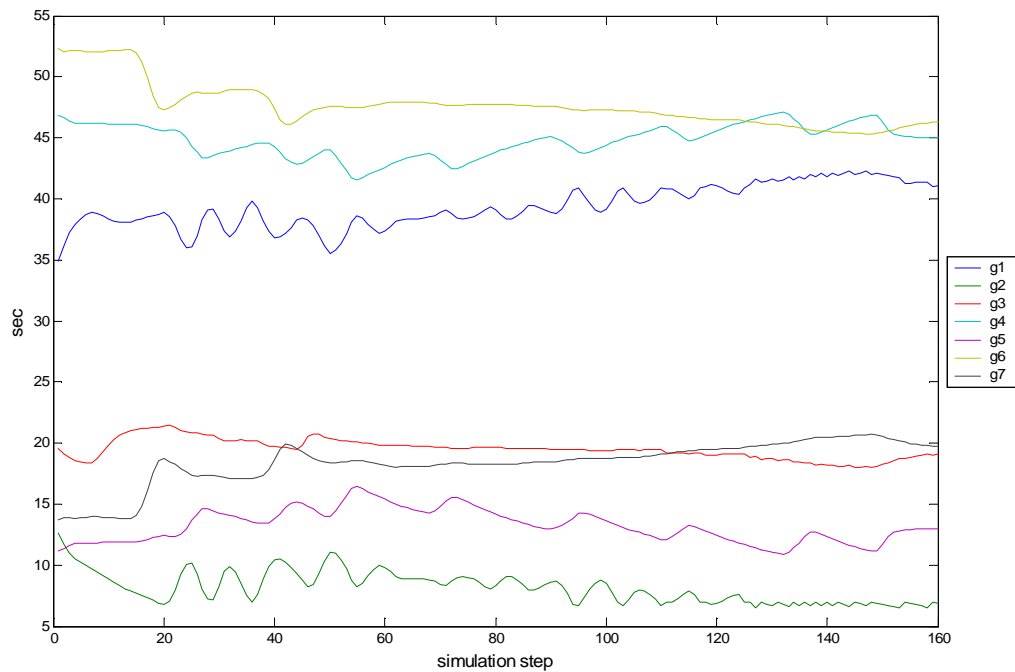


Σχήμα 7-2: Διακύμανση των ενεργών χρόνων πρασίνου (ελάχιστο TTS του Πίνακα 7-1)

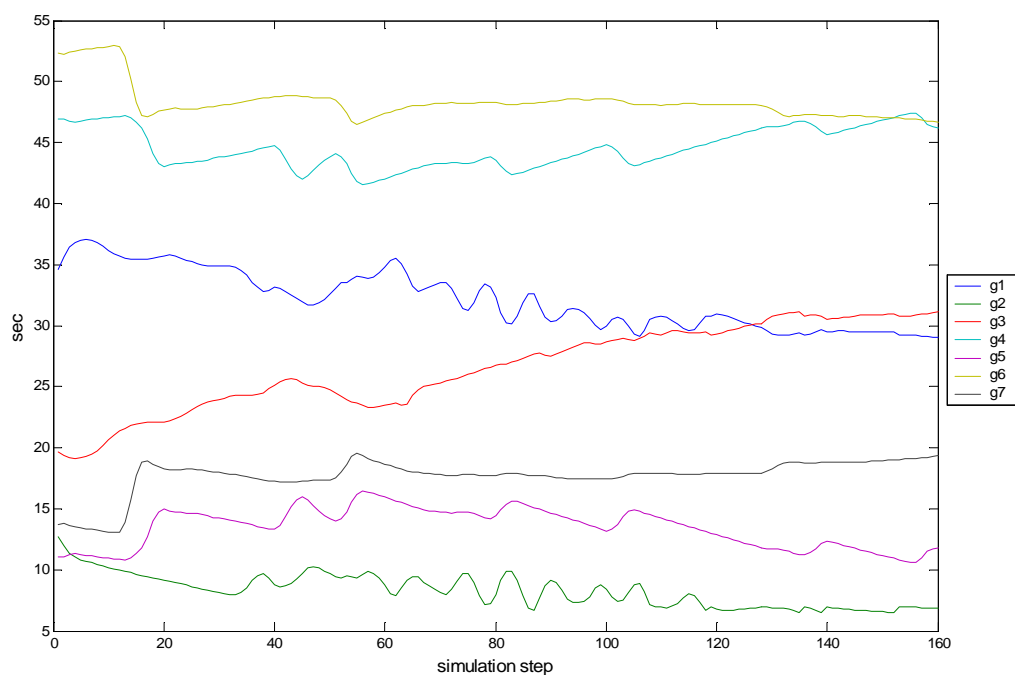


Σχήμα 7-3: Διακύμανση των ενεργών χρόνων πρασίνου (ελάχιστο TTS του Πίνακα 7-2)

Επίσης, για τις ίδιες προσομοιώσεις στα Σχήματα 7-2–7-5 φαίνεται η διακύμανση που έχουν οι ενεργοί χρόνοι πρασίνου και για τα 7 στάδια του δικτύου.



Σχήμα 7-4: Διακύμανση των ενεργών χρόνων πρασίνου (ελάχιστο TTS του Πίνακα 7-3)



Σχήμα 7-5: Διακύμανση των ενεργών χρόνων πρασίνου (ελάχιστο TTS του Πίνακα 7-4)

7.2.2 Αποτελέσματα για τον κανόνα ελέγχου LQ και για τα fixed-time σχέδια ελέγχου

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το μικρό δίκτυο από την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου LQ, δηλαδή της σχέσης (5.22) για δύο διαφορετικές ονομαστικές τιμές πρασίνων g^N και για τις δύο προσεγγίσεις είναι τα παρακάτω:

Γραμμικός-Τετραγωνικός Έλεγχος (LQ) - (κανόνας 5.22)		
TTS - (οχήματα*ώρες)		
r	Αρχική Προσέγγιση	Τελική Προσέγγιση (stage/link)
0.0001	1384,0006	1474,0816
0.001	1389,9523	1220,7966
0.01	1522,2977	1231,4413
0.06	2377,4636	1365,7166
0.08	2616,0800	1382,5607
0.1	2684,9217	1394,7474
0.9	3998,6500	2184,0839
5	4354,7838	3486,8877
10	4573,6635	4226,8808

Πίνακας 7-6: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου LQ με εφαρμογή του κανόνα (5.22) και με τις αρχικές ονομαστικές τιμές πρασίνου g^N .

Γραμμικός-Τετραγωνικός Έλεγχος (LQ) - (κανόνας 5.22)		
TTS - (οχήματα*ώρες)		
r	Αρχική Προσέγγιση	Τελική Προσέγγιση (stage/link)
0.0001	1099,3100	1714,7400
0.001	1085,1163	1432,0520
0.01	1049,0894	1106,4061
0.06	1049,2479	1132,8762
0.08	1049,5346	1136,0778
0.1	1049,0894	1145,4155
0.9	1090,0065	1171,9446
5	1097,0636	1175,6529
10	1099,2255	1196,8668

Πίνακας 7-7: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου LQ με εφαρμογή του κανόνα (5.22) και με τις βέλτιστες ονομαστικές τιμές πρασίνου g^N .

υπενθυμίζουμε εδώ ότι την εφαρμογή του κανόνα (5.22) την επηρεάζει μόνο ο διαγώνιος πίνακας βάρους R . Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι οι βέλτιστες ονομαστικές τιμές πρασίνου για τη στρατηγική LQ και για το συγκεκριμένο δίκτυο έχουν βρεθεί με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος.

Τέλος, στον Πίνακα 7-8 συνοψίζονται όλα τα κριτήρια αξιολόγησης τόσο για τις προσομοιώσεις των Πινάκων 7-6 και 7-7 με το μικρότερο TTS, όσο και για τα σχέδια ελέγχου σταθερού χρόνου για το μικρό δίκτυο:

Προσομοίωση με το ελάχιστο TTS	Συνολικός Χρόνος Αναμονής (veh*h)	Συνολικός Χρόνος Ταξιδιού (veh*h)	Συνολικός Χρόνος (veh*h)	Συνολική Διανυθείσα Απόσταση (veh*km)	Συνολική Κατανάλωση Καυσίμων (veh*lt)	Συνολικές Ουρές στο τέλος (veh)
Πίνακας 7-6 (αρχ. προσ.)	658,1035	725,8971	1384,0006	8234,2400	2202,7462	172,6741
Πίνακας 7-6 (stage/link)	626,0596	594,7370	1220,7966	8365,3396	2167,6348	23,5370
Πίνακας 7-7 (αρχ. προσ.)	372,4534	676,6359	1049,0894	8369,1474	1793,6020	0
Πίνακας 7-7 (stage/link)	527,4060	579,0001	1106,4061	8388,7792	1981,5888	0
Fixed-time (αρχικό gN)	4258,5120	718,8397	4977,3517	7225,1311	7864,3267	2111,1938
Fixed-time (βέλτιστο gN)	539,0229	636,9873	1176,0102	8354,5676	2007,8543	0

Πίνακας 7-8: Κριτήρια απόδοσης για τις προσομοιώσεις με το βέλτιστο TTS και για τα σχέδια ελέγχου σταθερού χρόνου.

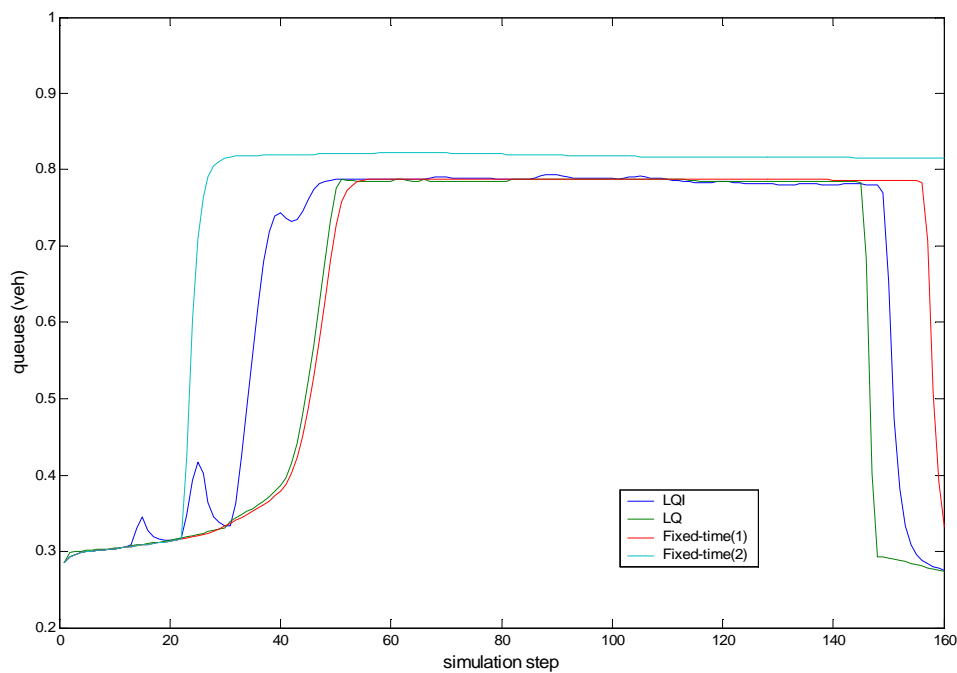
7.2.3 Συμπεράσματα από την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου LQI στο μικρό δίκτυο

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της στρατηγικής LQI στο μικρό αυτό δίκτυο, συγκρινόμενα με τα αποτελέσματα της στρατηγικής LQ και των fixed-time σχεδίων ελέγχου είναι τα ακόλουθα:

- Η στρατηγική ελέγχου LQI παρουσιάζει μικρή ευαισθησία στις παραμέτρους r και s που αφορούν τους πίνακες βάρους του ελέγχου. Αυτό φαίνεται από τους πίνακες των προσομοιώσεων της Παραγράφου 7.2.1 και ειδικότερα από τον Πίνακα 7-2.

Το ίδιο ισχύει και για την στρατηγική LQ, όσον αφορά τη μεταβολή της παραμέτρου r (Παράγραφος 7.2.2).

- Ο κανόνας ελέγχου (5.37) είναι αναμφισβήτητα αποδοτικότερος από τον κανόνα (5.35). Αυτό αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων που έγιναν για τη στρατηγική LQI, καθώς ο κανόνας (5.37) έχει καλύτερη αντίδραση στην αποσυμφόρηση του δικτύου (και για τις δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις και για τα διαφορετικά σενάρια κίνησης). Η παρατήρηση αυτή είναι λογική αφού ο κανόνας αυτός αντιδρά καλύτερα στις μεταβολές τις κίνησης.
- Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την προσέγγιση stage/link δεν είναι τόσο καλά όσο της αρχικής προσέγγισης (7stages/16links). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στον έλεγχο LQI και στον LQ. Επίσης, η ευαισθησία της στις παραμέτρους r και s είναι μεγαλύτερη συγκρινόμενη με την αρχική προσέγγιση.
- Η στρατηγική LQI λειτουργεί σωστά και δίνει αποτελέσματα παρόμοια με αυτά της στρατηγικής ελέγχου LQ. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα η LQI φαίνεται να είναι αποτελεσματικότερη.
- Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αν εφαρμοστούν στρατηγικές ελέγχου σταθερών χρόνων (fixed-time) είναι λογικό να είναι χειρότερα από αυτά των LQ και LQI, αφού δεν χρησιμοποιούν κανένα κανόνα ελέγχου. Είναι λογικό να δημιουργούν κυκλοφοριακή συμφόρηση στο δίκτυο καθώς δεν έχουν καμία ανάδραση. Στην περίπτωση δε που δεν εφαρμοστούν οι βέλτιστες ονομαστικές τιμές πρασίνου, μπορούν να οδηγήσουν σε καταστρεπτικά αποτελέσματα, δημιουργώντας τεράστιες ουρές στο δίκτυο (δες Σχήμα 7-6).
- Η μέθοδος LQ μπορεί να αποδώσει θετικά αποτελέσματα στον κυκλοφοριακό έλεγχο του δικτύου, με την προϋπόθεση βέβαια πως θα υπολογιστούν και θα εφαρμοστούν οι βέλτιστες ονομαστικές τιμές πρασίνου g^N . Σε περίπτωση που εφαρμοστούν άλλες ονομαστικές τιμές πρασίνου (μη βέλτιστες), η στρατηγική LQ αποδίδει και πάλι καλύτερα από τους fixed-time ελέγχους, αλλά κατά πολύ χειρότερα από τη στρατηγική ελέγχου LQI. Στην LQ λοιπόν, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας είναι οι ονομαστικές τιμές πρασίνου g^N που θα χρησιμοποιηθούν στον κανόνα (5.22) να είναι οι βέλτιστες. Μεταβάλλοντας άλλωστε κατά λίγο τις τιμές g^N (μόνο 2 sec, βλέπε Πίνακα 6.2), μπορούν να επηρεαστούν αρνητικά τα αποτελέσματα και να δημιουργηθεί σημαντική κυκλοφοριακή συμφόρηση στο δίκτυο (η διαφορά φαίνεται στους Πίνακες 7-6 και 7-7).



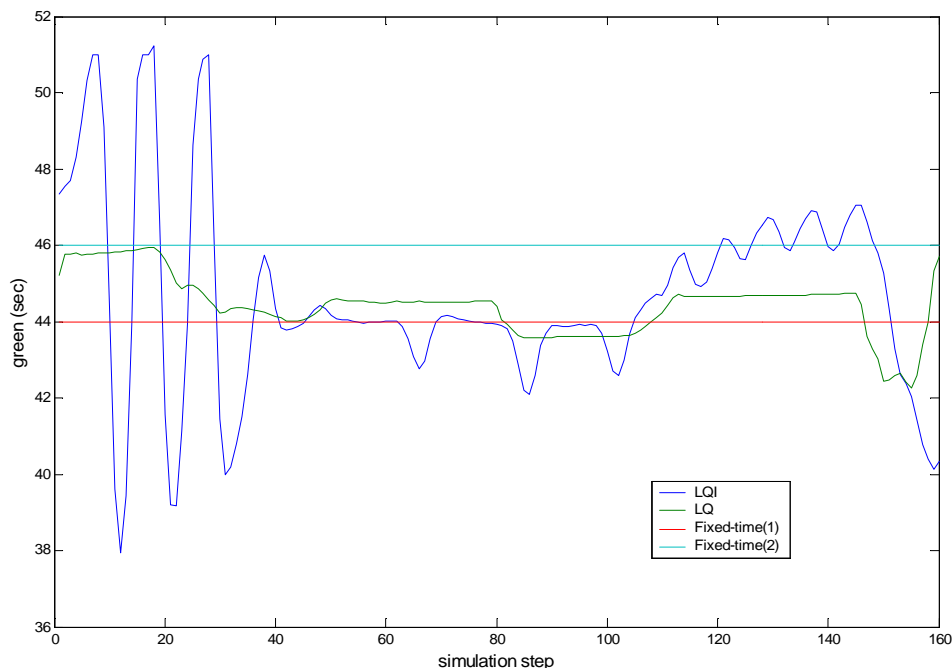
Σχήμα 7-6: Συγκριτικό διάγραμμα των ουρών για το σύνδεσμο O3 του δικτύου

Άλλο ένα μειονέκτημα της στρατηγικής LQ είναι πως η εύρεση των βέλτιστων g^N , τα οποία εξαρτώνται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δικτύου, είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολύ χρόνο και κόπο. Επίσης, ποτέ δεν μπορείς να είσαι σίγουρος ότι οι τιμές πρασίνου g^N που έχεις βρει είναι πραγματικά οι βέλτιστες.

- Βασικό πλεονέκτημα λοιπόν της στρατηγικής ελέγχου LQI είναι πως χωρίς να χρειάζεται g^N αποδίδει το ίδιο καλά με την LQ, γεγονός που την καθιστά μια ισχυρή στρατηγική ελέγχου.
- Σε μερικές από τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν παρατηρήθηκε το εξής αρνητικό φαινόμενο στην στρατηγική LQI: Ο κανόνας ελέγχου δίνει σε συνδέσμους που έχουν κίνηση μεγάλο χρόνο ενεργού πρασίνου, με αποτέλεσμα να μπλοκάρουν οι ανταγωνιστικοί τους σύνδεσμοι και να δημιουργούνται ουρές οι οποίες μεταδίδονται προς τα πίσω. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε κάποιες προσομοιώσεις στο σύνδεσμο O3 του δικτύου (οδός Χατζημιχάλη Γιάνναρη), ο οποίος παρουσιάζει συμφόρηση και παίρνει μεγάλο χρόνο ενεργού πρασίνου, δημιουργώντας έτσι ουρά στον σύνδεσμο L42, η οποία μεταφέρεται και στους L47 και L46 (οδός Κυδωνίας), όπου και τελικά διαλύεται (λόγω της μεγάλης χωρητικότητας του συνδέσμου). Απόρροια αυτού του φαινομένου είναι να

παρατηρούμε στον Πίνακα 7-3 διπλανές προσομοιώσεις να παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στο TTS.

Στο Σχήμα 7-7 φαίνεται η διακύμανση των ενεργών χρόνων πρασίνου για το σύνδεσμο O3 του δικτύου. Ο σύνδεσμος αυτός παίρνει r.o.w. στο 4^ο stage μαζί με το σύνδεσμο L6. Οι προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για να γίνουν τα διαγράμματα 7-6 και 7-7 είναι αυτές με το μικρότερο TTS από τους Πίνακες 7-2 (TTS=1101,0563 οχήματα*ώρες) και 7-7 (TTS=1049,0894 οχήματα*ώρες), καθώς και τα δύο σχέδια ελέγχου σταθερού χρόνου που παρουσιάστηκαν για το μικρό δίκτυο (TTS = 1176,0102 και 4977,3517 οχήματα*ώρες αντίστοιχα).



Σχήμα 7-7: Συγκριτικό διάγραμμα των ενεργών χρόνων πρασίνου για το σύνδεσμο O3 του δικτύου

7.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ολόκληρο το δίκτυο των Χανίων

Η εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου LQI στο μικρό δίκτυο που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο και τα αποτελέσματά της, έδειξαν πως η στρατηγική λειτουργεί σωστά και είναι αποτελεσματική. Η στρατηγική δίνει παρόμοιους χρόνους TTS με αυτούς της LQ, ενώ η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει πως σε κάποιες περιπτώσεις ο έλεγχος LQI υπερτερεί του LQ ενώ σε άλλες συμβαίνει το αντίθετο. Έτσι

προχωρήσαμε στην εφαρμογή (μέσω προσομοιώσεων) του ελέγχου LQI σε ολόκληρο το αστικό δίκτυο των Χανίων (Σχήμα 6-2), πάντα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του ελέγχου LQ και των σχεδίων ελέγχου σταθερού χρόνου.

7.3.1 Αποτελέσματα για τον κανόνα ελέγχου LQI

Στην Παράγραφο 7.2.3 καταλήξαμε στο συμπέρασμα πως ο κανόνας (5.37) έχει σαφώς καλύτερα αποτελέσματα από τον κανόνα (5.35) στον έλεγχο της συμφόρησης του δικτύου. Για το λόγο αυτό στην εφαρμογή της στρατηγικής LQI σε ολόκληρο το δίκτυο των Χανίων χρησιμοποιήθηκε μόνο ο κανόνας ελέγχου (5.37), καθώς έχει καλύτερα αποτελέσματα στον έλεγχο της κυκλοφορίας. Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 5.4 αυτό συμβαίνει επειδή ο κανόνας αυτός δίνει μεγαλύτερο βάρος στους συνδέσμους που παρουσιάζουν ουρές μεγαλύτερες του 20% της χωρητικότητάς τους, συμβάλλοντας έτσι στην ευκολότερη αποσυμφόρηση του δικτύου.

Για την εφαρμογή του κανόνα (5.37) κατασκευάστηκαν συνολικά 12 πίνακες ελέγχου για την αρχική προσέγγιση (διαστάσεων 42x113) και 12 πίνακες ελέγχου για την τελική προσέγγιση stage/link (διαστάσεων 71x142), οι οποίοι αντιστοιχούν σε διάφορους συνδυασμούς diag(R) και diag(S). Οι πίνακες αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για τα δύο εναλλακτικά σενάρια ζήτησης που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 6.6.7.

Αρχική Προσέγγιση - κανόνας (5.37) – Σενάριο 1			
TTS - (οχήματα*ώρες)			
	s		
r	0.0001	0.00001	0.000001
0.1	2236,8000	2273,3263	2294,2663
0.01	2255,3566	2250,6132	2294,2567
0.001	2330,6795	2236,1018	2294,2479
0.0001	2355,8834	2235,4369	2294,2462

Πίνακας 7-9: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου LQI με εφαρμογή του κανόνα (5.37) για το Σενάριο 1 και διάφορους συνδυασμούς r και s .

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων από την εφαρμογή του κανόνα (5.37) σε ολόκληρο το αστικό δίκτυο των Χανίων, για τις δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις και για

τα δύο διαφορετικά σενάρια ζήτησης παρουσιάζονται στους Πίνακες 7-9 έως 7-12.

Τελική Προσέγγιση - κανόνας (5.37) – Σενάριο 1			
TTS - (οχήματα*ώρες)			
	s		
r	0.0001	0.00001	0.000001
0.1	2269,0350	2290,4817	2294,2663
0.01	2239,3335	2291,7013	2294,2663
0.001	2242,1402	2281,0667	2290,0500
0.0001	2239,7146	2288,7365	2290,9256

Πίνακας 7-10: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου LQI με εφαρμογή του κανόνα (5.37) για το Σενάριο 1 και διάφορους συνδυασμούς r και s (stage/link).

Αρχική Προσέγγιση (stage/link) - κανόνας (5.37) – Σενάριο 2			
TTS - (οχήματα*ώρες)			
	s		
r	0.0001	0.00001	0.000001
0.1	4893,0820	4691,3217	4692,2041
0.01	5046,3194	4678,8623	4692,2080
0.001	5267,7157	4720,3483	4692,2110
0.0001	5344,6930	4740,7031	4692,2118

Πίνακας 7-11: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου LQI με εφαρμογή του κανόνα (5.37) για το Σενάριο 2 και διάφορους συνδυασμούς r και s .

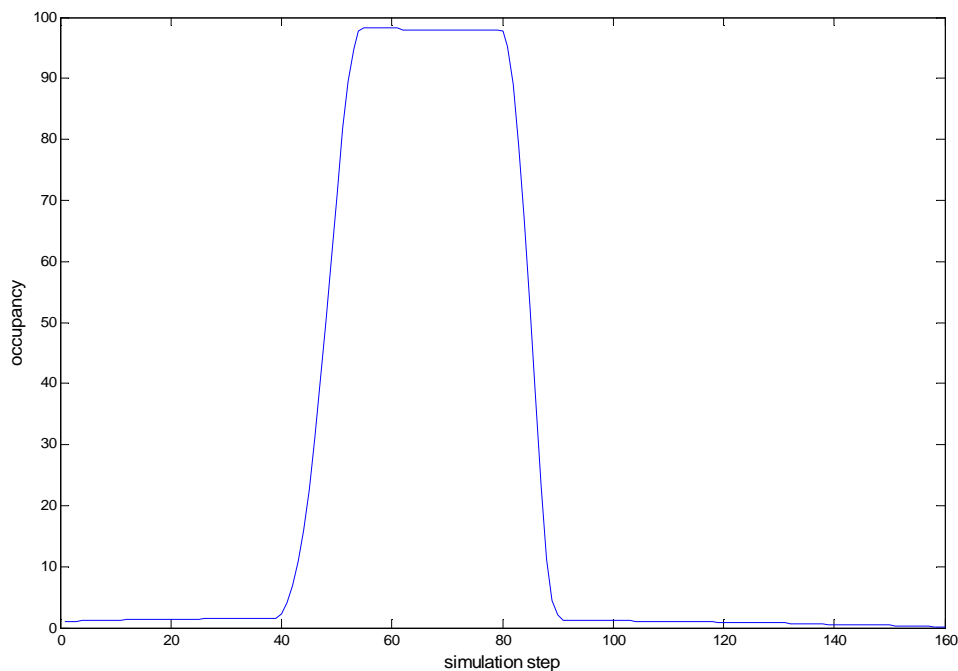
Τελική Προσέγγιση (stage/link) - κανόνας (5.37) – Σενάριο 2			
TTS - (οχήματα*ώρες)			
	s		
r	0.0001	0.00001	0.000001
0.1	4634,1853	4673,5745	4692,2041
0.01	4379,9155	4655,4181	4692,2041
0.001	4298,7307	4509,6393	4668,6978
0.0001	4310,3114	4466,4691	4656,6914

Πίνακας 7-12: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου LQI με εφαρμογή του κανόνα (5.37) για το Σενάριο 2 και διάφορους συνδυασμούς r και s (stage/link).

Για την προσομοίωση που παρουσιάζει τον ελάχιστο χρόνο TTS σε κάθε έναν από τους Πίνακες 7-9–7-12, παρατίθενται στον Πίνακα 7-13 και τα υπόλοιπα κριτήρια απόδοσης που αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 7.1.

Προσομοίωση με το ελάχιστο TTS	Συνολικός Χρόνος Αναμονής (veh*h)	Συνολικός Χρόνος Ταξιδιού (veh*h)	Συνολικός Χρόνος (veh*h)	Συνολική Διανυθείσα Απόσταση (veh*km)	Συνολική Κατανάλωση Καυσίμων (veh*lt)	Συνολικές Ουρές στο τέλος (veh)
Πίνακας 7-9	191,1769	2044,2601	2235,4369	16069,9469	3466,8783	0
Πίνακας 7-10	227,1580	2012,1754	2239,3335	16116,6341	3477,6410	0
Πίνακας 7-11	1347,9270	3330,9354	4678,8623	17306,2451	6631,4799	27,2429
Πίνακας 7-12	1340,8502	2957,8805	4298,7307	17454,7225	6183,0897	94,6421

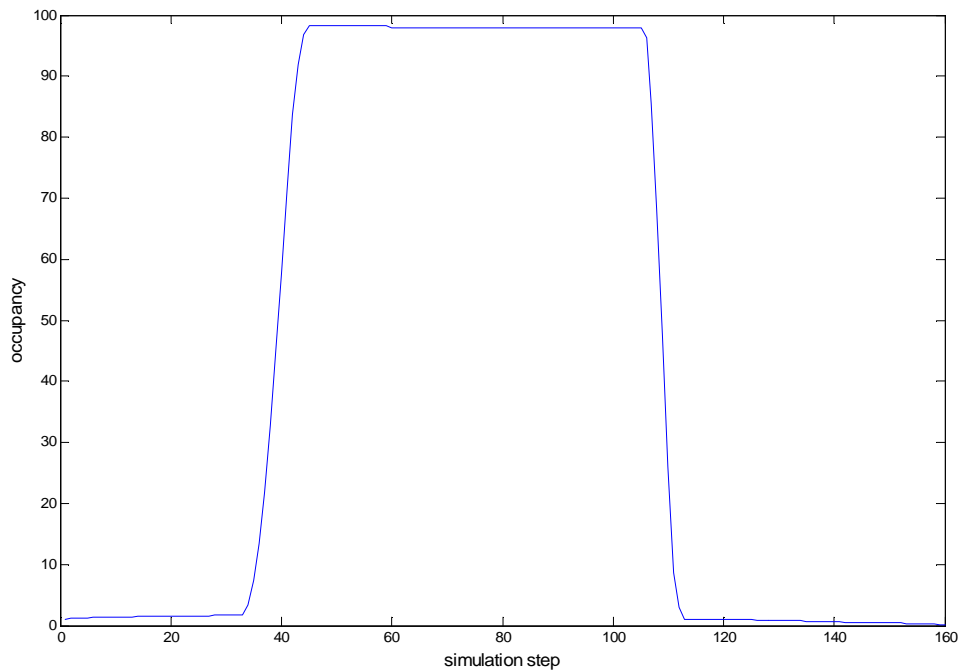
Πίνακας 7-13: Κριτήρια απόδοσης για τις προσομοιώσεις με το βέλτιστο TTS



Σχήμα 7-8: Ποσοστό κατάληψης (occupancy) της οδού Δημοκρατίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για το Σενάριο 1 (TTS=2235,4369 οχήματα*ώρες).

Επίσης, για τις προσομοιώσεις των Πινάκων 7-9 και 7-12 με το ελάχιστο TTS, στα Σχήματα 7-8 και 7-9 φαίνεται το ποσοστό κατάληψης που παρουσιάζει ένας από τους κεντρικότερους δρόμους των Χανίων κατά τη διάρκεια των τεσσάρων ωρών της

προσομοίωσης. Ο δρόμος αυτός είναι η οδός Δημοκρατίας, η οποία παρουσιάζει συχνά προβλήματα συμφόρησης. Το ποσοστό κατάληψης (occupancy) του συνδέσμου παρουσιάζεται και για τα δύο σενάρια ζήτησης και μετράται σε ποσοστό %.



Σχήμα 7-9: Ποσοστό κατάληψης (occupancy) της οδού Δημοκρατίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για το Σενάριο 2 ($TTS=4298,7307$ οχήματα*ώρες).

Τα γραφήματα του ποσοστού κατάληψης έγιναν για τις προσομοιώσεις που απέδωσαν τον καλύτερο χρόνο TTS για τα δύο σενάρια κίνησης αντίστοιχα. Από τα γραφήματα παρατηρούμε πως στο Σενάριο 2 έχουμε μεγαλύτερη κυκλοφοριακή συμφόρηση στην οδό Δημοκρατίας σε σχέση με το Σενάριο 1, γεγονός βέβαια που ήταν αναμενόμενο καθώς το Σενάριο 2 είναι πιο επιβαρυνόμενο.

7.3.2 Αποτελέσματα για τον κανόνα ελέγχου LQ και για τα fixed-time σχέδια ελέγχου

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για ολόκληρο το δίκτυο των Χανίων από την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου LQ (σχέση (5.22)), για δύο διαφορετικές ονομαστικές τιμές πρασίνων g^N , για τις δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις και τα δύο σενάρια ζήτησης παρουσιάζονται στους Πίνακες 7-14 έως 7-17:

Αρχική Προσέγγιση - κανόνας (5.22) – Σενάριο 1		
TTS - (οχήματα*ώρες)		
r	Αρχικό Πράσινο	Βέλτιστο Πράσινο
10	14349,7522	2105,7389
1	10016,1141	2013,3823
0.1	3551,6570	1965,1238
0.01	2824,4764	1979,0247
0.001	2719,7656	2021,4738
0.0001	2694,4906	2018,6166
0.00001	2696,9785	2022,2852

Πίνακας 7-14: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου LQ με εφαρμογή του κανόνα (5.22) για το Σενάριο 1 και διαφορετικές ονομαστικές τιμές πρασίνου g^N .

Τελική Προσέγγιση (stage/link) - κανόνας (5.22) – Σενάριο 1		
TTS - (οχήματα*ώρες)		
r	Αρχικό Πράσινο	Βέλτιστο Πράσινο
10	17071,8995	2129,0949
1	14401,3312	2050,3099
0.1	9779,5911	2098,0506
0.01	4414,6737	2921,9777
0.001	4608,0322	3599,1284

Πίνακας 7-15: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου LQ με εφαρμογή του κανόνα (5.22) για το Σενάριο 1 και διαφορετικές ονομαστικές τιμές πρασίνου g^N (stage/link).

Για τον κανόνα ελέγχου LQ παρουσιάζονται επίσης τα γραφήματα με τη χρονική εξέλιξη του αριθμού των οχημάτων για τους 3 κεντρικότερους δρόμους των Χανίων. Οι δρόμοι αυτοί είναι η οδός Δημοκρατίας, Τζανακάκη και Χατζημιχάλη Γιάνναρη, οι οποίοι είναι οι πιο ευάλωτοι σε φαινόμενα κυκλοφοριακής συμφόρησης και συχνά παρουσιάζουν μεγάλες ουρές οχημάτων. Οι ουρές των οχημάτων στους συνδέσμους αυτούς, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και για τα δύο σενάρια κίνησης φαίνονται στα Σχήματα 7-10 έως 7-15. Οι ουρές των οχημάτων παρουσιάζονται στα γραφήματα για την περίπτωση που η στρατηγική χρησιμοποιεί εκτιμήσεις για τον αριθμό των οχημάτων (estimated x) εντός των οδών του δικτύου, αλλά και για

πραγματικές μετρήσεις (real x).

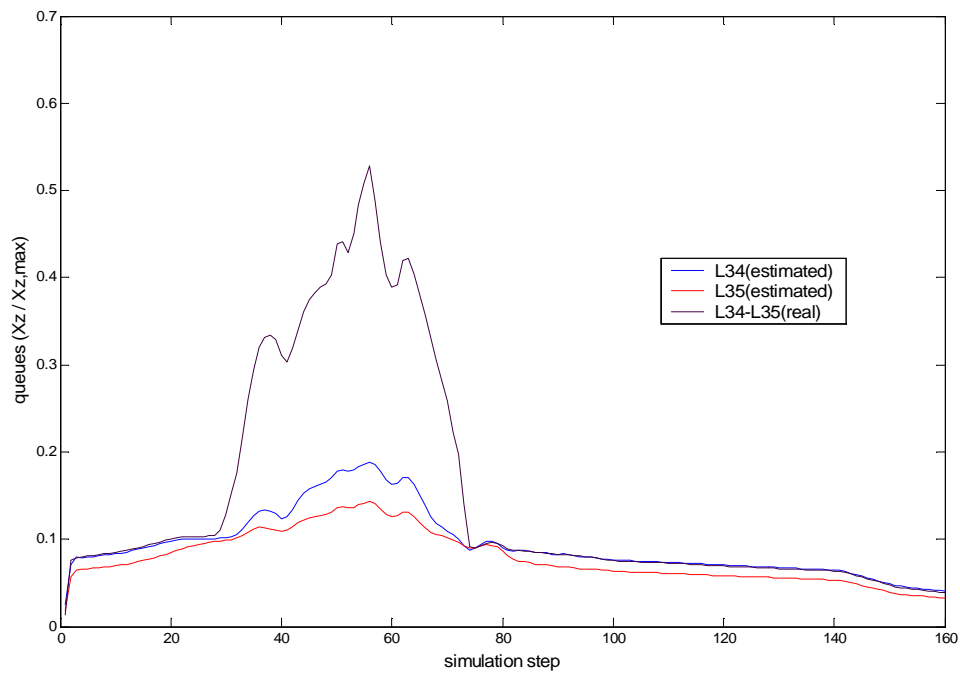
Αρχική Προσέγγιση - κανόνας (5.22) – Σενάριο 2		
TTS - (οχήματα*ώρες)		
r	Αρχικό Πράσινο	Βέλτιστο Πράσινο
10	19011,7862	3741,4642
1	14577,2269	3388,7789
0.1	6152,3524	3276,8275
0.01	4786,0542	3340,5966
0.001	4611,3116	3413,6153
0.0001	4588,8561	3449,9207
0.00001	4591,7573	3447,3062

Πίνακας 7-16: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου LQ με εφαρμογή του κανόνα (5.22) για το Σενάριο 2 και διαφορετικές ονομαστικές τιμές πρασίνου g^N .

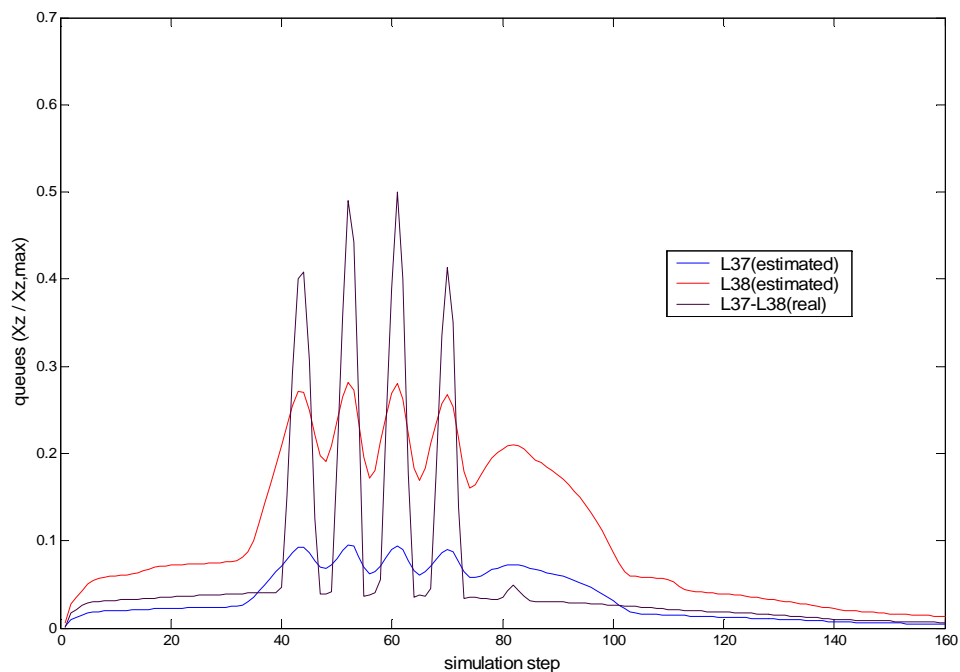
Τελική Προσέγγιση (stage/link) - κανόνας (5.22) – Σενάριο 2		
TTS - (οχήματα*ώρες)		
r	Αρχικό Πράσινο	Βέλτιστο Πράσινο
10	21352,1072	3944,3108
1	18089,1973	3587,3810
0.1	12375,9088	3819,3054
0.01	6214,7642	4781,5592
0.001	6515,5206	5632,2979

Πίνακας 7-17: Αποτελέσματα προσομοιώσεων της στρατηγικής ελέγχου LQ με εφαρμογή του κανόνα (5.22) για το Σενάριο 2 και διαφορετικές ονομαστικές τιμές πρασίνου g^N (stage/link).

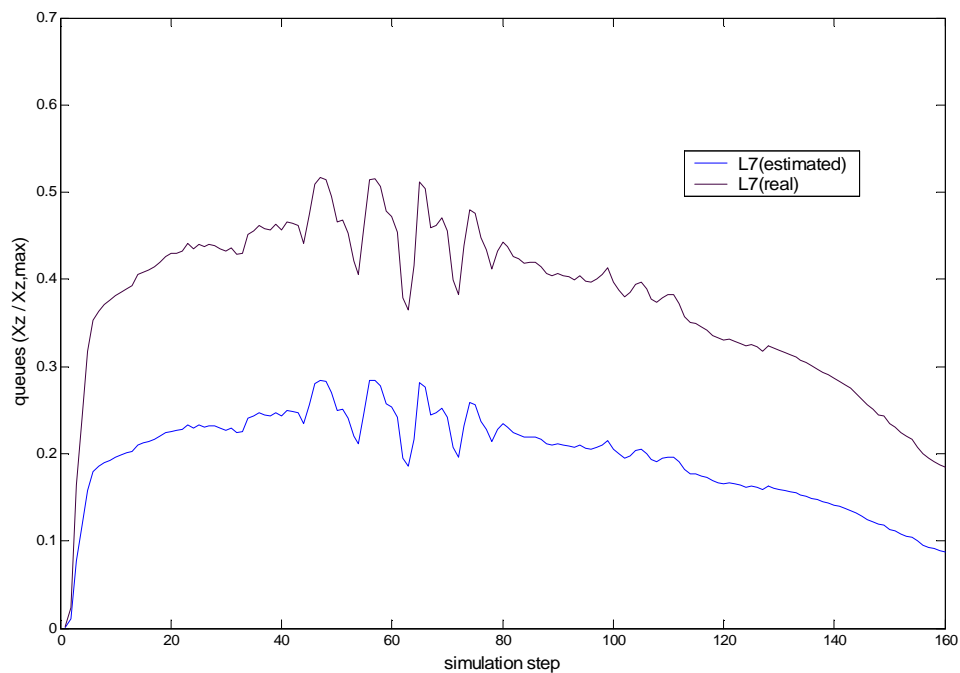
Η οδός Δημοκρατίας αποτελείται από τους συνδέσμους L34, L35 (βλέπε Σχήμα 6-2) και έχει r.o.w. στο 19^ο στάδιο του δικτύου. Στο στάδιο αυτό είναι ο μόνος σύνδεσμος που παίρνει προτεραιότητα. Η οδός Τζανακάκη αποτελείται από τους συνδέσμους L37, L38 και έχει r.o.w. στο 13^ο στάδιο του δικτύου. Είναι και αυτή ο μόνος σύνδεσμος που παίρνει προτεραιότητα στο συγκεκριμένο στάδιο. Τέλος, η οδός Χατζημιχάλη Γιάνναρη αποτελείται μόνο από το σύνδεσμο L27 και έχει r.o.w. στο 8^ο στάδιο του δικτύου, μαζί με τους συνδέσμους L8 και L9 (ανάντη σύνδεσμοι).



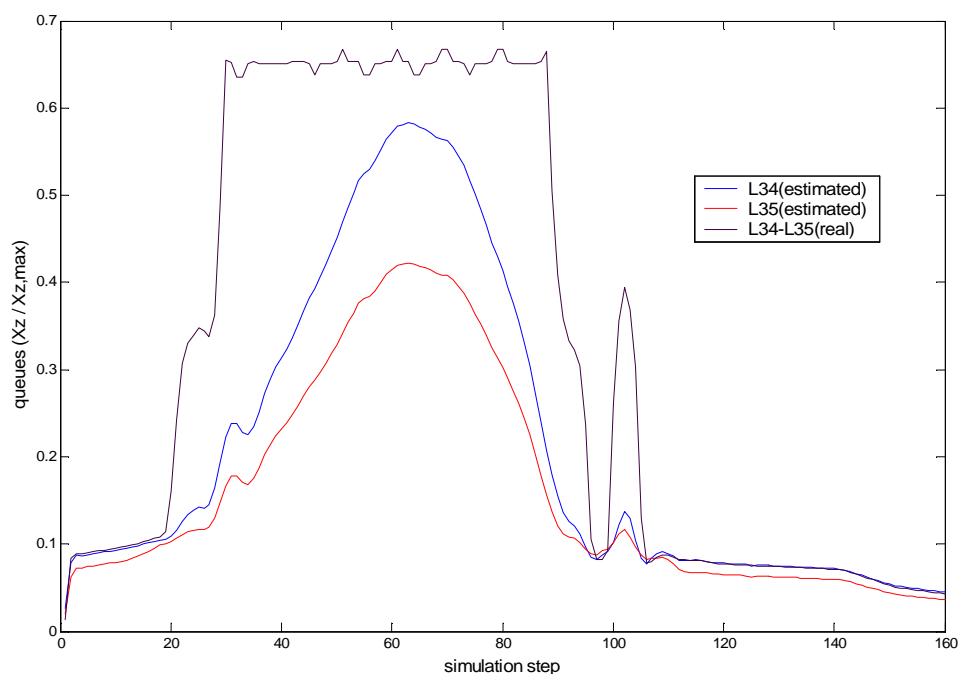
Σχήμα 7-10: Ουρές στην οδό Δημοκρατίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για το Σενάριο 1 ($TTS=1965,1238$ οχήματα*ώρες).



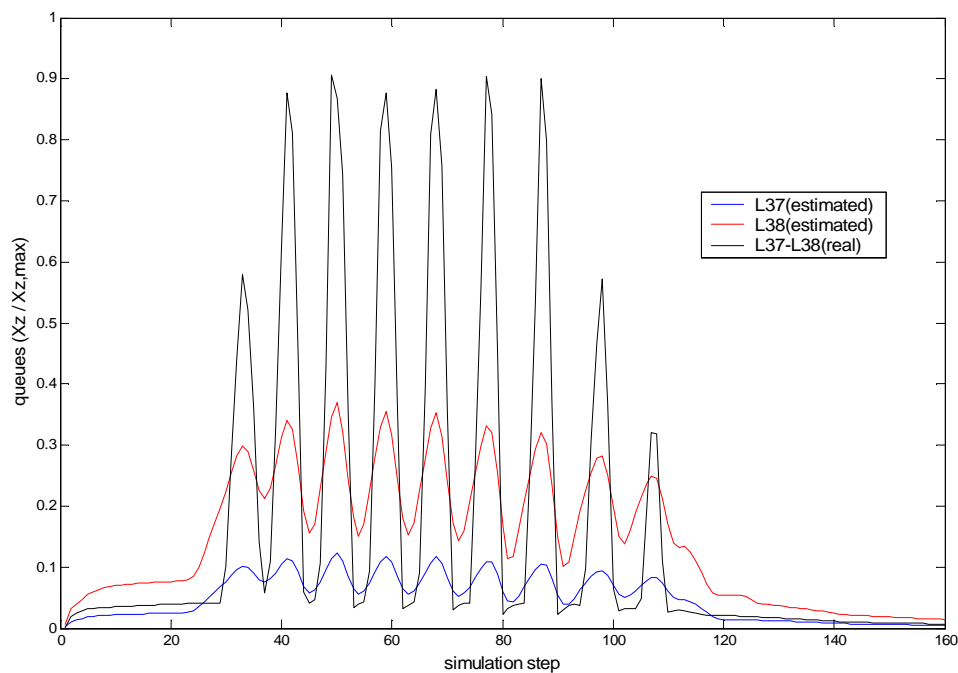
Σχήμα 7-11: Ουρές στην οδό Τζανακάκη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για το Σενάριο 1 ($TTS=1965,1238$ οχήματα*ώρες).



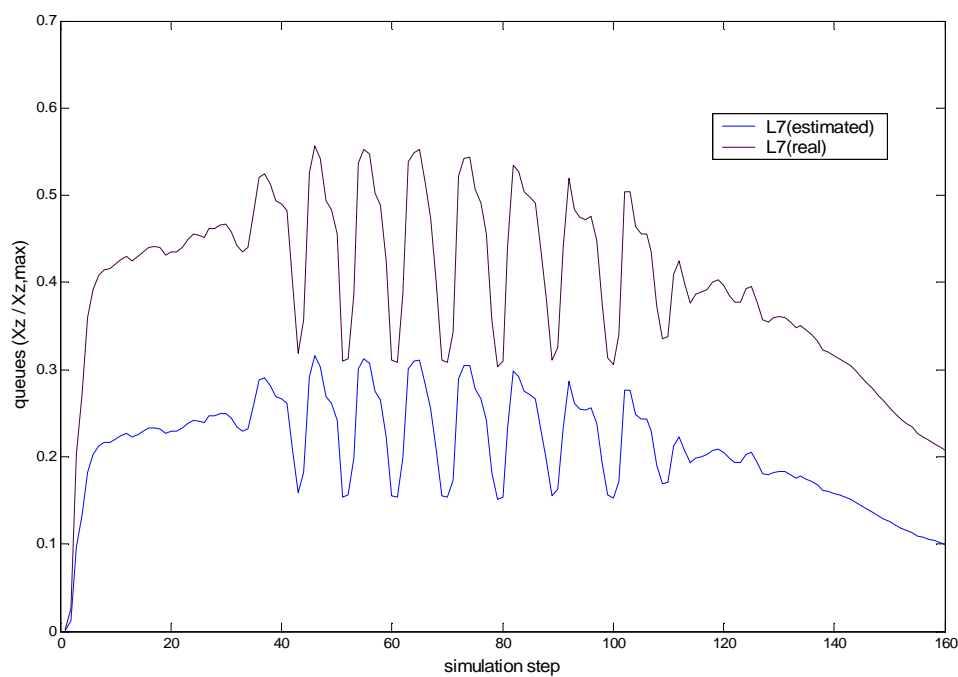
Σχήμα 7-12: Ουρές στην οδό Χατζημιχάλη Γιάνναρη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για το Σενάριο 1 ($TTS=1965,1238$ οχήματα*ώρες).



Σχήμα 7-13: Ουρές στην οδό Δημοκρατίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για το Σενάριο 2 ($TTS=3276,8275$ οχήματα*ώρες).



Σχήμα 7-14: Ουρές στην οδό Τζανακάκη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για το Σενάριο 2 ($TTS=3276,8275$ οχήματα*ώρες).



Σχήμα 7-15: Ουρές στην οδό Χατζημιχάλη Γιάνναρη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για το Σενάριο 2 ($TTS=3276,8275$ οχήματα*ώρες).

Οι προσομοιώσεις που επιλέχθηκαν για την κατασκευή των γραφημάτων των ουρών είναι αυτές που απέδωσαν το βέλτιστο χρόνο TTS για τον κανόνα ελέγχου LQ και για τα δύο διαφορετικά σενάρια κίνησης (Σενάριο 1: TTS=1965,1238 οχήματα*ώρες – Πίνακας 7-14 και Σενάριο 2: TTS=3276,8275 οχήματα*ώρες – Πίνακας 7-16). Ο κάθετος άξονας στα Σχήματα 7-10 – 7-15 αναπαριστά το κλάσμα του αριθμού των οχημάτων x_z του συνδέσμου z προς τη μέγιστη χωρητικότητα (Storage Capacity) $x_{z,max}$ του.

Επιπλέον, στον Πίνακα 7-18 συνοψίζονται όλα τα κριτήρια αξιολόγησης τόσο για τις προσομοιώσεις των Πινάκων 7-14 – 7-17 με το μικρότερο TTS, όσο και για τα σχέδια ελέγχου σταθερού χρόνου για το μικρό δίκτυο:

Προσομοίωση με το ελάχιστο TTS	Συνολικός Χρόνος Αναμονής (veh*h)	Συνολικός Χρόνος Ταξιδιού (veh*h)	Συνολικός Χρόνος (veh*h)	Συνολική Διανυθείσα Απόσταση (veh*km)	Συνολική Κατανάλωση Καυσίμων (veh*lt)	Συνολικές Ουρές στο τέλος (veh)
Πίνακας 7-14 (αρχικό gN)	823,1925	1871,2981	2694,4906	16043,7788	4097,1197	21,0787
Πίνακας 7-14 (βέλτιστο gN)	443,7739	1521,3500	1965,1238	16105,7863	3163,8429	0
Πίνακας 7-15 (αρχικό gN)	1983,0579	2431,6158	4414,6737	15556,6166	6257,3962	478,1052
Πίνακας 7-15 (βέλτιστο gN)	363,2685	1687,0414	2050,3099	16099,7005	3258,2531	0
Πίνακας 7-16 (αρχικό gN)	2193,8614	2394,9947	4588,8561	17195,5279	6588,0742	325,5849
Πίνακας 7-16 (βέλτιστο gN)	1256,1050	2020,7225	3276,8275	17411,6591	4899,7730	173,0213
Πίνακας 7-17 (αρχικό gN)	3418,4351	2796,3291	6214,7642	16585,7427	8619,6860	976,9424
Πίνακας 7-17 (βέλτιστο gN)	1253,1113	2334,2697	3587,3810	17462,0657	5282,1762	130,8309
Fixed-time - Σενάριο 1 (αρχικό gN)	13516,3022	5151,1984	18667,5006	5706,7973	23141,0200	8210,6359
Fixed-time - Σενάριο 1 (βέλτιστο gN)	213,6514	2080,6149	2294,2663	16088,6877	3538,5146	0

Fixed-time - Σενάριο 2 (αρχικό g^N)	18061,9197	5306,9323	23368,8519	5366,5687	28898,2012	10429,8715
Fixed-time - Σενάριο 2 (βέλτιστο g^N)	1375,0831	3317,1210	4692,2041	17432,4365	6652,5980	2,6740

***Πίνακας 7-18:** Κριτήρια απόδοσης για τις προσομοιώσεις με το βέλτιστο TTS και για τα σχέδια ελέγχου σταθερού χρόνου.*

7.3.3 Συμπεράσματα από την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου LQI στο αστικό δίκτυο των Χανίων

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της στρατηγικής LQI στο αστικό δίκτυο των Χανίων, συγκρινόμενα με τα αποτελέσματα της στρατηγικής LQ και των fixed-time σχεδίων ελέγχου είναι τα ακόλουθα:

- Το Σενάριο 2, όπως ήταν αναμενόμενο, παρουσιάζει μεγαλύτερους χρόνους TTS και μεγαλύτερη συμφόρηση στο δίκτυο για όλους τους κανόνες ελέγχου. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης παρατηρούνται μεγάλες ουρές στην πλειοψηφία των συνδέσμων και σε όλες τις κεντρικές αρτηρίες.
- Αντίθετα, το Σενάριο 1 αποδίδει πολύ καλύτερους χρόνους TTS. Παρουσιάζει μικρές ουρές στους συνδέσμους κατά τη διάρκεια του κόκκινου, οι οποίες εξαφανίζονται μόλις ο σύνδεσμος λάβει δικαίωμα κυκλοφορίας (πράσινο).
- Και στο μεγάλο δίκτυο, όπως και στο μικρό, η προσέγγιση stage/link αποδίδει χειρότερα από την αρχική προσέγγιση, γεγονός που φαίνεται από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τον κανόνα ελέγχου LQ (Παράγραφος 7.3.2). Η αρχική προσέγγιση παρουσιάζεται να έχει καλύτερη αντίδραση στις κυκλοφοριακές συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο.
- Τόσο ο έλεγχος LQ όσο και ο έλεγχος fixed-time παρουσιάζουν μεγάλη εξάρτηση από τις ονομαστικές τιμές πρασίνου g^N . Όταν οι τιμές του διανύσματος g^N είναι οι βέλτιστες, ο κανόνας LQ παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα ελέγχου από όλες τις υπό μελέτη στρατηγικές. Ωστόσο, αν μεταβάλλουμε τις τιμές των g^N τα αποτελέσματα χαλάνε αρκετά.
- Για το Σενάριο 1 η συμπεριφορά του κανόνα LQI κρίνεται αποτελεσματική. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, για όλα τα κριτήρια απόδοσης, είναι

παραπλήσια με αυτά του ελέγχου LQ, ενώ παράλληλα έχουν μικρή ευαισθησία στα r και s . Ο LQI είναι καλύτερος από τον LQ για τις αρχικές ονομαστικές τιμές πρασίνου και λίγο χειρότερος για τις βέλτιστες ονομαστικές τιμές πρασίνου (χωρίς αυτός να χρειάζεται ονομαστικές τιμές πρασίνου g^N).

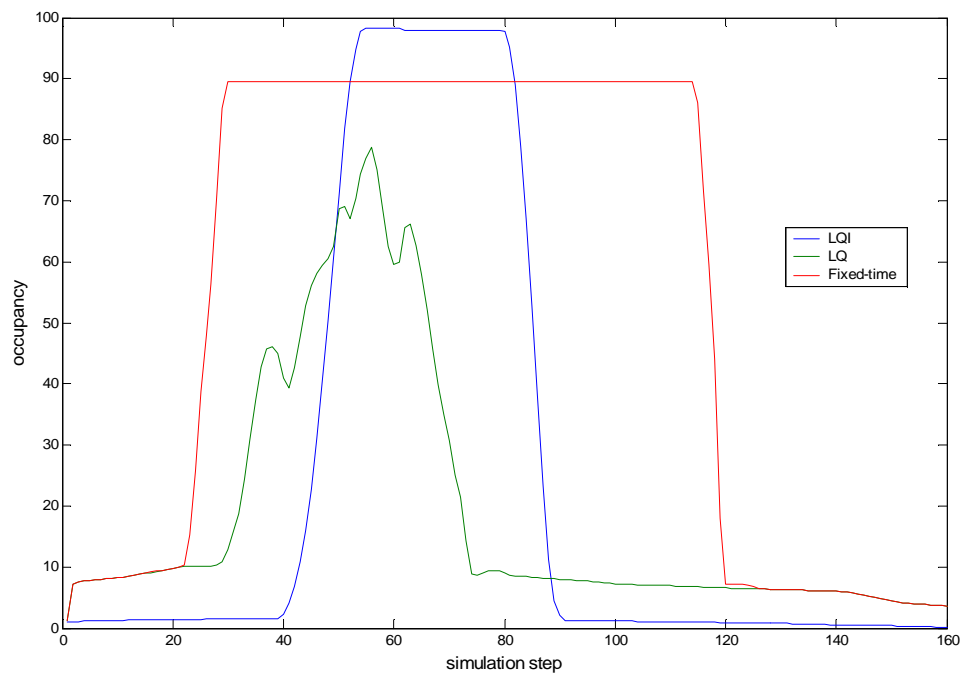
- Για το Σενάριο 2 η συμπεριφορά του κανόνα ελέγχου LQI δεν κρίνεται πολύ ικανοποιητική. Τα αποτελέσματα για τα κριτήρια αξιολόγησης είναι και πάλι καλύτερα από αυτά του LQ για το αρχικό πράσινο, άλλα για το βέλτιστο πράσινο ο κανόνας LQ παρουσιάζει αρκετά καλύτερα αποτελέσματα από τον LQI.
- Τα σχέδια ελέγχου fixed-time έχουν σε όλες τις περιπτώσεις χειρότερα αποτελέσματα από τους ελέγχους LQ και LQI. Για τις αρχικές ονομαστικές τιμές πρασίνου, μάλιστα, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για όλα τα κριτήρια απόδοσης είναι καταστρεπτικά και για τα δύο σενάρια κίνησης. Δημιουργούνται τεράστιες ουρές σε ολόκληρο το δίκτυο, μεγάλη κυκλοφοριακή συμφόρηση και έχουμε πολύωρες καθυστερήσεις και τεράστια συνολική κατανάλωση καυσίμων, γεγονότα που μπορούν να οδηγήσουν στην “κατάρευση” του δικτύου.
- Τέλος, στη στρατηγική ελέγχου LQI η εναλλακτική προσέγγιση stage/link που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 6.4 φαίνεται να λειτουργεί καλύτερα απ’ ότι στον κανόνα ελέγχου LQI, καθώς παρουσιάζει καλύτερες τιμές στα κριτήρια απόδοσης και είναι πιο αποτελεσματική.

Στα Σχήματα 7-16 και 7-17 παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα για το ποσοστό κατάληψης (occupancy) της οδού Δημοκρατίας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, για τους διαφορετικούς ελέγχους και τα δύο σενάρια κίνησης.

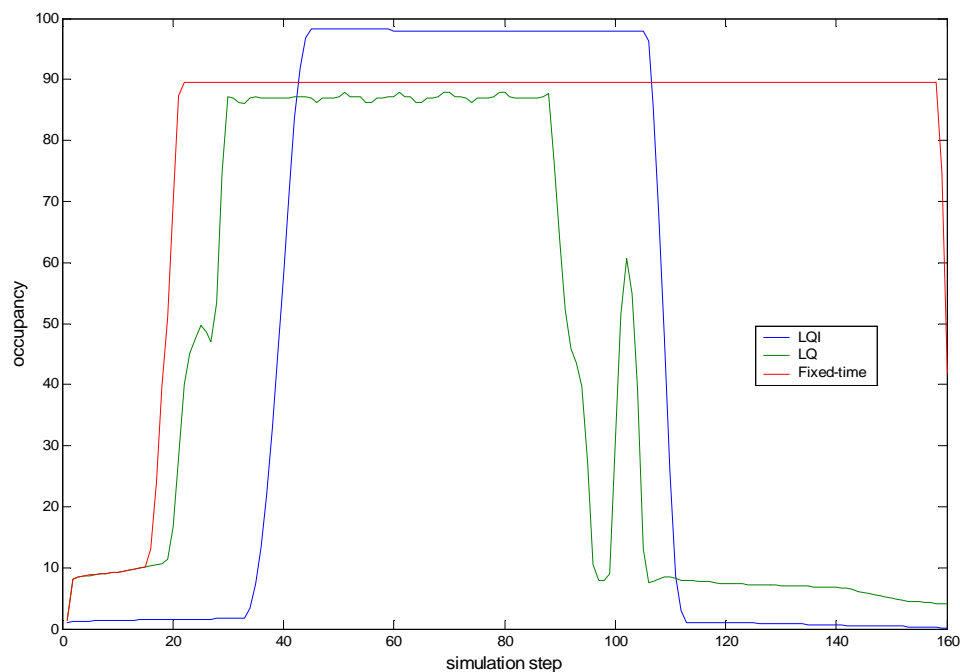
Οι προσομοιώσεις που επιλέχθηκαν για την κατασκευή του συγκριτικού διαγράμματος 7-16 είναι αυτές με το μικρότερο TTS από τους Πίνακες 7-9 (TTS=2235,4369 οχήματα*ώρες) και 7-14 (TTS=1965,1238 οχήματα*ώρες), καθώς και το σχέδιο ελέγχου σταθερού χρόνου με τις βέλτιστες ονομαστικές τιμές πρασίνου που παρουσιάστηκε για το δίκτυο των Χανίων (Πίνακας 7-18) για το Σενάριο 1 (TTS=2294,2663 οχήματα*ώρες).

Οι προσομοιώσεις που επιλέχθηκαν για την κατασκευή του συγκριτικού διαγράμματος 7-17 είναι αυτές με το ελάχιστο TTS από τους Πίνακες 7-12 (TTS=4298,7307 οχήματα*ώρες) και 7-16 (TTS=3276,8275 οχήματα*ώρες), καθώς και το σχέδιο ελέγχου σταθερού

χρόνου με τις βέλτιστες ονομαστικές τιμές πρασίνου που παρουσιάστηκε για το δίκτυο των Χανίων (Πίνακας 7-18) για το Σενάριο 2 (TTS=4692,2041 οχήματα*ώρες).



Σχήμα 7-16: Συγκριτικό διάγραμμα για το ποσοστό κατάληψης της οδού Δημοκρατίας για τους διάφορους κανόνες ελέγχου (Σενάριο 1).



Σχήμα 7-17: Συγκριτικό διάγραμμα για το ποσοστό κατάληψης της οδού Δημοκρατίας για τους διάφορους κανόνες ελέγχου (Σενάριο 2).

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΙΛΟΓΟΣ

8.1 Σύνοψη

Κατά την διάρκεια των δυο περασμένων δεκαετιών, υπήρξε μια αξιοσημείωτη αύξηση του ενδιαφέροντος και της έρευνας σχετικά με την επίλυση σοβαρών προβλημάτων κυκλοφοριακής συμφόρησης, σαν αποτέλεσμα της εκθετικής αύξησης του αριθμού των οχημάτων και της αναγνώρισης του γεγονότος ότι τα προβλήματα υπερφόρτωσης δεν μπορούν να λύνονται έπ' αόριστο με τη συνεχή αύξηση των υποδομών των δικτύων.

Πιο συγκεκριμένα, έγινε κατανοητή η ανάγκη της επαρκούς και αποτελεσματικής χρήσης των υπάρχοντων υποδομών μέσω της ανάπτυξης και υλοποίησης σύγχρονων μορφών ελέγχου και διαχείρισης.

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

Γενικά, τα συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας αστικών δικτύων τα οποία βρίσκονται σήμερα σε εφαρμογή ή υπό ανάπτυξη, μπορεί να ταξινομηθούν ως σταθερού χρόνου και πραγματικού χρόνου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, παρουσιάζουν οι στρατηγικές ελέγχου συντονισμένων συστημάτων πραγματικού χρόνου. Η παρούσα εργασία, επικεντρώθηκε γύρω από τα συντονισμένα συστήματα πραγματικού χρόνου και είχε ως στόχο την ανάπτυξη μιας στρατηγικής ελέγχου η οποία θα λαμβάνει υπόψη τις πραγματικές κυκλοφοριακές συνθήκες του δικτύου και θα ρυθμίζει αυτόματα τη σηματοδότηση.

Στις αρχές της δεκαετίας του 80, αναπτύχθηκαν τα πρώτα συστήματα ελέγχου κυκλοφοριακής απόκρισης αστικών δικτύων με κυριότερα τα SCOOT και SCAT. Πιο πρόσφατα, υλοποιήθηκαν μια σειρά από φιλόδοξα συστήματα της ίδιας κατηγορίας με

πιο γνωστά τα OPAC, PROLYN, CRONOS και UTOPIA. Αυτές οι στρατηγικές ελέγχου, είτε θεωρούν ελεγχόμενες δράσεις για τα μέτρα ελέγχου (π.χ. κύκλος, διάρκεια των φάσεων, χρονική μετατόπιση) μαζί είτε για κάποιο απ' αυτά ξεχωριστά. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα των προβλημάτων βελτιστοποίησης που απαιτεί η εφαρμογή τους, καθιστά πολλές από τις στρατηγικές ελέγχου μη εφαρμόσιμες σε μεγάλης κλίμακας αστικά δίκτυα, με αποτέλεσμα η εφαρμογή τους να περιορίζεται σε μεμονωμένες διασταυρώσεις.

Συνεπώς, ακόμη και σήμερα είναι επίκαιρη η ανάπτυξη αποτελεσματικών συντονισμένων στρατηγικών ελέγχου οι οποίες να έχουν την δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλης κλίμακας αστικά δίκτυα. Η στρατηγική ελέγχου που παρουσιάστηκε είναι βασισμένη στην πρωτοποριακή εργασία των Gazis και Potts (1963). Η μεθοδολογία που προτείνεται στην παρούσα εργασία, βασίζεται στην μοντελοποίηση αποθήκευσης-και-προώθησης και χρησιμοποιεί γνωστές μεθόδους της θεωρίας Αυτομάτου Ελέγχου για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός πολυμεταβλητού ρυθμιστή για το συντονισμένο έλεγχο, σε πραγματικό χρόνο αστικών δικτύων μεγάλης κλίμακας. Αντικειμενικός στόχος του ελέγχου, είναι να ελαχιστοποιήσει και να εξισορροπήσει τον αριθμό των οχημάτων μέσα στους αστικούς συνδέσμους που προσεγγίζουν σηματοδοτημένες διασταυρώσεις μεταβάλλοντας με συντονισμένο τρόπο την διάρκεια της κάθε φάσης γύρω από κάποιες ονομαστικές τιμές (ανάλογα τον κανόνα ελέγχου που εφαρμόζεται), δίχως να επηρεάζει τη χρονική μετατόπιση και τη διάρκεια του κύκλου αυτών.

Τρεις εναλλακτικές προσεγγίσεις του προβλήματος ελέγχου παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία, η μια από τη διατύπωση του προβλήματος ως πρόβλημα βελτιστοποίησης Γραμμικού–Τετραγωνικού Ελέγχου και οι άλλες δύο από την διατύπωση ως πρόβλημα Γραμμικού–Τετραγωνικού–Ολοκληρωτικού Ελέγχου, με ιδιαίτερη βαρύτητα στην εξέταση της αποτελεσματικότητας των δύο τελευταίων.

Η εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου πραγματοποιήθηκε στο αστικό οδικό δίκτυο των Χανίων. Για να γίνει δυνατή η διερεύνηση της στρατηγικής, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο μοντελοποίησης και προσομοίωσης METACOR με το οποίο αναπτύχθηκε το μοντέλο του υπό μελέτη δικτύου. Στην συνέχεια, το μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για την εξέταση της αποτελεσματικότητας της

στρατηγικής κάτω από διαφορετικά σενάρια ζήτησης και μέσω δύο εναλλακτικών προσεγγίσεων μοντελοποίησης.

Οι διερευνήσεις που ακολούθησαν για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου, έδειξαν σημαντικές μειώσεις σε όλα τα κριτήρια αποτελεσματικότητας συγκριτικά με τη στρατηγική σηματοδότησης σταθερού χρόνου (Fixed-time Control). Επίσης, συγκρινόμενη με τη στρατηγική του Γραμμικού – Τετραγωνικού Ελέγχου η προτεινόμενη στρατηγική (Γραμμικού – Τετραγωνικού – Ολοκληρωτικού Ελέγχου) παρουσιάζεται αρκετά αποτελεσματική και αποδίδει παρόμοια αποτελέσματα στο σύνολο των κριτηρίων απόδοσης. Οπότε, εξαρτάται κάθε φορά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δικτύου για το ποια από τις δύο στρατηγικές είναι καλύτερο να εφαρμοστεί.

8.2 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα από την ανάπτυξη και διερεύνηση της στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία είναι τα ακόλουθα:

- Ο κανόνας ελέγχου λειτουργεί σωστά και συμβάλλει θετικά στον έλεγχο της κυκλοφορίας του δικτύου των Χανίων.
- Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα κριτήρια αποτελεσματικότητας είναι θετικά και δείχνουν πως η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικό χρόνο.
- Βασικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου είναι πως για να εφαρμοστεί δεν χρειάζεται ονομαστικές τιμές πρασίνου g^N . Το γεγονός αυτό την καθιστά προτιμότερη από τη στρατηγική ελέγχου LQ, καθώς παρέχουν παρόμοια αποτελέσματα και ο υπολογισμός των ονομαστικών τιμών πρασίνου δεν είναι πάντα εύκολος.
- Από τη συνολική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, προκύπτει το συμπέρασμα πως οι καλύτερες τιμές για τις παραμέτρους r και s των πινάκων βάρους του κανόνα ελέγχου LQI είναι 0,001 και 0,00001 αντίστοιχα. Για το συγκεκριμένο δίκτυο, οι τιμές αυτές παρουσιάζουν τα καλύτερα αποτελέσματα.
- Η στρατηγική λειτουργεί αποτελεσματικά σε δίκτυα που παρουσιάζουν συμφορήσεις και συμβάλλει στη μείωση των ουρών των οχημάτων.

Στην περίπτωση τροποποιήσεων και επεκτάσεων στο ελεγχόμενο δίκτυο η στρατηγική ελέγχου απαιτείται να επανασχεδιαστεί από την αρχή. Παρ' όλα αυτά, ο επανασχεδιασμός είναι μια απλή διαδικασία, που πραγματοποιείται με την χρήση διαθέσιμου λογισμικού και αξιοποιεί όλη την πληροφορία και γνώση που έχει προέλθει από τον αρχικό σχεδιασμό. Η έλλειψη ευελιξίας της στρατηγικής ελέγχου, όσον αναφορά τροποποιήσεις και επεκτάσεις του ελεγχόμενου δικτύου είναι το τίμημα της συγκεντρωτικής της αρχιτεκτονικής που της επιτρέπει την ταυτόχρονη θεώρηση όλων των κόμβων του δικτύου με την εφαρμογή μιας μόνο απλής εξίσωσης πινάκων ανεξάρτητα από το μέγεθος του δικτύου. Παρά τα παραπάνω μειονεκτήματα, η ακολουθούμενη μεθοδολογία οδήγησε σε μια αποτελεσματική στρατηγική συντονισμένου ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης, εφαρμόσιμη σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας όπως έδειξαν οι διερευνήσεις που παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία.

8.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Μελλοντικές ερευνητικές εργασίες αφορούν στη σύγκριση της στρατηγικής ελέγχου LQI με άλλες στρατηγικές ελέγχου και για μεγαλύτερα δίκτυα από αυτό της πόλης των Χανίων. Επίσης, η προτεινόμενη στρατηγική θα πρέπει να διερευνηθεί για την τροποποίηση σε πραγματικό χρόνο της περιόδου των σηματοδοτών καθώς και της χρονικής μετατόπισης. Τέλος, σε πρακτικό επίπεδο η στρατηγική ελέγχου LQI θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε κάποια οδικά δίκτυα. Το γεγονός αυτό θα προσέφερε σημαντικά συμπεράσματα στην περαιτέρω μελέτη του κανόνα ελέγχου.

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

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παραθέτουμε εδώ τους πίνακες ελέγχου που χρησιμοποιεί ο κανόνας ελέγχου LQI. Στις επόμενες σελίδες του Παραρτήματος παρουσιάζεται ο πίνακας ελέγχου L , καθώς και ο πίνακας H που απαιτούνται για την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου LQI στο αστικό δίκτυο των Χανίων (για την αρχική προσέγγιση). Οι πίνακες αυτοί αποτελούν ένα τυχαίο ζευγάρι, καθώς για την εκτέλεση των προσομοιώσεων κατασκευάστηκαν πολλοί τέτοιοι πίνακες.

Οι πίνακες που παρουσιάζονται εδώ αφορούν την προσομοίωση του Πίνακα 7-9 με τον ελάχιστο χρόνο TTS και είναι για το πρώτο σενάριο κίνησης και την αρχική προσέγγιση (42stages/71lins). Ο πίνακας ελέγχου L έχει διαστάσεις (stages)x(stages+links) δηλαδή 42x113, ενώ ο πίνακας H stagesxlinks δηλαδή 42x71.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί πως οι πίνακες ελέγχου L_x και L_y δεν παρουσιάζονται στο παρόν παράρτημα καθώς προκύπτουν από τον πίνακα L . Ο L_x έχει διαστάσεις (stages)x(links) (42x71) και είναι οι πρώτες 71 στήλες του L , ενώ ο L_y έχει διαστάσεις (stages)x(stages) (42x42) και είναι οι επόμενες 42 στήλες του πίνακα ελέγχου L .

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ Ι

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	0.014	-0.001	0.038	-0.031	0.013	-0.001	-0.001	0.002	0.000	0.000	0.004	0.015	0.005	-0.019	-0.004	-0.715	-0.039	0.013	0.002	0.020	0.001	0.525	-0.190
2	-0.029	0.001	-0.075	0.061	-0.025	0.002	0.002	-0.005	0.000	0.001	-0.007	-0.030	-0.010	0.038	0.009	-0.590	0.078	-0.025	-0.005	-0.039	-0.001	0.964	0.374
3	0.657	-0.001	0.035	-0.029	0.012	-0.001	-0.001	0.002	0.000	0.000	0.003	0.014	0.005	-0.018	-0.004	0.162	-0.036	0.012	0.002	0.018	0.001	-0.336	-0.174
4	-0.086	-0.347	0.332	-0.270	0.111	-0.008	-0.008	0.022	-0.002	-0.004	0.033	0.133	0.046	-0.168	-0.020	0.175	-0.342	0.112	0.022	0.170	0.007	-0.125	0.051
5	0.046	1.020	0.013	-0.010	0.004	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.005	0.002	-0.006	-0.053	-0.093	-0.013	0.004	0.001	0.006	0.000	0.068	-0.025
6	-0.214	0.050	0.016	-0.014	0.006	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.006	0.003	-0.008	-0.301	0.434	-0.017	0.005	0.001	0.009	0.000	-0.316	0.117
7	0.014	-0.111	-0.091	0.074	-0.030	0.002	0.002	-0.006	0.000	0.001	-0.009	-0.036	-0.013	0.046	0.695	-0.028	0.094	-0.031	-0.006	-0.047	-0.002	0.019	-0.009
8	0.068	-0.007	-0.333	0.267	-0.110	0.008	0.008	-0.021	0.002	0.004	-0.032	-0.131	-0.045	0.167	0.039	-0.139	-0.004	-0.111	-0.021	-0.168	-0.007	0.100	-0.039
9	0.000	0.000	-1.969	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	2.293	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001
10	0.000	0.000	2.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	-0.038	0.004	0.005	-0.413	0.170	-0.013	-0.013	0.033	-0.003	-0.006	0.050	0.203	0.020	-0.075	-0.022	0.077	0.002	0.045	0.033	0.260	0.003	-0.055	0.022
12	-0.126	0.013	-0.010	0.209	-0.086	0.006	0.006	-0.017	0.001	0.003	-0.025	-0.103	0.011	0.048	-0.072	0.257	0.004	0.390	-0.017	-0.131	-0.043	-0.188	0.069
13	-0.016	0.002	0.040	0.025	-0.010	0.001	0.001	-0.002	0.000	0.000	-0.003	-0.013	0.098	-0.450	-0.012	0.033	0.001	-0.108	-0.002	-0.015	0.057	-0.024	0.009
14	0.266	-0.027	0.009	-0.007	0.003	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.004	0.001	-0.005	0.157	-0.541	-0.009	0.004	0.001	0.004	0.000	0.395	-0.146
15	-0.034	0.003	-0.233	-0.133	0.055	-0.004	-0.004	0.011	-0.001	-0.002	0.016	0.065	0.022	-0.083	-0.020	0.070	-0.001	0.055	0.011	0.084	0.004	-0.050	0.019
16	-0.002	0.001	0.006	0.003	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.047	-0.018	-0.007	0.004	-0.001	-0.924	0.000	-0.002	0.091	-0.003	0.001
17	0.043	-0.004	-0.009	0.052	-0.280	0.021	0.021	-0.055	0.005	0.010	-0.082	-0.031	-0.033	0.124	0.025	-0.088	-0.002	-0.074	-0.055	-0.042	-0.006	0.063	-0.024
18	0.000	0.000	0.000	1.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	0.006	-0.001	-0.001	0.082	-0.038	0.003	0.003	-0.007	0.001	0.001	-0.011	-0.394	-0.005	0.016	0.003	-0.012	-0.001	-0.010	-0.007	-0.501	-0.001	0.008	-0.004
20	-0.010	0.001	0.002	-0.126	-0.597	-0.004	-0.004	0.014	-0.001	-0.002	0.021	0.080	0.007	-0.027	-0.006	0.019	0.000	0.017	0.014	0.102	0.001	-0.014	0.005
21	-0.005	0.000	0.001	-0.010	1.373	-0.002	-0.002	0.006	0.000	-0.001	0.008	0.026	0.003	-0.013	-0.003	0.009	0.000	0.008	0.006	0.034	0.001	-0.007	0.003
22	-0.014	0.001	0.003	-0.133	-0.579	-0.007	-0.007	0.017	-0.001	-0.003	0.026	0.084	0.011	-0.040	-0.008	0.029	0.001	0.024	0.017	0.108	0.002	-0.021	0.008
23	0.007	-0.001	-0.002	0.100	0.614	-0.042	-0.042	0.105	-0.009	-0.019	0.159	-0.062	-0.006	0.020	0.004	-0.014	0.000	-0.012	0.105	-0.078	-0.001	0.011	-0.003
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.011	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000
25	0.009	-0.005	-0.032	-0.014	0.006	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.007	0.238	0.092	0.031	-0.018	0.003	0.128	0.001	0.009	-0.476	0.013	-0.005
26	-0.077	0.008	0.193	0.115	-0.047	0.004	0.004	-0.009	0.001	0.002	-0.014	-0.057	-0.019	0.073	-0.046	0.157	0.004	-0.047	-0.009	-0.073	-0.004	-0.115	0.042
27	-0.006	0.001	0.016	0.009	-0.004	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	-0.001	-0.005	-0.942	-0.399	-0.005	0.013	0.000	-0.039	-0.001	-0.006	0.019	-0.009	0.003
28	-0.008	0.004	0.027	0.012	-0.005	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	-0.001	-0.006	-0.207	-0.079	-0.027	0.016	-0.003	-0.712	-0.001	-0.008	0.412	-0.012	0.004
29	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	1.015	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30	0.029	-0.004	-0.074	-0.043	0.018	-0.001	-0.001	0.003	0.000	-0.001	0.005	0.022	-0.602	-0.005	0.023	-0.058	-0.001	0.201	0.003	0.027	-0.105	0.043	-0.016
31	0.009	-0.001	-0.023	-0.013	0.005	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.006	1.362	-0.003	0.007	-0.018	0.000	0.061	0.001	0.008	-0.032	0.013	-0.005
32	-0.001	0.000	0.000	-0.010	0.008	-0.038	-0.038	-0.204	-0.213	-0.458	1.071	0.007	0.001	-0.003	-0.001	0.002	0.000	0.002	-0.204	0.009	0.000	-0.002	0.001
33	-0.005	0.001	0.001	-0.049	0.036	-0.178	-0.178	0.219	-0.016	-0.038	0.327	0.035	0.004	-0.015	-0.003	0.011	0.000	0.009	0.219	0.045	0.001	-0.007	0.003
34	0.000	0.000	0.000	0.004	-0.003	0.014	0.014	0.791	0.078	0.166	0.330	-0.003	0.000	0.001	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.791	-0.004	0.000	0.001	0.000
35	0.001	0.000	0.000	0.011	-0.008	0.038	0.038	-0.187	0.776	-0.328	-0.389	-0.008	-0.001	0.003	0.001	-0.002	0.000	-0.002	-0.187	-0.010	0.000	0.002	-0.001
36	0.001	0.000	0.000	0.008	-0.006	0.027	0.027	-0.136	-0.377	1.101	-0.280	-0.005	-0.001	0.002	0.000	-0.002	0.000	-0.001	-0.136	-0.007	0.000	0.001	0.000
37	-0.016	0.002	0.003	-0.233	0.104	-0.008	-0.008	0.020	-0.002	-0.004	0.031	1.095	0.012	-0.046	-0.009	0.033	0.001	0.028	0.020	0.014	0.002	-0.024	0.009
38	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.011	0.000	0.000	0.000
39	0.006	-0.001	-0.001	0.059	-0.043	-0.291	-0.291	-0.265	0.022	0.048	-0.400	-0.042	-0.005	0.018	0.004	-0.013	0.000	-0.011	-0.265	-0.054	-0.001	0.009	-0.004
40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	1.012	1.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
41	0.017	0.028	0.026	-0.021	0.009	-0.001	-0.001	0.002	0.000	0.000	0.003	0.010	0.004	-0.013	-0.177	-0.035	-0.026	0.009	0.002	0.013	0.000	0.026	-0.009
42	-0.004	0.002	0.013	0.006	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.003	-0.100	-0.039	-0.013	0.008	-0.001	-0.321	0.000	-0.004	1.284	-0.006	0.002

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ L (συνέχεια)

	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
1	-0.190	0.098	0.098	-0.060	-0.060	-0.060	0.046	-0.026	-0.026	-0.006	0.004	0.022	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	0.000	0.001	0.000	-0.001	-0.030	-0.030	0.015
2	0.374	-0.196	-0.196	0.119	0.119	0.119	-0.091	0.051	0.051	0.013	-0.009	-0.044	0.010	0.010	0.010	0.010	-0.001	-0.003	0.000	0.001	0.060	0.060	-0.030
3	-0.174	0.091	0.091	-0.055	-0.055	-0.055	0.043	-0.024	-0.024	-0.006	0.004	0.020	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	0.000	0.001	0.000	-0.001	-0.028	-0.028	0.014
4	0.051	0.863	0.864	-0.523	-0.524	-0.524	0.402	-0.223	-0.223	-0.056	0.039	0.191	-0.045	-0.045	-0.045	-0.045	0.003	0.011	-0.002	-0.006	-0.264	-0.264	0.133
5	-0.025	0.033	0.033	-0.019	-0.019	-0.019	0.015	-0.008	-0.008	-0.002	0.001	0.007	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.010	-0.010	0.005
6	0.117	0.043	0.043	-0.026	-0.026	-0.026	0.019	-0.011	-0.011	-0.003	0.003	0.010	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	-0.013	-0.013	0.006
7	-0.009	-0.236	-0.236	0.143	0.143	0.143	-0.110	0.061	0.061	0.015	-0.011	-0.052	0.012	0.012	0.012	0.012	-0.001	-0.003	0.000	0.002	0.072	0.072	-0.036
8	-0.039	0.008	0.008	0.518	0.518	0.518	-0.398	0.220	0.220	0.055	-0.039	-0.189	0.044	0.044	0.044	0.044	-0.003	-0.011	0.002	0.006	0.261	0.261	-0.131
9	-0.002	0.002	0.001	-0.009	-0.005	-0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.001	-0.001	0.000	0.006	0.004	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.022	-0.005	-0.005	0.012	0.012	0.012	0.615	-0.342	-0.342	-0.085	0.059	0.290	-0.068	-0.068	-0.068	-0.068	0.004	0.017	-0.003	-0.009	-0.404	-0.404	0.203
12	0.069	-0.011	-0.011	0.000	0.000	0.001	-0.309	0.175	0.175	0.043	-0.027	-0.145	0.034	0.034	0.034	0.034	-0.002	-0.009	0.001	0.004	0.205	0.205	-0.103
13	0.009	-0.001	-0.001	0.047	0.047	0.047	-0.039	0.023	0.023	0.005	-0.001	-0.016	0.004	0.004	0.004	0.004	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.025	0.025	-0.013
14	-0.146	0.022	0.022	-0.013	-0.013	-0.013	0.012	-0.007	-0.007	-0.001	-0.001	0.003	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.007	-0.007	0.004
15	0.019	-0.004	-0.004	-0.259	-0.258	-0.258	0.198	-0.110	-0.110	-0.028	0.019	0.094	-0.022	-0.022	-0.022	-0.022	0.001	0.005	-0.001	-0.003	-0.130	-0.130	0.065
16	0.001	0.002	0.002	0.004	0.004	0.004	-0.003	0.001	0.001	0.001	-0.002	-0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	-0.001
17	-0.024	0.005	0.005	-0.016	-0.016	-0.016	-0.061	0.568	0.568	0.141	-0.101	-0.482	0.113	0.113	0.113	0.113	-0.007	-0.028	0.005	0.014	0.063	0.063	-0.031
18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	0.001
19	-0.004	0.001	0.001	-0.003	-0.003	-0.003	-0.006	0.074	0.074	0.019	-0.009	-0.063	0.015	0.015	0.015	0.015	-0.001	-0.004	0.001	0.002	0.783	0.783	-0.394
20	0.005	-0.001	-0.001	0.003	0.003	0.004	0.013	-0.125	-0.127	-0.693	2.009	0.122	-0.026	-0.027	-0.028	-0.028	0.000	0.007	-0.001	-0.003	-0.159	-0.159	0.080
21	0.003	-0.001	-0.001	0.002	0.002	0.002	0.006	-0.061	-0.061	-0.685	0.023	0.047	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011	0.001	0.003	0.000	-0.002	-0.052	-0.052	0.026
22	0.008	-0.002	-0.002	0.005	0.005	0.005	0.019	-0.185	-0.184	1.296	0.045	0.156	-0.037	-0.036	-0.036	-0.036	0.002	0.009	-0.001	-0.005	-0.168	-0.168	0.084
23	-0.003	0.000	0.000	-0.002	-0.001	-0.002	-0.010	0.089	0.091	0.682	-1.794	0.926	-0.220	-0.219	-0.218	-0.218	0.016	0.054	-0.009	-0.029	0.122	0.122	-0.062
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
25	-0.005	-0.008	-0.008	-0.027	-0.027	-0.027	0.021	-0.012	-0.012	-0.003	0.002	0.010	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	-0.014	-0.014	0.007
26	0.042	-0.006	-0.006	0.224	0.224	0.224	-0.172	0.096	0.096	0.024	-0.016	-0.081	0.019	0.019	0.019	0.019	-0.001	-0.005	0.001	0.002	0.113	0.113	-0.057
27	0.003	0.000	0.000	0.018	0.018	0.018	-0.014	0.008	0.008	0.002	-0.001	-0.006	0.002	0.002	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.009	-0.005
28	0.004	0.007	0.007	0.023	0.023	0.023	-0.018	0.010	0.010	0.002	-0.001	-0.008	0.002	0.002	0.002	0.002	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.012	0.012	-0.006
29	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30	-0.016	0.000	0.000	-0.084	-0.084	-0.084	0.066	-0.037	-0.037	-0.009	0.005	0.030	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	0.001	0.002	0.000	-0.001	-0.043	-0.043	0.022
31	-0.005	0.000	0.000	-0.026	-0.026	-0.026	0.020	-0.011	-0.011	-0.003	0.002	0.009	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	-0.013	-0.013	0.006
32	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	-0.014	-0.014	-0.003	0.081	0.012	-0.095	-0.095	-0.095	-0.095	0.362	1.275	-0.213	-0.672	-0.015	-0.015	0.007
33	0.003	-0.001	-0.001	0.002	0.002	0.002	0.007	-0.068	-0.068	-0.015	0.382	0.058	-0.456	-0.456	-0.456	-0.456	1.718	0.109	-0.016	-0.054	-0.069	-0.069	0.035
34	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.005	0.005	0.001	-0.029	-0.005	0.036	0.036	0.036	0.036	-0.132	-0.461	0.078	0.244	0.005	0.005	-0.003
35	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.015	0.015	0.003	-0.083	-0.013	0.098	0.098	0.098	0.098	-0.371	-0.201	0.776	0.448	0.015	0.015	-0.008
36	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.010	0.011	0.002	-0.059	-0.009	0.070	0.070	0.070	0.070	-0.265	-0.144	-0.377	0.725	0.011	0.011	-0.005
37	0.009	-0.002	-0.002	0.006	0.006	0.006	0.021	-0.209	-0.209	-0.052	0.035	0.178	-0.042	-0.042	-0.042	-0.042	0.003	0.010	-0.002	-0.005	-0.021	-0.021	1.095
38	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.001	0.001	0.000	-0.002	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	-0.001
39	-0.004	0.001	0.001	-0.003	-0.003	-0.003	-0.008	0.082	0.082	0.018	-0.460	-0.071	0.549	0.549	0.550	0.549	-0.036	-0.135	0.022	0.070	0.084	0.084	-0.042
40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
41	-0.009	0.066	0.066	-0.040	-0.040	-0.040	0.031	-0.017	-0.017	-0.004	0.003	0.015	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	0.000	0.001	0.000	0.000	-0.020	-0.020	0.010
42	0.002	0.004	0.004	0.011	0.011	0.011	-0.009	0.005	0.005	0.001	-0.001	-0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.006	-0.003

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ L (συνέχεια)

	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
1	0.043	0.043	0.065	0.019	-0.007	-0.001	-0.004	0.014	0.014	0.027	0.027	-0.031	0.000	-0.037	0.009	0.001	-0.024	-0.019	-0.002	0.012	0.001	-0.002	0.014
2	-0.084	-0.084	-0.127	-0.036	0.014	0.001	0.009	-0.029	-0.029	-0.045	-0.044	0.057	0.000	0.073	-0.016	-0.002	0.047	0.037	0.004	-0.024	-0.001	0.004	-0.029
3	0.039	0.039	0.060	0.017	-0.007	-0.001	-0.004	0.657	0.657	0.022	0.022	-0.027	0.000	-0.034	0.008	0.001	-0.022	-0.017	-0.002	0.011	0.001	-0.002	0.657
4	0.372	0.372	0.563	0.161	-0.063	-0.347	-0.020	-0.086	-0.086	0.254	0.254	-0.257	0.002	-0.323	0.073	0.007	-0.209	-0.163	-0.018	0.106	0.007	-0.018	-0.086
5	0.014	0.014	0.021	0.006	-0.002	1.020	-0.053	0.046	0.046	-0.136	-0.136	-0.010	0.000	-0.012	0.003	0.000	-0.008	-0.006	-0.001	0.004	0.000	-0.001	0.046
6	0.018	0.018	0.025	0.006	-0.002	0.050	-0.301	-0.214	-0.214	0.637	0.637	-0.007	0.000	-0.015	0.002	0.000	-0.010	-0.007	-0.001	0.005	0.000	-0.001	-0.214
7	-0.102	-0.102	-0.153	-0.043	0.017	-0.111	0.695	0.014	0.014	-0.040	-0.040	0.069	0.000	0.088	-0.019	-0.002	0.057	0.044	0.005	-0.029	-0.002	0.005	0.014
8	-0.368	-0.368	-0.557	-0.159	0.062	-0.007	0.039	0.068	0.068	-0.202	-0.202	0.254	-0.002	0.319	-0.072	-0.007	0.206	0.161	0.018	-0.104	-0.007	0.018	0.068
9	0.001	0.001	0.001	0.000	-0.001	0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	-0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.164	0.164	0.458	-0.157	-0.029	0.004	-0.022	-0.038	-0.038	0.112	0.112	-0.140	0.001	-0.134	0.033	0.004	-0.092	-0.072	-0.009	0.047	0.003	-0.009	-0.038
12	-0.088	-0.088	0.776	1.085	0.025	0.013	-0.072	-0.126	-0.126	0.377	0.377	-0.474	-0.013	-0.826	-0.031	-0.046	0.038	0.049	0.117	-0.024	-0.043	0.117	-0.126
13	0.981	0.981	-0.054	-0.015	-0.171	0.002	-0.012	-0.016	-0.016	0.047	0.047	-0.060	0.017	0.025	0.202	0.061	-0.536	-0.438	-0.155	0.275	0.057	-0.155	-0.016
14	0.011	0.011	0.021	0.010	-0.004	-0.027	0.157	0.266	0.266	-0.794	-0.794	1.002	0.000	-0.011	0.005	0.000	-0.007	-0.006	-0.001	0.003	0.000	-0.001	0.266
15	0.184	0.184	0.277	0.079	0.981	0.004	-0.020	-0.034	-0.034	0.101	0.101	-0.128	0.001	-0.159	0.039	0.004	-0.104	-0.082	-0.010	0.053	0.004	-0.010	-0.034
16	-0.002	-0.002	0.003	0.006	-0.022	0.001	-0.007	-0.002	-0.002	0.007	0.007	-0.012	0.027	2.003	0.027	0.099	0.026	-0.021	-0.250	-0.003	0.091	-0.250	-0.002
17	-0.275	-0.275	-0.276	-0.215	0.046	-0.004	0.025	0.043	0.043	-0.128	-0.128	0.161	-0.002	0.220	-0.053	-0.006	0.153	0.120	0.015	-0.078	-0.006	0.015	0.043
18	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	-0.035	-0.035	-0.035	-0.029	0.007	-0.001	0.003	0.006	0.006	-0.017	-0.017	0.022	0.000	0.030	-0.007	-0.001	0.020	0.016	0.002	-0.011	-0.001	0.002	0.006
20	0.060	0.060	0.061	0.048	-0.010	0.001	-0.006	-0.010	-0.010	0.028	0.028	-0.036	0.000	-0.049	0.012	0.001	-0.034	-0.026	-0.003	0.017	0.001	-0.003	-0.010
21	0.030	0.030	0.030	0.023	-0.005	0.000	-0.003	-0.005	-0.005	0.014	0.014	-0.017	0.000	-0.024	0.006	0.001	-0.016	-0.013	-0.002	0.008	0.001	-0.002	-0.005
22	0.089	0.089	0.090	0.070	-0.015	0.001	-0.008	-0.014	-0.014	0.042	0.042	-0.052	0.001	-0.072	0.018	0.002	-0.050	-0.039	-0.005	0.025	0.002	-0.005	-0.014
23	-0.043	-0.043	-0.043	-0.034	0.007	-0.001	0.004	0.007	0.007	-0.020	-0.020	0.026	0.000	0.035	-0.009	-0.001	0.024	0.019	0.002	-0.013	-0.001	0.002	0.007
24	0.000	0.000	-0.002	-0.002	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.009	0.001	0.002	-0.001	-0.001	-0.005	0.005	0.003	-0.005	0.000
25	0.020	0.020	0.029	0.008	0.121	-0.005	0.031	0.009	0.009	-0.026	-0.026	0.045	-0.141	-0.014	-0.143	-0.508	-0.130	0.108	1.289	-0.011	-0.476	1.289	0.009
26	-0.161	-0.161	-0.243	-0.071	-0.828	0.008	-0.046	-0.077	-0.077	0.230	0.230	-0.290	-0.001	0.138	0.981	-0.005	0.093	0.074	0.011	-0.048	-0.004	0.011	-0.077
27	-0.014	-0.014	-0.019	-0.005	-0.066	0.001	-0.005	-0.006	-0.006	0.018	0.018	-0.024	0.006	0.009	0.078	2.026	0.474	-0.468	-0.052	0.102	0.019	-0.052	-0.006
28	-0.019	-0.019	-0.024	-0.006	-0.104	0.004	-0.027	-0.008	-0.008	0.023	0.023	-0.039	0.122	0.007	0.123	0.439	0.116	-0.091	-1.115	2.018	0.412	-1.115	-0.008
29	0.003	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	-0.002	-0.001	0.001	0.000	-0.001	0.000
30	0.064	0.064	0.092	0.026	0.313	-0.004	0.023	0.029	0.029	-0.085	-0.085	0.110	-0.031	-0.049	-0.370	-0.116	1.284	0.682	0.286	-0.506	-0.105	0.286	0.029
31	0.018	0.018	0.027	0.008	0.097	-0.001	0.007	0.009	0.009	-0.027	-0.027	0.034	-0.010	-0.015	-0.114	-0.027	-0.683	0.679	0.086	-0.155	-0.032	0.086	0.009
32	0.007	0.007	0.007	0.005	-0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	0.003	0.003	-0.004	0.000	-0.006	-0.004	0.000	-0.004	-0.003	0.000	0.002	0.000	0.000	-0.001
33	0.033	0.033	0.033	0.026	-0.006	0.001	-0.003	-0.005	-0.005	0.015	0.015	-0.019	0.000	-0.026	0.006	0.001	-0.018	-0.014	-0.002	0.009	0.001	-0.002	-0.005
34	-0.003	-0.003	-0.003	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	0.002	0.000	0.002	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000
35	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	-0.003	-0.003	0.004	0.000	0.006	-0.001	0.000	0.004	0.003	0.000	-0.002	0.000	0.000	0.001
36	-0.005	-0.005	-0.005	-0.004	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	-0.002	-0.002	0.003	0.000	0.004	-0.001	0.000	0.003	0.002	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.001
37	0.101	0.101	0.102	0.080	-0.017	0.002	-0.009	-0.016	-0.016	0.048	0.047	-0.060	0.001	-0.082	0.020	0.002	-0.057	-0.044	-0.006	0.029	0.002	-0.006	-0.016
38	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
39	-0.039	-0.039	-0.039	-0.031	0.007	-0.001	0.004	0.006	0.006	-0.018	-0.018	0.023	0.000	0.032	-0.008	-0.001	0.022	0.017	0.002	-0.011	-0.001	0.002	0.006
40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
41	0.029	0.029	0.043	0.012	-0.005	0.028	-0.177	0.017	0.017	-0.052	-0.052	-0.020	1.017	-0.025	0.006	0.000	-0.016	-0.012	0.000	0.008	0.000	0.000	0.017
42	-0.009	-0.009	-0.012	-0.003	-0.051	0.002	-0.013	-0.004	-0.004	0.011	0.011	-0.019	0.059	0.004	0.060	0.213	0.055	-0.045	-0.540	0.001	1.284	-0.540	-0.004

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ L (συνέχεια)

	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
1	-0.177	0.006	-0.012	0.005	0.000	0.001	0.000	0.002	0.001	-0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.345	-0.013	-0.006	0.015	-0.001	-0.003	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
3	0.483	0.006	0.001	-0.005	0.012	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	-0.035	0.055	0.004	0.001	-0.001	0.014	-0.005	0.004	0.001	-0.007	-0.004	0.000	0.006	0.002	0.005	-0.003	-0.001	-0.003	-0.002	-0.002	-0.004	0.001	0.001
5	0.021	0.002	-0.001	0.000	0.000	0.002	0.014	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	-0.096	0.003	0.007	-0.002	-0.003	0.001	0.001	0.015	-0.008	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.005	-0.015	-0.002	0.000	0.001	-0.003	-0.001	-0.002	0.014	0.002	0.001	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000
8	0.029	-0.054	-0.003	0.000	0.001	0.001	0.001	-0.003	0.000	0.008	0.001	-0.002	-0.006	-0.002	-0.005	0.003	0.001	0.003	0.002	0.003	0.004	-0.001	-0.001
9	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	-0.001	-0.005	0.033	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	-0.008	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	-0.016	0.085	0.002	0.000	0.000	-0.001	-0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.010	-0.002	0.001	-0.002	0.000	-0.001	-0.005	-0.005	-0.007	0.001	0.002
12	-0.057	-0.043	0.004	-0.001	-0.002	0.000	0.000	0.008	-0.002	0.000	0.000	0.000	-0.003	0.017	-0.005	-0.009	0.001	-0.012	0.005	0.003	0.005	0.000	0.000
13	-0.007	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	-0.003	-0.003	0.021	0.001	-0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001
14	0.120	0.002	-0.008	0.003	0.004	0.000	-0.001	-0.018	0.005	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.003	0.020	0.000	-0.001	-0.001	0.000	0.000	-0.001	0.000
15	-0.015	0.027	0.001	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.002	0.000	-0.005	0.001	-0.002	0.003	0.001	0.003	-0.002	0.017	-0.002	-0.001	-0.001	-0.002	0.001	0.001
16	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.003	-0.002	-0.001	0.030	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000
17	0.019	-0.139	-0.002	0.000	0.001	0.001	0.000	-0.002	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	-0.003	-0.004	0.002	0.001	0.002	0.011	-0.001	-0.001	-0.004	-0.003
18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.015	-0.001	0.000	0.000
19	0.002	-0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.001	0.000
20	-0.004	-1.290	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	-0.001	-0.003	0.022	-0.004	
21	-0.002	0.688	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	-0.001	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001	-0.004	0.017
22	-0.006	0.718	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.003	-0.002	-0.003	-0.002	-0.005
23	0.003	1.297	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.003	-0.013	0.003
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
25	0.004	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
26	-0.035	-0.024	0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.005	-0.002	0.004	-0.001	0.002	-0.004	-0.002	-0.004	-0.006	-0.014	0.002	0.002	0.001	0.002	0.000	0.000
27	-0.003	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
28	-0.004	-0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
29	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30	0.013	0.009	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.002	0.000	-0.001	0.002	0.002	0.003	0.002	0.005	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.000
31	0.004	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
32	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
33	-0.002	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.003	0.001
34	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
35	0.000	-0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000
36	0.000	-0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
37	-0.007	0.052	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	-0.001	0.000	0.000	-0.003	-0.002	0.000	0.001	0.001
38	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
39	0.002	-0.026	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	-0.004	-0.002
40	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
41	0.008	0.004	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	-0.001	-0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
42	-0.002	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ L (συνέχεια)

[illegible]

ΠΙΝΑΚΑΣ Η

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	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	1	0	0	0	0	0	0	1	1	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	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	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	1	0	0	0	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	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	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	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	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	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	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	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
18	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
21	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	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	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	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	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	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	1	0	0	0	0	0	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	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	1	0	0	0	0	0	0	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	1	0	0	0	0	0	0	0	0	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	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	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	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	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	1	0	0	0	0	0	0	0	0	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	1	0	0	0	0	0	0	0	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	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
40	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	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	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ΠΙΝΑΚΑΣ Η (συνέχεια)

	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	1	0	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	0	1	1	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	1	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	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	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	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	1	0	0	0	0	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	1	1	0	0	0	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	1	1	0	0	0	0	0	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	0	0	0	1	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	1	0	0	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	0	0	0	0	0	1	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	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	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	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	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	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	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	0	0	0	0	0	0	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	1	0	0	0	0	0	0	0	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	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	0	0	0	0	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	