

Πολυτεχνείο Κρήτης

**Βέλτιστος Έλεγχος Φωτεινής Σηματοδότησης  
μέσω Τετραγωνικού Προγραμματισμού**

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση  
των απαιτήσεων για την απόκτηση  
Διδακτορικού Διπλώματος

υπό

Κωνσταντίνου Μ. Αμπουντώλα



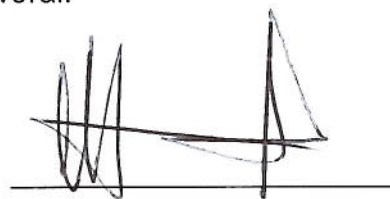
Χανιά, 2009

© Copyright υπό Κωνσταντίνου Μ. Αμπουντώλα

Χανιά, 2009

Η διατριβή του Κωνσταντίνου Μ. Αμπουντώλα, εγκρίνεται:

Καθ. Μάρκος Παπαγεωργίου (επιβλέπων)



Καθ. Αθανάσιος Μυγδαλάς (μέλος τριμελούς)



Αν. Καθ. Ηλίας Κοσματούπουλος (μέλος τριμελούς)



Καθ. Γεώργιος Σταυρουλάκης



Καθ. Βασίλειος Κουϊκόγλου



Επ. Καθ. Ιάσων Καραφύλλης



Επ. Καθ. Ιωάννης Παπαμιχαήλ



## Περιεχόμενα

|          |                                                                                                             |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Εισαγωγή</b>                                                                                             | <b>12</b> |
| 1.1      | Εισαγωγή . . . . .                                                                                          | 12        |
| 1.2      | Δομή της διατριβής . . . . .                                                                                | 17        |
| 1.3      | Δημοσιεύσεις στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής . . . . .                                               | 19        |
| <b>2</b> | <b>Έλεγχος κυκλοφορίας αστικών οδικών δικτύων</b>                                                           | <b>20</b> |
| 2.1      | Η ανάγκη ελέγχου της κυκλοφορίας . . . . .                                                                  | 20        |
| 2.2      | Ορισμοί . . . . .                                                                                           | 23        |
| 2.3      | Τρόποι ελέγχου κυκλοφορίας μέσω σηματοδοτών . . . . .                                                       | 24        |
| 2.4      | Κατάταξη συστημάτων ρύθμισης κυκλοφορίας . . . . .                                                          | 25        |
| 2.5      | Θεμελιώδες διάγραμμα για αστικά δίκτυα 2-διαστάσεων . . . . .                                               | 26        |
| 2.6      | Επισκόπηση προηγμένων στρατηγικών ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης . . . . .                                  | 28        |
| 2.7      | Συστήματα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου κεντρικής λειτουργικής αρχιτεκτονικής . . . . . | 40        |
| 2.8      | Προβλήματα της στρατηγικής TUC και εισαγωγή στην προτεινόμενη μεθοδολογία . .                               | 43        |
| <b>3</b> | <b>Μέθοδοι ελέγχου βασισμένες στο μαθηματικό πρότυπο αποθήκευσης-και-πρώ-<br/>θησης</b>                     | <b>48</b> |
| 3.1      | Εισαγωγή . . . . .                                                                                          | 48        |
| 3.2      | Διατύπωση του προβλήματος . . . . .                                                                         | 49        |

|          |                                                                                               |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3      | Αντικειμενικός στόχος του ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης . . . . .                            | 52         |
| 3.4      | Βέλτιστος έλεγχος κλειστού βρόχου με Γραμμικό-Τετραγωνικό έλεγχο (η στρατηγική TUC) . . . . . | 52         |
| 3.5      | Βέλτιστος έλεγχος ανοικτού βρόχου με τετραγωνικό προγραμματισμό . . . . .                     | 54         |
| 3.6      | Βέλτιστος έλεγχος ανοικτού βρόχου με μη γραμμικό προγραμματισμό . . . . .                     | 56         |
| 3.7      | Σχολιασμός προσεγγίσεων . . . . .                                                             | 62         |
| 3.8      | Το σχήμα ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα (ή προβλεπτικού έλεγχου) . . . . .                       | 63         |
| <b>4</b> | <b>Αποτελέσματα μακροσκοπικής προσομοίωσης</b>                                                | <b>66</b>  |
| 4.1      | Εισαγωγή . . . . .                                                                            | 66         |
| 4.2      | Το αστικό δίκτυο των Χανίων . . . . .                                                         | 67         |
| 4.3      | Το μοντέλο προσομοίωσης . . . . .                                                             | 70         |
| 4.4      | Κριτήρια αξιολόγησης . . . . .                                                                | 72         |
| 4.5      | Αποτελέσματα προσομοίωσης ανοικτού βρόχου . . . . .                                           | 74         |
| 4.6      | Αποτελέσματα προσομοίωσης κλειστού βρόχου . . . . .                                           | 78         |
| <b>5</b> | <b>Αποτελέσματα μικροσκοπικής προσομοίωσης</b>                                                | <b>94</b>  |
| 5.1      | Εισαγωγή . . . . .                                                                            | 94         |
| 5.2      | Ο μικροσκοπικός προσομοιωτής AIMSUN . . . . .                                                 | 95         |
| 5.3      | Κριτήρια αξιολόγησης . . . . .                                                                | 95         |
| 5.4      | Μοντέλο ελέγχου του αστικού δικτύου των Χανίων και περιγραφή σεναρίων . . . . .               | 96         |
| 5.5      | Στρατηγικές ελέγχου που εφαρμόστηκαν . . . . .                                                | 98         |
| 5.6      | Αξιολόγηση των στρατηγικών . . . . .                                                          | 99         |
| 5.7      | Ανάλυση απαιτήσεων υλοποίησης της στρατηγικής TUC σε αστικά οδικά δίκτυα . . . . .            | 101        |
| <b>6</b> | <b>Συμπεράσματα</b>                                                                           | <b>105</b> |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| <b>Περιεχόμενα</b>                    | <b>3</b>   |
| 6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα . . . . . | 105        |
| 6.2 Μελλοντική έρευνα . . . . .       | 113        |
| <b>Βιβλιογραφία</b>                   | <b>114</b> |

## Κατάλογος Σχημάτων

|     |                                                                                                                              |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Το σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου. . . . .                                                                                  | 22 |
| 2.2 | Η ροή κορεσμού ενός συνδέσμου. . . . .                                                                                       | 23 |
| 2.3 | Δομή σηματοδότησης κόμβου. . . . .                                                                                           | 24 |
| 2.4 | Θεμελιώδες διάγραμμα. . . . .                                                                                                | 27 |
| 2.5 | Βασικές αρχές λειτουργίας του συστήματος φωτεινής σηματοδότησης SCOOT. . . . .                                               | 36 |
| 2.6 | Αρχιτεκτονική του συστήματος ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης TASS. . . . .                                                    | 38 |
| 3.1 | Ένας σύνδεσμος που συνδέει δύο κόμβους $M$ και $N$ έτσι ώστε $z \in O_M$ και $z \in I_N$ . . . . .                           | 51 |
| 3.2 | Μοντελοποίηση της εκροής των συνδέσμων. . . . .                                                                              | 51 |
| 3.3 | Ένας δρόμος διπλής κατεύθυνσης που συνδέει δύο κόμβους $M$ και $N$ . . . . .                                                 | 55 |
| 3.4 | Το σχήμα κυλιόμενου ορίζοντα. . . . .                                                                                        | 64 |
| 4.1 | Δορυφορική λήψη του αστικού δικτύου των Χανίων. . . . .                                                                      | 67 |
| 4.2 | Το μοντέλο ελέγχου του αστικού οδικού δικτύου των Χανίων για την διερεύνηση των στρατηγικών ελέγχου ανοικτού βρόχου. . . . . | 69 |
| 4.3 | Το μοντέλο ελέγχου του αστικού οδικού δικτύου των Χανίων για την διερεύνηση των στρατηγικών ελέγχου κλειστού βρόχου. . . . . | 69 |
| 4.4 | Σύνδεση στρατηγικής ελέγχου με το μοντέλο προσομοίωσης. . . . .                                                              | 73 |

|     |                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.5 | Σχετικός αριθμός οχημάτων στους κόμβους 12 και 13 από την εφαρμογή: (a) LQ, (c) QPC και (e) NOC. Βέλτιστες διάρκειες των φάσεων στον κόμβο 12: (b) LQ, (d) QPC και (f) NOC. . . . .                                                       | 77 |
| 4.6 | Σύγκριση των διαφορετικών εκδοχών LQ, QPC, και FT-B για το σενάριο ζήτησης 5: (a), (b) κατάληψη στον σύνδεσμο 38 στον κόμβο 12. (c), (d) χρόνοι πρασίνου στη φάση 3 του κόμβου 12 όπου ο σύνδεσμος 38 έχει προτεραιότητα κίνησης. . . . . | 84 |
| 4.7 | Συσσωρευμένος αριθμός υπερφορτωμένων συνδέσμων για κάθε στρατηγική ελέγχου. .                                                                                                                                                             | 86 |
| 4.8 | Θεμελιώδη διαγράμματα για κάθε στρατηγική ελέγχου. . . . .                                                                                                                                                                                | 88 |
| 5.1 | Η αρχιτεκτονική της διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών AIMSUN API. . . . .                                                                                                                                                                | 96 |
| 5.2 | Το μοντέλο ελέγχου του αστικού οδικού δικτύου των Χανίων στο πρόγραμμα προσο-<br>μοίωσης μικροσκοπικής κυκλοφορίας AIMSUN. . . . .                                                                                                        | 97 |

## Κατάλογος Πινάκων

|      |                                                                                                                                                                                                 |     |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1  | Σύνοψη πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων διαφορετικών συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας σε αστικά δίκτυα. . . . .                                                                                  | 31  |
| 4.1  | Περιγραφή της σηματοδότησης των κόμβων του αστικού δικτύου των Χανίων. . . . .                                                                                                                  | 70  |
| 4.2  | Περιγραφή των συνδέσμων του αστικού δικτύου των Χανίων. . . . .                                                                                                                                 | 71  |
| 4.3  | Σύγκριση των κριτηρίων αξιολόγησης. . . . .                                                                                                                                                     | 75  |
| 4.4  | Κριτήρια αξιολόγησης για τις στρατηγικές ελέγχου FT-A, FT-B, LQ-A και LQ-B. . . . .                                                                                                             | 81  |
| 4.5  | Κριτήρια αξιολόγησης για την προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα QPC-A. . . . .                                                                                                                      | 82  |
| 4.6  | Κριτήρια αξιολόγησης για την προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα QPC-B. . . . .                                                                                                                      | 82  |
| 4.7  | Σύγκριση των κριτηρίων αξιολόγησης. . . . .                                                                                                                                                     | 83  |
| 4.8  | Κριτήρια αποτελεσματικότητας των διερευνήσεων ευαισθησίας για την προσέγγιση LQ, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς πίνακες ελέγχου στην (3.8) λόγω διαφορετικών τιμών των ποσοστών στροφής. . . . . | 92  |
| 4.9  | Κριτήρια αποτελεσματικότητας των διερευνήσεων ευαισθησίας για την προσέγγιση QPC, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές των ποσοστών στροφής σε όλους τους κόμβους του δικτύου. . . . .            | 92  |
| 4.10 | Σύγκριση κριτηρίων αποτελεσματικότητας των διερευνήσεων ευαισθησίας για τις προσεγγίσεις LQ και QPC. . . . .                                                                                    | 93  |
| 5.1  | Κριτήρια αξιολόγησης για τις στρατηγικές ελέγχου FT, TUC-A, TUC-B, QPC. . . . .                                                                                                                 | 99  |
| 5.2  | Σύγκριση των κριτηρίων αξιολόγησης. . . . .                                                                                                                                                     | 100 |

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή, δεν θα ήταν δυνατόν να διεκπεραιωθεί χωρίς την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση ορισμένων ανθρώπων τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω. Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης κ. Μάρκο Παπαγεωργίου για την βοήθεια και την σωστή καθοδήγηση που μου προσέφερε καθώς και για την οικονομική υποστήριξη που μου παρείχε όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επ. Καθ. Ηλία Κοσματόπουλο ο οποίος εκτός από επιβλέπων καθηγητής ήταν και επιστημονικός υπεύθυνος στο ερευνητικό έργο «Ανάπτυξη και αξιολόγηση μιας νέας στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου αστικών οδικών δικτύων» (03ΕΔ898) στα πλαίσια του οποίου πραγματοποιήθηκε η διατριβή.

Τέλος, ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, Καθ. Αθ. Μυγδαλά (Καθ. του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης – μέλος τριμελούς), Καθ. Β. Κουϊκόγλου, Καθ. Γ. Σταυρουλάκη, Επ. Καθ. Ι. Καραφυλλή (Επ. Καθ. του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης) και Επ. Καθ. Ι. Παπαμιχαήλ για τη διόρθωση και αξιολόγηση της εργασίας.

Κ. Αμπουντώλας



Η παρούσα διατριβή είναι μέρος του ερευνητικού έργου 03ΕΔ898, το οποίο υλοποιήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Ενίσχυσης Ερευνητικού Δυναμικού (ΠΕΝΕΔ) που συν-χρηματοδοτήθηκε από εθνικούς και κοινοτικούς πόρους (75% από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο και 25% από το Ελληνικό Υπουργείο Ανάπτυξης, Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας.)

## **Σύντομο Βιογραφικό**

Ο Κωνσταντίνος Μ. Αμπουντώλας είναι γεννημένος το 1976, στην Κατερίνη του Νομού Πιερίας. Είναι διπλωματούχος Μηχανικός Παραγωγής και Διοίκησης (ΜΠΔ) και κάτοχος μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης στην Επιχειρησιακή Έρευνα από το Πολυτεχνείο Κρήτης, 1999 και 2003, αντιστοίχως. Επί του παρόντος είναι υποψήφιος διδάκτορας του τμήματος ΜΠΔ.

Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα εστιάζονται στη μοντελοποίηση και τον έλεγχο της κυκλοφοριακής ροής σε αστικά οδικά δίκτυα μεγάλης κλίμακας. Είναι μέλος του Τ.Ε.Ε.

## Περίληψη Διατριβής

Τα συστήματα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου αποτελούν έναν επιστημονικό χώρο με μακρόχρονη και πλούσια ερευνητική δραστηριότητα. Σήμερα όλες σχεδόν οι μεγάλες πόλεις των προηγμένων χωρών διαθέτουν συστήματα ελεγχόμενης φωτεινής σηματοδότησης, στα οποία οι μετρήσεις πραγματικού χρόνου (ενδείξεις φωρατών) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο φωτεινής σηματοδότησης σε πραγματικό χρόνο. Παρά το γεγονός ότι η εφαρμογή των συστημάτων αυτών βελτίωσε σημαντικά τις κυκλοφοριακές συνθήκες σε σχέση με τα συστήματα σταθερού χρόνου στα οποία ο έλεγχος φωτεινής σηματοδότησης βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα και όχι σε μετρήσεις πραγματικού χρόνου, είναι σήμερα κοινώς αποδεκτό (όχι μόνο από τους χρήστες των συστημάτων αυτών αλλά και από τους ίδιους τους σχεδιαστές/κατασκευαστές τους) ότι τα υπάρχοντα συστήματα δεν μπορούν να ανταποκριθούν αποτελεσματικά στις ολοένα αυξανόμενες ανάγκες κυκλοφοριακής ζήτησης.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης η στρατηγική TUC, μια καινοτόμος και πρωτοποριακή μεθοδολογία ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου, που μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού. Η στρατηγική TUC βασίζεται σε ρεαλιστικά αλλά ταυτοχρόνως απλά (από την άποψη υπολογιστικών απαιτήσεων) μοντέλα κυκλοφοριακής ροής, τα οποία μοντελοποιούν αποτελεσματικά την κυκλοφοριακή ροή τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού. Ωστόσο, από εφαρμογές της στρατηγικής TUC τόσο σε επίπεδο προσομοίωσης, μακροσκοπικής ή μικροσκοπικής, όσο και σε επίπεδο υλοποίησης στο πεδίο, διαπιστώθηκε ότι παρά τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα υπάρχουν ορισμένα προβλήματα τα οποία οφείλονται (α) στο γεγονός ότι ο αναδραστικός κανόνας ελέγχου της TUC που προκύπτει από την εφαρμογή μεθόδων γραμμικού τετραγωνικού βέλτιστου ελέγχου δεν λαμβάνει υπόψη όλους τους περιορισμούς του προβλήματος κυκλοφορίας (εφαρμόζονται αυτοί εκ των υστέρων κατά την εφαρμογή του αναδραστικού κανόνα ελέγχου σε πραγματικό χρόνο) και (β) στο γεγονός ότι η εφαρμογή της στρατηγικής TUC απαιτεί ειδικό χειρισμό και προσεκτική βελτιστοποίηση των παραμέτρων ελέγχου από τον μελετητή, ειδικά σε περιπτώσεις πολύπλοκης γεωμετρίας ή/και σηματοδότησης του κόμβου.

Στόχος της παρούσας διατριβής ήταν η αντιμετώπιση των δύο προαναφερθέντων προβλημάτων της στρατηγικής TUC μέσω της ανάπτυξης μιας νέας στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης, η οποία κάνοντας χρήση τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα θα

αντικαταστήσει τις απλούστερες μεθόδους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί η TUC. Η βασική λογική ανάπτυξης της νέας στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης είναι η διατύπωση του προβλήματος ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης ως προβλήματος περιορισμένου βέλτιστου ελέγχου του οποίου το βασικό μοντέλο της κυκλοφορίας είναι παρόμοιο με αυτό της TUC, αλλά λαμβάνονται ρητώς και εκ των προτέρων υπόψη όλοι οι περιορισμοί του αντίστοιχου προβλήματος κυκλοφορίας. Με βάση την μεθοδολογία αυτή, το παραπάνω πρόβλημα επιλύεται σε κάθε περίοδο για ένα μεγάλο χρονικό ορίζοντα θεωρώντας ότι η τρέχουσα περίοδος είναι η αρχική και οι αποφάσεις ελέγχου που εφαρμόζονται στο αστικό δίκτυο είναι αυτές που αντιστοιχούν στις τιμές της πρώτης χρονικής περιόδου βελτιστοποίησης.

Η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας και της δυνατότητας εφαρμογής σε πραγματικό χρόνο της προτεινόμενης μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα πραγματοποιήθηκε μέσω σύγκρισης της, με βελτιστοποιημένα προγράμματα σταθερού χρόνου φωτεινής σηματοδότησης και τον αναδραστικό κανόνα ελέγχου της στρατηγικής TUC. Για την αξιολόγηση, χρησιμοποιήθηκαν καθιερωμένοι στον τομέα του ελέγχου κυκλοφορίας δείκτες σύγκρισης, όπως συνολικοί χρόνοι διαδρομής εντός του αστικού δικτύου καθώς και ποιοτικά μέτρα σύγκρισης όπως (α) στιγμιότυπα από την προσομοίωση σε περιοχές του προς εξέταση δικτύου τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, (β) ο συσσωρευμένος αριθμός υπερφορτωμένων συνδέσμων που αντικατοπτρίζει τον κίνδυνο υπερφόρτωσης των συνδέσμων και του μπλοκαρίσματος του δικτύου και (γ) το θεμελιώδες διάγραμμα αστικών οδικών δικτύων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο μακροσκοπικής και μικροσκοπικής προσομοίωσης όπου μοντελοποιήθηκε το αστικό δίκτυο των Χανίων και έγινε σύγκριση της συμπεριφοράς του προσομοιωμένου δικτύου για διαφορά ρεαλιστικά σενάρια κυκλοφοριακής ζήτησης.

Από την διερεύνηση μέσω μακροσκοπικής και μικροσκοπικής προσομοίωσης βρέθηκε ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα οδηγεί σε σημαντική βελτίωση των δεικτών αξιολόγησης και υπερτερεί σημαντικά στα ποιοτικά μέτρα σύγκρισης, συγκρινόμενη με βελτιστοποιημένα προγράμματα σταθερού χρόνου φωτεινής σηματοδότησης, που καταδεικνύει τη σαφή υπεροχή που έχουν κατάλληλα σχεδιαζόμενες στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου σε σχέση με (ακόμα και βελτιστοποιημένες) στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου για τη διαχείριση του κυκλοφοριακού κορεσμού σε αστικά οδικά δίκτυα. Επίσης, βρέθηκε ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα δείχνει να είναι καλύτερη ή ισάξια από την στρατηγική ελέγχου TUC.

Συμπερασματικά, το βασικό αποτέλεσμα της διατριβής είναι μια καινοτόμος μεθοδολογία ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των κυκλοφοριακών συνθηκών και κυρίως συνθηκών κορεσμού. Βασίζόμενοι: (α) στο γεγονός ότι η αναπτυχθείσα από το Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης TUC αποδείχθηκε, κατόπιν εφαρμογής και αξιολόγησης στο πεδίο, να υπερτερεί - ή να είναι ισάξια - των πιο προηγμένων διεθνώς στρατηγικών ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης, (β) στο γεγονός ότι η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα χρησιμοποιεί παρόμοια μαθηματικά μοντέλα και εργαλεία με αυτά της στρατηγικής TUC και ως συνέπεια διατηρεί τις βασικές ιδιότητες της TUC: απλότητα στο σχεδιασμό και την υλοποίηση, εξαιρετική αποτελεσματικότητα αντιμετώπισης συνθηκών κορεσμού, αποφυγή μπλοκαρίσματος μέρους του δικτύου, ευρωστία, αξιοπιστία, κλπ., και (γ) στο γεγονός ότι η νέα αυτή στρατηγική αντιμετωπίζει αποτελεσματικά κάποια προβλήματα που εμφανίζει η στρατηγική TUC κατά την εφαρμογή της, ειδικά σε περιπτώσεις πολύπλοκης γεωμετρίας ή/και σηματοδότησης του κόμβου, όπου η εφαρμογή της στρατηγικής TUC απαιτεί ειδικό χειρισμό και προσεκτική βελτιστοποίηση των παραμέτρων ελέγχου από τον μελετητή, εκτιμάται ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης θα βρει εφαρμογές σε αστικά οδικά δίκτυα τόσο στην χώρα μας όσο και στο εξωτερικό. Η εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας σε αστικά οδικά δίκτυα της χώρας μας και του εξωτερικού, θα έχει ως συνέπεια την βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών εντός των αστικών αυτών δικτύων, με σημαντικά θετικά αποτελέσματα τόσο στην βελτίωση των χρόνων διαδρομής, όσο και στη κατανάλωση καυσίμων και εκπομπή ρύπων.

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγή

Οι αστικές οδικές μεταφορές αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα και ζωτικό τομέα της οικονομικής και κοινωνικής δραστηριότητας κάθε αστικής περιοχής. Επί χιλιετίες η αστική κυκλοφορία απαρτιζόταν από πεζούς, υποζύγια και ζωοκίνητα τροχοφόρα. Η εμφάνιση των μηχανοκίνητων οχημάτων σε ικανό και αυξανόμενο αριθμό κατά το πρώτο ήμισυ του εικοστού αιώνα οδήγησε στην επιτακτική ανάγκη λήψης ρυθμιστικών μέτρων για λόγους ασφαλούς διασταύρωσης ανταγωνιστικών ρευμάτων οχημάτων και πεζών, κυρίως στους κόμβους του αστικού οδικού δικτύου. Οι πρώτοι ρυθμιστές-τροχονόμοι αντικαταστάθηκαν σταδιακά από αυτόματους ηλεκτρικούς (και αργότερα ηλεκτρονικούς) φωτεινούς σηματοδότες οι οποίοι, μέχρι σήμερα, καθορίζουν το ποσοστό προτεραιότητας κάθε ανταγωνιστικού ρεύματος σε συνθήκες οδικής ασφάλειας. Με την συνεχή όμως αύξηση του αριθμού των οχημάτων κατέστη γρήγορα σαφές ότι η ρύθμιση της κυκλοφορίας επιδρά όχι μόνον στην ασφάλεια, αλλά και στην αποτελεσματικότητα της ροής. Με άλλα λόγια, διαφορετικά σχέδια ή στρατηγικές ρύθμισης της κυκλοφορίας, που ανταποκρίνονται εξίσου στην ανάγκη ασφαλούς ροής, μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερη ή χειρότερη αποτελεσματικότητα της ροής.

Κατά το δεύτερο ήμισυ και ιδιαίτερα κατά τις τελευταίες δεκαετίες του εικοστού αιώνα εμφανίζεται σε συνεχώς οξυνόμενο βαθμό το φαινόμενο της *κυκλοφοριακής συμφόρησης* ή *κυκλοφοριακού κορεσμού* λόγω της αύξησης των οχημάτων ιδιωτικής χρήσης, καθώς και της μετακίνησης μεγάλων μαζών πληθυσμού από την ύπαιθρο στις αστικές μητροπόλεις. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση εμφανίζεται κατ' αρχήν σε περιορισμένο βαθμό, όταν η ζήτηση σε κάποιο σημείο του οδικού δικτύου υπερβαίνει για κάποια χρονική περίοδο την διαθέσιμη ικανότητα ροής οδηγώντας στην δημιουργία ουρών οχημάτων σε κάποιους δρόμους του δικτύου. Όταν οι ουρές αυτές προσεγγίσουν τους αντίστοιχους ανάντη

κόμβους, η εκεί κυκλοφοριακή ροή μειώνεται σημαντικά (μείωση ικανότητας ροής) με αποτέλεσμα την επιτάχυνση επέκτασης της συμφόρησης, την περαιτέρω μείωση της ικανότητας ροής, κ.ο.κ., μέχρις ότου γενικευθεί η συμφόρηση σε ένα μεγάλο μέρος του αστικού δικτύου μειώνοντας την διαθέσιμη ικανότητα ροής κατά τρόπο δραματικό. Σημειώνεται ότι η παρατηρούμενη κυκλοφοριακή ροή σε συνθήκες γενικευμένης συμφόρησης είναι πολύ κατώτερη της θεωρητικής ικανότητας του δικτύου. Κατά συνέπεια, η άμεση και αποτελεσματική αντιμετώπιση της αρχικά περιορισμένης συμφόρησης με κατάλληλα μέσα, έτσι ώστε να προστατευθεί η κυκλοφοριακή ικανότητα του δικτύου, μπορεί να οδηγήσει στην σημαντική μείωση της έκτασης και της διάρκειάς της με προφανή οφέλη για τους χρήστες του δικτύου.

Η αποτελεσματική και απρόσκοπτη κυκλοφοριακή ροή στα σύγχρονα αστικά κέντρα αποτελεί μια σημαντική προϋπόθεση για την ομαλή οικονομική και κοινωνική δραστηριότητα. Το συνολικό κόστος της οδικής κυκλοφοριακής συμφόρησης στην Ευρωπαϊκή Ένωση εκτιμάται ότι υπερβαίνει ήδη το 1% του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος (ΑΕΠ), αυξανόμενο με γοργούς ρυθμούς, με ανυπολόγιστες επί πλέον συνέπειες στην μόλυνση της ατμόσφαιρας και στην υγεία του αστικού πληθυσμού. Οι προταθέντες ή επιχειρούμενοι τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Βελτίωση της οδικής υποδομής (μονοδρομήσεις και άλλες οδικές ρυθμίσεις, κατασκευή αστικών ή περιαστικών οδών ταχείας κυκλοφορίας, χώροι στάθμευσης οχημάτων, αστυνόμευση, ανισόπεδοι κόμβοι, υπόγειες οδοί κλπ.).
- Κυκλοφοριακός έλεγχος και πληροφόρηση οδηγών (προηγμένες στρατηγικές φωτεινής σηματοδότησης, πίνακες μεταβαλλόμενων μηνυμάτων, διαδίκτυο, έλεγχος εισόδου αυτοκινητοδρόμων, καθοδήγηση πορείας κλπ.).
- Μείωση χρήσης ιδιωτικών οχημάτων (βελτίωση μέσων μαζικής μεταφοράς, λεωφορειολωρίδες, εναλλακτικά μέσα μεταφοράς, ηλεκτρονικά αστικά διόδια κλπ.).

Όσο αφορά την βελτίωση της διαθέσιμης υποδομής οδικής κυκλοφορίας, παρά τα δαπανηρότατα κατασκευαστικά μέτρα βελτίωσης και επέκτασής της, τα προβλήματα κυκλοφορίας συνέχισαν να οξύνονται λόγω της συνεχιζόμενης αύξησης του αριθμού των οχημάτων αλλά και του πληθυσμού των αστικών κέντρων. Η έλλειψη χώρου για περαιτέρω επεκτάσεις, αλλά και η ισχυροποίηση της οικολογικής ευαισθησίας των κοινωνιών στις αναπτυγμένες χώρες οδήγησαν στην σταδιακή αναζήτηση εναλ-

λακτικών τρόπων αντιμετώπισης του κυκλοφοριακού προβλήματος μέσω της ανάπτυξης και εφαρμογής προηγμένων τεχνολογιών κυκλοφοριακού ελέγχου και πληροφόρησης οδηγών (επονομαζόμενα και ως ευφυή συστήματα μεταφορών). Οι προηγμένες στρατηγικές ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης αποτελούν ίσως το σημαντικότερο εργαλείο, στην κατηγορία των ευφυνών συστημάτων μεταφορών, για την αντιμετώπιση του κυκλοφοριακού προβλήματος. Η αντίστοιχη επιστημονική περιοχή του ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου αστικών οδικών δικτύων έχει να επιδείξει ένα σημαντικό και πλούσιο έργο έρευνας διεθνώς κατά τα τελευταία 40 χρόνια. Σήμερα όλες σχεδόν οι μεγάλες πόλεις των προηγμένων χωρών διαθέτουν συστήματα ελεγχόμενης φωτεινής σηματοδότησης, στα οποία οι μετρήσεις πραγματικού χρόνου (ενδείξεις φωρατών) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο φωτεινής σηματοδότησης σε πραγματικό χρόνο. Παρά το γεγονός ότι η εφαρμογή των συστημάτων αυτών βελτίωσε σημαντικά τις κυκλοφοριακές συνθήκες σε σχέση με τα συστήματα σταθερού χρόνου στα οποία ο έλεγχος φωτεινής σηματοδότησης βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα και όχι σε μετρήσεις πραγματικού χρόνου, είναι σήμερα κοινώς αποδεκτό (όχι μόνο από τους χρήστες των συστημάτων αυτών αλλά και από τους ίδιους τους σχεδιαστές/κατασκευαστές τους) ότι τα υπάρχοντα συστήματα δεν μπορούν να ανταποκριθούν αποτελεσματικά στις ολοένα αυξανόμενες ανάγκες κυκλοφοριακής ζήτησης.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης η στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου αστικών οδικών δικτύων TUC, μια καινοτόμος και πρωτοποριακή μεθοδολογία ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου, που μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού. Η στρατηγική TUC βασίζεται σε ρεαλιστικά αλλά ταυτοχρόνως απλά (από την άποψη υπολογιστικών απαιτήσεων) μοντέλα κυκλοφοριακής ροής, τα οποία μοντελοποιούν αποτελεσματικά την κυκλοφοριακή ροή τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού. Παράλληλα, ο σχεδιασμός της στρατηγικής TUC βασίζεται σε μεθόδους βέλτιστου ελέγχου γραμμικών συστημάτων, και έχει σαν αποτέλεσμα η στρατηγική TUC να «κληρονομεί» τις ιδιότητες ευρωστίας και αξιοπιστίας οι οποίες είναι «ενσωματωμένες» στις προηγμένες αυτές μεθόδους αυτόματου ελέγχου. Για την ανάπτυξη της απαιτείται ο εκ των προτέρων σχεδιασμός και εν συνεχεία η υλοποίηση σε πραγματικό χρόνο ενός απλού αναδραστικού κανόνα ελέγχου για τον υπολογισμό της σχετικής διάρκειας των φάσεων στους κόμβους του δικτύου. Ωστόσο, από εφαρμογές της στρατηγικής TUC τόσο σε επίπεδο – μακροσκοπικής ή μικροσκοπικής – προσομοίωσης όσο και σε επίπεδο υλοποίησης στο πεδίο, διαπιστώθηκε ότι παρά τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα υπάρχουν

ορισμένα προβλήματα τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής:

1. Το μαθηματικό πρότυπο και ο αναδραστικός κανόνας ελέγχου της TUC που προκύπτει από την εφαρμογή μεθόδων γραμμικού τετραγωνικού βέλτιστου ελέγχου δεν λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι ο αριθμός των οχημάτων εντός των συνδέσμων του δικτύου δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από την χωρητικότητα του συνδέσμου και – πιο σημαντικό – δεν μπορεί να είναι μικρότερος από το μηδέν. Σαν αποτέλεσμα, σε αυτές τις περιπτώσεις ο αναδραστικός κανόνας ελέγχου της TUC, υποθέτει ότι είναι δυνατή η υπερφόρτωση του συνδέσμου ή, ακόμη χειρότερα, η «επιστροφή» οχημάτων στους ανάντη συνδέσμους.
2. Το μαθηματικό πρότυπο της TUC βασίζεται στην παραδοχή ότι το αποτελεσματικό πράσινο των φάσεων ταυτίζεται με το πραγματικό πράσινο της φάσης, ή με άλλα λόγια, ότι όσο διαρκεί το πράσινο της φάσης ενός συνδέσμου υπάρχουν πάντα οχήματα εντός του συνδέσμου τα οποία εξέρχονται απρόσκοπτα του συνδέσμου. Αυτή η παραδοχή, δεν ισχύει σε δύο περιπτώσεις: (α) όταν το πράσινο της φάσης του συνδέσμου είναι ενεργό ενώ όλα τα οχήματα έχουν εξέλθει του συνδέσμου (περίπτωση χαμηλής κατάληψης) και (β) όταν το πράσινο της φάσης του συνδέσμου είναι ενεργό αλλά τα οχήματα δεν μπορούν να εξέλθουν του συνδέσμου επειδή οι κατάντη σύνδεσμοι που τροφοδοτούνται από τον σύνδεσμο αυτόν είναι πλήρεις οχημάτων (περίπτωση μπλοκαρίσματος κατάντη συνδέσμων).

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η αντιμετώπιση των δύο προαναφερθέντων προβλημάτων της στρατηγικής TUC μέσω της ανάπτυξης μιας νέας στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης, η οποία κάνοντας χρήση τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα ή μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου θα αντικαταστήσει τις απλούστερες μεθόδους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί η TUC. Η βασική λογική ανάπτυξης της νέας στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης είναι η διατύπωση του προβλήματος ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης ως προβλήματος περιορισμένου βέλτιστου ελέγχου του οποίου το βασικό μοντέλο της κυκλοφορίας είναι παρόμοιο με αυτό της TUC, αλλά λαμβάνονται ρητώς και εκ των προτέρων υπόψη όλοι οι περιορισμοί του αντίστοιχου προβλήματος κυκλοφορίας.

Στην περίπτωση της μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού, με κατάλληλη αναπροσαρμογή του βασικού μοντέλου κυκλοφορίας της στρατηγικής TUC, οι περιορισμοί του προβλήματος κυκλοφορίας μπορούν να μοντελοποιηθούν μαθηματικά σαν γραμμικοί περιορισμοί. Δεδομένου του γεγονότος ότι το βασικό μοντέλο της κυκλοφορίας είναι και αυτό γραμμικό, το πρόβλημα ελέγχου

φωτεινής σηματοδότησης μοντελοποιείται σαν ένα πρόβλημα γραμμικού ή τετραγωνικού ελέγχου υπό γραμμικούς περιορισμούς. Με βάση την μεθοδολογία αυτή, το παραπάνω πρόβλημα επιλύεται σε κάθε περίοδο για ένα μεγάλο χρονικό ορίζοντα θεωρώντας ότι η τρέχουσα περίοδος είναι η αρχική και οι χρόνοι πράσινου που εφαρμόζονται είναι αυτοί που αντιστοιχούν στις τιμές της πρώτης χρονικής περιόδου βελτιστοποίησης. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και από άλλες εφαρμογές ως έλεγχος κυλιόμενου ορίζοντα ή προβλεπτικός έλεγχος.

Στα πλαίσια της δεύτερης μεθοδολογίας, το πρόβλημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης αντιμετωπίζεται σαν ένα πρόβλημα μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου. Σύμφωνα με την μεθοδολογία αυτή η εισερχόμενη και εξερχόμενη στους κόμβους ροή των οχημάτων, μοντελοποιείται ως ένα μη γραμμικό φαινόμενο ενώ ως διάστημα διακριτού χρόνου δεν θεωρείται η περίοδος φωτεινής σηματοδότησης – όπως συμβαίνει στην πρώτη μεθοδολογία – αλλά μικρότερα χρονικά διαστήματα (π.χ., 5 δευτερόλεπτα) της περιόδου. Ως αποτέλεσμα, το μαθηματικό μοντέλο της μεθοδολογίας αυτής μοντελοποιεί ακριβέστερα την κυκλοφοριακή ροή αστικών οδικών δικτύων σε σχέση με αυτό της πρώτης μεθοδολογίας. Από την άλλη, η ισχυρή μη γραμμικότητα του μαθηματικού μοντέλου της δεύτερης μεθοδολογίας, έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εφαρμογή μεθόδων γραμμικού ή τετραγωνικού βέλτιστου ελέγχου σε αυτό το μοντέλο, και συνεπώς να απαιτείται η αντιμετώπιση του προβλήματος ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης ως πρόβλημα μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου, το οποίο είναι εν γένει πιο δύσκολο να επιλυθεί από αυτά του γραμμικού ή τετραγωνικού βέλτιστου ελέγχου.

Συμπερασματικά, η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης χρησιμοποιεί παρόμοια μαθηματικά μοντέλα και εργαλεία με αυτά της στρατηγικής TUC και ως συνέπεια διατηρεί τις βασικές ιδιότητες της TUC: απλότητα στο σχεδιασμό και την υλοποίηση, εξαιρετική αποτελεσματικότητα αντιμετώπισης συνθηκών κορεσμού, αποφυγή μπλοκαρίσματος μέρους του δικτύου, ευρωστία, αξιοπιστία, κλπ. Επιπλέον, η νέα αυτή στρατηγική – κάνοντας χρήση μεθόδων τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα και μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου που αντικαθιστούν τις απλούστερες μεθόδους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί η TUC (γραμμικός-τετραγωνικός έλεγχος) – αντιμετωπίζει αποτελεσματικά κάποια προβλήματα που εμφανίζονται στην εφαρμογή της στρατηγικής TUC, ειδικά σε περιπτώσεις πολύπλοκης γεωμετρίας ή/και σηματοδότησης του κόμβου, όπου η εφαρμογή της στρατηγικής TUC απαιτεί ειδικό χειρισμό και προσεκτική βελτιστοποίηση των παραμέτρων ελέγχου από τον μελετητή.

## 1.2 Δομή της διατριβής

Η οργάνωση της διατριβής έχει ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 2 ορίζονται οι βασικές έννοιες που αφορούν τον έλεγχο αστικών οδικών δικτύων μέσω σηματοδοτών και γίνεται ανασκόπηση των κυριότερων προηγμένων συστημάτων ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. Η ανάλυση εστιάζεται κυρίως γύρω από τα συντονισμένα συστήματα ελέγχου πραγματικού χρόνου ενώ παρουσιάζονται τα κύρια μειονεκτήματα των πιο διαδεδομένων συστημάτων τα οποία είναι σήμερα σε εφαρμογή. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το θεμελιώδες διάγραμμα για αστικά δίκτυα 2-διαστάσεων και μελετάται πως αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο αξιολόγησης της απόδοσης συστημάτων ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. Τέλος, γίνεται η εισαγωγή στην προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου προσδιορίζοντας τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αυτή προσφέρει σε σχέση με την στρατηγική TUC.
- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τρεις εναλλακτικές προσεγγίσεις, εκ των οποίων οι δύο είναι νέες, που έχουν αναπτυχθεί μέσω της διατύπωσης του προβλήματος ελέγχου αστικής κυκλοφορίας σαν ένα πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου βασισμένο στο μαθηματικό πρότυπο μοντελοποίησης αποθήκευσης-και-προώθησης. Η πρώτη προσέγγιση, έχει αναπτυχθεί στο παρελθόν ως κομμάτι την στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης TUC, είναι η μοντελοποίηση του προβλήματος ελέγχου αστικής κυκλοφορίας στη μορφή ενός γραμμικού-τετραγωνικού προβλήματος βέλτιστου ελέγχου. Στη δεύτερη προσέγγιση το πρόβλημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης μοντελοποιείται στη μορφή ενός τετραγωνικού προβλήματος βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου με ενσωματωμένους γραμμικούς περιορισμούς, του οποίου η λύση επιτυγχάνεται μέσω τετραγωνικού προγραμματισμού. Η τρίτη προσέγγιση, οδηγεί σ' ένα πρόβλημα μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου του οποίου η λύση επιτυγχάνεται μέσω ενός κατάλληλου αλγορίθμου εφικτής κατεύθυνσης. Τέλος, παρουσιάζεται το σχήμα ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα που επιτρέπει την εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο των δύο νέων προσεγγίσεων βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου.
- Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας και της δυνατότητας εφαρμογής σε πραγματικό χρόνο των προτεινόμενων μεθοδολογιών τετραγωνικού προγραμματισμού και μη γραμμικού προγραμματισμού μέσω σύγκρισης τους, με βελτιστοποιημένα προγράμματα σταθε-

ρού χρόνου φωτεινής σηματοδότησης και τον κανόνα ελέγχου της στρατηγικής TUC. Για την σύγκριση και αξιολόγηση των δύο εναλλακτικών μεθοδολογιών, χρησιμοποιούνται καθιερωμένοι στον τομέα του ελέγχου κυκλοφορίας δείκτες σύγκρισης, όπως συνολικοί χρόνοι διαδρομής εντός του αστικού δικτύου καθώς και ποιοτικά μέτρα σύγκρισης όπως (α) στιγμιότυπα από την προσομοίωση σε περιοχές του προς εξέταση δικτύου τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, (β) ο συσσωρευμένος αριθμός υπερφορτωμένων συνδέσμων που αντικατοπτρίζει τον κίνδυνο υπερφόρτωσης των συνδέσμων και του μπλοκαρίσματος του δικτύου και (γ) το θεμελιώδες διάγραμμα αστικών δικτύων. Για την ανάλυση των αλγορίθμων ελέγχου χρησιμοποιείται ένας μακροσκοπικός προσομοιωτής που βασίζεται σ' ένα αρκετά ακριβές μη γραμμικό μοντέλο κυκλοφοριακής ροής. Κάνοντας χρήση του προσομοιωτή αυτού, μοντελοποιείται το αστικό δίκτυο των Χανίων και γίνεται σύγκριση της συμπεριφοράς του προσομοιωμένου δικτύου για διαφορά ρεαλιστικά σενάρια κυκλοφοριακής ζήτησης.

- Στο Κεφάλαιο 5 η μία εκ των δύο προτεινόμενη μεθοδολογία του τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα ενσωματώνεται στο λογισμικό που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης για την εφαρμογή της στρατηγικής TUC σε πραγματικό χρόνο στο πεδίο. Για την ανάλυση της προτεινόμενης μεθοδολογίας χρησιμοποιείται το πρόγραμμα προσομοίωσης μικροσκοπικής κυκλοφορίας AIMSUN. Κάνοντας χρήση του προγράμματος αυτού, μοντελοποιείται το αστικό δίκτυο των Χανίων και γίνεται σύγκριση της συμπεριφοράς του προσομοιωμένου αστικού δικτύου των Χανίων για διαφορά ρεαλιστικά σενάρια κυκλοφοριακής ζήτησης όταν εφαρμόζονται (α) στρατηγική ελέγχου που βασίζεται σε πρόγραμμα σταθερής σηματοδότησης, (β) στρατηγική ελέγχου που βασίζεται στην προτεινόμενη μεθοδολογία τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα και (γ) στρατηγική ελέγχου TUC. Για την σύγκριση των στρατηγικών χρησιμοποιήθηκαν καθιερωμένοι στον τομέα του ελέγχου κυκλοφορίας δείκτες σύγκρισης, όπως, μέσες ταχύτητες, συνολικοί χρόνοι διαδρομής και συνολικοί χρόνοι αναμονής εντός του αστικού δικτύου.
- Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται σύνοψη της διδακτορικής διατριβής και έκθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από αυτήν. Ακόμη προτείνονται κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας που μπορούν συνεισφέρουν στην επέκταση των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής.

### 1.3 Δημοσιεύσεις στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής δημοσιεύθηκαν σε περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων οι ακόλουθες εργασίες:

#### Δημοσιεύσεις σε περιοδικά

1. K. Aboudolas, M. Papageorgiou, and E. Kosmatopoulos, 2009. Store-and-forward based methods for the signal control problem in large-scale congested urban road networks. *Transportation Research* 17C (2), 163–174.
2. K. Aboudolas, M. Papageorgiou, A. Kouvelas, and E. Kosmatopoulos, 2009. A rolling-horizon quadratic programming approach for the signal control problem in large-scale congested urban road networks. *Transportation Research Part C*, in press, doi:10.1016/j.trc.2009.06.003.

#### Άρθρα συνεδρίων

1. K. Aboudolas, M. Papageorgiou, and E. Kosmatopoulos: A quadratic programming approach for the signal control problem in large-scale congested urban road networks. *Proc. (CD-ROM) Sixth Triennial Symposium on Transportation Analysis*, Phuket Island, Thailand, June 10–15, 2007.
2. K. Aboudolas, M. Papageorgiou, and E. Kosmatopoulos: Control and optimization methods for traffic signal control in large-scale congested urban road networks. *Proc. 2007 American Control Conference*, New York City, USA, July 11–13, 2007, pp. 3132–3138.
3. K. Aboudolas, M. Papageorgiou, A. Kouvelas, and E. Kosmatopoulos, 2008. A rolling horizon control scheme for the signal control problem in large-scale congested urban road networks. *Proc. (CD-ROM) 10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation*, Athens, Greece, May 27–31, 2008.

## Κεφάλαιο 2

### Έλεγχος κυκλοφορίας αστικών οδικών δικτύων

#### 2.1 Η ανάγκη ελέγχου της κυκλοφορίας

Επί αιώνες, οι μεταφορές ήταν μια από τις σημαντικότερες δραστηριότητες του ανθρωπίνου πολιτισμού. Ωστόσο, μόνο μετά το δεύτερο μισό του προηγούμενου αιώνα άρχισαν να εμφανίζονται φαινόμενα *κυκλοφοριακής συμφόρησης* λόγω της ταχύτατης αύξησης του αριθμού των οχημάτων και της συνεχούς αύξησης των μετακινήσεων για την μεταφορά αγαθών, ανθρώπων κλπ. Κυκλοφοριακή συμφόρηση παρουσιάζεται όταν μεγάλος αριθμός οχημάτων («πελάτης») προσπαθεί να χρησιμοποιήσει μια κοινή υποδομή («εξυπηρετητής») μετακίνησης με περιορισμένη χωρητικότητα. Στην καλύτερη περίπτωση, η κυκλοφοριακή συμφόρηση οδηγεί σε φαινόμενα σχηματισμού ουρών (και αντίστοιχων καθυστερήσεων) ενώ η χωρητικότητα της υποδομής χρησιμοποιείται πλήρως. Στην χειρότερη (και πολύ πιο συχνή) περίπτωση, η κυκλοφοριακή συμφόρηση οδηγεί στη μειωμένη χρήση της διαθέσιμης υποδομής (μείωση εξυπηρέτησης η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μπλοκάρισμα μέρος του δικτύου) με επακόλουθα καθυστερήσεις, μειωμένη οδική ασφάλεια, αυξημένη κατανάλωση καυσίμων και σοβαρή ατμοσφαιρική ρύπανση.

Η εμφάνιση κυκλοφορίας (δηλαδή, πολλά οχήματα τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας μια κοινή υποδομή) και συνακόλουθα η κυκλοφοριακή συμφόρηση (όπου η ζήτηση ξεπερνά την ικανότητα της υποδομής) έδωσε ισχυρή ώθηση στην ανάπτυξη καινοτόμων ιδεών στον τομέα των οδικών μεταφορών. Η ενεργειακή κρίση την δεκαετία του '70, το έντονο ενδιαφέρον για το περιβάλλον και τα όρια των φυσικών και οικονομικών πόρων είναι μεταξύ των σημαντικότερων λόγων που οδήγησαν στην αλλαγή του τρόπου αντιμετώπισης των προβλημάτων συμφόρησης με άμεσους τρόπους (δηλαδή, με την συνεχή επέκταση της υπάρχουσας υποδομής). Ο μυωπικός αυτός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος της αύξησης των αναγκών μεταφοράς και κινητικότητας

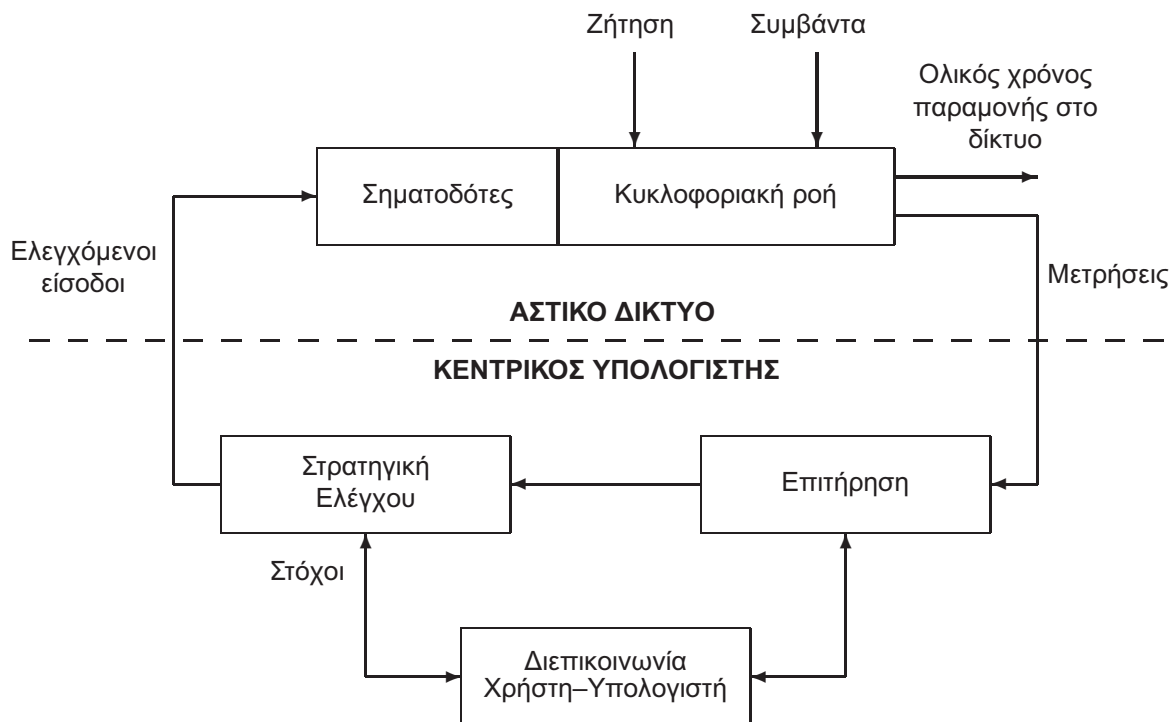
των σύγχρονων κοινωνιών δεν μπορούσε πλέον να είναι η μόνη λύση. Μια εναλλακτική και εφικτή προσέγγιση προς την επίλυση των κυκλοφοριακών προβλημάτων, η οποία δέχθηκε ισχυρή ώθηση με τις αλματώδεις εξελίξεις στην τεχνολογία των επικοινωνιών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών (τηλεματική), είναι η ορθολογική και πλήρης αξιοποίηση και χρήση της υπάρχουσας υποδομής μέσω της ανάπτυξης και υλοποίησης σύγχρονων μορφών ελέγχου και διαχείρισης τα οποία θα έχουν τη δυνατότητα να ανταποκρίνονται αυτομάτως στις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες.

Το πρόβλημα λοιπόν ανάγεται στην ανάπτυξη ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου (συνήθως αναφέρεται και ως στρατηγική ελέγχου) και για την ανάλυση/επίλυση του η θεωρία αυτόματου ελέγχου και βελτιστοποίησης προσφέρει μια ευρεία κλίμακα επιτυχημένων μεθόδων και αλγορίθμων. Το γενικό πρόβλημα στην ορολογία της τεχνικής αυτόματου ελέγχου μεταφράζεται ως εξής: η κυκλοφοριακή ροή θεωρείται ως μια διεργασία, η αποτελεσματικότητα της οποίας, όπως εκφράζεται από τις εξόδους (π.χ. μέσος χρόνος διαδρομής), επηρεάζεται από καθορισμένες εισόδους (π.χ. σχέδιο σηματοδότησης) και από ανεξάρτητες διαταραχές (π.χ. ζήτηση, ατύχημα). Ο ρόλος της στρατηγικής ελέγχου έγκειται στον κατάλληλο προσδιορισμό των εισόδων με χρήση μετρήσεων από τη διεργασία έτσι ώστε να επιτευχθεί κάποιος προκαθορισμένος στόχος (π.χ. ελαχιστοποίηση μέσου χρόνου διαδρομής) υπό οποιεσδήποτε συνθήκες διαταραχών.

Πιο συγκεκριμένα, το Σχήμα 2.1 παρουσιάζει τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου. Η συμπεριφορά της κυκλοφοριακής ροής στο δίκτυο (αστικό, αυτοκινητόδρομος ή μεικτό) εξαρτάται από κάποιες εξωτερικές ποσότητες οι οποίες ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- *Ελεγχόμενοι είσοδοι* οι οποίοι άμεσα αφορούν κάποια αντίστοιχη διάταξη ελέγχου όπως φωτεινοί σηματοδότες, πίνακες μεταβλητών μηνυμάτων, κλπ. Οι ελεγχόμενοι είσοδοι μπορεί να επιλέγονται από μια επιτρεπτή περιοχή ελέγχου υπό τεχνικούς, φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς.
- *Διαταραχές* των οποίων οι τιμές δεν μπορούν να είναι άμεσες προς διαχείριση. Εν τούτοις μπορεί να είναι μετρήσιμες (π.χ., ζήτηση) ή ανιχνεύσιμες (π.χ., ατύχημα) ή προβλέψιμες για ένα μελλοντικό χρονικό ορίζοντα.

Η αποτελεσματικότητα ή απόδοση ενός δικτύου είναι μετρήσιμη μέσω κατάλληλων δεικτών, όπως ο ολικός χρόνος παραμονής όλων των οχημάτων μέσα στο δίκτυο για δεδομένο χρονικό ορίζοντα. Ο στόχος της *Επιτήρησης* είναι η διαχείριση της πληροφορίας που προέρχεται από τις συσκευές

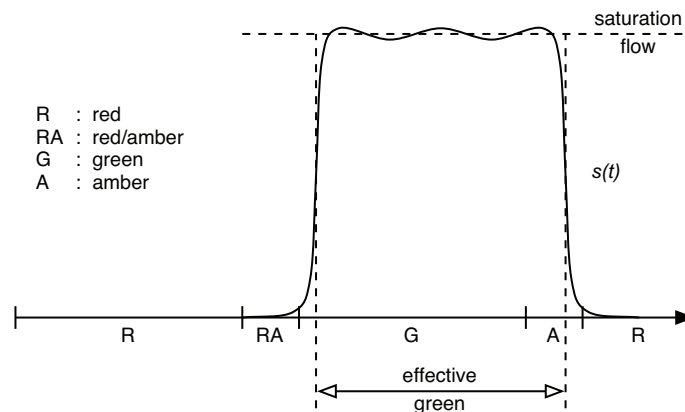


Σχήμα 2.1: Το σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου.

μετρήσεων (π.χ., φωρατές) πριν αυτή διοχετευθεί στην στρατηγική ελέγχου και τον άνθρωπο ο οποίος αλληλεπιδρά με το σύστημα. Ο πυρήνας του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου είναι η *Στρατηγική Ελέγχου* η οποία έχει ως στόχο:

«Τον προσδιορισμό των *ελεγχόμενων εισόδων* βάσει διαθέσιμων *μετρήσεων, εκτιμήσεων, προβλέψεων* έτσι ώστε να επιτευχθεί ο προκαθορισμένος στόχος (π.χ., ελαχιστοποίηση του ολικού χρόνου παραμονής στο δίκτυο) υπό οποιοσδήποτε συνθήκες διαταραχών.»

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

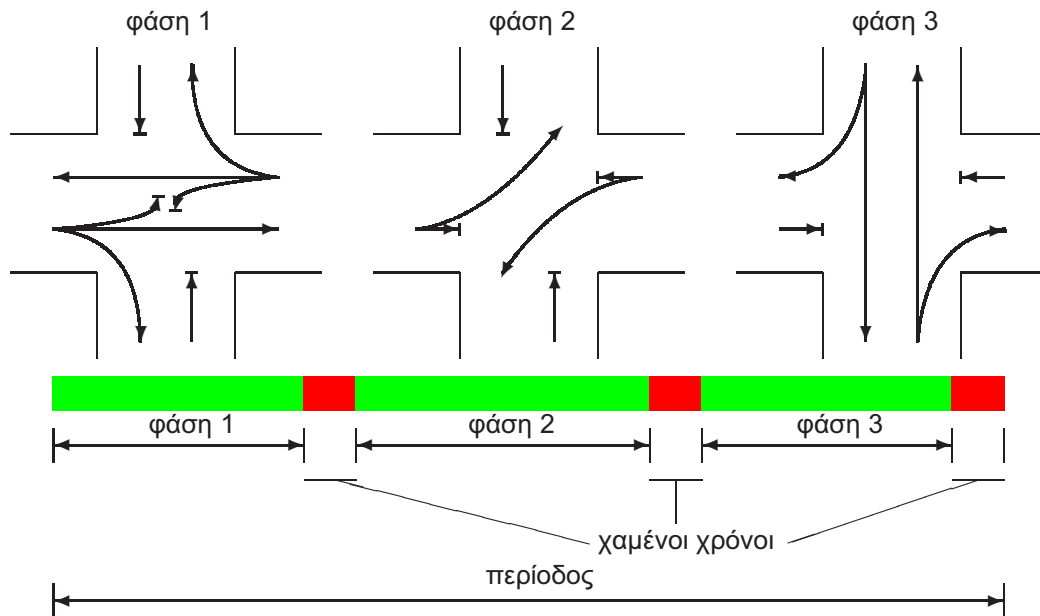


Σχήμα 2.2: Η ροή κορεσμού ενός συνδέσμου.

## 2.2 Ορισμοί

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

Ένας αστικός *κόμβος* αποτελείται από ένα σύνολο προσβάσεων (approaches) και μια κοινή διασταύρωση. Ένας *σύνδεσμος* είναι μέρος ενός δρόμου που αποτελείται από μια ή παραπάνω λωρίδες. Η κυκλοφορία σ' έναν κόμβο διαιρείται σε *ρεύματα* όπου κάθε σύνδεσμος χρησιμοποιείται από ένα αντίστοιχο ρεύμα και κάθε ρεύμα έχει ιδιαίτερη σηματοδότηση. Δύο ή παραπάνω ρεύματα καλούνται *συμβατά* όταν μπορούν να διασχίσουν τον κόμβο ταυτόχρονα με ασφάλεια, αλλιώς καλούνται *ασύμβατα* ή *ανταγωνιστικά*. *Ροή κορεσμού* είναι η μέση ροή που περνάει τη γραμμή διακοπής πορείας ενός συνδέσμου όταν το αντίστοιχο ρεύμα έχει προτεραιότητα, η ανάντη ζήτηση (ή η ουρά αναμονής) είναι αρκούντως μεγάλη και οι κατάντη σύνδεσμοι δεν είναι φραγμένοι (Σχήμα 2.2). Μια *περίοδος* είναι μια



Σχήμα 2.3: Δομή σηματοδότησης κόμβου.

επανάληψη της βασικής σειράς των συνδυασμών σημάτων σ' έναν κόμβο. Η διάρκειά της καλείται *διάρκεια περιόδου* ή *κύκλος*. Μια *φάση* (ή *στάδιο*) είναι ένα μέρος της περιόδου κατά το οποίο έχει προτεραιότητα ένα υποσύνολο συμβατών ρευμάτων (Σχήμα 2.3). Οι φάσεις διαδέχονται η μια την άλλη κατά προκαθορισμένη κυκλική σειρά. Προκειμένου να αποφευχθεί η εμπλοκή ανταγωνιστικών ρευμάτων σε διαδοχικές φάσεις, προβλέπονται σταθεροί *χαμένοι χρόνοι* λίγων δευτερολέπτων ανάμεσα στις φάσεις (Σχήμα 2.3). Ο χρόνος που προκύπτει αν αφαιρεθεί από την περίοδο ο χαμένος χρόνος, ονομάζεται *αποτελεσματικός χρόνος*. Είναι ο χρόνος που χρησιμοποιείται για την κίνηση των οχημάτων και υποδιαιρείται στις διάφορες φάσεις για την εξυπηρέτηση των αντίστοιχων κινήσεων. Σε κόμβους με μεγάλη κίνηση πεζών είναι δυνατή η δημιουργία μιας ιδιαίτερης φάσης για την αποτελεσματική εξυπηρέτηση των πεζών που μπορούν έτσι να κινηθούν ταυτόχρονα σε όλες τις κατευθύνσεις, ακόμα και διαγώνια. Κατά την διάρκεια αυτής της φάσης, όλοι οι σηματοδότες οχημάτων παρουσιάζουν κόκκινη ένδειξη που ονομάζεται *καθολική κόκκινη ένδειξη*.

## 2.3 Τρόποι ελέγχου κυκλοφορίας μέσω σηματοδοτών

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

- Καθορισμός της σύστασης των φάσεων κυκλοφορίας σε κάθε διασταύρωση (δηλαδή επιλογή των ρευμάτων που λαμβάνουν πράσινο ή κόκκινο σε κάθε φάση) καθώς και του αριθμού φάσεων (Σχήμα 2.3).

- Προσδιορισμός της σχετικής διάρκειας κάθε φάσης, ήτοι η σχετική διάρκεια ισούται με την διάρκεια της φάσης δια τη διάρκεια της περιόδου (Σχήμα 2.3).
- Μεταβολή της χρονικής διάρκειας της περιόδου (η διάρκεια της περιόδου ισούται με το άθροισμα της διάρκειας της κάθε φάσης συν το συνολικό χαμένο χρόνο).
- Καθορισμός χρονικής μετατόπισης 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 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:

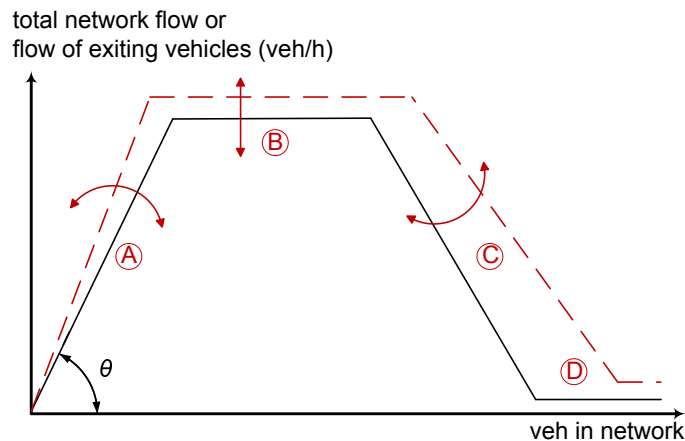
- Συστήματα *σταθερού χρόνου* λειτουργούν καθημερινά κατά τον ίδιο τρόπο, σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο ημερήσιο πρόγραμμα. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των συστημάτων σταθερού χρόνου πηγάζει από το γεγονός ότι οι συνθήκες κυκλοφορίας αλλάζουν: ζήτηση, ατυχήματα, καιρικές συνθήκες υπόκεινται σε βραχυπρόθεσμες ή μακροπρόθεσμες αλλαγές που απαιτούν αντίστοιχες αλλαγές του σχεδίου ελέγχου κυκλοφορίας. Αντιθέτως, τα συστήματα *πραγματικού χρόνου* προσαρμόζουν τις αποφάσεις τους στις επικρατούσες συνθήκες κυκλοφορίας βάσει αντίστοιχων μετρήσεων.
- *Μεμονωμένα συστήματα* περιορίζουν το πεδίο λειτουργίας τους σε μια μόνο διασταύρωση με στόχο την ελαχιστοποίηση της μέσης καθυστέρησης των οχημάτων στη διασταύρωση αυτή. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των μεμονωμένων συστημάτων πηγάζει από το γεγονός ότι το άθροισμα μεμονωμένων βέλτιστων ρυθμίσεων ενός αριθμού γειτονικών διασταυρώσεων δεν ισοδυναμεί με τη βέλτιστη ρύθμιση του αντίστοιχου οδικού δικτύου ως συνόλου. Το μειονέκτημα αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη *συντονισμένων συστημάτων* ελέγχου πολλών διασταυρώσεων ή και ολόκληρου του οδικού δικτύου.
- Κάποια συστήματα είναι εφαρμόσιμα μόνο σε συνθήκες *ακόρεστης κυκλοφορίας*, όταν δηλαδή η ζήτηση είναι χαμηλότερη από την κυκλοφοριακή ικανότητα μιας διασταύρωσης ή ολόκληρου δικτύου, ενώ άλλα συστήματα είναι εφαρμόσιμα και σε συνθήκες *κορεσμένης κυκλοφορίας*.

## 2.5 Θεμελιώδες διάγραμμα για αστικά δίκτυα 2-διαστάσεων

Ο ορισμός ενός θεμελιώδους διαγράμματος (π.χ. ως μια καμπύλη ροής-πυκνότητας) για αυτοκινητόδρομους δείχθηκε πρόσφατα ότι μπορεί να εφαρμοσθεί (υπό κάποιες συνθήκες) και για αστικά δίκτυα 2-διαστάσεων, δες Gartner and Wagner (2004) για αποτελέσματα βασισμένα σε προσομοίωση, Geroliminis and Daganzo (2008) για διερευνήσεις με πραγματικά δεδομένα, Daganzo and Geroliminis (2008) και Farhi (2008) για μία αναλυτική προσέγγιση. Στην πραγματικότητα, ένα σχήμα θεμελιώδους διαγράμματος το οποίο αποτελείται από σημεία με μετρήσεις πεδίου παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Godfrey (1969), αλλά επίσης παρατηρήθηκε σε μία μελέτη αξιολόγησης αποτελεσμάτων πεδίου για ένα μέρος του αστικού δικτύου των Χανίων (Dinoroulou et al., 2005), δες το Σχήμα 6 και τα αντίστοιχα σχόλια στην εργασία αυτή.

Το Σχήμα 2.4 απεικονίζει την τυπική μορφή ενός θεμελιώδους διαγράμματος για αστικά δίκτυα, όπου ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει τη συνολική ροή του δικτύου (δηλ. το άθροισμα των ροών που εξέρχονται από τους συνδέσμους του δικτύου) ή την συνολική ροή των οχημάτων που προσεγγίζουν αντίστοιχους προορισμούς του δικτύου, ενώ ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει των αριθμό των οχημάτων εντός του δικτύου. Στην περίπτωση των αυτοκινητόδρομων, το θεμελιώδες διάγραμμα είναι αποτέλεσμα της υποδομής του δικτύου, των δυνατοτήτων που έχουν τα οχήματα και της συμπεριφοράς των οδηγών, αλλά μπορεί επίσης να επηρεασθεί από την επίδραση κάποιου μέτρου ελέγχου όπως των μεταβλητών ορίων ταχύτητας (Papageorgiou et al., 2008) ή άλλου. Στην περίπτωση των αστικών δικτύων, το θεμελιώδες διάγραμμα μπορεί επίσης να εξαρτάται από την μορφή του κυκλοφοριακού φόρτου (αφετηρίας-προορισμού ή δρομολόγησης των οχημάτων) όπως και από την λειτουργία των φωτεινών σηματοδοτών. Συνεπώς, θεωρώντας ότι ο κυκλοφοριακός φόρτος για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους είναι συγκρίσιμος από μέρα σε μέρα, το θεμελιώδες διάγραμμα για αστικά δίκτυα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου των σηματοδοτών όπως επιχειρείται στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας διατριβής. Σημειώνεται ότι αυτή είναι η πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία που πραγματοποιείται μια τέτοια αξιολόγηση στρατηγικών ελέγχου, δηλαδή βάσει του θεμελιώδους διαγράμματος για αστικά δίκτυα 2-διαστάσεων.

Επιστρέφοντας στο Σχήμα 2.4, η κατάσταση της κυκλοφορίας στην συνεχή γραμμή Α αντιπροσωπεύει συνθήκες ακόρεστης κυκλοφορίας (όπου τα οχήματα που περιμένουν στους σηματοδοτούμενους κόμβους εξυπηρετούνται κατά την διάρκεια της επόμενης πράσινης ένδειξης), με χρόνους πράσινης ένδειξης να είναι κατά ένα μέρος «χαμένοι» (απωλεσμένοι) λόγω μειωμένης κυκλοφοριακής



Σχήμα 2.4: Θεμελιώδες διάγραμμα.

ζήτησης. Σημειώνεται ότι η κλίση της γραμμής A ( $\tan \theta$ ) είναι ανάλογη με την μέση ταχύτητα των οχημάτων στο αστικό δίκτυο. Η μέση ταχύτητα των οχημάτων στο αστικό δίκτυο μπορεί να επηρεασθεί (όπως δείχνουν τα βέλη στο Σχήμα 2.4) από την εφαρμογή διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου των φωτεινών σηματοδοτών (σχετική διάρκεια πράσινης ένδειξης, χρονική διάρκεια της περιόδου, χρονική μετατόπιση της έναρξης των περιόδων γειτονικών διασταυρώσεων). Η κατάσταση της κυκλοφορίας στην οριζόντια γραμμή B αντιπροσωπεύει τη ικανότητα του δικτύου (μέγιστη ροή) η οποία επίσης μπορεί να επηρεασθεί από την εφαρμογή διαφορετικών ρυθμίσεων στους φωτεινούς σηματοδότες. Σημειώνεται ότι η μέγιστη ροή στα αστικά οδικά δίκτυα μπορεί να παρατηρηθεί για ένα φάσμα αριθμού-οχημάτων (εξού η οριζόντια γραμμή) σε αντίθεση με την κυκλοφοριακή ροή στους αυτοκινητόδρομους η οποία συναντάται για μία συγκεκριμένη τιμή πυκνότητας. Καταστάσεις κυκλοφορίας κατά μήκος της γραμμής B χαρακτηρίζονται από μερική συμφόρηση, δηλαδή οι περισσότεροι σύνδεσμοι του δικτύου παρουσιάζουν ροή κορεσμού κατά την διάρκεια της αντίστοιχης πράσινης ένδειξης των σηματοδοτών, αλλά δεν λαμβάνει χώρα σοβαρή υπερχειλίση των ουρών σε ανάντη συνδέσμους.

Όταν οι ουρές στους συνδέσμους του δικτύου αρχίζουν να υπερχειλίζουν και να μπλοκάρουν ανάντη κόμβους, εισερχόμαστε στην περιοχή κορεσμού C. Στην περιοχή αυτή ο αυξημένος αριθμός οχημάτων μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένες υπερχειλίσεις των ουρών και ακόμη σε μερικό μπλοκάρισμα μέρους του δικτύου, σπατάλη της πράσινης ένδειξης στους αντίστοιχους κόμβους και συνεπώς σε μικρότερη συνολική ροή του δικτύου. Κατάλληλα σχεδιασμένα συστήματα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου μπορούν να μεταβάλλουν την περιοχή κορεσμού C με δύο τρόπους: (α) αυξάνοντας τον αριθμό των οχημάτων στο αστικό δίκτυο όταν αρχίζει η περιοχή

κορεσμού C, δηλαδή επεκτείνοντας την περιοχή μερικής συμφόρησης B για μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων στο αστικό δίκτυο, (β) αυξάνοντας την (αρνητική) κλίση της περιοχής κορεσμού C. Και στις δύο περιπτώσεις οδηγούμαστε σε αύξηση της ροής για μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων στο αστικό δίκτυο. Τέλος, η περιοχή D χαρακτηρίζεται από μπλοκάρισμα μέρους ή ολόκληρου του δικτύου με πολύ υψηλό αριθμό οχημάτων και σχεδόν μηδενική ροή, μια κατάσταση που από τη στιγμή που θα εμφανισθεί πολύ δύσκολα μπορεί να αντιμετωπισθεί από οποιαδήποτε σύστημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης.

## **2.6 Επισκόπηση προηγμένων στρατηγικών ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης**

### **2.6.1 Εισαγωγή**

Ο έλεγχος κυκλοφορίας σε αστικές περιοχές εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο μέσω της φωτεινής σηματοδότησης των σημαντικότερων κόμβων που περιλαμβάνονται σε αυτές. Στην παραδοσιακή της μορφή, η φωτεινή σηματοδότηση εφαρμόζεται βάσει προκαθορισμένων πλάνων που αποθηκεύονται στους τοπικούς ελεγκτές των κόμβων και καλούνται προς εφαρμογή ανάλογα με την αντίστοιχη περίοδο της ημέρας. Τα εφαρμοζόμενα πλάνα αρχικά σχεδιάζονταν εμπειρικά. Αργότερα αναπτύχθηκαν κατάλληλα μεθοδολογικά εργαλεία τα οποία με χρήση ιστορικών μετρήσεων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών από το δίκτυο και χρησιμοποιώντας αλγόριθμους βελτιστοποίησης υπολογίζουν βέλτιστα πλάνα με στόχο την ικανοποίηση συγκεκριμένων κριτηρίων όπως π.χ. μείωση ουρών, μείωση καθυστερήσεων, αύξηση επιπέδου εξυπηρέτησης κλπ. Το πιο γνωστό και πλέον διαδεδομένο τέτοιο εργαλείο είναι το βρετανικό σύστημα TRANSYT (Robertson, 1969, 1977). Μετά το σχεδιασμό τους, τα σταθερά πλάνα αποθηκεύονται είτε άμεσα στους τοπικούς ελεγκτές, οι οποίοι τα εφαρμόζουν βάσει χρονοδιαγράμματος, είτε σε κάποιο κεντρικό υπολογιστή ο οποίος τα στέλνει βάσει χρονοδιαγράμματος στους τοπικούς ελεγκτές για εφαρμογή. Καθότι ο υπολογισμός των βέλτιστων πλάνων λαμβάνει χώρα εκ των προτέρων, τα παραδοσιακά αυτά συστήματα δεν απαιτούν ιδιαίτερη υπολογιστική ισχύ ούτε από τον κεντρικό υπολογιστή ούτε από τους τοπικούς ελεγκτές που έχουν απλώς εκτελεστικό ρόλο.

Με τη σταθερά αυξητική πορεία της κινητικότητας προσώπων και αγαθών έχει γίνει σε μεγάλο βαθμό επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης νέων συστημάτων ελέγχου που έχουν τη δυνατότητα να ανταποκρίνονται αυτομάτως στις εκάστοτε επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες. Οι αλματώδεις

εξελιξείς στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των επικοινωνιών προσφέρουν τη δυνατότητα υλοποίησης τέτοιων συστημάτων. Πράγματι, υπάρχει σήμερα μια ποικιλία διαφορετικών προσεγγίσεων στο πρόβλημα ελέγχου αστικής κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο, η οποία, εκτός των άλλων χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων κάθε προσέγγισης, αντανακλά μερικώς και τις ιδιαίτερες ανάγκες, προτιμήσεις και προδιαγραφές των χωρών στις οποίες αναπτύχθηκαν. Μερικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις αντιμετωπίζουν το αστικό οδικό δίκτυο σαν ένα ενιαίο σύνολο και επιχειρούν να επιλύσουν το πρόβλημα ελέγχου του συνολικά, ενώ άλλες το χωρίζουν σε υποδίκτυα και εξετάζουν κάθε υποδίκτυο ξεχωριστά, άλλες επικεντρώνονται στο επίπεδο μεμονωμένων κόμβων, ενώ άλλες χρησιμοποιούν συνδυασμούς των προαναφερομένων. Η λειτουργική αρχιτεκτονική μίας στρατηγικής ελέγχου περιγράφει τις διακριτές υπολογιστικές οντότητες που περιλαμβάνονται σ' αυτή, τη συγκεκριμένη λειτουργία κάθε οντότητας καθώς και την ανταλλαγή πληροφοριών σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές μεταξύ αυτών και με το εξωτερικό περιβάλλον. Η λειτουργική αρχιτεκτονική μιας στρατηγικής ελέγχου επηρεάζει τη φυσική αρχιτεκτονική του εξοπλισμού υλοποίησης της στρατηγικής. Η φυσική αρχιτεκτονική περιγράφει τα στοιχεία υλοποίησης (αισθητήρες, ελεγκτές, υπολογιστές, περιφερειακά συστήματα, συστήματα χειρισμού και απεικόνισης κλπ.), τη θέση αυτών εντός του δικτύου, τον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ τους καθώς και τις προδιαγραφές λειτουργίας κάθε επιμέρους συσκευής.

Για παράδειγμα, μια στρατηγική που αντιμετωπίζει το πρόβλημα ελέγχου συνολικά επιχειρώντας να προσδιορίσει σε πραγματικό χρόνο το βέλτιστο έλεγχο βάσει του συνόλου των κυκλοφοριακών συνθηκών του δικτύου, είναι απαραίτητο να υλοποιηθεί σε ένα κεντρικό σημείο στο οποίο μεταφέρεται όλη η δυναμική πληροφορία μετρήσεων, εκτελούνται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί και λαμβάνονται οι αποφάσεις ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης δικτύου, οι οποίες στη συνέχεια στέλνονται για εφαρμογή στους αντίστοιχους κόμβους. Η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος προϋποθέτει την ύπαρξη ενός κεντρικού υπολογιστή υψηλής (συνήθως) υπολογιστικής ισχύος, φωρατές για τη συλλογή μετρήσεων και τοπικούς ελεγκτές χαμηλής σχετικά υπολογιστικής ισχύος αφού ο ρόλος τους είναι απλά εκτελεστικός.

Για λόγους κεντρικής παρακολούθησης και επισκόπησης της ορθής λειτουργίας, ένα σύστημα ελέγχου κυκλοφορίας πραγματικού χρόνου πρέπει να περιλαμβάνει στον εξοπλισμό του έναν ή περισσότερους κεντρικούς υπολογιστές κατάλληλης υπολογιστικής ισχύος που απορρέει από τα καθήκοντα που αναλαμβάνουν στο σύστημα ελέγχου. Πέραν αυτού απαιτούνται τοπικοί ελεγκτές ικανής υπολογιστικής ισχύος για τις αντίστοιχες τοπικές ενέργειες, φωρατές για τη συλλογή μετρήσεων, φωτεινοί σηματοδότες και διάφορες περιφερειακές συσκευές (συσκευές τηλεπικοινωνίας, εκτυπωτές, πίνακες

κλπ.) και καλωδιώσεις ή άλλα στοιχεία σύνδεσης και επικοινωνίας. Ο Πίνακας 2.1 δίνει τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφορετικών συστημάτων ελέγχου της κυκλοφορίας.

Στις ακόλουθες παραγράφους γίνεται μια επισκόπηση των γνωστότερων προηγμένων στρατηγικών ελέγχου πραγματικού χρόνου. Η παρουσίαση γίνεται κατά κατηγορίες βάσει της λειτουργικής τους αρχιτεκτονικής η οποία, όπως προαναφέρθηκε, καθορίζει ως ένα βαθμό και την απαιτούμενη φυσική αρχιτεκτονική του συστήματος. Γενικά, βάσει της λειτουργικής αρχιτεκτονικής τους, οι στρατηγικές ελέγχου διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Στρατηγικές αποκεντρωμένης λειτουργικής αρχιτεκτονικής. Στις στρατηγικές αυτές οι αποφάσεις ελέγχου λαμβάνονται μεμονωμένα για κάθε κόμβο λαμβάνοντας υπόψη μόνον τις τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες. Σε κάποιες περιπτώσεις λαμβάνονται υπόψη και οι κυκλοφοριακές συνθήκες και αποφάσεις των γειτονικών κόμβων. Γνωστές στρατηγικές αυτής της κατηγορίας είναι τα OPAC, COP και PROLYN.
2. Στρατηγικές ιεραρχικής λειτουργικής αρχιτεκτονικής. Οι στρατηγικές αυτές αποτελούν μια ενδιάμεση κατηγορία μεταξύ των προαναφερομένων όπου οι αποφάσεις ελέγχου παίρνονται σε διάφορα επίπεδα. Για παράδειγμα, μερικές αποφάσεις λαμβάνονται σε επίπεδο δικτύου, άλλες σε επίπεδο ομάδας κόμβων και άλλες σε επίπεδο μεμονωμένου κόμβου. Γνωστές στρατηγικές αυτής της κατηγορίας είναι τα SCOOT, SCATS, TASS, MOTION και UTOPIA.
3. Στρατηγικές κεντρικής λειτουργικής αρχιτεκτονικής. Στις στρατηγικές αυτές οι αποφάσεις ελέγχου λαμβάνονται συνολικά για όλο το δίκτυο βάσει των συνολικών κυκλοφοριακών συνθηκών που επικρατούν σε αυτό. Η μόνη γνωστή στρατηγική αυτής της κατηγορίας είναι η στρατηγική ελέγχου TUC.

Έμφαση κατά την παρουσίαση των συστημάτων αυτών θα δοθεί στη φυσική αρχιτεκτονική που απαιτεί η υλοποίησή τους έτσι ώστε να προσδιοριστούν τελικά οι κατηγορίες φυσικής αρχιτεκτονικής που συναντώνται σήμερα και οι απαιτήσεις τους.

### **2.6.2 Συστήματα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου αποκεντρωμένης λειτουργικής αρχιτεκτονικής**

Τα πιο γνωστά συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας με πλήρως αποκεντρωμένη λειτουργική αρχιτεκτονική είναι τα αμερικανικά OPAC (Gartner, 1983) και COP (Sen and Head, 1997) και το γαλλικό

**Πίνακας 2.1:** Σύνοψη πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων διαφορετικών συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας σε αστικά δίκτυα.

| Σύστημα                                                                                       | Πλεονεκτήματα                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Μειονεκτήματα                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Σταθερού χρόνου                                                                               | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ελάχιστες απαιτήσεις εγκατάστασης και συντήρησης.</li> <li>2. Μπορούν να υλοποιηθούν χωρίς την εγκατάσταση κέντρου ελέγχου.</li> <li>3. Εξοικείωση των χρηστών του δικτύου με τις ρυθμίσεις.</li> <li>4. Η υλοποίηση του πράσινου κύματος είναι απλή.</li> <li>5. Ιδανικά για όλα τα είδη οχημάτων.</li> </ol>                                      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Για την εφαρμογή απαιτείται η συλλογή και διαχείριση μεγάλου όγκου (ιστορικών) δεδομένων.</li> <li>2. Τα σχέδια σηματοδότησης μπορεί να υποστούν «παλαίωση».</li> <li>3. Τα σχέδια σηματοδότησης είναι δύσκολο να τροποποιηθούν.</li> <li>4. Στην περίπτωση ατυχημάτων απαιτείται η άμεση παρέμβαση του διαχειριστή του συστήματος.</li> <li>5. Δεν μπορούν να διαχειριστούν βραχυπρόθεσμες αλλαγές της κυκλοφοριακής ζήτησης.</li> </ol> |
| Πραγματικού χρόνου<br>Επιλογή προϋπολογισμένου πλάνου από μια βιβλιοθήκη αποθηκευμένων πλάνων | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Διαχείριση βραχυπρόθεσμων αλλαγών της κυκλοφοριακής ζήτησης.</li> <li>2. Τα σχέδια σηματοδότησης είναι εύκολο να τροποποιηθούν</li> <li>3. Είναι χρήσιμα στην περίπτωση μεγάλων αρτηριών με σταθερούς φόρτους.</li> <li>4. Φθηνότερα από τα συστήματα πραγματικού χρόνου.</li> </ol>                                                                | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Απαιτούν περισσότερα δεδομένα από τα συστήματα σταθερού χρόνου.</li> <li>2. Πιθανές βλάβες φωρατών.</li> <li>3. Για την τροποποίηση των σχεδίων σηματοδότησης απαιτείται επιπλέον εργασία.</li> <li>4. Τα σχέδια σηματοδότησης μπορεί να τροποποιηθούν προς λάθος κατεύθυνση.</li> <li>5. Δύσκολο να δημιουργηθούν σχέδια σηματοδότησης για όλες τις περιπτώσεις.</li> </ol>                                                              |
| Πραγματικού χρόνου                                                                            | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Για την εφαρμογή απαιτούνται λίγα κυκλοφοριακά δεδομένα του δικτύου.</li> <li>2. Τα σχέδια σηματοδότησης αλλάζουν σε πραγματικό χρόνο και ως εκ τούτου αποφεύγονται προβλήματα «παλαίωσης» τους.</li> <li>3. Διαχείριση βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων αλλαγών της κυκλοφοριακής ζήτησης.</li> <li>4. Αυτόματη διαχείριση ατυχημάτων.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Πιθανές βλάβες φωρατών.</li> <li>2. Δαπανηρή εγκατάσταση και συντήρηση.</li> <li>3. Απαιτείται κεντρικός έλεγχος.</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

PRODYN (Farges et al., 1983, 1990). Στα συστήματα αυτά οι έννοιες της σχετικής διάρκειας κάθε φάσης, της χρονικής διάρκειας της περιόδου σηματοδότησης και της χρονικής μετατόπισης (offset) της έναρξης των περιόδων γειτονικών κόμβων δεν υφίστανται. Τα OPAC και COP βρίσκονται σε πειραματική εφαρμογή στις ΗΠΑ ενώ το PRODYN έχει εφαρμοσθεί στην Τουλούζη (Γαλλία) και, πειραματικώς, στις Βρυξέλλες.

Οι τρεις προαναφερόμενες στρατηγικές χρησιμοποιούν μετρήσεις κυκλοφοριακής ροής που λαμβάνονται από φωρατές εγκατεστημένους στα ανάντη άκρα των οδών του ελεγχόμενου δικτύου και μεταβιβάζονται στους τοπικούς ελεγκτές. Ο έλεγχος υλοποιείται αποκλειστικά στους τοπικούς ελεγκτές όπου είναι εγκατεστημένοι οι αλγόριθμοι ελέγχου που και στις τρεις περιπτώσεις επιλύουν σε πραγματικό χρόνο ένα δυναμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με κυλιόμενο ορίζοντα χρησιμοποιώντας ιδιαίτερος ρεαλιστικά μαθηματικά πρότυπα για την περιγραφή της διεργασίας της κυκλοφοριακής ροής. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η απόφαση για το αν θα πραγματοποιηθεί άμεση μετάβαση σε επόμενη φάση ή όχι. Οι αποφάσεις λαμβάνονται σε μικρά χρονικά διαστήματα που κυμαίνονται από 1–5 δευτερόλεπτα ανάλογα με την εφαρμοζόμενη στρατηγική ελέγχου. Αυτό συνεπάγεται ότι οι απαιτούμενες μετρήσεις πρέπει επίσης να συλλέγονται κατά αντιστοίχως μικρά χρονικά διαστήματα που κυμαίνονται από 1–5 δευτερόλεπτα ανάλογα με την εφαρμοζόμενη στρατηγική ελέγχου. Καθώς όμως οι μετρήσεις συγκεντρώνονται και χρησιμοποιούνται τοπικά από τους τοπικούς ελεγκτές, το αντίστοιχο σύστημα επικοινωνιών δεν απαιτείται να είναι υψηλής ικανότητας. Οι τοπικοί ελεγκτές επικοινωνούν μεταξύ τους με στόχο την καλύτερη πρόβλεψη του αναμενόμενου φόρτου από ανάντη κόμβους, αλλά οι αποφάσεις λαμβάνονται τοπικά, βάσει τοπικών μετρήσεων. Ο κεντρικός υπολογιστής στην περίπτωση των συστημάτων αυτών χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κεντρική παρακολούθηση και εποπτεία του όλου συστήματος, ενώ οι τοπικοί ελεγκτές είναι πλήρως επιφορτισμένοι με την ευθύνη του ελέγχου. Επομένως η αποκεντρωμένη λειτουργική αρχιτεκτονική των συστημάτων αυτών αντανακλάται σε μια αποκεντρωμένη φυσική αρχιτεκτονική που περιλαμβάνει έναν κεντρικό υπολογιστή χαμηλής υπολογιστικής ισχύος και τοπικούς ελεγκτές υψηλής υπολογιστικής ισχύος.

Η αποκεντρωμένη λειτουργική αρχιτεκτονική των προαναφερομένων συστημάτων, αν και επαρκεί για τον έλεγχο μεμονωμένων κόμβων, τα καθιστά ανεπαρκή για το συντονισμένο έλεγχο αστικών δικτύων που περιλαμβάνουν πολλούς κόμβους. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια οι κατασκευαστές και των τριών συστημάτων σχεδιάζουν αντίστοιχες επεκτάσεις τους (Gartner, 2001; Mirchandani and Head, 1998; Kessaci et al., 1990). Οι επεκτάσεις αφορούν στην ανάπτυξη και

ενοποίηση ανώτερων ιεραρχικά επιπέδων ελέγχου με στόχο το συντονισμό της διαδικασίας ελέγχου σε επίπεδο δικτύου. Όταν ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός των ανώτερων ιεραρχικά επιπέδων ελέγχου, οι προαναφερόμενες στρατηγικές θα περάσουν στην κατηγορία στρατηγικών ελέγχου ιεραρχικής λειτουργικής αρχιτεκτονικής με ό,τι αυτό συνεπάγεται για τη φυσική αρχιτεκτονική των συστημάτων υλοποίησής τους (π.χ. αύξηση απαιτήσεων αναφορικά με τις προδιαγραφές του κεντρικού υπολογιστή και των επικοινωνιών). Στη συνέχεια, συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά δύο συστημάτων αυτής της κατηγορίας.

### **OPAC (Optimization Policies for Adaptive Control)**

Το OPAC (Gartner, 1983) αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και χρησιμοποιεί δυναμικό προγραμματισμό για τον υπολογισμό βέλτιστων σχεδίων σηματοδότησης. Το προς επίλυση πρόβλημα δυναμικού προγραμματισμού δεν απαιτεί σταθερή περίοδο σηματοδότησης ή σταθερή χρονική μετατόπιση και περιορίζεται μόνο από τις ελάχιστες και μέγιστες διάρκειες των χρόνων πράσινης ένδειξης των σηματοδοτών. Αντικειμενικός στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων και των σταματημάτων των οχημάτων. Σε επίπεδο κόμβων το OPAC χρησιμοποιεί δεδομένα από φωρατές τοποθετημένους στο μέσον περίπου (χρόνος ταξιδιού 10–15 δευτερόλεπτα από την γραμμή διακοπής πορείας) των συνδέσμων που προσεγγίζουν τον εκάστοτε κόμβο. Τέλος ένα ανώτερο επίπεδο είναι υπεύθυνο για το συντονισμό των τοπικών αποφάσεων σε επίπεδο δικτύου.

Το σύστημα OPAC είναι πραγματικού χρόνου και για την επίλυση του προβλήματος δυναμικού προγραμματισμού απαιτεί εκτίμηση του κυκλοφοριακού φόρτου. Ωστόσο η εκτίμηση είναι δύσκολο να γίνει με ακρίβεια. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε μια νέα έκδοση του συστήματος που ονομάζεται ROPAC (Gartner et al., 1991) και επιλύει το πρόβλημα δυναμικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα. Το σχήμα με κυλιόμενο ορίζοντα εγγυάται (ανάδραση) ότι τυχόν ανακρίβεια στην εκτίμηση του κυκλοφοριακού φόρτου έχει μικρή επίπτωση στο βέλτιστο σχέδιο σηματοδότησης. Επίσης μια πιο πρόσφατη έκδοση DynaROPAC (Valdes and Paz, 2004) υπολογίζει βέλτιστα σχέδια σηματοδότησης λαμβάνοντας υπόψη σε πραγματικό χρόνο και τον καταμερισμό της κυκλοφορίας.

## PRODYN

Το σύστημα PRODYN (Farges et al., 1983, 1990) αναπτύχθηκε στην Γαλλία και έχει υλοποιηθεί σε μερικές άλλες χώρες. Χρησιμοποιεί ένα αλγόριθμο ανοικτού βρόχου για τον έλεγχο ποσοστού πράσινου φάσεων σε κάθε κόμβο μεμονωμένα. Όπως στο SCOOT, οι φωρατές τοποθετούνται στο μέσον (και προς το τέλος του μήκους) περίπου των συνδέσμων και παρέχουν μετρήσεις κατάληψης. Το σύστημα κάθε 5 δευτερόλεπτα κάνει εκτίμηση του κυκλοφοριακού φόρτου χρησιμοποιώντας μια χρονική περίοδο πρόβλεψης 75 δευτερολέπτων. Αντικειμενικός στόχος της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση των συνολικών καθυστερήσεων στην περίοδο αυτή. Η βελτιστοποίηση γίνεται με έμπροσθεν δυναμικό προγραμματισμό. Οι τοπικοί ρυθμιστές των κόμβων μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους ώστε να πετύχουν καλύτερη εκτίμηση της κυκλοφοριακής ροής που φτάνει σε κατάντη κόμβους. Όπως είναι φανερό η δομή του συνολικού συστήματος είναι αποκεντρωτική.

### 2.6.3 Συστήματα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου ιεραρχικής λειτουργικής αρχιτεκτονικής

#### SCOOT (Split Cycle Offset Optimization Technique)

Το πιο γνωστό σύστημα αυτής της κατηγορίας είναι το βρετανικό σύστημα SCOOT (Hunt et al., 1982) με πλέον των 170 εφαρμογών παγκοσμίως. Το SCOOT χρησιμοποιεί μια ευρετική μεθοδολογία βελτιστοποίησης για να υπολογίσει σε πραγματικό χρόνο τη σχετική διάρκεια κάθε φάσης, τη χρονική διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης και τη χρονική μετατόπιση της έναρξης των περιόδων γειτονικών κόμβων βασιζόμενο σε ένα ενιαίο μαθηματικό πρότυπο του ελεγχόμενου δικτύου. Το SCOOT λαμβάνει μετρήσεις κυκλοφοριακής ροής από φωρατές εγκατεστημένους στα ανάντη άκρα των οδών, 10–15 μέτρα κατάντη του κόμβου που προηγείται. Σε περίπτωση που υπάρχει σημαντικός αριθμός εισόδων και εξόδων κατά μήκος της οδού ή κάποια άλλη φυσική ανομοιογένεια, μπορεί να απαιτηθεί ένας ακόμη φωρατής, κατάντη του πρώτου. 5 δευτερόλεπτα πριν από τη λήξη κάθε φάσης ενός κόμβου, το SCOOT αποφασίζει για ενδεχόμενη αυξομείωσή της μέχρι 4 δευτερόλεπτα. Για τη συγκεκριμένη απόφαση εξετάζεται κάθε κόμβος ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους κόμβους με χρήση αποκλειστικά τοπικών μετρήσεων (αποκεντρωμένη λειτουργία). Μία φορά σε κάθε περίοδο, το SCOOT αποφασίζει για ενδεχόμενη αυξομείωση, μέχρι 4 και πάλι δευτερόλεπτα, της χρονικής μετατόπισης (offset) κάθε κόμβου σε σχέση με την έναρξη των περιόδων των όμορων κόμβων. Η απόφαση αυτή λαμβάνεται επίσης μεμονωμένα για κάθε ζεύγος κόμβων (αποκεντρωμένη λειτουργία).

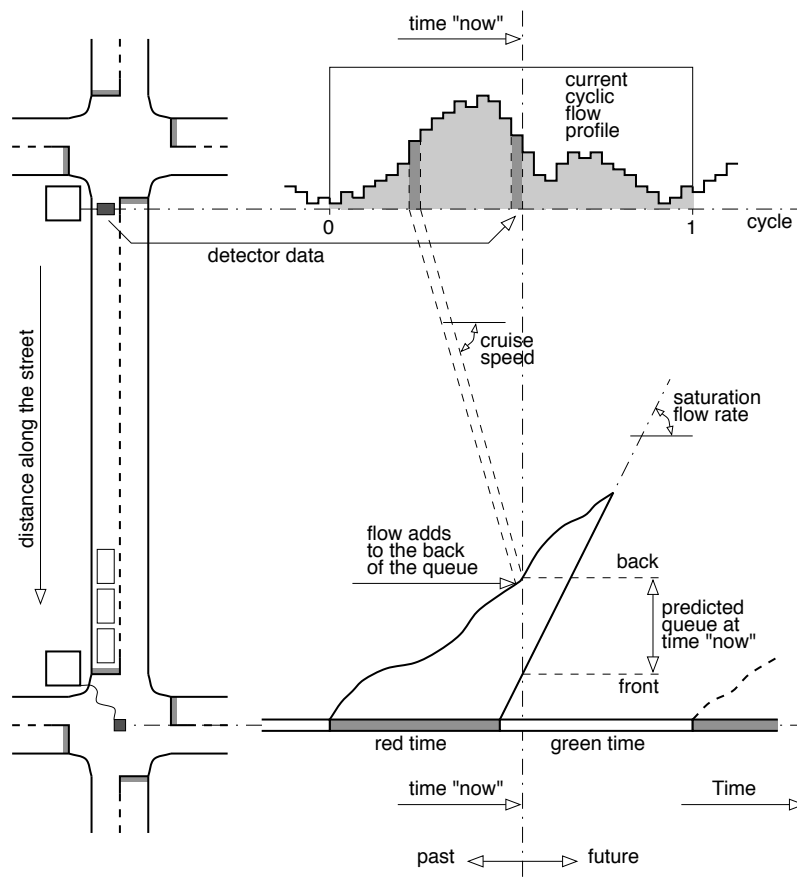
Τέλος, το SCOOT αποφασίζει κάθε 2.5 ή συνήθως κάθε 5 λεπτά για ενδεχόμενη αυξομείωση της διάρκειας της περιόδου μιας ομάδας κόμβων μέχρι 4, 8, ενίοτε και 16 δευτερόλεπτα.

Παρά την επί το πλείστον αποκεντρωμένη λειτουργική αρχιτεκτονική του, το SCOOT υλοποιείται συνολικά σε έναν κεντρικό υπολογιστή στον οποίο είναι αποθηκευμένο το ενιαίο μαθηματικό πρότυπο του εκάστοτε δικτύου, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης και όλα τα στατικά δεδομένα (περιγραφή δικτύου, παράμετροι ελέγχου). Ο κεντρικός υπολογιστής λαμβάνει κάθε δευτερόλεπτο τις μετρήσεις κυκλοφοριακής ροής είτε άμεσα από τους φωρατές είτε μέσω των τοπικών ελεγκτών (εφόσον έχουν την αντίστοιχη ικανότητα), εκτελεί όλους τους απαιτούμενους υπολογισμούς για κάθε κόμβο ξεχωριστά και μεταβιβάζει τις τελικές αποφάσεις ελέγχου στους τοπικούς ελεγκτές κάθε κόμβου για εφαρμογή. Επομένως, ο υπολογιστικός φόρτος του κεντρικού υπολογιστή είναι υψηλός και για το λόγο αυτό η υπολογιστική ισχύς του θα πρέπει να είναι αντίστοιχα υψηλή. Αντιθέτως, τα καθήκοντα των τοπικών ελεγκτών εντός του συστήματος είναι περιορισμένα και για το λόγο αυτό η υπολογιστική ισχύς τους μπορεί να είναι χαμηλή. Τέλος, από πλευράς επικοινωνιών, το αντίστοιχο σύστημα θα πρέπει να είναι υψηλής ικανότητας, κυρίως επειδή η συχνότητα μετρήσεων και η συχνότητα ελέγχου της σχετικής διάρκειας φάσεων είναι υψηλές.

Συμπερασματικά, η φυσική αρχιτεκτονική του συστήματος είναι κεντρική γι' αυτό και το SCOOT εκλαμβάνεται συνήθως ως κεντρικό σύστημα ελέγχου παρά το γεγονός ότι η λειτουργική του αρχιτεκτονική είναι στην πραγματικότητα μεικτή, αφού ο υπολογισμός της σχετικής διάρκειας κάθε φάσης και της χρονικής μετατόπισης των περιόδων γειτονικών κόμβων βασίζονται σε μετρήσεις από τις ανάντη παρακείμενες οδούς μόνον. Το Σχήμα 2.5 απεικονίζει τις βασικές αρχές λειτουργίας του συστήματος SCOOT.

### **SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System)**

Το σύστημα SCATS (Lowrie, 1982) αναπτύχθηκε στην Αυστραλία και έχει υλοποιηθεί σε αρκετές πόλεις, κυρίως της Αυστραλίας και της Νοτιοανατολικής Ασίας αλλά και στην Βόρειο Αμερική. Το SCATS υιοθετεί μια ιεραρχική δομή στην εφαρμογή του ελέγχου κατά την οποία ένα ανώτερο επίπεδο είναι υπεύθυνο για το συντονισμό σε επίπεδο δικτύου, ενώ σε ένα κατώτερο επίπεδο τροποποιείται η σηματοδότηση κάθε κόμβου μεμονωμένα. Το SCATS χωρίζει καταρχήν το δίκτυο σε υποδίκτυα (1 έως 10 κόμβων έκαστο) και στη συνέχεια εφαρμόζει σε κάθε υποδίκτυο έλεγχο δύο επιπέδων, στρατηγικό και τακτικό. Για την εφαρμογή στρατηγικού ελέγχου το SCATS χρησιμοποιεί ειδικές



**Σχήμα 2.5:** Βασικές αρχές λειτουργίας του συστήματος φωτεινής σηματοδότησης SCOOT.

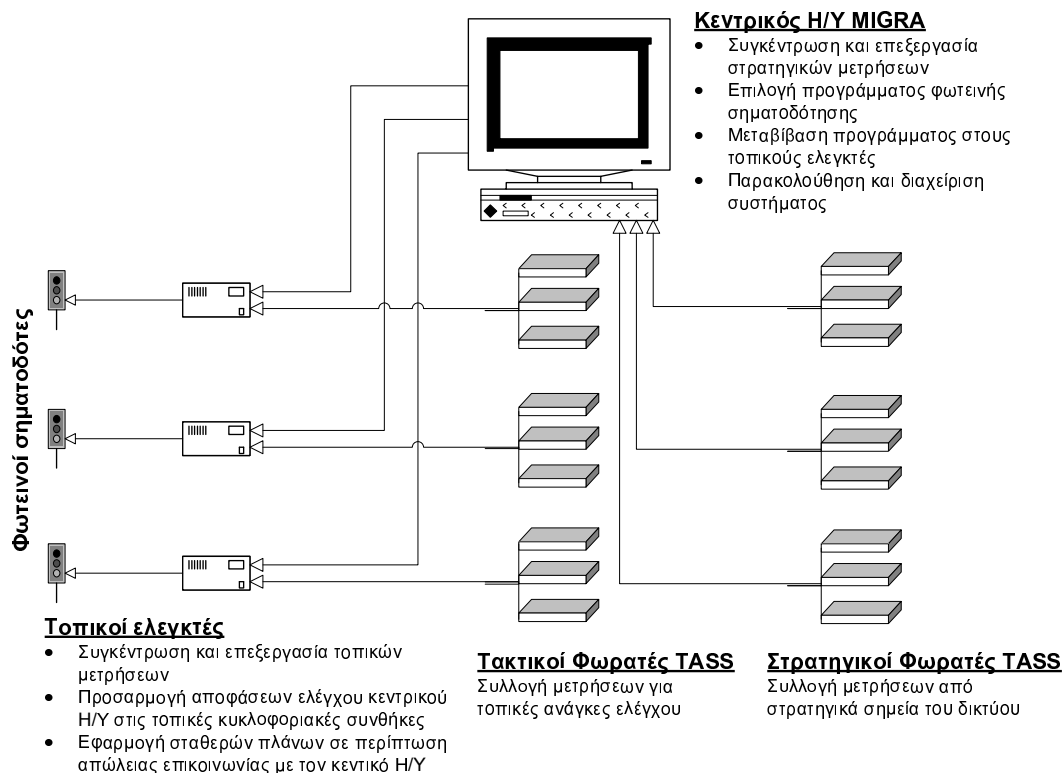
μετρήσεις που μεταβιβάζονται σε έναν κεντρικό υπολογιστή μέσω των τοπικών ελεγκτών μία φορά σε κάθε περίοδο. Ο κεντρικός υπολογιστής αποφασίζει για ενδεχόμενη αυξομείωση της περιόδου (μέχρι 6 δευτερόλεπτα) και ενδεχόμενη αυξομείωση (μέχρι 4% της περιόδου) της σχετικής διάρκειας των φάσεων. Η χρονική μετατόπιση της έναρξης των περιόδων γειτονικών κόμβων επιλέγεται τόσο για κάθε υποσύστημα όσο και μεταξύ των υποσυστημάτων που συνδέονται μεταξύ τους. Στη συνέχεια, οι αποφάσεις ελέγχου του στρατηγικού επιπέδου μεταβιβάζονται στους τοπικούς ελεγκτές όπου υλοποιείται το τακτικό επίπεδο ελέγχου. Στο τακτικό επίπεδο ελέγχου οι ρυθμίσεις του στρατηγικού επιπέδου τροποποιούνται βάσει τοπικών μετρήσεων έτσι ώστε να ανταποκριθούν κατά το δυνατόν στις τρέχουσες τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες. Για την εφαρμογή του τακτικού επιπέδου ελέγχου το SCATS χρησιμοποιεί μετρήσεις που συλλέγονται από φορατές εγκατεστημένους πάνω στη γραμμή διακοπής πορείας (γραμμή διακοπής πορείας). Κατά περίπτωση μπορούν να εγκατασταθούν φορατές και στα ανάντη τμήματα επιλεγμένων οδών για ανίχνευση ουρών και κατάλληλη προσαρμογή των ρυθμίσεων σε τακτικό επίπεδο. Σε αντίθεση με το SCOOT, το SCATS δε χρησιμοποιεί αναλυτικό

μοντέλο κυκλοφορίας στους υπολογισμούς του. Η εφαρμογή του όμως απαιτεί λεπτομερή μελέτη και γνώση των συγκεκριμένων κυκλοφοριακών φόρτων και τυπικών καταστάσεων του εκάστοτε δικτύου εφαρμογής.

Για την υλοποίηση του SCATS τόσο ο χρησιμοποιούμενος κεντρικός υπολογιστής όσο και οι τοπικοί ελεγκτές αρκεί να είναι μέσης υπολογιστικής ισχύος αφού μοιράζονται το φόρτο των απαιτούμενων υπολογισμών κατά τη διαδικασία ελέγχου. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι στο τακτικό επίπεδο ελέγχου οι τοπικοί ελεγκτές εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες σαφώς καθορισμένες από τους κατασκευαστές του SCATS. Για την διεκπεραίωση αυτών των λειτουργιών, οι κατασκευαστές του SCATS έχουν αναπτύξει ειδικά προγράμματα τα οποία αποθηκεύονται σε τοπικούς ελεγκτές συγκεκριμένων κατασκευαστών, γεγονός που περιορίζει κατά πολύ την ελεύθερη επιλογή των αντίστοιχων συσκευών. Τέλος, από πλευράς επικοινωνιών, το αντίστοιχο σύστημα αρκεί να είναι μέσης ικανότητας αφού τόσο η συχνότητα μετρήσεων όσο και η συχνότητα ελέγχου δεν είναι υψηλές.

## TASS

Το TASS (Siemens, 2000) είναι ένα σύγχρονο σύστημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου που αναπτύχθηκε από την εταιρία Siemens και έχει τύχει δεκάδων εφαρμογών σε πολλές πόλεις ανά τον κόσμο. Το TASS λειτουργεί ως εξής: χρησιμοποιώντας ευρετικούς αλγόριθμους επιλέγει με βάση μετρήσεις πραγματικού χρόνου ένα από τα προκαθορισμένα πλάνα (βασισμένα σε ιστορικές μετρήσεις και την γεωμετρία του δικτύου) που βρίσκονται αποθηκευμένα (βιβλιοθήκη αποθηκευμένων πλάνων) στον κεντρικό υπολογιστή (Siemens MIGRA). Κάθε πλάνο χαρακτηρίζεται από διαφορετική διάρκεια περιόδου, διαφορετικές σχετικές διάρκειες πρασίνων των φάσεων σηματοδότησης και διαφορετικές χρονικές μετατοπίσεις στην έναρξη των περιόδων σηματοδότησης. Η επιλογή γίνεται κάθε 10–15 λεπτά βάσει μετρήσεων κυκλοφοριακής ροής που συλλέγουν ειδικοί (στρατηγικοί) φωρατές εγκατεστημένοι σε στρατηγικά σημεία του δικτύου (δηλαδή στις βασικές αρτηρίες). Το επιλεγμένο πλάνο στέλνεται στη συνέχεια στους τοπικούς ελεγκτές, οι οποίοι, λίγα δευτερόλεπτα πριν το τέλος κάθε φάσης, αποφασίζουν, βάσει τοπικών μετρήσεων κυκλοφοριακής ροής ή κατάληψης που συλλέγονται από (τακτικούς) φωρατές εγκατεστημένους σε απόσταση 40 μέτρων ανάντη της γραμμής διακοπής πορείας (γραμμή STOP), ενδεχόμενη επιμήκυνσή της. Ο υπολογιστικός φόρτος που απαιτείται για τη διαδικασία ελέγχου μοιράζεται μεταξύ κεντρικού υπολογιστή και τοπικών ελεγκτών και είναι σχετικά χαμηλός. Κατά συνέπεια για την υλοποίηση του συστήματος ελέγχου αρκούν κεντρικός υπολογιστής και τοπικοί ελεγκτές μέσης υπολογιστικής ισχύος. Το Σχήμα 2.6 απεικονίζει



**Σχήμα 2.6:** Αρχιτεκτονική του συστήματος ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης TASS.

την βασική αρχιτεκτονική του TASS. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός ότι κάθε πλάνο που αποστέλλεται από το TASS στους τοπικούς ελεγκτές έχει σταθερή διάρκεια περιόδου, πρασίνων και χρονικών μετατοπίσεων, η αναπροσαρμογή που επιφέρουν οι τοπικοί φωρατές οδηγεί τελικά όχι μόνο στην μεταβολή της διάρκειας των πρασίνων αλλά και σε μεταβολές της διάρκειας της περιόδου και των χρονικών μετατοπίσεων.

### **MOTION (Method for the Optimization of Traffic signals In Online controlled Networks)**

Το σύστημα MOTION (Bielefeldt and Busch, 1994) αναπτύχθηκε στην Γερμανία, και έχει μερικώς υλοποιηθεί σε Ευρωπαϊκές πόλεις, μεταξύ αυτών στην Θεσσαλονίκη και τον Πειραιά. Το MOTION εκτιμά (βάσει πολύπλοκων μαθηματικών προτύπων δικτύου) σε πραγματικό χρόνο τα βασικά κυκλοφοριακά ρεύματα αφετηρίας-προορισμού στο δίκτυο και υπολογίζει βάσει αυτών τη χρονική διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης, τη σχετική διάρκεια κάθε φάσης και τη χρονική μετατόπιση της έναρξης των περιόδων γειτονικών κόμβων κάθε 15 λεπτά. Να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός της σχετικής διάρκειας κάθε φάσης πραγματοποιείται χωριστά για κάθε κόμβο λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες (αποκεντρωμένη λειτουργία). Οι υπολογισμοί εκτελούνται στον κεντρικό

υπολογιστή με χρήση μετρήσεων κυκλοφοριακής ροής που συλλέγονται από φωρατές εγκατεστημένους στα 50 και 150 μέτρα ανάντη της γραμμής διακοπής πορείας (γραμμή STOP) κάθε οδού του ελεγχόμενου δικτύου (2 φωρατές ανά οδό). Στη συνέχεια, οι ρυθμίσεις στέλνονται στους τοπικούς ελεγκτές οι οποίοι (αν έχουν τις αντίστοιχες προδιαγραφές) μπορούν βάσει τοπικών μετρήσεων να προσαρμόσουν τις ρυθμίσεις που έλαβαν ώστε να ανταποκριθούν κατά το δυνατόν στις τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες. Επομένως και στην περίπτωση του MOTION ο υπολογιστικός φόρτος που απαιτείται για τη διαδικασία ελέγχου μοιράζεται μεταξύ κεντρικού υπολογιστή και τοπικών ελεγκτών. Λόγω της πολυπλοκότητας των υπολογισμών σε κεντρικό επίπεδο απαιτούνται για την υλοποίηση της στρατηγικής κεντρικός υπολογιστής υψηλής σχετικά υπολογιστικής ισχύος και τοπικοί ελεγκτές μέσης υπολογιστικής ισχύος.

### **UTOPIA (Urban Traffic OPTimization by Integrated Automation)**

Το Ιταλικό σύστημα UTOPIA (Mauro and Di Taranto, 1989) αποτελεί ένα επίσης χαρακτηριστικό παράδειγμα ιεραρχικού συστήματος ελέγχου από πλευράς τόσο λειτουργικής όσο και φυσικής αρχιτεκτονικής, έντονα αποκεντρωμένου όμως σε σχέση με τα προαναφερθέντα. Το UTOPIA έχει εφαρμοσθεί κυρίως στο Τορίνο και μερικές άλλες ιταλικές πόλεις, καθώς και, πειραματικά, στην Στοκχόλμη. Στο UTOPIA, το μεγαλύτερο μέρος των υπολογισμών πραγματοποιείται στους τοπικούς ελεγκτές, ενώ ο κεντρικός υπολογιστής υλοποιεί ένα ανώτερο επίπεδο ελέγχου το οποίο μπορεί ακόμα και να αγνοηθεί πλήρως από τους τοπικούς ελεγκτές. Το ανώτερο επίπεδο ελέγχου υπολογίζει, χρησιμοποιώντας τεχνικές βελτιστοποίησης με κυλιόμενο ορίζοντα (λεπτομέρειες δεν έχουν δημοσιευθεί) κάποια αρχική ρύθμιση και περιορισμούς που στόχο έχουν τη βελτιστοποίηση των κυκλοφοριακών συνθηκών σε επίπεδο δικτύου. Τόσο η αρχική ρύθμιση όσο και οι περιορισμοί επαναπροσδιορίζονται όταν παρατηρηθεί κάποια σημαντική αλλαγή στις αναμενόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες του ελεγχόμενου δικτύου. Οι υπολογισμοί στο ανώτερο επίπεδο ελέγχου πραγματοποιούνται βάσει μετρήσεων κυκλοφοριακής ροής που συλλέγονται κάθε 6 δευτερόλεπτα από φωρατές εγκατεστημένους στα ανάντη τμήματα των οδών. Στη συνέχεια, οι αποφάσεις του ανωτέρου επιπέδου ελέγχου στέλνονται στους τοπικούς ελεγκτές. Οι τοπικοί ελεγκτές με τη σειρά τους εφαρμόζουν μια επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης της αρχικής ρύθμισης λαμβάνοντας υπόψη τις τρέχουσες τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες και τους λοιπούς περιορισμούς που τέθηκαν από το ανώτερο επίπεδο ελέγχου. Κατά τη διαδικασία τοπικού ελέγχου, οι τοπικοί ελεγκτές γειτονικών κόμβων επικοινωνούν μεταξύ τους με στόχο την καλύτερη πρόβλεψη του αναμενόμενου φόρτου από ανάντη κόμβους, αλλά οι αποφάσεις λαμβάνονται τοπικά,

βάσει τοπικών μετρήσεων. Επομένως για την υλοποίηση του συστήματος απαιτείται ένα σύστημα ελέγχου αποκεντρωμένο-ιεραρχικό ως προς τη φυσική αρχιτεκτονική, που περιλαμβάνει κεντρικό υπολογιστή μέσης υπολογιστικής ισχύος και τοπικούς ελεγκτές υψηλής υπολογιστικής ισχύος για την τοπική επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Αναφορικά με το σύστημα επικοινωνιών, τόσο η συχνότητα μετρήσεων όσο και η συχνότητα ελέγχου είναι υψηλές και άρα απαιτείται σύνδεση υψηλής ικανότητας.

### **RHODES (Real-time Hierarchical Optimized Distributed and Effective System)**

Το RHODES (Mirchandani and Head, 1998) αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Το RHODES υιοθετεί μια ιεραρχική δομή που αποτελείται από τρία επίπεδα. Το υψηλότερο επίπεδο είναι υπεύθυνο για τον προσδιορισμό των επιπέδων κυκλοφοριακού φόρτου στο δίκτυο. Το επόμενο επίπεδο λειτουργεί όπως στα περισσότερα συστήματα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης, δηλαδή εκτιμά το μήκος των ουρών αναμονής στους κόμβους του δικτύου. Τέλος στο χαμηλότερο επίπεδο, μοντελοποιείται η κίνηση των οχημάτων σε συνδέσμους που προσεγγίζουν κόμβους του δικτύου.

Στο RHODES εκτελούνται βασικά δύο διαδικασίες: (α) εκτίμηση και πρόβλεψη (β) λήψη αποφάσεων. Η πρώτη διαδικασία είναι υπεύθυνη για τη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από τους φωρατές για την εκτίμηση και κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στο δίκτυο. Η δεύτερη διαδικασία είναι υπεύθυνη για τον προσδιορισμό των ποσοστών πράσινου φάσεων λαμβάνοντας υπόψη κατάλληλο αντικειμενικό κριτήριο (π.χ. ελαχιστοποίηση της μέσης καθυστέρησης ανά όχημα, του μέσου μήκους των ουρών, του αριθμού σταματημάτων, κλπ.). Για την βελτιστοποίηση χρησιμοποιείται δυναμικός προγραμματισμός και δέντρα αποφάσεων. Τέλος, το σύστημα RHODES στην τελευταία έκδοση του διαθέτει ειδικά σχεδιασμένο έλεγχο για την παροχή προτεραιότητας σε οχήματα μαζικής μεταφοράς (Mirchandani et al., 2001).

## **2.7 Συστήματα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου κεντρικής λειτουργικής αρχιτεκτονικής**

### **TUC (Traffic-responsive Urban Control)**

Η μόνη γνωστή στρατηγική αυτής της κατηγορίας είναι η ελληνική στρατηγική ελέγχου TUC (Diakaki, 1999; Diakaki et al., 2002, 2003). Η στρατηγική TUC αποτελεί μια νέα και πρωτότυπη προσέγγιση στο πρόβλημα συντονισμένου ελέγχου μεγάλων αστικών δικτύων σε πραγματικό χρόνο και έχει υλοποιηθεί

στα ευμεγέθη δίκτυα (20–50 κόμβων) των Ευρωπαϊκών πόλεων: Γλασκόβη (Σκωτία) (Diakaki et al., 2000), Σάουθαμπτον (Αγγλία), Μόναχο (Γερμανία), Χανιά (Ελλάδα) (Kosmatopoulos et al., 2006). Επίσης, πρόσφατα η στρατηγική TUC υλοποιήθηκε στην πόλη Macaé της Βραζιλίας με προοπτική εφαρμογής της σε μια σειρά άλλων πόλεων στην Νότια Αμερική. Τέλος, έχει γίνει η προκαταρκτική μελέτη υλοποίησης της TUC στο υποδίκτυο Αττική Οδός-Κηφισίας (Αθήνα - Ελλάδα).

Η TUC βασίζεται στη γνωστή θεωρία των πολυμεταβλητών ρυθμιστών αυτόματου ελέγχου. Για την ανάπτυξή της απαιτείται ο εκ των προτέρων σχεδιασμός και εν συνεχεία η υλοποίηση σε πραγματικό χρόνο ενός απλού κανόνα ελέγχου για τον υπολογισμό της σχετικής διάρκειας των φάσεων στους κόμβους του δικτύου. Κατά τον υπολογισμό της σχετικής διάρκειας των φάσεων κάθε κόμβου, η TUC λαμβάνει υπόψη όχι μόνον τις τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες αλλά τις κυκλοφοριακές συνθήκες που επικρατούν στο σύνολο του δικτύου. Αυτή η διαδικασία ελέγχου που εφαρμόζει η TUC είναι άμεση απόρροια της μεθοδολογίας που ακολουθείται κατά το σχεδιασμό της και την καθιστά εφαρμόσιμη ακόμα και σε περίπτωση κορεσμένων κυκλοφοριακών συνθηκών, σε αντίθεση με όλες τις στρατηγικές ελέγχου που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Η TUC διαθέτει επίσης ειδικά σχεδιασμένο αναδραστικό έλεγχο της διάρκειας περιόδου σηματοδότησης, αναδραστικό έλεγχο για το συντονισμό των φωτεινών σηματοδοτών (πράσινο κύμα) που λαμβάνει υπόψη την παρουσία ουρών αναμονής εντός των συνδέσμων, καθώς και παροχή προτεραιότητας σε οχήματα μαζικής μεταφοράς (Diakaki et al., 2003). Σημειώνουμε επίσης ότι η στρατηγική TUC μπορεί εύκολα να επεκταθεί (IN-TUC) ώστε να συμπεριλάβει και άλλα στοιχεία ελέγχου, όπως πίνακες μεταβαλλόμενων μηνυμάτων για καθοδήγηση πορείας, έλεγχο εισόδου αυτοκινητοδρόμου κλπ. (Diakaki et al., 2000).

Για να επιτευχθεί η κεντρική λειτουργία της TUC, το αντίστοιχο σύστημα υλοποίησης πρέπει να περιλαμβάνει έναν κεντρικό υπολογιστή. Σε αυτόν αποθηκεύεται τόσο το απαιτούμενο λογισμικό όσο και όλα τα στατικά δεδομένα (περιγραφή δικτύου, παράμετροι ελέγχου). Ο κεντρικός υπολογιστής λαμβάνει κατά τακτά χρονικά διαστήματα (ανά περίοδο) μετρήσεις κατάληψης που συλλέγονται κατά την προηγούμενη περίοδο (απαιτείται τουλάχιστον μία μέτρηση ανά σημαντική οδό), εκτελεί όλους τους απαιτούμενους υπολογισμούς λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική εικόνα που παρουσιάζει το δίκτυο και μεταβιβάζει τις τελικές αποφάσεις ελέγχου στους τοπικούς ελεγκτές κάθε κόμβου για εφαρμογή κατά την επόμενη περίοδο. Σε περίπτωση απώλειας της επικοινωνίας με τον κεντρικό υπολογιστή, οι τοπικοί ελεγκτές εφαρμόζουν προκαθορισμένα πλάνα. Οι απαιτούμενοι υπολογισμοί για την εφαρμογή της TUC είναι σχετικά απλοί και για το λόγο αυτό αρκεί ένας υπολογιστής μέσης υπολογιστικής ισχύος. Για τη συλλογή μετρήσεων κατάληψης απαιτείται η εγκατάσταση φωρατών

τουλάχιστον στις σημαντικότερες οδούς του δικτύου (ένας φωρατής ανά οδό). Η θέση του φωρατή επί της οδού μπορεί να είναι τυχαία αλλά το σύστημα λειτουργεί αποτελεσματικότερα όταν ο φωρατής τοποθετείται στο ανάντη ήμισυ της οδού. Οι φωρατές μπορούν είτε να συνδέονται άμεσα με τον κεντρικό υπολογιστή είτε να του μεταβιβάζουν τις μετρήσεις μέσω των τοπικών ελεγκτών εφόσον αυτοί έχουν την απαιτούμενη ικανότητα. Σε κάθε περίπτωση, ο υπολογιστικός φόρτος των τοπικών ελεγκτών εντός του συστήματος είναι περιορισμένος και για το λόγο αυτό η υπολογιστική ισχύς τους μπορεί να είναι χαμηλή. Τέλος, από πλευράς επικοινωνιών, το αντίστοιχο σύστημα αρκεί να είναι μέσης ικανότητας αφού τόσο η συχνότητα μετρήσεων όσο και η συχνότητα ελέγχου δεν είναι υψηλές.

Συμπερασματικά, η υλοποίηση της TUC απαιτεί ένα σύστημα ελέγχου κεντρικό ως προς τη φυσική αρχιτεκτονική, όπου οι απαιτούμενοι υπολογισμοί πραγματοποιούνται κατά κύριο λόγο στον κεντρικό υπολογιστή, ενώ οι τοπικοί ελεγκτές εκτελούν τις εντολές ελέγχου ή εφαρμόζουν προκαθορισμένα πλάνα σε περίπτωση απώλειας της επικοινωνίας με τον κεντρικό υπολογιστή.

### **Σύγκριση υπαρχόντων συστημάτων ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης με την στρατηγική ελέγχου TUC**

Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες υπάρχουσες στρατηγικές ελέγχου, η στρατηγική TUC αναπτύχθηκε με στόχο την δυνατότητα συντονισμένου ελέγχου μεγάλων αστικών δικτύων σε πραγματικό χρόνο ακόμα και υπό συνθήκες υψηλού κορεσμού. Η επίτευξη του στόχου αυτού έγινε δυνατή με τη χρήση κατάλληλων μεθοδολογικών εργαλείων που οδηγούν στα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Υψηλή αποτελεσματικότητα όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των διερευνήσεων σε πραγματικές και προσομοιωμένες κυκλοφοριακές συνθήκες.
- Υψηλή ευρωστία σε λάθη μετρήσεων και διαταραχές.
- Αξιοπιστία σε περίπτωση βλαβών εξοπλισμού (αισθητήρες, γραμμές επικοινωνίας κλπ.).
- Απόλυτη γενικότητα που οδηγεί σε εύκολη εφαρμογή (με χρήση διαθέσιμου λογισμικού) σε δίκτυα τυχαίων χαρακτηριστικών και διαστάσεων.
- Εξαιρετική απλότητα.
- Περιορισμένες απαιτήσεις μετρήσεων (απαιτείται ένας φωρατής ανά σημαντική οδό σε τυχαίο σημείο της οδού).

- Χαμηλότερος υπολογιστικός φόρτος.

Η πρώτη ανάπτυξη και υλοποίηση της TUC πραγματοποιήθηκε με ιδιαίτερα επιτυχή αποτελέσματα το 1998 σε μία αρτηρία του Δήμου Γλασκόβης (Σκωτία) όπου και βρίσκεται έκτοτε σε συνεχή εφαρμογή. Με συγχρηματοδότηση της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας και του Δήμου Χανίων καθώς και με την υποστήριξη του ΥΠΕΧΩΔΕ και την συνδρομή της εταιρείας Siemens, η TUC υλοποιήθηκε με εξαιρετική επιτυχία τον Αύγουστο και Σεπτέμβριο του 2001 πιλοτικά σε δύο κόμβους στα Χανιά.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, θεωρώντας ότι η νέα στρατηγική αποτελεί εν δυνάμει ένα σημαντικό διεθνές επίτευγμα στον έλεγχο αστικής κυκλοφορίας, ενέκρινε την χρηματοδότηση υλοποίησης της TUC σε ευμεγέθη δίκτυα τριών ευρωπαϊκών πόλεων: Σάουθαμπτον (Αγγλία), Μόναχο (Γερμανία) και Χανιά (συνολικό δίκτυο). Στο έργο αυτό που είχε καταληκτική ημερομηνία τον Μάρτιο 2004, συμμετείχαν ως παρατηρητές με έντονο ενδιαφέρον μελλοντικής υιοθέτησης της στρατηγικής 10 ακόμη ευρωπαϊκές πόλεις (Λονδίνο, Παρίσι, Αθήνα, Πράγα, Κοπεγχάγη, Κόρκ, Γράτς, Μπέλφαστ, Γλασκόβη, Μπιαλυστόκ).

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης, μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων υλοποίησης της TUC με αυτά των στρατηγικών ελέγχου που ήδη χρησιμοποιούνταν στα αστικά δίκτυα εφαρμογής (SCOOT: Σάουθαμπτον, TASS: Χανιά, BALANCE: Μόναχο), έδειξαν ότι η TUC είτε υπερτερεί (τουλάχιστον 10% βελτίωση στα Χανιά και το Μόναχο) είτε είναι ισάξια (Σάουθαμπτον) με τις πιο προηγμένες στρατηγικές ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι ειδικά στα Χανιά και στο Σάουθαμπτον στις υπάρχουσες στρατηγικές των δικτύων εφαρμογής έχει γίνει εντατική βελτιστοποίηση των παραμέτρων τους τα τελευταία χρόνια, ενώ η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της TUC, έλαβε χώρα σε διαστήματα 2 μηνών (Χανιά) και 1 εβδομάδας (Σάουθαμπτον, Μόναχο).

## 2.8 Προβλήματα της στρατηγικής TUC και εισαγωγή στην προτεινόμενη μεθοδολογία

Οι εφαρμογές της TUC τόσο σε επίπεδο — μακροσκοπικής ή μικροσκοπικής — προσομοίωσης όσο και σε επίπεδο υλοποίησης στο πεδίο, όπως είδαμε παραπάνω, έδειξαν ότι η στρατηγική TUC διαθέτει μερικά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που πηγάζουν από:

- Το γεγονός ότι η στρατηγική TUC βασίζεται σε ρεαλιστικά αλλά ταυτοχρόνως απλά (από την

άποψη υπολογιστικών απαιτήσεων) μοντέλα κυκλοφοριακής ροής, τα οποία μοντελοποιούν αποτελεσματικά την κυκλοφοριακή ροή τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού. Σαν αποτέλεσμα, η εφαρμογή της στρατηγικής δεν απαιτεί υψηλούς υπολογιστικούς φόρτους, όπως οι περισσότερες από τις υπάρχουσες μεθοδολογίες, όπου οι υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις έχουν σαν αποτέλεσμα είτε την περιορισμένη εφαρμογή σε μεμονωμένους κόμβους είτε την μεγάλη χρονική καθυστέρηση στη λήψη αποφάσεων είτε την χρήση υπεραπλουστευμένων μοντέλων κυκλοφοριακής ροής τα οποία αποτυγχάνουν να μοντελοποιήσουν αποτελεσματικά συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού.

- Το γεγονός ότι ο σχεδιασμός της στρατηγικής TUC βασίζεται σε μεθόδους βέλτιστου ελέγχου γραμμικών συστημάτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η στρατηγική TUC να «κληρονομεί» τις ιδιότητες ευρωστίας και αξιοπιστίας οι οποίες είναι «ενσωματωμένες» στις προηγμένες αυτές μεθόδους αυτόματου ελέγχου. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι σε αντίθεση με τις υπάρχουσες στρατηγικές ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης που βασίζονται είτε σε ευρετικές μεθόδους (δηλαδή μεθόδους που δεν χρησιμοποιούν μαθηματική μοντελοποίηση και ανάλυση) είτε σε μεθόδους βελτιστοποίησης ανοιχτού βρόχου, οι μέθοδοι βέλτιστου ελέγχου γραμμικών συστημάτων είναι μέθοδοι βελτιστοποίησης κλειστού βρόχου, όπου λαμβάνεται υπόψη και βελτιστοποιείται η ευστάθεια (και συνεπώς η συμπεριφορά, ευρωστία και αξιοπιστία) του συστήματος κυκλοφορίας κατά την διάρκεια εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου.

Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι παρά τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα της στρατηγικής αυτής έναντι των υπολοίπων στρατηγικών ελέγχου, υπάρχουν ορισμένα προβλήματα τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής:

1. **Περιορισμός χωρητικότητας συνδέσμου:** Το μαθηματικό πρότυπο και ο αναδραστικός κανόνας ελέγχου της TUC που προκύπτει από την εφαρμογή μεθόδων γραμμικού τετραγωνικού βέλτιστου ελέγχου δεν λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι ο αριθμός των οχημάτων εντός των συνδέσμων του δικτύου δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από την χωρητικότητα του συνδέσμου και – πιο σημαντικό – δεν μπορεί να είναι μικρότερος από το μηδέν. Σαν αποτέλεσμα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η εφαρμογή του αναδραστικού κανόνα για τον υπολογισμό της σχετικής διάρκειας των φάσεων στους κόμβους του δικτύου οδηγεί είτε σε πολύ μεγάλους χρόνους πράσινου είτε σε αρνητικούς χρόνους πράσινου. Με άλλα λόγια, σε αυτές τις περιπτώσεις ο αναδραστικός κανόνας ελέγχου της TUC, υποθέτει ότι είναι δυνατή η υπερφόρτωση του

συνδέσμου ή, ακόμη χειρότερα, η «επιστροφή» οχημάτων στους ανάντη συνδέσμους. Βέβαια, η εκ των υστέρων εφαρμογή των περιορισμών μέγιστων/ελάχιστων επιτρεπτών χρόνων πράσινου και του περιορισμού περιόδου αποτρέπει την εφαρμογή αρνητικών ή μεγάλων χρόνων πράσινου.

2. **Περιορισμός αποτελεσματικού πράσινου:** Το μαθηματικό πρότυπο της TUC βασίζεται στην παραδοχή ότι όσο διαρκεί το πράσινο της φάσης ενός συνδέσμου υπάρχουν πάντα οχήματα εντός του συνδέσμου τα οποία εξέρχονται απρόσκοπτα του συνδέσμου. Αυτή η παραδοχή, δεν ισχύει σε δύο περιπτώσεις: (α) όταν το πράσινο της φάσης του συνδέσμου είναι ενεργό ενώ όλα τα οχήματα έχουν εξέλθει του συνδέσμου (περίπτωση χαμηλής κατάληψης) και (β) όταν το πράσινο της φάσης του συνδέσμου είναι ενεργό αλλά τα οχήματα δεν μπορούν να εξέλθουν του συνδέσμου επειδή οι κατάντη σύνδεσμοι που τροφοδοτούνται από τον σύνδεσμο αυτόν είναι πλήρεις οχημάτων (περίπτωση μπλοκαρίσματος κατάντη συνδέσμων).

Τα δύο παραπάνω προβλήματα αντιμετωπίστηκαν μερικώς στις εφαρμογές της TUC, εισάγοντας επιπλέον παραμέτρους ελέγχου ο κατάλληλος συνδυασμός των οποίων οδήγησε στις περισσότερες περιπτώσεις υλοποίησης της TUC σε αποτελεσματική αντιμετώπιση των προβλημάτων που αναφέραμε. Βέβαια, ο κατάλληλος αυτός συνδυασμός προκύπτει μετά από την δοκιμή διαφορετικών συνδυασμών των παραμέτρων ελέγχου και παρατήρηση/ανάλυση της συμπεριφοράς της κυκλοφορίας, μια διαδικασία η οποία απαιτεί περίπου 1–2 μήνες δοκιμών διαφορετικών συνδυασμών για δίκτυα 15–50 κόμβων. Επιπλέον, σε κόμβους με πολύπλοκη γεωμετρία/σηματοδότηση (π.χ., διπλοί κόμβοι πολύπλοκης γεωμετρίας με κοινή σηματοδότηση και αριθμό φάσεων πλέον των τριών) απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των ως άνω παραμέτρων ελέγχου.

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η αντιμετώπιση των δύο προαναφερθέντων προβλημάτων της στρατηγικής TUC μέσω της ανάπτυξης μιας νέας στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης, η οποία κάνοντας χρήση τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα ή μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου θα αντικαταστήσουν τις απλούστερες μεθόδους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί η TUC. Η βασική λογική ανάπτυξης της νέας στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης είναι η διατύπωση του προβλήματος ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης ως προβλήματος περιορισμένου βέλτιστου ελέγχου του οποίου το βασικό μοντέλο της κυκλοφορίας είναι παρόμοιο με αυτό της TUC, αλλά λαμβάνονται ρητώς και εκ των προτέρων υπόψη οι παρακάτω περιορισμοί:

**Περιορισμός 1:** περιορισμός μέγιστων/ελάχιστων χρόνων πράσινου

**Περιορισμός 2:** περιορισμός περιόδου σηματοδότησης για κάθε κόμβο

**Περιορισμός 3:** περιορισμός χωρητικότητας συνδέσμου καθώς και

**Περιορισμός 4:** περιορισμός αποτελεσματικού πράσινου.

Δηλαδή σε αντίθεση με την στρατηγική TUC όπου το πρόβλημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης επιλύεται πρώτα βασιζόμενο μόνο στο βασικό μοντέλο της κυκλοφορίας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί 1–4, στην νέα προτεινόμενη στρατηγική, το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου θα επιλύεται βάσει του μοντέλου της κυκλοφορίας σε συνδυασμό με όλους τους περιορισμούς 1–4. Δύο διαφορετικές μεθοδολογίες θα διερευνηθούν για το σκοπό αυτό:

1. Όπως έχει δειχθεί στην εργασία Papageorgiou (1995) με κατάλληλη αναπροσαρμογή του βασικού μοντέλου της κυκλοφορίας, οι περιορισμοί 1–4 μπορούν να μοντελοποιηθούν μαθηματικά σαν γραμμικοί περιορισμοί. Δεδομένου του γεγονότος ότι το βασικό μοντέλο της κυκλοφορίας είναι και αυτό γραμμικό, το πρόβλημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί σαν ένα πρόβλημα γραμμικού ή τετραγωνικού ελέγχου υπό γραμμικούς περιορισμούς. Με βάση την μεθοδολογία αυτή, το παραπάνω πρόβλημα επιλύεται σε κάθε περίοδο για ένα μεγάλο χρονικό ορίζοντα θεωρώντας ότι η τρέχουσα περίοδος είναι η αρχική (έχει αποδειχθεί ότι αν ο χρονικός ορίζοντας είναι αρκετά μεγάλος, τότε η λύση που προκύπτει προσεγγίζει ικανοποιητικά την «βέλτιστη» λύση που θα προέκυπτε στην περίπτωση που ο χρονικός ορίζοντας ήταν άπειρος) και οι χρόνοι πράσινου που εφαρμόζονται είναι αυτοί που αντιστοιχούν στις τιμές της πρώτης χρονικής περιόδου βελτιστοποίησης. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και από άλλες εφαρμογές ως έλεγχος κυλιόμενου ορίζοντα ή προβλεπτικός έλεγχος (rolling-horizon ή model-predictive control) (Bertsekas, 2005). Προβλήματα γραμμικού ή τετραγωνικού βέλτιστου ελέγχου με γραμμικούς περιορισμούς που εφαρμόζονται όπως περιγράφεται παραπάνω, είναι γνωστό ότι αντιμετωπίζουν – στην γενική τους μορφή – το πρόβλημα της σχετικά υψηλής υπολογιστικής πολυπλοκότητας, με συνέπεια την δυσκολία εφαρμογή τους στην πράξη. Παρόλα αυτά, η λεπτομερής και προσεκτική ανάλυση των ιδιοτήτων του συγκεκριμένου συστήματος στο οποίο εφαρμόζεται ο γραμμικός ή τετραγωνικός βέλτιστος έλεγχος καθώς και η χρήση προηγμένων μεθόδων βελτιστοποίησης, μπορεί να οδηγήσει σε αποτελεσματικές και υπολογιστικά «φθηνές» – και συνεπώς πρακτικά υλοποιήσιμες – μεθοδολογίες επίλυσης του προβλήματος γραμμικού ή τετραγωνικού βέλτιστου ελέγχου για το συγκεκριμένο σύστημα το οποίο εξετάζεται.

2. Στην δεύτερη μεθοδολογία, το πρόβλημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης αντιμετωπίζεται σαν ένα πρόβλημα μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου. Σύμφωνα με την μεθοδολογία αυτή η εισερχόμενη και εξερχόμενη στους κόμβους ροή των οχημάτων, μοντελοποιείται ως ένα μη γραμμικό φαινόμενο ενώ ως διάστημα διακριτού χρόνου δεν θεωρείται η περίοδος φωτεινής σηματοδότησης – όπως συμβαίνει στην πρώτη μεθοδολογία – αλλά μικρότερα χρονικά διαστήματα (π.χ., 5 δευτερόλεπτα) της περιόδου. Ως αποτέλεσμα, το μαθηματικό μοντέλο της δεύτερης μεθοδολογίας μοντελοποιεί ακριβέστερα την κυκλοφοριακή ροή αστικών οδικών δικτύων σε σχέση με αυτό της πρώτης μεθοδολογίας. Από την άλλη, η ισχυρή μη γραμμικότητα του μαθηματικού μοντέλου της δεύτερης μεθοδολογίας, έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εφαρμογή μεθόδων γραμμικού ή τετραγωνικού βέλτιστου ελέγχου σε αυτό το μοντέλο, και συνεπώς να απαιτείται η αντιμετώπιση του προβλήματος ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης ως πρόβλημα μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου, το οποίο είναι εν γένει πιο δύσκολο να επιλυθεί από αυτά του γραμμικού ή τετραγωνικού βέλτιστου ελέγχου. Όπως όμως και στην περίπτωση της πρώτης μεθοδολογίας, η λεπτομερής και προσεχτική ανάλυση των ιδιοτήτων του συγκεκριμένου συστήματος στο οποίο εφαρμόζεται ο μη γραμμικός βέλτιστος έλεγχος καθώς και η χρήση προηγμένων μεθόδων βελτιστοποίησης, μπορεί να οδηγήσει σε αποτελεσματικές και υπολογιστικά «φθηνές» – και συνεπώς πρακτικά υλοποιήσιμες – μεθοδολογίες επίλυσης του προβλήματος μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου για το συγκεκριμένο σύστημα το οποίο εξετάζεται.

Εν κατακλείδι, η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης χρησιμοποιεί παρόμοια μαθηματικά μοντέλα και εργαλεία με αυτά της στρατηγικής TUC και ως συνέπεια διατηρεί τις βασικές ιδιότητες της TUC: απλότητα στο σχεδιασμό και την υλοποίηση, εξαιρετική αποτελεσματικότητα αντιμετώπισης συνθηκών κορεσμού, αποφυγή μπλοκαρίσματος μέρους του δικτύου, ευρωστία, αξιοπιστία, κλπ. Επιπλέον, η νέα αυτή στρατηγική – κάνοντας χρήση μεθόδων τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα και μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου που αντικαθιστούν τις απλούστερες μεθόδους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί η TUC (γραμμικός-τετραγωνικός έλεγχος) – αντιμετωπίζει αποτελεσματικά κάποια προβλήματα που εμφανίζονται στην εφαρμογή της στρατηγικής TUC, ειδικά σε περιπτώσεις πολύπλοκης γεωμετρίας ή/και σηματοδότησης του κόμβου, όπου η εφαρμογή της στρατηγικής TUC απαιτεί ειδικό χειρισμό και προσεκτική βελτιστοποίηση των παραμέτρων ελέγχου από τον μελετητή.

## Κεφάλαιο 3

### Μέθοδοι ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης για κορεσμένα αστικά δίκτυα μεγάλης κλίμακας βασισμένες στο μαθηματικό πρότυπο αποθήκευσης-και-προώθησης

#### 3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τρεις εναλλακτικές προσεγγίσεις, εκ των οποίων οι δύο είναι νέες, που έχουν αναπτυχθεί μέσω της διατύπωσης του προβλήματος ελέγχου αστικής κυκλοφορίας σαν ένα πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου βασισμένο στο μαθηματικό πρότυπο μοντελοποίησης αποθήκευσης-και-προώθησης. Το μαθηματικό πρότυπο αποθήκευσης-και-προώθησης προτάθηκε από ερευνητές την δεκαετία του '60 (Gazis and Potts, 1963) και έκτοτε χρησιμοποιήθηκε σε διάφορες εργασίες για τον έλεγχο κυκλοφορίας σε οδικά δίκτυα (Gazis, 1964; Ans and Gazis, 1974; Singh and Tamura, 1974; Michalopoulos and Stephanopoulos, 1977a,b; Lim et al., 1981; Davison and Özgüner, 1983; Park et al., 1984; Rathi, 1988; Kim and Bell, 1992). Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, τα οχήματα οδεύουν κατά μήκος ενός συνδέσμου για κάποιο σταθερό χρόνο και συσσωρεύονται στην έξοδο του συνδέσμου αν η εισροή είναι μεγαλύτερη από την εκροή. Η εκροή προωθείται σύμφωνα με την εκάστοτε εφαρμοζόμενη ρύθμιση σηματοδότησης. Το κύριο χαρακτηριστικό που κάνει την συγκεκριμένη προσέγγιση ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα, είναι η εισαγωγή ενός απλοποιημένου μοντέλου που επιτρέπει τη μαθηματική περιγραφή της διεργασίας της κυκλοφοριακής ροής χωρίς την χρήση διακριτών μεταβλητών που θα οδηγούσε σε πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης δύσκολα επιλύσιμων σε πραγματικό χρόνο. Η απλοποίηση αφορά την μοντελοποίηση της εκροής ενός συνδέσμου.

Η πρώτη προσέγγιση που υιοθετείται στη διατριβή και έχει αναπτυχθεί στο παρελθόν ως κομμάτι την στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης TUC (Diakaki, 1999; Diakaki et al., 2002) είναι η μοντελοποίηση του προβλήματος ελέγχου αστικής κυκλοφορίας στη μορφή ενός γραμμικού-τετραγωνικού προβλήματος βέλτιστου ελέγχου (LQ). Η επίλυση του γραμμικού-τετραγωνικού προ-

βλήματος βέλτιστου ελέγχου οδηγεί σ' ένα κανόνα ελέγχου κλειστού βρόχου (πολυμεταβλητός αναδραστικός ρυθμιστής). Ο υπολογιστικός φόρτος που απαιτείται για την εφαρμογή αυτού του κανόνα ελέγχου σε πραγματικό χρόνο είναι αμελητέος. Σημειώνεται ότι η διατύπωση αυτή δεν επιτρέπει την ενσωματωμένη εφαρμογή περιορισμών, οι οποίοι εφαρμόζονται μετά την εκτέλεση του αναδραστικού κανόνα ελέγχου με υποβέλτιστα αποτελέσματα. Επιπλέον, η εφαρμογή αυτού του κανόνα ελέγχου σε πραγματικό χρόνο βασίζεται στη διαθεσιμότητα ονομαστικών τιμών για τη σχετική διάρκεια των χρόνων πράσινου των φάσεων σηματοδότησης όλων των ελεγχόμενων αστικών κόμβων. Αυτές οι ονομαστικές τιμές είναι βέλτιστες για μια δεδομένη ιστορική ζήτηση και μπορούν να υπολογιστούν με χρήση κατάλληλων διαθέσιμων τεχνικών. Στην περίπτωση που τέτοιες ονομαστικές τιμές δεν είναι διαθέσιμες, προτείνονται δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις που βασίζονται σε προηγμένες μεθόδους βελτιστοποίησης και βέλτιστου ελέγχου και αντιμετωπίζουν το προαναφερθέν πρόβλημα.

Στην πρώτη εναλλακτική προσέγγιση το πρόβλημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης μοντελοποιείται στη μορφή ενός τετραγωνικού προβλήματος βέλτιστου ελέγχου (QPC) ανοικτού βρόχου με ενσωματωμένους γραμμικούς περιορισμούς, του οποίου η λύση επιτυγχάνεται μέσω τετραγωνικού προγραμματισμού. Η δεύτερη εναλλακτική προσέγγιση οδηγεί σ' ένα πρόβλημα μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου (NOC) ανοικτού βρόχου του οποίου η λύση επιτυγχάνεται μέσω ενός κατάλληλου αλγορίθμου εφικτής κατεύθυνσης. Για την εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο των δύο αυτών νέων προσεγγίσεων βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι πρέπει να ενσωματωθούν σ' ένα σχήμα ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα. Με τον τρόπο αυτό το αντίστοιχο δυναμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης πεπερασμένου ορίζοντα ενσωματώνεται στο περιβάλλον εφαρμογής πραγματικού χρόνου και ανταποκρίνεται έτσι αυτόματα στις εκάστοτε επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες.

### 3.2 Διατύπωση του προβλήματος

Ένα αστικό δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας γράφος με συνδέσμους  $z \in Z$  και κόμβους  $j \in J$ . Θεωρούμε ένα ελεγχόμενο κόμβο  $j$  ορίζοντας  $I_j$  και  $O_j$  τα σύνολα των συνδέσμων εισόδου και εξόδου αντίστοιχα, και κάνουμε τις ακόλουθες παραδοχές:

- Όλες οι επιτρεπτές κινήσεις ενός συνδέσμου εισόδου λαμβάνουν ταυτοχρόνως προτεραιότητα.
- Η διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης  $C_j$  και ο συνολικός χαμένος χρόνος  $L_j$  του κόμβου  $j$  έχουν δεδομένες τιμές (που μπορούν όμως να μεταβάλλονται σε πραγματικό χρόνο). Για

απλότητα και συντονισμό του αστικού δικτύου υποθέτουμε ότι  $C_j = C$  για όλους τους κόμβους  $j \in J$ .

- Οι χρονικές μετατοπίσεις είναι δεδομένες (δηλαδή το ξεκίνημα της κύριας φάσης για κάθε περίοδο σηματοδότησης είναι δεδομένο), μπορούν όμως να μεταβάλλονται σε πραγματικό χρόνο.
- Ο έλεγχος σηματοδότησης του κόμβου  $j$  βασίζεται σε ένα δεδομένο και 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  $S_z$ ,  $z \in Z$ , (σε οχήματα ανά ώρα) και τα ποσοστά στροφής για κάθε κίνηση  $t_{w,z}$ ,  $w \in I_j$ ,  $z \in O_j$ , θεωρούνται δεδομένα, μπορούν όμως να μεταβάλλονται σε πραγματικό χρόνο στις δύο νέες προσεγγίσεις (όχι στην προσέγγιση του γραμμικού-τετραγωνικού ελέγχου).

Εξ ορισμού, ισχύει σε κάθε κόμβο  $j$  ο περιορισμός

$$\sum_{i \in F_j} g_{j,i} + L_j = C \quad (3.1)$$

όπου  $g_{j,i}$  είναι η διάρκεια της φάσης  $i$  στον κόμβο  $j$ . Επιπλέον, ο παρακάτω περιορισμός εισάγεται για να εγγυηθεί την κατανομή χρόνου σε όλες τις φάσεις και ικανό χρόνο διέλευσης πεζών

$$g_{j,i} \geq g_{j,i,\min}, \quad i \in F_j \quad (3.2)$$

όπου  $g_{j,i,\min}$  είναι η ελάχιστη επιτρεπτή διάρκεια της φάσης  $i$  στον κόμβο  $j \in J$ .

Οι ουρές των συνδέσμων περιορίζονται ως εξής

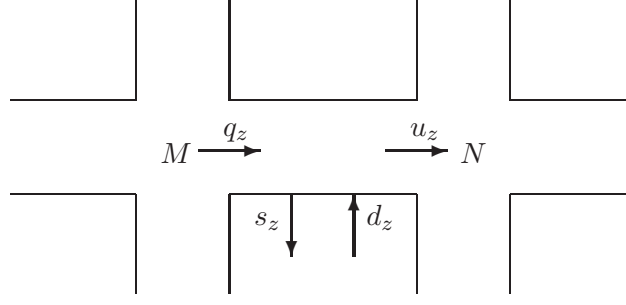
$$0 \leq x_z(k) \leq x_{z,\max}, \quad \forall z \in Z \quad (3.3)$$

όπου  $x_{z,\max}$  είναι η μέγιστη χωρητικότητα (σε οχήματα) του συνδέσμου  $z$ . Το δεύτερο σκέλος του περιορισμού αυτού προστατεύει το σύνδεσμο  $z$  από συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού κατά την διάρκεια περιόδων μεγάλης ζήτησης.

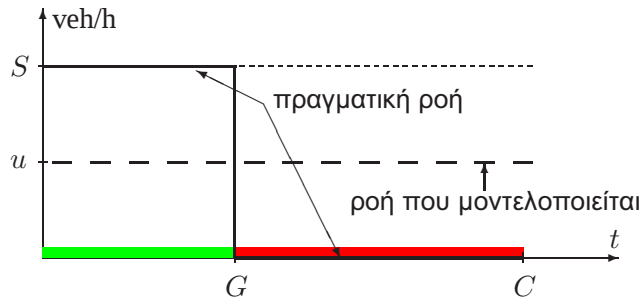
Θεωρούμε τον σύνδεσμο  $z$  που συνδέει δύο κόμβους  $M$  και  $N$  έτσι ώστε  $z \in O_M$  και  $z \in I_N$  (Σχήμα 3.1). Η δυναμική ροής στο σύνδεσμο  $z$  διατυπώνεται από την εξίσωση συνέχειας

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T[q_z(k) - s_z(k) + d_z(k) - u_z(k)] \quad (3.4)$$

όπου  $x_z(k)$  είναι ο αριθμός των οχημάτων στον σύνδεσμο  $z$  την χρονική στιγμή  $kT$ ,  $q_z(k)$  και  $u_z(k)$  η εισροή και εκροή, αντίστοιχα, του ίδιου συνδέσμου κατά την περίοδο  $[kT, (k+1)T]$ , με  $T$  το διακριτό



**Σχήμα 3.1:** Ένας σύνδεσμος που συνδέει δύο κόμβους  $M$  και  $N$  έτσι ώστε  $z \in O_M$  και  $z \in I_N$ .



**Σχήμα 3.2:** Μοντελοποίηση της εκροής των συνδέσμων.

διάστημα ελέγχου και  $k = 0, 1, \dots$  το δείκτη διακριτού χρόνου. Επιπλέον,  $d_z$  και  $s_z$  είναι η ζήτηση και η ροή εξόδου εντός του συνδέσμου  $z$ , αντίστοιχα. Για την ροή εξόδου θέτουμε  $s_z(k) = t_{z,0}q_z(k)$  όπου τα ποσοστά εξόδου  $t_{z,0}$  θεωρούνται γνωστά. Η εισροή στον σύνδεσμο  $z$  δίδεται από την σχέση  $q_z(k) = \sum_{w \in I_M} t_{w,z}u_w(k)$  όπου  $t_{w,z}$ , με  $w \in I_M$ , είναι τα ποσοστά στροφής προς το σύνδεσμο  $z$  των συνδέσμων που εισέρχονται στον κόμβο  $M$ .

Στο σημείο αυτό θα εισάγουμε ένα απλοποιημένο μοντέλο (γραμμικό) για την εκροή  $u_z$  που χαρακτηρίζει την προτεινόμενη προσέγγιση και επιτρέπει τη μαθηματική περιγραφή της διεργασίας της κυκλοφοριακής ροής χωρίς την χρήση διακριτών μεταβλητών. Υποθέτοντας ότι υπάρχει χώρος στους κατάντη συνδέσμους και ότι το  $x_z$  είναι αρκούντως μεγάλο, η εκροή  $u_z$  (πραγματική ροή) ενός συνδέσμου είναι ίση με την ροή κορεσμού  $S_z$  αν το κυκλοφοριακό ρεύμα του συνδέσμου έχει πράσινο και ίση με το μηδέν αν όχι (Σχήμα 3.2). Αν όμως το διακριτό διάστημα ελέγχου  $T$  επιλεγεί ίσο με την περίοδο σηματοδότησης  $C$ , έχουμε για κάθε περίοδο την παρακάτω μέση τιμή για την εκροή (Σχήμα 3.2)

$$u_z(k) = G_z(k)S_z/C \quad (3.5)$$

όπου  $G_z$  είναι ο χρόνος πράσινου του συνδέσμου  $z$ , και υπολογίζεται ως  $G_z(k) = \sum_{i \in v_z} g_{j,i}(k)$ .

### 3.3 Αντικειμενικός στόχος του ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης

Αντικειμενικός στόχος του ελέγχου είναι η ελαχιστοποίηση του ρίσκου μείωσης της κυκλοφοριακής ικανότητας του δικτύου λόγω υπερφόρτωσης (όπου οι σχηματιζόμενες ουρές οχημάτων επεκτείνονται σε ανάντη διασταυρώσεις και φράζουν το εισερχόμενο και, ενδεχομένως, και το κάθετο ρεύμα κυκλοφορίας). Ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί με την ελαχιστοποίηση και εξισορρόπηση του σχετικού αριθμού οχημάτων  $x_z/x_{z,\max}$  εντός των συνδέσμων του ελεγχόμενου δικτύου. Το κριτήριο αυτό είναι λογικό αλλά και κατάλληλο για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου, όπως θα δούμε αργότερα. Εναλλακτικά θα μπορούσαμε να έχουμε ως στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου διαδρομής των οχημάτων στο δίκτυο, αλλά στο κριτήριο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη η χωρητικότητα των επιμέρους συνδέσμων με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος υπερφόρτωσης του δικτύου.

### 3.4 Βέλτιστος έλεγχος κλειστού βρόχου με Γραμμικό-Τετραγωνικό έλεγχο (η στρατηγική TUC)

Αντικαθιστώντας την (3.5) στην (3.4) για ένα αυθαίρετο δίκτυο ελεγχόμενων κόμβων, καταλήγουμε στην παρακάτω γραμμική καταστατική εξίσωση (σε διανυσματική μορφή) που περιγράφει την εξέλιξη του συστήματος στο χρόνο

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{g}(k) + T\Delta\mathbf{d}(k) \quad (3.6)$$

όπου  $\mathbf{x}(k) \in \mathbb{R}^n$  είναι το διάνυσμα κατάστασης (με στοιχεία τους αριθμούς οχημάτων  $x_z$  στους συνδέσμους  $z \in Z$ ),  $\Delta\mathbf{g}(k) = \mathbf{g}(k) - \mathbf{g}^N$  και  $\Delta\mathbf{d}(k) = \mathbf{d}(k) - \mathbf{d}^N$  είναι τα διανύσματα απόκλισης ελέγχου και ζήτησης, αντίστοιχα,  $\mathbf{g}(k) \in \mathbb{R}^m$  είναι το διάνυσμα ελέγχου (με στοιχεία τις διάρκειες των φάσεων σηματοδότησης  $g_{j,i}$ ,  $\forall i \in F_j$ ,  $j \in J$ ),  $\mathbf{g}^N$  είναι ένα διάνυσμα με ονομαστικές τιμές (με στοιχεία τις ονομαστικές διάρκειες των φάσεων σηματοδότησης  $g_{j,i}^N$ ,  $\forall i \in F_j$ ,  $j \in J$ ) το οποίο αντιστοιχεί σε ένα προκαθορισμένο σχέδιο σηματοδότησης σταθερού χρόνου,  $\mathbf{d}(k) \in \mathbb{R}^n$  είναι το διάνυσμα διαταραχών (με στοιχεία τη ζήτηση  $d_z$  για κάθε  $z$ ),  $\mathbf{d}^N$  είναι ένα διάνυσμα διαταραχών με ονομαστικές τιμές τέτοιο ώστε να ισχύει  $\mathbf{B}\mathbf{g}^N + T\mathbf{d}^N = \mathbf{0}$  για την κατάσταση ισορροπίας. Τέλος  $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}$  είναι σταθερός πίνακας που περιέχει τα χαρακτηριστικά του αστικού δικτύου (τοπολογία, ροές κορεσμού, ποσοστά στροφής).

Όπως προαναφέρθηκε στόχος του ελέγχου είναι η ελαχιστοποίηση και εξισορρόπηση του

αριθμού οχημάτων εντός των συνδέσμων του ελεγχόμενου δικτύου. Ένα τετραγωνικό κριτήριο που αντανακλά το στόχο αυτό έχει τη γενική μορφή

$$\mathcal{J} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \left( \|\mathbf{x}(k)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \|\Delta \mathbf{g}(k)\|_{\mathbf{R}}^2 \right) \quad (3.7)$$

όπου  $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  και  $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{m \times m}$  θετικά ημιορισμένοι διαγώνιοι πίνακες βάρους. Ο πρώτος όρος στην (3.7) είναι υπεύθυνος για την ελαχιστοποίηση και εξισορρόπηση του αριθμού οχημάτων στους συνδέσμους του ελεγχόμενου δικτύου. Για το σκοπό αυτό, τα διαγώνια στοιχεία του  $\mathbf{Q}$  ορίζονται ίσα με το αντίστροφο του μέγιστου επιτρεπτού αριθμού αυτοκινήτων  $1/x_{z,\max}$  στους αντίστοιχους συνδέσμους. Η επιλογή εξάλλου του πίνακα βάρους  $\mathbf{R} = r\mathbf{I}$  επηρεάζει το μέγεθος της αντίδρασης του ελέγχου. Για το λόγο αυτό η επιλογή της παραμέτρου  $r$  πραγματοποιείται μέσω μιας διαδικασίας δοκιμής-και-σφάλματος έτσι ώστε να επιτευχθεί μια ικανοποιητική συμπεριφορά ελέγχου για ένα δεδομένο δίκτυο.

Η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου κόστους (3.7) υπό τον περιορισμό (3.6) οδηγεί στον κανόνα ελέγχου (θεωρώντας  $\Delta \mathbf{d}(k) = \mathbf{0}$ )

$$\mathbf{g}(k) = \mathbf{g}^N - \mathbf{L}\mathbf{x}(k) \quad (3.8)$$

όπου  $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{m \times n}$  είναι ο πίνακας ελέγχου ο οποίος αν και εξαρτάται από τους πίνακες του προβλήματος βελτιστοποίησης και έχει μικρή ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων κυκλοφορίας (όπως ποσοστά στροφής και ροές κορεσμού). Ο υπολογισμός του πίνακα  $\mathbf{L}$  μπορεί να απαιτεί αρκετό χρόνο για προβλήματα μεγάλων διαστάσεων, γίνεται όμως εκ των προτέρων (στο εργαστήριο), ενώ σε πραγματικό χρόνο απαιτούνται μόνον οι υπολογισμοί της σχέσης (3.8) μια φορά ανά περίοδο με σταθερό πίνακα  $\mathbf{L}$  και μετρήσεις κατάστασης  $\mathbf{x}(k)$  που αντανακλούν το μέσο όρο μετρήσεων για την προηγούμενη περίοδο.

Ο πολυμεταβλητός αναδραστικός ρυθμιστής (3.8) χρησιμοποιείται από την στρατηγική ελέγχου TUC (Diakaki et al., 2002) για τον υπολογισμό της σχετικής διάρκειας της πράσινης ένδειξης των σηματοδοτών. Η TUC διαθέτει επίσης ειδικά σχεδιασμένο αναδραστικό έλεγχο της διάρκειας περιόδου σηματοδότησης, αναδραστικό έλεγχο της χρονικής μετατόπισης που λαμβάνει υπόψη την παρουσία ουρών αναμονής εντός των συνδέσμων, καθώς και παροχή προτεραιότητας σε οχήματα μαζικής μεταφοράς (Diakaki et al., 2003).

Η μεθοδολογία του γραμμικού-τετραγωνικού ελέγχου δεν λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη περιορισμών πέραν της καταστατικής εξίσωσης. Για το λόγο αυτό, αφού υπολογιστούν οι νέες διάρκειες των

φάσεων από την (3.8), υφίστανται κατάλληλη τροποποίηση μέσω ενός αλγορίθμου σακιδίου ώστε να ικανοποιούν τους περιορισμούς (3.1), (3.2). Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος επιλύει για κάθε κόμβο  $j \in J$  το ακόλουθο πρόβλημα: Δεδομένων των  $g_{j,i}$  (από την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου (3.8)), να βρεθούν τα  $\tilde{g}_{j,i}$ ,  $\forall i \in F_j$  έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κριτήριο κόστους

$$\Phi(\tilde{g}_{j,i}) = \frac{1}{2} \sum_{i \in F_j} (\tilde{g}_{j,i} - g_{j,i})^2 / g_{j,i} \quad (3.9)$$

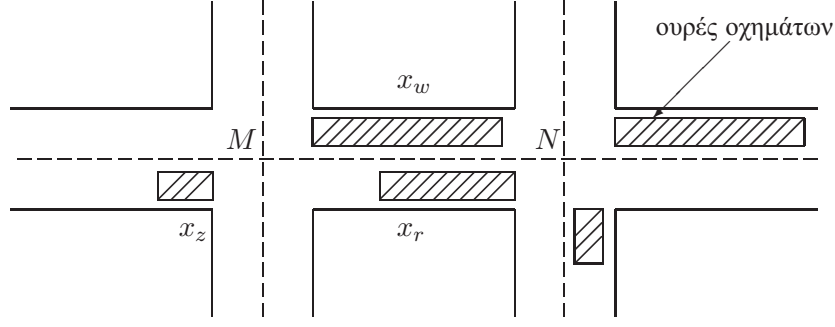
υπό τους περιορισμούς (3.1), (3.2). Το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης υπολογίζει τιμές  $\tilde{g}_{j,i}$ , των οποίων οι σχετικές τιμές  $\tilde{g}_{j,i} / \sum_{i \in v_z} \tilde{g}_{j,i}$  που έχουν ελάχιστη απόσταση από τις σχετικές τιμές των  $g_{j,i} / \sum_{i \in v_z} g_{j,i}$  που υπολογίζονται από τον κανόνα ελέγχου (3.8), και ταυτοχρόνως ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς. Η επίλυση του παραπάνω προβλήματος γίνεται με τη χρήση ενός απλού αλγορίθμου σακιδίου ο οποίος συγκλίνει στην ακριβή λύση σε πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων (Helgason et al., 1980; Diakaki, 1999) που δεν υπερβαίνουν τον αριθμό  $|F_j|$  των φάσεων σε κάθε κόμβο  $j \in J$ .

### 3.5 Βέλτιστος έλεγχος ανοικτού βρόχου με τετραγωνικό προγραμματισμό

Σε αντίθεση με άλλες προσεγγίσεις που βασίζονται στο μοντέλο αποθήκευσης-και-προώθησης (δες Singh and Tamura (1974)) θα εισάγουμε στο σημείο αυτό τις διάρκειες της πράσινης ένδειξης κάθε συνδέσμου  $G_z$  ως επιπρόσθετες μεταβλητές του προβλήματος. Η τροποποίηση αυτή εισάγεται στο μοντέλο ώστε να είναι κατάλληλο και για συνθήκες ακόρεστης κυκλοφορίας. Οι μεταβλητές περιορίζονται ως εξής

$$0 \leq G_z(k) \leq \sum_{i \in v_z} g_{j,i}(k), \quad \forall j \in J. \quad (3.10)$$

Η εισαγωγή των ανεξάρτητων μεταβλητών  $G_z$  στη διατύπωση του προβλήματος προέρχεται από την ακόλουθη παρατήρηση: αν η ουρά  $x_z$  δεν είναι αρκετά μεγάλη ή ακόμα και μηδέν, ή εάν η ουρά που σχηματίζεται στον κατάντη σύνδεσμο είναι πολύ μεγάλη για να εξυπηρετήσει μεγάλες εισροές οχημάτων, τότε θα ενεργοποιηθεί ο περιορισμός (3.3) με αποτέλεσμα την μείωση του αντίστοιχου χρόνου πρασίνου. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι για μια δεδομένη περίοδο σηματοδότησης δύο σύνδεσμοι  $z$  και  $w$  λαμβάνουν ταυτοχρόνως προτεραιότητα στη φάση  $(M, i)$ , και ότι  $x_z \approx 0$  ενώ  $x_w \gg 0$  (βλέπε Σχήμα 3.3). Στην περίπτωση αυτή, αν τα  $G_z$  και  $G_w$  δεν είναι ανεξάρτητα, τότε εξ ορισμού έχουμε  $G_z = G_w = g_{M,i}$ . Ωστόσο, η ουρά στο σύνδεσμο  $z$  είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα να ενεργοποιηθεί ο περιορισμός  $x_z \geq 0$  και συνεπώς να περιορισθεί ο αποτελεσματικός χρόνος  $G_z$ . Η



**Σχήμα 3.3:** Ένας δρόμος διπλής κατεύθυνσης που συνδέει δύο κόμβους  $M$  και  $N$ .

μείωση αυτή όμως δεν επιτρέπει την διάλυση της ουράς του συνδέσμου  $w$  (αφού  $G_z = G_w = g_{M,i}$ ) που απαιτεί περισσότερο αποτελεσματικό χρόνο. Αντιθέτως, αν εισάγουμε ανεξάρτητες μεταβλητές  $G_z$  και  $G_w$ , η βελτιστοποίηση μπορεί να εγγυηθεί  $x_z \geq 0$  επιλέγοντας  $G_z$  «μικρό», χωρίς να περιορίζει το  $G_w$  που απαιτείται να είναι «μεγάλο» για την διάλυση της ουράς  $x_w \gg 0$ .

Παρομοίως, αν ο σύνδεσμος  $r$  κατάντη του συνδέσμου  $z$ , έχει ουρά κοντά στην χωρητικότητά του (Σχήμα 3.3) τότε η βελτιστοποίηση μπορεί να εγγυηθεί ότι ο περιορισμός  $x_r \leq x_{r,\max}$  δεν θα ενεργοποιηθεί, επιλέγοντας  $G_z$  «μικρό» χωρίς να περιορίζει την πράσινη ένδειξη άλλων συνδέσμων οι οποίοι έχουν προτεραιότητα στην ίδια φάση.

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω τροποποίηση, αντικαθιστώντας την (3.5) στην (3.4) για ένα αυθαίρετο δίκτυο ελεγχόμενων κόμβων  $z \in Z$ , καταλήγουμε στην παρακάτω γραμμική καταστατική εξίσωση (σε διανυσματική μορφή) που περιγράφει την εξέλιξη του συστήματος στο χρόνο

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \bar{\mathbf{B}}(k)\mathbf{G}(k) + T\mathbf{d}(k) \quad (3.11)$$

όπου  $\mathbf{G}(k) \in \mathbb{R}^n$  είναι το διάνυσμα ελέγχου των συνδέσμων με στοιχεία την πράσινη ένδειξη  $G_z$  κάθε συνδέσμου  $z \in Z$  και  $\bar{\mathbf{B}} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  είναι πίνακας που περιέχει τα χαρακτηριστικά του αστικού δικτύου. Στην προσέγγιση αυτή οι μεταβλητές ελέγχου  $\mathbf{g}(k) \in \mathbb{R}^m$  είναι το διάνυσμα ελέγχου (με στοιχεία τις διάρκειες των φάσεων σηματοδότησης  $g_{j,i}$ ,  $\forall i \in F_j$ ,  $j \in J$ ) που εμπεριέχονται στους περιορισμούς (3.10) και όχι στην καταστατική εξίσωση όπως στην περίπτωση του γραμμικού-τετραγωνικού ελέγχου. Σημειώνεται ότι ο πίνακας  $\bar{\mathbf{B}}$  μπορεί να μεταβάλλεται στο χρόνο αν οι ροές κορεσμού και τα ποσοστά στροφής μεταβάλλονται στο χρόνο.

Σ' αυτή την προσέγγιση, ένα τετραγωνικό κριτήριο που αντανάκλα τον αντικειμενικό στόχο

του προβλήματος έχει τη μορφή

$$\mathcal{J} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^K \sum_{z \in Z} \frac{x_z^2(k)}{x_{z,\max}}. \quad (3.12)$$

Σημειώνεται το ως άνω τετραγωνικό κριτήριο είναι ίδιο με το κριτήριο (3.7) για  $K \rightarrow \infty$ ,  $r = 0$ . Επίσης το γραμμικό μοντέλο (3.11), με ανεξάρτητες μεταβλητές  $G_z$  για κάθε σύνδεσμο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην προσέγγιση του γραμμικού-τετραγωνικού ελέγχου του τμήματος 3.4.

Με βάση το γραμμικό μοντέλο (3.11), τους περιορισμούς (3.10), τους περιορισμούς που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.2 και το τετραγωνικό κριτήριο (3.12), μπορεί να διατυπωθεί ένα πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου για ένα ορίζοντα βελτιστοποίησης  $K$  ξεκινώντας από δεδομένη αρχική κατάσταση  $\mathbf{x}(0)$  στην καταστατική εξίσωση (3.11). Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού διατυπώνεται ως εξής: ελαχιστοποίηση του κριτηρίου κόστους (3.12) υπό τους περιορισμούς (3.1), (3.2), (3.3), (3.10), (3.11). Το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει τρεις τύπους χρονικά μεταβαλλόμενων μεταβλητών απόφασης: τους χρόνους πράσινης ένδειξης των φάσεων  $g_{j,i}(k)$ , τις μεταβλητές κατάστασης  $x_z(k)$  και τους χρόνους πράσινης ένδειξης των συνδέσμων  $G_z(k)$ . Τέλος το παραπάνω πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού (αραιών πινάκων) μπορεί εύκολα να επιλυθεί μέσω δημόσια διαθέσιμων λογισμικών ή εμπορικών πακέτων σε μερικά CPU-seconds ακόμη και για μεγάλα δίκτυα και μεγάλους ορίζοντες βελτιστοποίησης.

### 3.6 Βέλτιστος έλεγχος ανοικτού βρόχου με μη γραμμικό προγραμματισμό

Στην παρούσα προσέγγιση το πρόβλημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης αντιμετωπίζεται σαν ένα πρόβλημα μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου. Ο λόγος αυτής της τροποποίησης είναι ότι η γραμμική συνάρτηση εκροής (3.5) είναι κατάλληλη στην περίπτωση που οι περιορισμοί (3.3) ικανοποιούνται για κάθε  $x_z(k)$ . Αντί της (3.5) θα ορίσουμε τώρα μία νέα μη γραμμική συνάρτηση της εκροής  $u_z(k)$  η οποία μοντελοποιεί την εκροή σε κάθε σύνδεσμο του δικτύου με μεγαλύτερη ακρίβεια. Πιο συγκεκριμένα θεωρώντας ότι η περίοδος του μοντέλου είναι πολύ μικρότερη από την περίοδο σηματοδότησης, ήτοι  $T \ll C$ , η εκροή θα δίδεται από την μη γραμμική συνάρτηση

$$u_z(k) = \begin{cases} 0 & \text{αν οποιoδήποτε } x_{d,z}(k) \geq cx_{d,\max} \\ \min \left\{ \frac{x_z(k)}{T}, \frac{G_z(k)S_z}{C} \right\} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.13)$$

όπου  $x_{d,z}(k)$  είναι οποιοσδήποτε κατάντη σύνδεσμος του συνδέσμου  $z$  τέτοιος ώστε  $t_{z,d} \neq 0$  και  $c \in (0, 1]$  είναι μία παράμετρος μοντελοποίησης. Εισάγοντας την (3.13), οι μεταβλητές κατάστασης επιτρέπεται να αλλάζουν τιμές πιο συχνά από τις μεταβλητές ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα το διακριτό

βήμα  $T$  για το μοντέλο (3.4) με εκροή την (3.13) μπορεί να είναι της τάξης των 5 sec ενώ οι μεταβλητές ελέγχου  $g_{j,i}$  μπορούν να αλλάζουν τις τιμές τους σε μεγαλύτερα διακριτά διαστήματα  $T_c$ , π.χ. κάθε περίοδο  $C$ . Σημειώνεται ότι χρησιμοποιώντας την (3.13), οι περιορισμοί χωρητικότητας των συνδέσμων λαμβάνονται έμμεσα υπόψη και συνεπώς μπορούν να απαλειφθούν από το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στην πραγματικότητα η εκροή (3.13) ενός συνδέσμου γίνεται μηδέν αν δεν υπάρχουν οχήματα στον σύνδεσμο ή αν οποιοσδήποτε κατάντη σύνδεσμος τον οποίο τροφοδοτεί ο σύνδεσμος  $z$  είναι υπερφορτωμένος. Σημειώνεται ότι η βασική υπόθεση της μοντελοποίησης αποθήκευσης-και-προώθησης, δηλαδή ύπαρξη μιας συνεχούς εκροής (αντί εκροή μηδέν κατά την διάρκεια της κόκκινης ένδειξης και ελεύθερη ροή κατά την διάρκεια της πράσινης ένδειξης), υφίσταται και σ' αυτή την προσέγγιση.

Αντικαθιστώντας την (3.13) στην (3.4) για ένα αυθαίρετο δίκτυο ελεγχόμενων κόμβων  $z \in Z$ , καταλήγουμε στην παρακάτω μη γραμμική καταστατική εξίσωση (σε διανυσματική μορφή) που περιγράφει την εξέλιξη του συστήματος στο χρόνο (Aboudolas, 2003)

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{g}(\kappa), \mathbf{d}(k)], \quad \kappa = [k/\tau] \quad (3.14)$$

όπου  $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^n$  είναι μία μη γραμμική διανυσματική συνάρτηση,  $\kappa$  ένας δείκτης διακριτού χρόνου και  $T_c = \tau T$ .

Σ' αυτή την προσέγγιση, ένα κριτήριο κόστους που αντανακλά τον αντικειμενικό στόχο του προβλήματος έχει τη γενική μορφή

$$\mathcal{J} = \sum_{z \in Z} \frac{x_z^2(K)}{x_{z,\max}} + \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ \sum_{z \in Z} \frac{x_z^2(k)}{x_{z,\max}} + a_f \sum_{j=1}^{|J|} \sum_{i=1}^{|F_j|} [g_{j,i}(\kappa) - g_{j,i}(\kappa-1)]^2 \right\} \quad (3.15)$$

όπου  $a_f$ , είναι θετική παράμετρος βάρους. Το κριτήριο αυτό, χωρίς τον τελευταίο όρο τιμωρίας, προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει και εξισορροπήσει τον αριθμό οχημάτων εντός των συνδέσμων του ελεγχόμενου δικτύου παρομοίως με τα κριτήρια (3.12) και (3.7). Στην πραγματικότητα για  $a_f = 0$ , το κριτήριο (3.15) γίνεται ίδιο με (3.12). Ο όρος συνάρτησης τιμωρίας προστίθεται στην συνάρτηση κόστους για την αποφυγή έντονων διακυμάνσεων των τροχιών ελέγχου στον ορίζοντα βελτιστοποίησης. Η παράμετρος βάρους  $a_f$  προσδιορίζεται για δεδομένο δίκτυο μέσω μιας διαδικασίας δοκιμής-και-σφάλματος έτσι ώστε να επιτευχθεί μια ικανοποιητική συμπεριφορά ελέγχου και ο αλγόριθμος να παρουσιάζει ικανοποιητική ταχύτητα σύγκλισης στο βέλτιστο του προβλήματος.

Με βάση το μη γραμμικό μοντέλο (3.14), τους περιορισμούς (3.1), (3.2) και το κριτήριο κόστους (3.15), μπορεί να διατυπωθεί ένα πρόβλημα μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου για ένα ορίζοντα

βελτιστοποίησης  $K$  ξεκινώντας από δεδομένη αρχική κατάσταση  $\mathbf{x}(0)$  στην καταστατική εξίσωση (3.14). Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου διατυπώνεται ως εξής: ελαχιστοποίηση του κριτηρίου κόστους (3.15) υπό τους περιορισμούς (3.1), (3.2), (3.14). Το παραπάνω πρόβλημα μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου μπορεί να λυθεί μέσω ενός αλγορίθμου εφικτής κατεύθυνσης σε μερικά CPU-mins ακόμη και για μεγάλα δίκτυα και μεγάλους ορίζοντες βελτιστοποίησης (Aboudolas, 2003).

### Το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου διακριτού χρόνου με περιορισμούς

Το γενικό πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου διακριτού χρόνου με περιορισμούς διατυπώνεται ως εξής:

$$\min \quad \mathcal{J} = \vartheta[\mathbf{x}(K)] + \sum_{k=0}^{K-1} \varphi[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{d}(k)] \quad (3.16)$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{d}(k)], \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (3.17)$$

$$\mathbf{h}_1[\mathbf{u}(k)] = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{u}(k) - \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{h}_2[\mathbf{u}(k)] = \mathbf{u}_{\min} - \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{0} \quad (3.19)$$

όπου  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  είναι το διάνυσμα κατάστασης,  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$  είναι το διάνυσμα ελέγχου, και  $k = 0, 1, \dots, K-1$ ,  $\kappa = [k/\tau]$  είναι δείκτες διακριτού χρόνου για τις μεταβλητές κατάστασης και ελέγχου, αντίστοιχα. Η συνάρτηση κόστους (3.16) διατυπώνει τον αντικειμενικό στόχο του ελέγχου με μαθηματικούς όρους όπου  $\vartheta$ ,  $\varphi$  είναι αυθαίρετες, μη γραμμικές συναρτήσεις κόστους. Η καταστατική εξίσωση (3.17), με δεδομένη αρχική κατάσταση  $\mathbf{x}_0$ , περιγράφει τη δυναμική εξέλιξη του συστήματος, ενώ  $\mathbf{d}$  είναι το διάνυσμα των διαταραχών το οποίο θεωρούμε γνωστό για όλο τον χρονικό ορίζοντα βελτιστοποίησης. Οι εξισώσεις (3.18), (3.19) περιγράφουν τους περιορισμούς των μεταβλητών ελέγχου (3.1) και (3.2), αντίστοιχα, ενώ  $\bar{\mathbf{A}} \in \mathbb{R}^{|J| \times m}$  είναι ένας αραιός και διαχωρίσιμος πίνακας που αποτελείται από 1 και 0 και αντικατοπτρίζει το αριστερό μέρος των περιορισμών (3.1) ενώ  $b_j = C - L_j$ ,  $j = 1, \dots, |J|$ .

Οι αναγκαίες συνθήκες (τοπικής) βελτιστοποίησης για το πρόβλημα (3.16)–(3.19) προκύπτουν από την επαυξημένη Χαμιλτονιανή συνάρτηση διακριτού χρόνου που ορίζεται ως

$$\begin{aligned} \mathcal{H}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \boldsymbol{\lambda}(k+1), \boldsymbol{\mu}(k), \boldsymbol{\nu}(k)] = & \varphi[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{d}(k)] + \\ & + \boldsymbol{\lambda}(k+1)^T \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{d}(k)] + \boldsymbol{\mu}(k)^T \mathbf{h}_1[\mathbf{u}(k)] + \boldsymbol{\nu}(k)^T \mathbf{h}_2[\mathbf{u}(k)] \end{aligned} \quad (3.20)$$

όπου  $\boldsymbol{\lambda}(k+1) \in \mathbb{R}^n$ ,  $\boldsymbol{\mu}(k) \in \mathbb{R}^{|J|}$  και  $\boldsymbol{\nu}(k) \in \mathbb{R}^m$  είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange και Kuhn-Tucker για τους αντίστοιχους περιορισμούς ισότητας και ανισότητας. Οι συνθήκες που πρέπει να

ικανοποιούνται είναι (συμβολισμός:  $x_y = \partial x / \partial y$ )

$$\mathcal{H}_{\lambda(k+1)} = \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(\kappa), \mathbf{d}(k)], \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (3.21)$$

$$\mathcal{H}_{\mathbf{x}(k)} = \boldsymbol{\lambda}(k) = \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}(k)} + \left[ \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}(k)} \right]^T \boldsymbol{\lambda}(k+1), \quad \boldsymbol{\lambda}(K) = \boldsymbol{\vartheta}_{\mathbf{x}(K)} \quad (3.22)$$

$$\mathcal{H}_{\mathbf{u}(\kappa)} = \sum_{k=\kappa\tau}^{(\kappa+1)\tau-1} \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{u}(\kappa)} + \left[ \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}(\kappa)} \right]^T \boldsymbol{\lambda}(k+1) \right\} + \bar{\mathbf{A}}^T \boldsymbol{\mu}(\kappa) + \left[ \frac{\partial \mathbf{h}_2}{\partial \mathbf{u}(\kappa)} \right]^T \boldsymbol{\nu}(\kappa) \quad (3.23)$$

$$\boldsymbol{\nu}(\kappa)^T \mathbf{h}_2[\mathbf{u}(\kappa)] = 0, \quad \boldsymbol{\nu}(\kappa) \geq \mathbf{0} \quad (3.24)$$

$$\mathbf{h}_1[\mathbf{u}(\kappa)] = \mathbf{0}, \quad \mathbf{h}_2[\mathbf{u}(\kappa)] \leq \mathbf{0}. \quad (3.25)$$

Συνεπώς, αν οι παραπάνω εξισώσεις ταυτοχρόνως ικανοποιούνται για κάποιες τροχιές  $\mathbf{x}(k+1)$ ,  $\boldsymbol{\lambda}(k)$ ,  $\mathbf{u}(\kappa)$ ,  $\boldsymbol{\mu}(\kappa)$  και  $\boldsymbol{\nu}(\kappa)$ ,  $k = 0, \dots, K-1$ , έχουμε προσδιορίσει ένα στάσιμο σημείο για το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου διακριτού χρόνου με περιορισμούς (3.16)–(3.19).

### Ένας αλγόριθμος εφικτής κατεύθυνσης για την αριθμητική επίλυση

Τώρα θα περιγράψουμε έναν αλγόριθμο ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου διακριτού χρόνου με περιορισμούς που περιγράψαμε στην ενότητα 3.6.

Το πιο κρίσιμο κομμάτι του αλγόριθμου επίλυσης είναι ο υπολογισμός κατάλληλων εφικτών κατευθύνσεων στο χώρο που παράγουν οι μεταβλητές ελέγχου με βάση την κλίση του προβλήματος. Για δεδομένη επιτρεπτή τροχιά ελέγχου  $\mathbf{u}(\kappa)$ ,  $\kappa = 0, \dots, K_c$ , όπου  $K_c = \lfloor K/\tau \rfloor - 1$  είναι ο χρονικός ορίζοντας ελέγχου, η αντίστοιχη τροχιά κατάστασης  $\mathbf{x}(k)$  μπορεί να υπολογισθεί ολοκληρώνοντας την εξίσωση (3.21), και ως εκ τούτου το κριτήριο κόστους εξαρτάται μόνο από τις μεταβλητές ελέγχου, δηλαδή  $\mathcal{J} = \bar{\mathcal{J}}(\mathbf{u})$ . Η μειωμένη κλίση της  $\bar{\mathcal{J}}$  ως προς  $\mathbf{u}$  στην επιφάνεια των περιορισμών ισότητας (καταστατική εξίσωση (3.17)) είναι

$$\mathbf{g}(\kappa) = \mathcal{H}_{\mathbf{u}(\kappa)} = \sum_{k=\kappa\tau}^{(\kappa+1)\tau-1} \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{u}(\kappa)} + \left[ \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}(\kappa)} \right]^T \boldsymbol{\lambda}(k+1) \right\} \quad (3.26)$$

όπου το διάνυσμα  $\boldsymbol{\lambda}$  ικανοποιεί (3.22).

Μια δεδομένη επιτρεπτή τροχιά ελέγχου  $\mathbf{u}$  μπορεί να ενεργοποιεί ένα αριθμό  $q$  περιορισμών ικανοποιώντας  $\mathbf{h}_1 = \mathbf{0}$ ,  $h_{2,i} = 0$ ,  $i \in E$ , ενώ άλλοι περιορισμοί μπορεί να είναι ανενεργοί, δηλαδή  $h_{2,i} < 0$ ,  $i \in I$ . Ορίζουμε το ενεργό σύνολο  $\mathcal{A}_q$  να είναι το σύνολο των ενεργών περιορισμών και  $\mathbf{A}_q$  ένας πίνακας ο οποίος αποτελείται από τις γραμμές των ενεργών περιορισμών. Στη συνέχεια

αναζητούμε μια εφικτή κατεύθυνση καθόδου  $\mathbf{p}$  η οποία βρίσκεται στο εφαπτόμενο επίπεδο που παράγεται από το ενεργό σύνολο των περιορισμών. Στην απλούστερη περίπτωση, κάποιος μπορεί να προβάλει μια κλίση (καθόδου) στον προαναφερόμενο υποχώρο. Μια τέτοια προβολή μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός συμμετρικού πίνακα προβολής  $\mathbf{P}_q$  ο οποίος δίνεται από (Rosen, 1960)

$$\mathbf{P}_q = \mathbf{I} - \mathbf{A}_q^T (\mathbf{A}_q \mathbf{A}_q^T)^{-1} \mathbf{A}_q. \quad (3.27)$$

Στην περίπτωση αυτή η προβαλλόμενη κλίση δίδεται ως  $\gamma(\kappa) = \mathbf{P}_q \mathbf{g}(\kappa)$ .

Αν  $\gamma(\kappa) \neq \mathbf{0}$  τότε ένας κατάλληλος αλγόριθμος αναζήτησης επί γραμμής (Bertsekas, 1999) κατά μήκος της κατεύθυνσης αναζήτησης  $\mathbf{p}$  μπορεί να εφαρμοσθεί (π.χ.  $\mathbf{p} = -\gamma$ ) για την εύρεση μιας νέας βελτιωμένης επιτρεπτής τροχιάς ελέγχου. Λόγω των περιορισμών (3.18), (3.19) το μήκος του βήματος  $\alpha$  περιορίζεται ως εξής:  $\alpha_{\max} = \max\{\alpha \mid \mathbf{u} + \alpha \mathbf{p} \text{ είναι εφικτό}\}$ . Το μήκος του βήματος  $\alpha_{\max}$  αντικατοπτρίζει την ελάχιστη απόσταση από (οποιοδήποτε) ανενεργό περιορισμό, κατά μήκος της κατεύθυνσης  $\mathbf{p}$ .

Επιπλέον, αν  $\gamma(\kappa) = \mathbf{0}$ , οι πολλαπλασιαστές Lagrange για τους ενεργούς περιορισμούς δίδονται από

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}(\kappa) \\ \nu_{i \in E}(\kappa) \end{bmatrix} = -(\mathbf{A}_q \mathbf{A}_q^T)^{-1} \mathbf{A}_q \mathbf{g}(\kappa). \quad (3.28)$$

ενώ  $\nu_{i \in I}(\kappa) = 0$ . Στην περίπτωση αυτή, αν  $\nu_{i \in E}(\kappa) \geq 0$  για κάθε  $i \in E$ , έχουμε προσδιορίσει ένα στάσιμο σημείο (στην πραγματικότητα ένα τοπικό ελάχιστο) του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου αφού όλες οι αναγκαίες συνθήκες βελτιστοποίησης (3.21)–(3.25) ικανοποιούνται. Ωστόσο, αν τουλάχιστον ένα από τα στοιχεία  $\nu_{i \in E}(\kappa)$  είναι αρνητικό, είναι δυνατόν, αφαιρώντας την αντίστοιχη ανισότητα (δηλ. αφαιρώντας την από το ενεργό σύνολο), να προσδιορίσουμε μία νέα κατεύθυνση η οποία οδηγεί σε ένα καλύτερο σημείο. Συνήθως, ο περιορισμός που αντιστοιχεί στο πιο αρνητικό στοιχείο  $\nu_{i \in E}(\kappa)$  είναι αυτός που επιλέγεται προς αφαίρεση από το ενεργό σύνολο. Τελικά, προσδιορίζεται μία νέα κατεύθυνση αναζήτησης προβάλλοντας την κλίση στο χώρο που παράγεται από το εναπομείνον ενεργό σύνολο των περιορισμών και μία νέα επανάληψη ξεκινά.

Ο αλγόριθμος επίλυσης έχει την ακόλουθη μορφή:

**Βήμα 1:** Επέλεξε μια αρχική επιτρεπτή τροχιά ελέγχου  $\mathbf{u}^{(0)}(\kappa)$ ,  $\kappa = 0, \dots, K_c$ , θέσε τον δείκτη επανάληψης  $\ell = 0$ .

**Βήμα 2:** Χρησιμοποιώντας  $\mathbf{u}^{(\ell)}(\kappa)$  λύσε την (3.21) από την γνωστή αρχική συνθήκη  $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$  και

υπολόγισε  $\mathbf{x}^{(\ell)}(k+1)$ , χρησιμοποιώντας  $\mathbf{x}^{(\ell)}(k+1)$  και  $\mathbf{u}^{(\ell)}(\kappa)$  λύσε την (3.22) από την τελική συνθήκη  $\boldsymbol{\lambda}(K) = \boldsymbol{\vartheta}_{\mathbf{x}(K)}$  και υπολόγισε  $\boldsymbol{\lambda}^{(\ell)}(k+1), k = 0, \dots, K-2$ .

**Βήμα 3:** Χρησιμοποιώντας  $\mathbf{x}^{(\ell)}(k+1)$ ,  $\mathbf{u}^{(\ell)}(\kappa)$  και  $\boldsymbol{\lambda}^{(\ell)}(k+1)$ , υπολόγισε την μειωμένη κλίση  $\mathbf{g}^{(\ell)}(\kappa)$ . Προσδιόρισε των υποχώρο των ενεργών περιορισμών και σχημάτισε  $\mathcal{A}$ ,  $\mathbf{A}_q$ . Χρησιμοποιώντας (3.27) υπολόγισε τον πίνακα προβολής  $\mathbf{P}_q$  και την προβαλλόμενη κλίση  $\boldsymbol{\gamma}^{(\ell)}(\kappa) = \mathbf{P}_q \mathbf{g}^{(\ell)}(\kappa), \kappa = 0, \dots, K_c$ .

**Βήμα 4:** Προσδιόρισε μια κατεύθυνση αναζήτησης  $\mathbf{p}^{(\ell)}(\kappa), \kappa = 0, \dots, K_c$ , π.χ. μέγιστη κατάβαση ή συζυγών κλίσεων.

**Βήμα 5:** Επίλυσε το πρόβλημα αναζήτησης επί γραμμής κατά μήκος της κατεύθυνσης αναζήτησης  $\mathbf{p}^{(\ell)}$  για την εύρεση μιας νέας βελτιωμένης επιτρεπτής τροχιάς ελέγχου  $\mathbf{u}^{(\ell+1)}(\kappa)$ , δηλαδή

$$\alpha^{(\ell)} = \arg \min_{\alpha \in (0, \alpha_{\max}]} \overline{\mathcal{J}} \left\{ \mathbf{u}^{(\ell)}(\kappa) + \alpha \mathbf{p}^{(\ell)}(\kappa) \right\}$$

όπου  $\alpha^{(\ell)} > 0$  είναι το βέλτιστο βήμα του προβλήματος αναζήτησης επί γραμμής και

$$\mathbf{u}^{(\ell+1)}(\kappa) = \mathbf{u}^{(\ell)}(\kappa) + \alpha^{(\ell)} \mathbf{p}^{(\ell)}(\kappa), \quad \forall \kappa = 0, \dots, K_c.$$

**Βήμα 6:** Αν για δεδομένο βαθμωτό  $\varepsilon > 0$ , το κριτήριο σύγκλισης  $\|\boldsymbol{\gamma}^{(\ell)}(\kappa)\| < \varepsilon, \forall \kappa$ , δεν ικανοποιείται, θέσε  $\ell := \ell + 1$  και πήγαινε στο **Βήμα 2**, διαφορετικά, προσδιόρισε του πολλαπλασιαστές Lagrange για τους ενεργούς περιορισμούς από την (3.28).

(α) Αν  $\nu_{i \in E}(\kappa) \geq 0$  για κάθε  $i \in E$  (αντιστοιχούν στους ενεργούς περιορισμούς), τότε ΤΕΛΟΣ. Η επιτρεπτή τροχιά ελέγχου  $\mathbf{u}(\kappa)$  ικανοποιεί τις συνθήκες Kuhn-Tacker.

(β) Διαφορετικά, διέγραψε μια γραμμή του πίνακα  $\mathbf{A}_q$ , η οποία συνήθως αντιστοιχεί στην ανισότητα με την μικρότερη τιμή  $\nu_{i \in E}(\kappa)$  και αφαίρεσε τον αντίστοιχο δείκτη από το ενεργό σύνολο  $\mathcal{A}$ . Θέσε  $\ell := \ell + 1$  και πήγαινε στο **Βήμα 2**.

Σημειώνεται ότι οι περιορισμοί (3.18) και (3.19) είναι διαχωρίσιμοι (ένα σύνολο περιορισμών για κάθε κόμβο) και ως εκ τούτου ο υπολογισμός του πίνακα προβολής ακόμη και για δίκτυα μεγάλης κλίμακας είναι υπολογιστικά εφικτός. Παράλληλα, αφού το σύνολο των ενεργών περιορισμών στο ενεργό σύνολο αλλάζει το πολύ κατά ένα περιορισμό κάθε φορά, είναι εφικτός ο υπολογισμός του πίνακα προβολής από τον προηγούμενο τού (που αντιστοιχεί στο προηγούμενο ενεργό σύνολο) χρησιμοποιώντας μία απλή αναδρομική σχέση (Rosen, 1960).

### 3.7 Σχολιασμός προσεγγίσεων

Θα κλείσουμε την παρουσίαση των προτεινόμενων προσεγγίσεων με μερικά σχόλια για τις επιπτώσεις της απλοποίησης (3.5) στην προς σχεδίαση στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης και για την εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο των προσεγγίσεων βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου με τετραγωνικό προγραμματισμό (QPC) και μη γραμμικό προγραμματισμό (NOC).

Ας θεωρήσουμε καταρχήν τις συνέπειες της απλοποίησης (3.5) για την μοντελοποίηση της εκροής ενός συνδέσμου. Πρώτον, η περίοδος του μοντέλου  $T$  δεν μπορεί να είναι μικρότερη από την περίοδο σηματοδότησης  $C$  όλων των ελεγχόμενων κόμβων. Ο περιορισμός αυτός δεν είναι απαγορευτικός για τον συντονισμένο έλεγχο φωτεινής σηματοδότησης σε πραγματικό χρόνο ενώ έχει ως συνέπεια την επικοινωνία του κεντρικού υπολογιστή και των τοπικών ελεγκτών μία φορά κάθε περίοδο σηματοδότησης μόνον, σε αντίθεση με άλλα προηγμένα συστήματα φωτεινής σηματοδότησης όπως το SCOOT (Hunt et al., 1982) που απαιτούν πολύ συχνότερη επικοινωνία (π.χ. ανά δευτερόλεπτο). Δεύτερον, το μοντέλο δεν περιγράφει τις περιοδικές μεταβολές των ουρών στους συνδέσμους που απορρέουν από την εναλλαγή κόκκινης-πράσινης ένδειξης αφού υποθέτει την ύπαρξη μιας συνεχούς μέσης εκροής για κάθε σύνδεσμο του δικτύου (όσο υπάρχει ικανή ζήτηση). Τέλος, η επίδραση της χρονικής μετατόπισης μεταξύ γειτονικών κόμβων και η χρονική διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη. Ωστόσο είναι δυνατή η πρόσδεση στην στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης κατάλληλων αλγορίθμων που λειτουργούν παράλληλα προς αυτήν και μεταβάλουν την περίοδο σηματοδότησης καθώς και την χρονική μετατόπιση μεταξύ γειτονικών κόμβων όπως έχει παρουσιασθεί στην εργασία Diakaki et al. (2003). Οι παραπάνω συνέπειες είναι το τίμημα για την αποφυγή μοντελοποίησης των εναλλαγών κόκκινης-πράσινης ένδειξης στους φωτεινούς σηματοδότες μέσω διακριτών μεταβλητών που θα οδηγούσε σ' ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης διακριτού προγραμματισμού εκθετικής πολυπλοκότητας όπως στις εργασίες Farges et al. (1983); Mirchandani and Head (1998); Gartner (1983); Abu-Lebdeh and Benekohal (1997); De Schutter and De Moor (1998); Lo (1999); Lo et al. (2001); Beard and Ziliaskopoulos (2006).

Για την εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο των προσεγγίσεων βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου QPC και NOC, οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι πρέπει να ενσωματωθούν σ' ένα σχήμα ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα (ή προβλεπτικού ελέγχου) το οποίο θα περιγράψουμε λεπτομερώς στην επόμενη ενότητα. Το σχήμα ελέγχου με κυλιόμενο ορίζοντα αποφεύγει την εφαρμογή «μυωπικών» πολιτικών ελέγχου στους φωτεινούς σηματοδότες του δικτύου ενώ ενσωματώνει το δυναμικό πρόβλημα βελ-

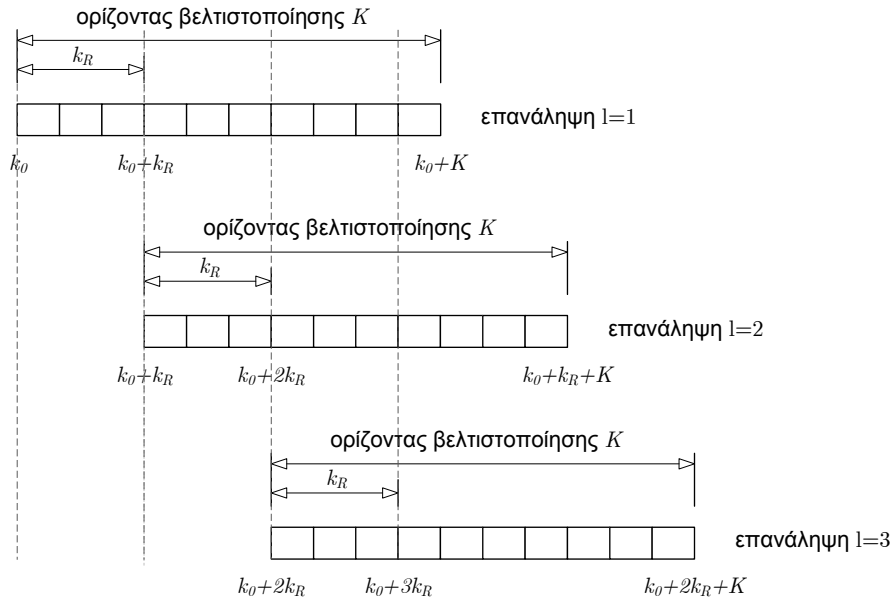
τιστοποίησης πεπερασμένου ορίζοντα στο πραγματικό περιβάλλον εφαρμογής πραγματικού χρόνου ώστε να ανταποκρίνεται στις εκάστοτε κυκλοφοριακές συνθήκες. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση του ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης με κυλιόμενο ορίζοντα (σε αντίθεση με τον γραμμικό-τετραγωνικό έλεγχο) η χρονική μεταβολή κυκλοφοριακών παραμέτρων, όπως ροές κορεσμού και ποσοστά στροφής, μπορεί να ληφθεί υπόψη κατά την εφαρμογή του αντίστοιχου αλγόριθμου βελτιστοποίησης εφόσον υπάρχουν αντίστοιχες εκτιμήσεις ή προβλέψεις σε πραγματικό χρόνο.

### 3.8 Το σχήμα ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα (ή προβλεπτικού ελέγχου)

Όπως ήδη αναφέρθηκε, για την εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο των προσεγγίσεων βέλτιστου ελέγχου ανοικτού βρόχου QPC και NOC, οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι πρέπει να ενσωματωθούν σ' ένα σχήμα ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα. Πιο συγκεκριμένα το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου επιλύεται σε πραγματικό χρόνο μία φορά κάθε περίοδο για ένα μεγάλο χρονικό ορίζοντα βελτιστοποίησης  $K$  θεωρώντας ότι η τρέχουσα κατάσταση του συστήματος (μετρήσεις αριθμού οχημάτων που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της τελευταίας περιόδου) είναι η αρχική κατάσταση  $\mathbf{x}(0)$  και ότι η ζήτηση  $\mathbf{d}(k)$  στον αντίστοιχο χρονικό ορίζοντα βελτιστοποίησης  $K$  είναι διαθέσιμη από ιστορικές μετρήσεις ή κατάλληλες μεθόδους πρόβλεψης (π.χ. χρονοσειρές ή νευρωνικά δίκτυα) ή και αγνοείται πλήρως. Στη συνέχεια, ο αντίστοιχος αλγόριθμος βελτιστοποίησης παράγει μία τροχιά βέλτιστου ελέγχου  $\mathbf{g}(k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, K - 1$  με στοιχεία τις διάρκειες των φάσεων σε κάθε κόμβο  $g_{j,i}$ ,  $\forall i \in F_j, j \in J$  για  $K$  περιόδους ενώ οι χρόνοι πράσινου που εφαρμόζονται στους φωτεινούς σηματοδότες του δικτύου είναι αυτοί που αντιστοιχούν στις τιμές της πρώτης χρονικής περιόδου  $\mathbf{g}(0)$ .

Το σχήμα ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα εφαρμόζεται ως εξής:

Την χρονική στιγμή  $k_0$ , το πρόβλημα QP (ή NOC) επιλύεται βάσει μετρήσεων (ή εκτιμήσεων) της αρχικής κατάστασης  $\mathbf{x}(k_0)$  (μετρήσεις ουρών οχημάτων στους συνδέσμους του ελεγχόμενου δικτύου) και δεδομένων της μελλοντικής ζήτησης  $\mathbf{d}(k)$ ,  $k = k_0, \dots, k_0 + K - 1$ , για τον υπολογισμό των μεταβλητών ελέγχου  $\mathbf{g}^*(k)$  και κατάστασης  $\mathbf{x}^*(k+1)$ ,  $k = k_0, \dots, k_0 + K - 1$ . Ωστόσο, μόνο ένα κομμάτι της τροχιάς ελέγχου εφαρμόζεται στην διαδικασία, ήτοι  $\mathbf{g}^*(k)$ ,  $k = k_0, \dots, k_0 + k_R - 1$ , όπου  $k_R \ll K$  (π.χ.  $k_R = 1$ ). Στην συνέχεια, την χρονική στιγμή  $k_0 + k_R$ , βάσει νέων μετρήσεων της αρχικής κατάστασης  $\mathbf{x}(k_0 + k_R)$  (ανάδραση) και ενημερωμένων δεδομένων της μελλοντικής ζήτησης  $\mathbf{d}(k)$ ,  $k = k_0 + k_R, \dots, k_0 + k_R + K - 1$ , το πρόβλημα QP (ή NOC) επιλύεται ξανά για τον υπολογισμό της τροχιάς ελέγχου  $\mathbf{g}^*(k)$  και κατάστασης  $\mathbf{x}^*(k+1)$ ,  $k = k_0 + k_R, \dots, k_0 + k_R + K - 1$ , όμως μόνο



Σχήμα 3.4: Το σχήμα κυλίσμενου ορίζοντα.

$g^*(k)$ ,  $k = k_0 + k_R, \dots, k_0 + 2k_R - 1$ , πράγματι εφαρμόζεται στην διαδικασία, κ.ο.κ. (δες Σχήμα 3.4).

Υπάρχουν μερικά σημαντικά ζητήματα που σχετίζονται με το σχήμα κυλίσμενου ορίζοντα που μόλις περιγράφηκε:

- Οι ροές κορεσμού  $S_z$  και τα ποσοστά στροφής  $t_{w,z}$ , μπορούν να μεταβάλλονται στο χρόνο (σε αντίθεση με τον γραμμικό-τετραγωνικό έλεγχο όπου θεωρούνται σταθερά), π.χ. μπορεί να εκτιμώνται ή προβλέπονται σε πραγματικό χρόνο μέσω γνωστών μεθόδων εκτίμησης (Cremet, 1991). Επιπλέον, η εκτιμώμενη ζήτηση  $d(k)$  μπορεί να υπολογισθεί από ιστορικά δεδομένα ή μέσω κατάλληλων μεθόδων επέκτασης καθολικών τάσεων (π.χ., χρονοσειρές ή νευρωνικά δίκτυα).
- Ο ορίζοντας βελτιστοποίησης  $K$  θα πρέπει να είναι κατάλληλος ώστε τα οχήματα να μπορούν να κινηθούν μέσα στο δίκτυο. Πολύ μικρότερος ορίζοντας βελτιστοποίησης μπορεί να οδηγήσει σε «μυωπικές» πολιτικές ελέγχου.
- Ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού ή μη γραμμικού προγραμματισμού (μέσω του αλγορίθμου εφικτής κατεύθυνσης) πρέπει να είναι αρκετά μικρός (μικρότερος από την διάρκεια της περιόδου) ώστε να είναι δυνατή η επαναληπτική επίλυση του προβλήματος σε πραγματικό χρόνο. Ή

συνθήκη αυτή ικανοποιείται για το πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού της παρούσας προσέγγισης ενώ για το πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού ικανοποιείται υπό ορισμένες προϋποθέσεις.

- Οι μεταβλητές κατάστασης  $x$  (ο αριθμός οχημάτων σε κάθε σύνδεσμο) πρέπει να μπορούν να μετρηθούν ή εκτιμηθούν σε πραγματικό χρόνο. Για το σκοπό αυτό, μετρήσεις κατάληψης από παραδοσιακούς φωρατές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του αριθμού οχημάτων στους συνδέσμους μέσω κατάλληλων μη-γραμμικών συναρτήσεων (Diakaki, 1999). Η θέση των φωρατών στους συνδέσμους μπορεί γενικά να είναι αυθαίρετη, ωστόσο η ποιότητα της εκτίμησης είναι καλύτερη στην περίπτωση που οι φωρατές τοποθετηθούν περίπου στο μέσον του συνδέσμου.

## Κεφάλαιο 4

### Αποτελέσματα μακροσκοπικής προσομοίωσης

#### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας και της δυνατότητας εφαρμογής σε πραγματικό χρόνο των προτεινόμενων μεθοδολογιών τετραγωνικού προγραμματισμού (QPC) και μη γραμμικού προγραμματισμού (NOC) μέσω σύγκρισης τους, με βελτιστοποιημένα προγράμματα σταθερού χρόνου φωτεινής σηματοδότησης και τον κανόνα ελέγχου LQ της στρατηγικής TUC. Για την σύγκριση και αξιολόγηση των δύο μεθοδολογιών, χρησιμοποιούνται καθιερωμένοι στον τομέα του ελέγχου κυκλοφορίας δείκτες σύγκρισης, όπως συνολικοί χρόνοι διαδρομής εντός του αστικού δικτύου καθώς και ποιοτικά μέτρα σύγκρισης όπως (α) στιγμιότυπα από την προσομοίωση σε περιοχές του προς εξέταση δικτύου τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, (β) ο συσσωρευμένος αριθμός υπερφορτωμένων συνδέσμων που αντικατοπτρίζει τον κίνδυνο υπερφόρτωσης των συνδέσμων και του μπλοκαρίσματος του δικτύου και (γ) το θεμελιώδες διάγραμμα αστικών δικτύων. Για την ανάλυση των αλγορίθμων ελέγχου χρησιμοποιείται ένας μακροσκοπικός προσομοιωτής που βασίζεται στο μη γραμμικό μοντέλο κυκλοφοριακής ροής (3.14). Κάνοντας χρήση του προσομοιωτή αυτού, μοντελοποιείται το αστικό δίκτυο των Χανίων και γίνεται σύγκριση της συμπεριφοράς του προσομοιωμένου δικτύου για διαφορά ρεαλιστικά σενάρια κυκλοφοριακής ζήτησης.

Σημαντικό παράγοντα αξιολόγησης των προτεινόμενων μεθοδολογιών αποτελεί η υπολογιστική απλότητα των μεθοδολογιών αυτών, ή, με άλλα λόγια, η δυνατότητα υλοποίησής τους από τα υπάρχοντα κέντρα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. Για το σκοπό αυτό, αρχικά γίνεται σύγκριση και αξιολόγηση των δύο μεθοδολογιών σε επίπεδο ανοιχτού βρόχου (ενώ ο κανόνας ελέγχου LQ της στρατηγικής TUC είναι κλειστού βρόχου εκ του σχεδιασμού του) και γίνεται επιλογή της καλύτερης εκ των δύο μεθοδολογιών με βάση τη δυνατότητά της να βελτιώσει τις κυκλοφοριακές συνθήκες



Σχήμα 4.1: Δορυφορική λήψη του αστικού δικτύου των Χανίων.

όσο και στις απαιτήσεις υπολογιστικού φόρτου. Στην συνέχεια, η μεθοδολογία αυτή επιλέγεται ως η μοναδική για περαιτέρω ανάλυση σε επίπεδο κλειστού βρόχου μέσω της ενσωμάτωσης της σε ένα σχήμα ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.

## 4.2 Το αστικό δίκτυο των Χανίων

### 4.2.1 Περιγραφή του δικτύου

Το Σχήμα 4.1 δείχνει έναν χάρτη (δορυφορική λήψη) του υπό μελέτη δικτύου που έχει μήκος περίπου 8 χιλιόμετρα και αποτελείται από 23 ελεγχόμενους κόμβους με σηματοδότες, οι οποίοι βρίσκονται σε συντονισμό. Στους υπόλοιπους κόμβους είτε δεν υπάρχει φωτεινή σηματοδότηση είτε υπάρχει αλλά λειτουργεί αυτόνομα. Οι περισσότεροι από τους συνδέσμους του δικτύου αποτελούνται από μόνο μια λωρίδα, γεγονός που σημαίνει ότι απροσδόκητα γεγονότα (όπως για παράδειγμα ατυχήματα, διπλοπαρκάρισμα) μπορούν να μπλοκάρουν το σύνδεσμο και επομένως να επιδεινώσουν την κατάσταση της κυκλοφορίας, ακόμα και αν η διάρκειά τους είναι μόνο μερικά λεπτά.

Προβλήματα κυκλοφοριακής συμφόρησης αντιμετωπίζονται καθημερινά ειδικά στο κεντρικό (Χατζημιχάλη Γιάνναρη, Κυδωνίας, Αποκορώνου) και ανατολικό μέρος (Μανούσου Κούνδουρου, Ελ. Βενιζέλου) του εξεταζόμενου δικτύου για περίπου μία έως δύο ώρες το πρωί και το βράδυ. Στις περισσότερες αρτηρίες της πόλης υπάρχει μεγάλη συμφόρηση στις 19:00–21:30 την Τρίτη, την Πέμπτη και την Παρασκευή το βράδυ λόγω της λειτουργίας των εμπορικών καταστημάτων. Ένας άλλος λόγος

που προκαλεί τη συμφόρηση είναι η μεγάλη συχνότητα των λεωφορείων, τα οποία επιβιβάζουν και αποβιβάζουν πολίτες στις στάσεις και συχνά εμποδίζουν την κυκλοφορία στη μία κατεύθυνση του δρόμου.

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

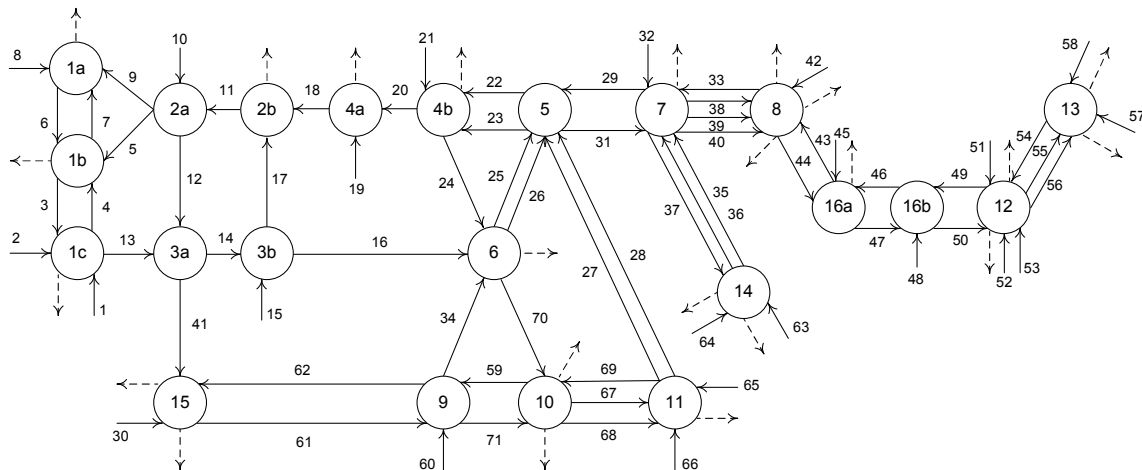
Προβλήματα βαριάς συμφόρησης προκύπτουν επίσης κατά τη διάρκεια της θερινής τουριστικής περιόδου. Το ήδη βαριά φορτωμένο οδικό δίκτυο της πόλης φορτώνεται περαιτέρω από τα πρόσθετα ιδιωτικά αυτοκίνητα και μοτοσικλέτες, τα ενοικιαζόμενα αυτοκίνητα και μοτοποδήλατα, τα τουριστικά λεωφορεία και την αυξημένη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

#### **4.2.2 Μοντελοποίηση του δικτύου για την εφαρμογή των υπό διερεύνηση στρατηγικών ελέγχου**

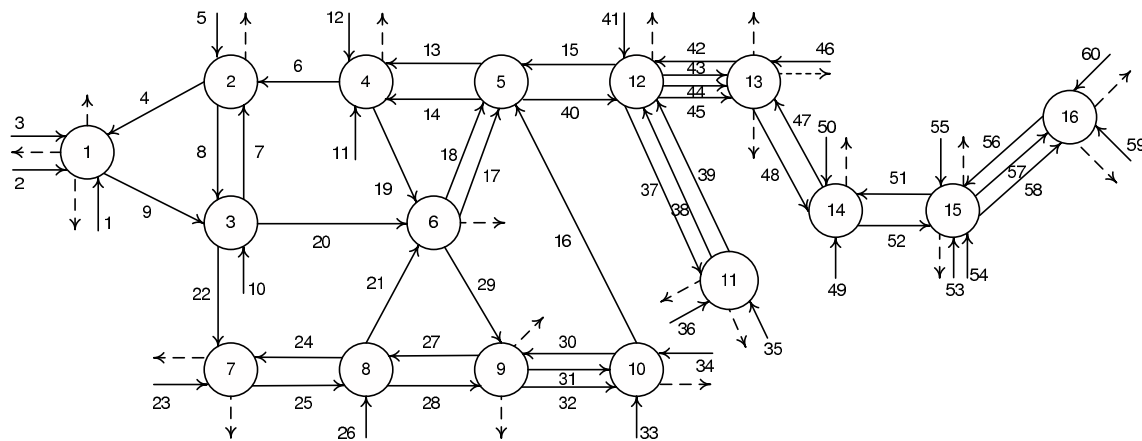
Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται σχηματικά το αρχικό μοντέλο ελέγχου που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή των υπό διερεύνηση στρατηγικών ελέγχου στο αστικό δίκτυο των Χανίων. Σημειώνεται ότι:

- Οι κόμβοι 1a, 1b και 1c ελέγχονται βάσει 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 4 ζευγάρια και μια τριάδα κόμβων) και όχι σαν 11 ξεχωριστοί κόμβοι.
- Τα ζευγάρια των συνδέσμων 35 και 36, 52 και 53, 55 και 56, 67 και 68, καθώς και η τριάδα των συνδέσμων 38, 39 και 40 αποτελούν διαφορετικές προσεγγίσεις ίδιων δρόμων επειδή δε λαμβάνουν ταυτοχρόνως προτεραιότητα. Για το λόγο αυτό, θεωρούνται ως διαφορετικοί σύνδεσμοι.

Το αρχικό αυτό μοντέλο ελέγχου αναπτύχθηκε για την διερεύνηση μέσω μακροσκοπικής προσομοίωσης στο αστικό δίκτυο των Χανίων των δύο προτεινόμενων στρατηγικών ελέγχου ανοιχτού



**Σχήμα 4.2:** Το μοντέλο ελέγχου του αστικού οδικού δικτύου των Χανίων για την διερεύνηση των στρατηγικών ελέγχου ανοικτού βρόχου.



**Σχήμα 4.3:** Το μοντέλο ελέγχου του αστικού οδικού δικτύου των Χανίων για την διερεύνηση των στρατηγικών ελέγχου κλειστού βρόχου.

βρόχου (τετραγωνικού και μη γραμμικού προγραμματισμού) σε σύγκριση με την στρατηγική ελέγχου κλειστού βρόχου της TUC (γραμμικός-τετραγωνικός έλεγχος). Στην συνέχεια για την διερεύνηση των προτεινόμενων στρατηγικών σε επίπεδο κλειστού βρόχου μέσω κυλιόμενου ορίζοντα και λόγους καλύτερης μοντελοποίησης του δικτύου αναπτύχθηκε ένα πιο συμπαγές μοντέλο ελέγχου το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3. Στο Σχήμα 4.3 οι προαναφερόμενοι 11 κόμβοι του Σχήματος 4.2 που ελέγχονται βάσει κοινών πλάνων σηματοδότησης θεωρούνται πλέον όχι μόνο από την άποψη ελέγχου αλλά και από την άποψη της μοντελοποίησης σαν 4 κόμβοι. Από τα Σχήματα 4.2, 4.3 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το πρώτο μοντέλο ελέγχου αποτελείται από 16 σηματοδοτημένους κόμβους και 71 συνδέσμους ενώ το δεύτερο από 16 σηματοδοτημένους κόμβους και 60 συνδέσμους.

Πίνακας 4.1: Περιγραφή της σηματοδότησης των κόμβων του αστικού δικτύου των Χανίων.

| Κόμβος | Σύνολο φάσεων | Περίοδος    | Χαμένος χρόνος | Ελάχιστος χρόνος πρασίνου $g_{j,i}$ (sec) |         |         |         |
|--------|---------------|-------------|----------------|-------------------------------------------|---------|---------|---------|
| $j$    | $F_j$         | $C_j$ (sec) | $L_j$ (sec)    | $i = 1$                                   | $i = 2$ | $i = 3$ | $i = 4$ |
| 1      | {1, 2, 3}     | 90          | 23             | 7                                         | 7       | 7       |         |
| 2      | {1, 2}        | 90          | 32             | 7                                         | 7       |         |         |
| 3      | {1, 2}        | 90          | 24             | 7                                         | 7       |         |         |
| 4      | {1, 2, 3}     | 90          | 19             | 7                                         | 7       | 7       |         |
| 5      | {1, 2, 3}     | 90          | 25             | 7                                         | 7       | 7       |         |
| 6      | {1, 2, 3}     | 90          | 33             | 7                                         | 7       | 7       |         |
| 7      | {1, 2}        | 90          | 16             | 7                                         | 7       |         |         |
| 8      | {1, 2}        | 90          | 35             | 7                                         | 7       |         |         |
| 9      | {1, 2, 3}     | 90          | 19             | 7                                         | 7       | 7       |         |
| 10     | {1, 2, 3}     | 90          | 24             | 7                                         | 7       | 7       |         |
| 11     | {1, 2}        | 90          | 30             | 7                                         | 7       |         |         |
| 12     | {1, 2, 3}     | 90          | 37             | 7                                         | 7       | 7       |         |
| 13     | {1, 2, 3, 4}  | 90          | 32             | 7                                         | 7       | 7       | 7       |
| 14     | {1, 2}        | 90          | 32             | 7                                         | 7       |         |         |
| 15     | {1, 2, 3}     | 90          | 33             | 7                                         | 7       | 9       |         |
| 16     | {1, 2}        | 90          | 34             | 7                                         | 10      |         |         |

Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει στοιχεία των ελεγχόμενων κόμβων που χρησιμοποιούνται από το δεύτερο μοντέλο ελέγχου (Σχήμα 4.3), ενώ ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει στοιχεία που αφορούν τους συνδέσμους του δικτύου, τη χωρητικότητα, τη ροή κορεσμού, και τις φάσεις κατά τις οποίες έχουν δικαίωμα κυκλοφορίας. Επίσης στους πίνακες αυτούς δίδεται ο κόμβος με τον οποίο συνδέεται ο κάθε σύνδεσμος. Τα στοιχεία των Πινάκων 4.1, 4.2 προέρχονται από πραγματικές μετρήσεις στο δίκτυο των Χανίων και παρέχονται από τη Δημοτική Αρχή που είναι υπεύθυνη για αυτό.

### 4.3 Το μοντέλο προσομοίωσης

Το μακροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή για την διερεύνηση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου, είναι απλό αλλά πιο ακριβές από τα γραμμικά μοντέλα σχεδιασμού (3.6) και (3.11) χάριν στην μη γραμμική συνάρτηση (3.13) της εκροής  $u_z(k)$  η οποία μοντελοποιεί την εκροή σε κάθε σύνδεσμο του δικτύου με μεγαλύτερη ακρίβεια. Δηλαδή περιγράφει την εξέλιξη των ουρών στους συνδέσμους του δικτύου καθόλη την διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης (δηλαδή για χρονικές περιόδους  $T \ll C$ ) αντί να υπολογίζει για κάθε περίοδο μια μέση τιμή της εκροής όπως η (3.5). Η μη γραμμική συνάρτηση (3.13) έχει ήδη παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 3, εδώ την ξαναπαρουσιάζουμε για λόγους πληρότητας. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ότι η περίοδος του μοντέλου προσομοίωσης είναι πολύ μικρότερη (μεγαλύτερη ακρίβεια αναπαράστασης των ουρών στους συνδέσμους στους δικτύου) από την περίοδο σηματοδότησης, ήτοι  $T \ll C$  και η περίοδος ελέγχου  $T_c$  είναι ίση με  $C$  η εκροή για το μοντέλο προσομοίωσης θα δίδεται

Πίνακας 4.2: Περιγραφή των συνδέσμων του αστικού δικτύου των Χανίων.

| Σύνδεσμος | Κόμβος | Λωρίδες                  | Χωρητικότητα         | Ροή                       | Σύνολο φάσεων | Σύνδεσμος | Κόμβος | Λωρίδες                  | Χωρητικότητα         | Ροή                       | Σύνολο φάσεων |
|-----------|--------|--------------------------|----------------------|---------------------------|---------------|-----------|--------|--------------------------|----------------------|---------------------------|---------------|
|           |        |                          |                      | κορεσμού με προτεραιότητα |               |           |        |                          |                      | κορεσμού με προτεραιότητα |               |
| $z$       | $j$    | $x_{z,\max}(\text{veh})$ | $S_z (\text{veh/h})$ | $v_z$                     |               | $z$       | $j$    | $x_{z,\max}(\text{veh})$ | $S_z (\text{veh/h})$ | $v_z$                     |               |
| 1         | 1      | 1                        | 20                   | 1800                      | {2}           | 31        | 10     | 1                        | 15                   | 1600                      | {2}           |
| 2         | 1      | 2                        | 60                   | 3600                      | {1}           | 32        | 10     | 1                        | 35                   | 1800                      | {2, 3}        |
| 3         | 1      | 1                        | 13                   | 1800                      | {3}           | 33        | 10     | 2                        | 68                   | 3600                      | {1}           |
| 4         | 1      | 2                        | 60                   | 3600                      | {1, 2}        | 34        | 10     | 1                        | 24                   | 1800                      | {3}           |
| 5         | 2      | 1                        | 10                   | 1800                      | {2}           | 35        | 11     | 1                        | 32                   | 1800                      | {1}           |
| 6         | 2      | 2                        | 44                   | 3600                      | {1}           | 36        | 11     | 1                        | 24                   | 1600                      | {2}           |
| 7         | 2      | 1                        | 25                   | 2200                      | {2}           | 37        | 11     | 1                        | 72                   | 1800                      | {1}           |
| 8         | 3      | 1                        | 55                   | 2200                      | {2}           | 38        | 12     | 1                        | 48                   | 2200                      | {3}           |
| 9         | 3      | 2                        | 124                  | 3600                      | {1}           | 39        | 12     | 1                        | 28                   | 1575                      | {3}           |
| 10        | 3      | 1                        | 24                   | 1800                      | {2}           | 40        | 12     | 3                        | 24                   | 4500                      | {1}           |
| 11        | 4      | 1                        | 20                   | 1575                      | {2, 3}        | 41        | 12     | 2                        | 30                   | 3600                      | {2}           |
| 12        | 4      | 1                        | 10                   | 1800                      | {3}           | 42        | 12     | 3                        | 26                   | 4500                      | {1}           |
| 13        | 4      | 3                        | 14                   | 4500                      | {1}           | 43        | 13     | 1                        | 25                   | 1800                      | {3}           |
| 14        | 4      | 1                        | 8                    | 1800                      | {1}           | 44        | 13     | 1                        | 25                   | 1800                      | {2, 3}        |
| 15        | 5      | 3                        | 36                   | 4500                      | {1}           | 45        | 13     | 1                        | 13                   | 1800                      | {1, 2, 3}     |
| 16        | 5      | 2                        | 80                   | 3600                      | {3}           | 46        | 13     | 1                        | 22                   | 2200                      | {2}           |
| 17        | 5      | 1                        | 24                   | 1800                      | {1, 2}        | 47        | 13     | 1                        | 50                   | 2200                      | {1, 4}        |
| 18        | 5      | 1                        | 24                   | 1800                      | {2}           | 48        | 14     | 1                        | 50                   | 1800                      | {1}           |
| 19        | 6      | 2                        | 42                   | 3600                      | {2}           | 49        | 14     | 1                        | 12                   | 1600                      | {2}           |
| 20        | 6      | 2                        | 75                   | 3600                      | {1}           | 50        | 14     | 1                        | 20                   | 1600                      | {2}           |
| 21        | 6      | 1                        | 42                   | 1800                      | {3}           | 51        | 14     | 1                        | 77                   | 1800                      | {1}           |
| 22        | 7      | 1                        | 88                   | 2200                      | {1}           | 52        | 15     | 1                        | 77                   | 1800                      | {2}           |
| 23        | 7      | 1                        | 61                   | 1800                      | {2}           | 53        | 15     | 1                        | 20                   | 1600                      | {3}           |
| 24        | 7      | 1                        | 35                   | 1800                      | {2}           | 54        | 15     | 1                        | 20                   | 1800                      | {1, 3}        |
| 25        | 8      | 1                        | 35                   | 1800                      | {2}           | 55        | 15     | 1                        | 16                   | 1600                      | {3}           |
| 26        | 8      | 2                        | 80                   | 3600                      | {1}           | 56        | 15     | 1                        | 38                   | 1800                      | {1}           |
| 27        | 8      | 1                        | 28                   | 1800                      | {2}           | 57        | 16     | 1                        | 20                   | 1800                      | {1}           |
| 28        | 9      | 1                        | 28                   | 1800                      | {3}           | 58        | 16     | 1                        | 20                   | 1800                      | {1, 2}        |
| 29        | 9      | 2                        | 90                   | 3600                      | {1}           | 59        | 16     | 1                        | 80                   | 1800                      | {2}           |
| 30        | 9      | 1                        | 49                   | 1600                      | {2}           | 60        | 16     | 1                        | 40                   | 1800                      | {1}           |

από την μη γραμμική συνάρτηση

$$u_z(k) = \begin{cases} 0 & \text{αν οποιoδήποτε } x_{d,z}(k) \geq cx_{d,\max} \\ \min \left\{ \frac{x_z(k)}{T}, \frac{G_z(\kappa)S_z}{C} \right\} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.1)$$

όπου ο δείκτης  $d$  αναφέρεται σε ένα κατάντη σύνδεσμο του  $z$  με ποσοστό στροφής  $t_{z,d} \neq 0$ , και η παράμετρος μοντελοποίησης  $c \in (0.7, 1]$  αναφέρεται στο ποσοστό της κατάληψης για το οποίο ένας σύνδεσμος του δικτύου θεωρείται υπερφορτωμένος. Σημειώνεται ότι  $k$  είναι ο δείκτης διακριτού χρόνου του μοντέλου προσομοίωσης (με διακριτό βήμα  $T \ll C$ ) ενώ  $\kappa$  είναι το δείκτης διακριτού χρόνου του ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης (με διακριτό βήμα  $T_c = C$ ) και  $\kappa = \text{int}(kT/T_c)$ . Όπως προαναφέρθηκε, εισάγοντας την (4.1), οι μεταβλητές κατάστασης επιτρέπεται να αλλάζουν τιμές πιο συχνά από τις μεταβλητές ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα το διακριτό βήμα  $T$  για το μοντέλο (3.4) με εκροή την (4.1) μπορεί να είναι της τάξης των 5 δευτερόλεπτα ενώ οι μεταβλητές ελέγχου  $g_{j,i}$  μπορούν να αλλάζουν τις τιμές τους σε μεγαλύτερα διακριτά διαστήματα  $T_c$ , π.χ. κάθε περίοδο  $C$ . Σημειώνεται ότι η βασική υπόθεση της μοντελοποίησης αποθήκευσης-και-προώθησης, δηλαδή ύπαρξη μιας συνεχούς εκροής (αντί εκροή μηδέν κατά την διάρκεια της κόκκινης ένδειξης και

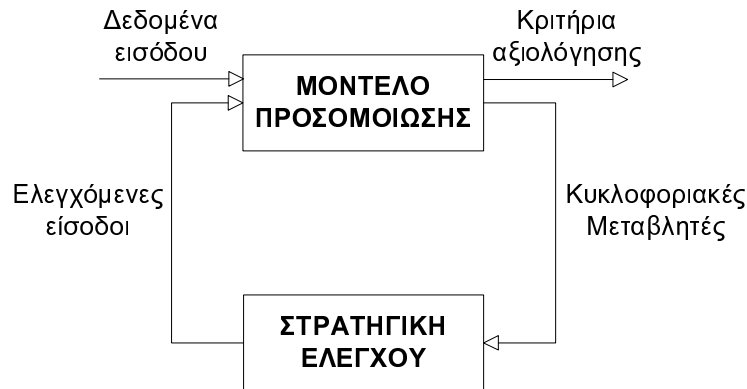
ελεύθερη ροή κατά την διάρκεια της πράσινης ένδειξης), υφίσταται και σ' αυτή την προσέγγιση. Στην πραγματικότητα η εκροή (4.1) ενός συνδέσμου γίνεται μηδέν αν δεν υπάρχουν οχήματα στον σύνδεσμο ή αν οποιοσδήποτε κατάντη σύνδεσμος τον οποίο τροφοδοτεί ο σύνδεσμος  $z$  είναι υπερφορτωμένος.

Παρά τη σχετική του απλότητα, το μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά τα βασικά φαινόμενα της κυκλοφοριακής ροής σε αστικά οδικά δίκτυα και είναι πιο ακριβές από τα μοντέλα σχεδιασμού των στρατηγικών ελέγχου που διερευνώνται. Σε κάθε περίπτωση, κύριος στόχος στην παρούσα διατριβή είναι η σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου υπό τις ίδιες συνθήκες προσομοίωσης και όχι ο προσδιορισμός απόλυτων τιμών των κριτηρίων αποτελεσματικότητας για το δίκτυο εφαρμογής. Για το λόγο αυτό, θεωρούμε ότι το προτεινόμενο μακροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης είναι κατάλληλο.

Οι στρατηγικές ελέγχου προς διερεύνηση μπορούν να συνδέονται με το μοντέλο προσομοίωσης (Σχήμα 4.4) ώστε να επιδρούν στον υπολογισμό των μεταβλητών ελέγχου των σηματοδοτών (εδώ του ποσοστού πρασίνου φάσεων), ούτως ώστε να προσομοιώνουν ενέργειες ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Πιο συγκεκριμένα στην αρχή της προσομοίωσης, το μη γραμμικό μοντέλο (3.14) χρησιμοποιώντας την (4.1), τροφοδοτείται με τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου: (α) το διακριτό διάστημα προσομοίωσης  $T_s$  και το διακριτό διάστημα ελέγχου  $T_c$  (περίοδος σηματοδότησης), (β) τον ορίζοντα προσομοίωσης  $K_s$  και τον ορίζοντα βελτιστοποίησης  $K$ , (γ) την παράμετρο  $c$  αναγνώρισης υπερφορτωμένων συνδέσμων στην (4.1), (δ) την αρχική κατάσταση  $x(0)$  και τη ζήτηση  $d(k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, K - 1$  στους συνδέσμους του δικτύου και (ε) την αρχική σηματοδότηση του δικτύου  $g(0)$ . Στο τέλος κάθε περιόδου σηματοδότησης το μοντέλο προσομοίωσης υπολογίζει την εξέλιξη των ουρών στους συνδέσμους του δικτύου μέσω της (3.14) χρησιμοποιώντας την (4.1). Οι ουρές στους συνδέσμους του δικτύου στο τέλος της περιόδου σηματοδότησης χαρακτηρίζουν την τρέχουσα κατάσταση της κυκλοφορίας στο δίκτυο και ως εκ τούτου τροφοδοτούνται (ανάδραση) στην εκάστοτε στρατηγική ελέγχου ώστε να υπολογίσει το νέο πρόγραμμα φωτεινής σηματοδότησης. Στην συνέχεια το νέο πρόγραμμα φωτεινής σηματοδότησης αποστέλλεται στον προσομοιωτή για να υπολογίσει εκ νέου την εξέλιξη των ουρών στους συνδέσμους του δικτύου, κ.ο.κ.

#### 4.4 Κριτήρια αξιολόγησης

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι στρατηγικές ελέγχου ενεργοποιούνται σε διακριτά χρονικά διαστήματα  $T_c, 2T_c, 3T_c, \dots$ , όπου  $T_c$  είναι το διάστημα ελέγχου (π.χ.  $T_c = C$ ) που είναι διαφορετικό από το διάστημα προσομοίωσης  $T$  (π.χ.  $T = 5$  δευτερόλεπτα). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης



Σχήμα 4.4: Σύνδεση στρατηγικής ελέγχου με το μοντέλο προσομοίωσης.

συνοψίζονται με την μορφή των παρακάτω δύο κριτηρίων αποτελεσματικότητας:

- Συνολικός χρόνος διαδρομής στο ελεγχόμενο δίκτυο που υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (σε veh·h)

$$TTS = T_s \sum_{k=0}^{K_s} \sum_{z \in Z} x_z(k).$$

Το κριτήριο αυτό αναπαριστά τον ολικό χρόνο διαδρομής όλων των αυτοκινήτων του δικτύου για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προσομοίωσης.

- Εξισορρόπηση του σχετικού αριθμού οχημάτων εντός των συνδέσμων του ελεγχόμενου δικτύου (σε veh)

$$RQB = \sum_{k=0}^{K_s} \sum_{z \in Z} \frac{x_z^2(k)}{x_{z,\max}}.$$

Το κριτήριο αυτό λαμβάνει υπόψη του την χωρητικότητα των συνδέσμων του ελεγχόμενου δικτύου με αποτέλεσμα να αντικατοπτρίζει τον κίνδυνο υπερφόρτωσης των συνδέσμων και του μπλοκαρίσματος του δικτύου.

Επιπλέον, για την καλύτερη αξιολόγηση των προς διερεύνηση στρατηγικών ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης χρησιμοποιούνται και ποιοτικά μέτρα αξιολόγησης όπως (α) στιγμιότυπα από την προσομοίωση σε περιοχές του προς εξέταση δικτύου τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, (β) ο συσσωρευμένος αριθμός υπερφορτωμένων συνδέσμων που αντικατοπτρίζει τον κίνδυνο υπερφόρτωσης των συνδέσμων και του μπλοκαρίσματος του δικτύου και (γ) το θεμελιώδες διάγραμμα αστικών δικτύων (δες στο τμήμα 2.5 τα αντίστοιχα σχόλια που αφορούν την συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης).

## 4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης ανοιχτού βρόχου

### 4.5.1 Μοντέλο ελέγχου του δικτύου και περιγραφή σεναρίων

Το αστικό δίκτυο της πόλης των Χανίων αποτελείται από 16 σηματοδοτούμενους κόμβους και 71 συνδέσμους (Σχήμα 4.2). Σύμφωνα με την διατύπωση του προβλήματος στην ενότητα 3.2 ορίζουμε τα εξής σύνολα  $J = \{1, \dots, 16\}$ ,  $Z = \{1, \dots, 71\}$ . Η περίοδος σηματοδότησης στο δίκτυο είναι  $C = 90$  sec, και  $T = C$  λαμβάνεται ως διάστημα ελέγχου για όλες τις στρατηγικές. Για την προσέγγιση NOC θεωρούμε  $T_s = 5$  sec,  $T_c = 90$  sec, και  $c = 0.85$  (δηλαδή υπερφορτωμένοι σύνδεσμοι στην (4.1) θεωρούνται αυτοί για τους οποίους ισχύει  $x_z \geq 0.85x_{z,\max}$ ).

Η συμπεριφορά των τριών εναλλακτικών προσεγγίσεων διερευνήθηκε για ποικίλα σενάρια ζήτησης στο αστικό δίκτυο των Χανίων του Σχήματος 4.2. Τα σενάρια δημιουργήθηκαν θεωρώντας μικρότερες ή μεγαλύτερες αρχικές καταστάσεις  $x_z(0)$  στις αφετηρίες του δικτύου ενώ η ζήτηση  $d_z(k)$  τέθηκε ίση με μηδέν. Ειδικότερα για κάθε σενάριο ζήτησης:

**Σενάριο 1.** Μεγάλες ουρές σε όλες τις εισόδους του δικτύου.

**Σενάριο 2.** Μέτριες ουρές (25% μικρότερες από το σενάριο 1).

**Σενάριο 3.** Μικρές ουρές (50% μικρότερες από το σενάριο 1).

Ο ορίζοντας βελτιστοποίησης για κάθε σενάριο ζήτησης είναι 450 sec ( $K = 5$  περίοδοι σηματοδότησης).

Για τα τρία διαφορετικά σενάρια αρχικής κατάστασης  $x(0)$  και για κάθε προσέγγιση, υπολογίσθηκαν προς σύγκριση τα δύο κριτήρια αξιολόγησης, ο συνολικός χρόνος διαδρομής στο δίκτυο και η εξισορρόπηση των ουρών στους συνδέσμους του δικτύου. Σημειώνεται, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, ότι τα αποτελέσματα του ελέγχου για κάθε προσέγγιση εφαρμόζονται στο μη γραμμικό μοντέλο (3.14) για τον υπολογισμό των προαναφερθέντων κριτηρίων αξιολόγησης. Πιο συγκεκριμένα ο αριθμός των οχημάτων  $x_z(k)$  υπολογίζεται για μία περίοδο ως ο μέσος όρος τιμών των  $T_s = 5$  sec που απορρέουν από την (3.14), προτού υπολογισθούν τα κριτήρια αξιολόγησης με βάση τον  $T_c = C = 90$  sec.

| Strategy    | LQ   |     | QPC   |        | NOC   |        |
|-------------|------|-----|-------|--------|-------|--------|
| Scenario    | TTS  | RQB | TTS   | RQB    | TTS   | RQB    |
| 1           | 31.1 | 532 | 30.4  | 445    | 29.9  | 440    |
| 2           | 15.2 | 223 | 13.8  | 183    | 13.2  | 183    |
| 3           | 9.3  | 79  | 8.9   | 63     | 8.8   | 64     |
| Average     | 18.5 | 278 | 17.7  | 230    | 17.3  | 229.0  |
| Improvement | -    | -   | -4.5% | -17.1% | -6.7% | -17.6% |

Πίνακας 4.3: Σύγκριση των κριτηρίων αξιολόγησης.

#### 4.5.2 Αξιολόγηση βάσει κριτηρίων αποτελεσματικότητας

Ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δύο κριτηρίων αξιολόγησης για τα τρία προαναφερθέντα σενάρια για κάθε μία από τις τρεις εναλλακτικές μεθοδολογίες. Διαφαίνεται ότι οι προσεγγίσεις QPC και NOC οδηγούν σε βελτίωση και των δύο κριτηρίων αξιολόγησης συγκρινόμενες με την LQ. Πιο συγκεκριμένα, όταν εφαρμόζεται η QPC, τα κριτήρια TTS και RQB βελτιώνονται κατά 4.5 % και 17.2 %, αντίστοιχα, ενώ όταν εφαρμόζεται η NOC τα κριτήρια TTS και RQB βελτιώνονται κατά 6.1 % και 14.9 %, αντίστοιχα, συγκρινόμενα με την LQ.

Η NOC δείχνει να υπερέχει των άλλων προσεγγίσεων ως προς το TTS. Αυτό είναι συνέπεια του μη γραμμικού μοντέλου που χρησιμοποιείται από την NOC το οποίο είναι πιο ακριβές από τα γραμμικά μοντέλα των δύο άλλων προσεγγίσεων (και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται και ως προσομοιωτής για την συγκριτική δοκιμή).

Σχετικά με το RQB η QPC δείχνει να υπερέχει των άλλων προσεγγίσεων. Μετά από μία προσεκτική ανάλυση των κριτηρίων απόδοσης που χρησιμοποιούν οι τρεις εναλλακτικές προσεγγίσεις μπορεί εύκολα να κατανοηθεί το αποτέλεσμα αυτό αφού το RQB είναι ακριβώς το κριτήριο κόστους που λαμβάνεται υπόψη από την QPC ενώ οι άλλες δύο προσεγγίσεις λαμβάνουν υπόψη τους και άλλους αντικρουόμενους στόχους.

Ο μέσος υπολογιστικός φόρτος για κάθε σενάριο ζήτησης για τις QPC και NOC είναι 10 δευτερόλεπτα και 1 λεπτό, αντίστοιχα. Όπως έχει προαναφερθεί ο υπολογιστικός φόρτος που απαιτείται για την LQ (εφαρμογή του κανόνα ελέγχου (3.8)) είναι αμελητέος.

### 4.5.3 Λεπτομερή αποτελέσματα

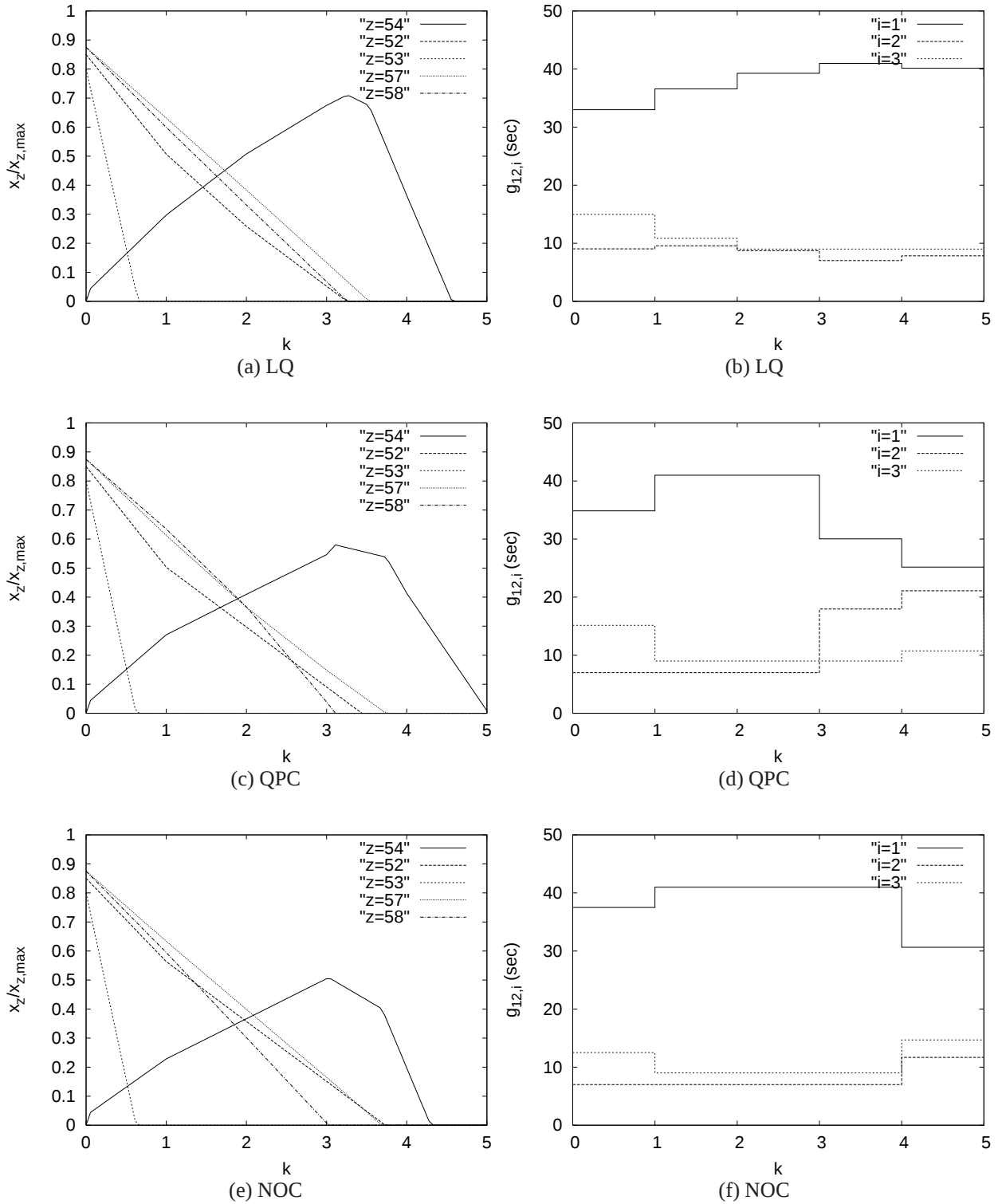
Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε μερικά πιο λεπτομερή αποτελέσματα της προσομοίωσης τα οποία εστιάζονται στους κόμβους 12 και 13. Οι δύο αυτοί κόμβοι είναι μία κύρια είσοδος και έξοδος προς και από το κέντρο της πόλης των Χανίων και έχουν υψηλούς φόρτους ζήτησης (βλέπε Σχήμα 4.2).

Για τα προαναφερθέντα σενάρια οι τροχιές ελέγχου (διάρκειες των φάσεων σε κάθε κόμβο) και κατάσταση (οι αριθμοί των οχημάτων στους συνδέσμους) καταδεικνύουν την συμπεριφορά και αποδοτικότητα των τριών εναλλακτικών προσεγγίσεων για την επίλυση του προβλήματος ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. Το Σχήμα 4.5 απεικονίζει τις βέλτιστες τροχιές για ένα σενάριο ζήτησης για τις τρεις εναλλακτικές προσεγγίσεις. Από την εξέταση των βέλτιστων τροχιών μπορούμε να κάνουμε τις ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Οι τρεις εναλλακτικές προσεγγίσεις διαχειρίζονται τις ουρές των συνδέσμων με τέτοιο τρόπο (ομοιογενώς) ώστε να επιτυγχάνεται ο αντικειμενικός στόχος της βελτιστοποίησης που είναι η ελαχιστοποίηση και εξισορρόπηση των ουρών. Σημειώνεται ότι οι περισσότερες ουρές διαλύονται συγχρόνως για  $k = 3$ .
- Η εκροή από τους συνδέσμους εισόδου στο δίκτυο 57 και 58 μεταφέρεται στο σύνδεσμο 54 (συνεχής γραμμή στα Σχήματα 4.5(a), 4.5(c), 4.5(e)) σύμφωνα με τις αντίστοιχες διάρκειες της πράσινης ένδειξης στον κόμβο 13. Οι QPC και NOC δείχνουν να έχουν παρόμοια συμπεριφορά για την διαχείριση της ουράς που αναπτύσσεται στον σύνδεσμο 54 (βλέπε τροχιές ελέγχου στα Σχήματα 4.5(d), 4.5(f)).
- Αντιθέτως, η στρατηγική LQ αρχικά αφήνει την υψηλή εισροή να εισέλθει στον σύνδεσμο 54 και στη συνέχεια, για να την διαχειρισθεί, αυξάνει με αργό ρυθμό την διάρκεια της πράσινης ένδειξης στη φάση 1 του κόμβου 12 όπου ο σύνδεσμος 54 δέχεται προτεραιότητα (Σχήμα 4.5(b)). Αυτή η κάπως αργή αντίδραση στη διαχείριση της ουράς που αναπτύσσεται στον σύνδεσμο 54 οφείλεται στη αναδραστική φύση του πολυμεταβλητού ρυθμιστή LQ.

### 4.5.4 Συμπεράσματα

Οι δύο προτεινόμενες εναλλακτικές προσεγγίσεις QPC και NOC παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα με παρόμοια αποτελεσματικότητα ελέγχου για διαφορετικά σενάρια. Συνεπώς, λαμβάνοντας



**Σχήμα 4.5:** Σχετικός αριθμός οχημάτων στους κόμβους 12 και 13 από την εφαρμογή: (a) LQ, (c) QPC και (e) NOC. Βέλτιστες διάρκειες των φάσεων στον κόμβο 12: (b) LQ, (d) QPC και (f) NOC.

υπόψη ότι η QPC χρειάζεται πολύ λιγότερο υπολογιστικό φόρτο από την NOC, η QPC μπορεί να θεωρηθεί αρκούντως αποτελεσματική προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης αστικών δικτύων και ένας δυνατός αντίπαλος της LQ όσο αφορά την απόδοση και την δυνατότητα εφαρμογής της σε πραγματικό χρόνο. Ως εκ τούτου στις διερευνήσεις που ακολουθούν η προσέγγιση QPC ενσωματωμένη σε κυλιόμενο ορίζοντα συγκρίνεται με των αναδραστικό κανόνα ελέγχου της στρατηγικής TUC καθώς και με σηματοδότηση σταθερού χρόνου. Σημειώνεται επίσης ότι σε αντίθεση με την LQ, η εφαρμογή της QPC σε πραγματικό χρόνο δεν βασίζεται στη διαθεσιμότητα ονομαστικών τιμών για τη σχετική διάρκεια των χρόνων πράσινου των φάσεων σηματοδότησης των ελεγχόμενων αστικών κόμβων και ως εκ τούτου απαιτεί λιγότερη εργασία για την «βελτιστοποίηση» των παραμέτρων ελέγχου του συστήματος ελέγχου.

## 4.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης κλειστού βρόχου

### 4.6.1 Μοντέλο ελέγχου του δικτύου και περιγραφή σεναρίων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για την διερεύνηση της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης QPC ενσωματωμένη σε κυλιόμενο ορίζοντα (δηλ. σε επίπεδο κλειστού βρόχου) θα χρησιμοποιηθεί το συμπαγές μοντέλο ελέγχου που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3. Στο μοντέλο αυτό το αστικό δίκτυο της πόλης των Χανίων αποτελείται από 16 σηματοδοτούμενους κόμβους και 60 συνδέσμους (Σχήμα 4.3). Σύμφωνα με την διατύπωση του προβλήματος στην ενότητα 3.2 ορίζουμε τα εξής σύνολα  $J = \{1, \dots, 16\}$ ,  $Z = \{1, \dots, 60\}$ . Η περίοδος σηματοδότησης στο δίκτυο είναι  $C = 90$  sec, και  $T_s = C$  λαμβάνεται ως διάστημα ελέγχου για όλες τις στρατηγικές. Για τον προσομοιωτή (4.1) θεωρούμε  $T = 5$  sec,  $T_c = 90$  sec, και  $c = 0.85$  (δηλαδή υπερφορτωμένοι σύνδεσμοι στην (4.1) θεωρούνται αυτοί για τους οποίους ισχύει  $x_z \geq 0.85x_{z,\max}$ ).

Σηματοδότηση σταθερού χρόνου (FT), ο πολυμεταβλητός ρυθμιστής ανάδρασης (LQ) και η προτεινόμενη προσέγγιση τετραγωνικού προγραμματισμού ενσωματωμένη σε ένα σχήμα κυλιόμενου ορίζοντα (QPC) διερευνήθηκαν ως προς την αποτελεσματικότητα και την συμπεριφορά τους μέσω προσομοίωσης για πέντε σενάρια ζήτησης στο αστικό δίκτυο των Χανίων. Ο ορίζοντας προσομοίωσης για το κάθε σενάριο ζήτησης είναι 1 ώρα (40 περίοδοι σηματοδότησης). Τα πέντε σενάρια ζήτησης έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

**Σενάριο 1.** Πολύ χαμηλή ζήτηση σε όλες τις εισόδους του δικτύου.

**Σενάριο 2.** Χαμηλή ζήτηση (25% μεγαλύτερη από το σενάριο 1).

**Σενάριο 3.** Μέτρια ζήτηση (50% μεγαλύτερη από το σενάριο 2).

**Σενάριο 4.** Υψηλή ζήτηση, το δίκτυο στο σενάριο αυτό εμφανίζει σημαντικά προβλήματα συμφόρησης για περίπου μισή ώρα (20 περιόδους σηματοδότησης) με τις ουρές σε μερικούς συνδέσμους να υπερχειλίζουν σε ανάντη συνδέσμους.

**Σενάριο 5.** Υψηλή ζήτηση που μεταβάλλεται έντονα με την πάροδο του χρόνου.

Εκτός από την ζήτηση στις αφετηρίες του δικτύου, δημιουργήθηκε επίσης μέτρια ζήτηση σε αρκετούς εσωτερικούς συνδέσμους του δικτύου για όλα τα σενάρια ζήτησης. Για τα πρώτα τέσσερα σενάρια ζήτησης, το σχήμα των τροχιών ζήτησης στο χρόνο είναι τραπεζοειδές εμφανίζοντας μια σταθερή ζήτηση την περίοδο αιχμής. Στο σενάριο πέντε, η σταθερή ζήτηση την ώρα αιχμής μεταβάλλεται έντονα με την πάροδο του χρόνου, προκειμένου να επιτραπεί η διερεύνηση της εκάστοτε εφαρμοζόμενης στρατηγικής ελέγχου σε δυναμικά μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες. Τα σενάρια περιλαμβάνουν μια τελική φάση μηδενικής ζήτησης η οποία είναι αρκετή για την εκκένωση του δικτύου κατά την εφαρμογή όλων των στρατηγικών ελέγχου έτσι ώστε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να είναι συγκρίσιμα.

#### 4.6.2 Στρατηγικές ελέγχου που εφαρμόστηκαν

Διερευνήθηκαν οι ακόλουθες παραλλαγές των τριών στρατηγικών ελέγχου:

- Έλεγχος σταθερού χρόνου (FT-A) που βασίζεται σε ένα πλάνο σηματοδότησης  $\mathbf{g}^N$  από το πεδίο το οποίο δεν ανταποκρίνεται πλήρως στα εξεταζόμενα σενάρια ζήτησης.
- Έλεγχος σταθερού χρόνου (FT-B) που βασίζεται σε ένα πλάνο σηματοδότησης  $\mathbf{g}^N$  βελτιστοποιημένο ξεχωριστά για το κάθε σενάριο ζήτησης. Τα πλάνα αυτά υπολογίστηκαν για κάθε σενάριο ζήτησης ξεχωριστά χρησιμοποιώντας την προσέγγιση QPC ως ένα εργαλείο βελτιστοποίησης δικτύων εκτός γραμμής με  $T_c = K_s T$  και δεδομένη ζήτηση  $\mathbf{d}(k)$ , δηλαδή για τον υπολογισμό ενός βέλτιστου σταθερού πλάνου σηματοδότησης για όλο τον ορίζοντα προσομοίωσης.
- Στρατηγική ελέγχου LQ-A που βασίζεται στον πολυμεταβλητό ρυθμιστή ανάδρασης (3.8) με διάνυσμα ονομαστικών τιμών  $\mathbf{g}^N$  το πλάνο σηματοδότησης της FT-A.

- Στρατηγική ελέγχου LQ-B που βασίζεται στον πολυμεταβλητό ρυθμιστή ανάδρασης (3.8) με βελτιστοποιημένο διάνυσμα ονομαστικών τιμών  $\mathbf{g}^N$  για κάθε σενάριο ζήτησης (τα πλάνα σηματοδότησης της FT-B).
- Στρατηγική ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα QPC-A χωρίς πληροφορία για την εξέλιξη της ζήτησης  $\mathbf{d}$  στο χρόνο. Το πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού QP επιλύεται κάθε περίοδο σηματοδότησης (κάθε  $k_R = 1$ ) με τον ορίζοντα βελτιστοποίησης να διερευνάται για τις τιμές  $K = 1, 2, \dots, 6$ , δηλαδή για 90 sec, 180 sec, ..., 540 sec, αντιστοίχως. Στην περίπτωση αυτή, θεωρούμε ότι το σχήμα κυλιόμενου ορίζοντα εφαρμόζεται χωρίς πρόγνωση (εκτίμηση) της ζήτησης  $\mathbf{d}(k)$  στους συνδέσμους του δικτύου, συνεπώς θέτουμε  $\mathbf{d}(k) = \mathbf{0} \ \forall k$  (αν και στην πραγματικότητα μη μηδενική ζήτηση εμφανίζεται στις προσομοιώσεις).
- Στρατηγική ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα QPC-B με πλήρη πληροφορία της ζήτησης  $\mathbf{d}$  στο χρόνο. Το πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού QP επιλύεται κάθε περίοδο σηματοδότησης (κάθε  $k_R = 1$ ) με τον ορίζοντα βελτιστοποίησης να διερευνάται για τις τιμές  $K = 1, 2, \dots, 5, 9, 10, 20, 22, 25$ . Στην περίπτωση αυτή, θεωρούμε ότι το σχήμα κυλιόμενου ορίζοντα εφαρμόζεται έχοντας ακριβή γνώση της ζήτησης στους συνδέσμους του δικτύου για όλο τον ορίζοντα προσομοίωσης.

Όλες οι στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου εφαρμόστηκαν με διάστημα ελέγχου  $T_c = C$ , δηλαδή να λαμβάνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο στο τέλος κάθε περιόδου σηματοδότησης με βάση μετρήσεις του αριθμού οχημάτων  $\mathbf{x}$  (ανάδραση) που παρέχονται από τον προσομοιωτή. Η στρατηγική ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα QPC εφαρμόστηκε με διαφορετικές τιμές του ορίζοντα βελτιστοποίησης  $K$  ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή του στην απόδοση του ελέγχου. Όπως είναι αναμενόμενο τα αποτελέσματα θα πρέπει να είναι καλύτερα για μεγαλύτερες τιμές του  $K$  (λόγω λιγότερων μυωπικών πολιτικών ελέγχου). Από την άλλη πλευρά, η μη πρόβλεψη της ζήτησης στους συνδέσμους του δικτύου για την στρατηγική ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα QPC-A μπορεί να καταστήσει τις υπολογιζόμενες αποφάσεις ελέγχου ολοένα και πιο παρωχημένες για μεγάλους ορίζοντες βελτιστοποίησης  $K$ . Σημειώνεται επίσης ότι η στρατηγική ελέγχου LQ δεν λαμβάνει υπόψη την ζήτηση στους συνδέσμους του δικτύου εκ του σχεδιασμού της, δηλαδή  $\mathbf{d}(k) = \mathbf{0}$ . Ωστόσο, η παραλλαγή LQ-B λαμβάνει έμμεσα υπόψη την ζήτηση στους συνδέσμους του δικτύου μέσω του βελτιστοποιημένου διανύσματος ονομαστικών τιμών  $\mathbf{g}^N$  της FT-B.

Πίνακας 4.4: Κριτήρια αξιολόγησης για τις στρατηγικές ελέγχου FT-A, FT-B, LQ-A και LQ-B.

| Strategy | FT-A |        | FT-B |        | LQ-A |        | LQ-B |        |
|----------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|
| Scenario | TTS  | RQB    | TTS  | RQB    | TTS  | RQB    | TTS  | RQB    |
| 1        | 21   | 1679   | 15   | 1411   | 13   | 561    | 14   | 702    |
| 2        | 99   | 36403  | 56   | 13532  | 44   | 7341   | 41   | 7187   |
| 3        | 231  | 97947  | 201  | 79578  | 164  | 53993  | 146  | 48282  |
| 4        | 481  | 218565 | 353  | 142363 | 285  | 100136 | 250  | 89946  |
| 5        | 594  | 259101 | 412  | 170329 | 348  | 130891 | 311  | 120760 |
| Average  | 285  | 122739 | 207  | 81443  | 171  | 58584  | 152  | 53375  |

#### 4.6.3 Αξιολόγηση βάσει κριτηρίων αποτελεσματικότητας

Ο Πίνακας 4.4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των παραλλαγών FT και LQ. Το βελτιστοποιημένο πλάνο σταθερού χρόνου FT-B δείχνει να είναι πολύ καλύτερο από το FT-A. Ως εκ τούτου, το FT-B μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το βασικό πλάνο (αν όχι ιδεατό) για την σύγκριση των προς αξιολόγηση σχεδίων ρύθμισης φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου. Ο Πίνακας 4.4 δείχνει ότι και οι δύο παραλλαγές LQ οδηγούν σε σημαντική βελτίωση των κριτηρίων αξιολόγησης συγκρινόμενες με το βελτιστοποιημένο πλάνο σταθερού χρόνου FT-B. Αυτή η απόδοση των παραλλαγών LQ καταδεικνύει την ανωτερότητα που μπορεί να έχουν κατάλληλα σχέδια ρύθμισης φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου ακόμη και στην περίπτωση που το πλάνο σταθερού χρόνου είναι βελτιστοποιημένο. Στο LQ-B η χρήση του βελτιστοποιημένου διανύσματος ονομαστικών τιμών  $\mathbf{g}^N$  οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα από το LQ-A. Ωστόσο, οι μεγάλες διαφορές αποδοτικότητας μεταξύ των FT-A και FT-B συρρικνώνονται σε μικρές ή μεσαίες διαφορές αποδοτικότητας στην περίπτωση των LQ-A και LQ-B που καταδεικνύει την σχετικά χαμηλή ευαισθησία της προσέγγισης LQ σε μη βελτιστοποιημένα πλάνα ονομαστικών τιμών  $\mathbf{g}^N$  στην (3.8).

Ο Πίνακας 4.5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για την προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα QPC-A για διαφορετικούς ορίζοντες προσομοίωσης  $K$ . Φαίνεται ότι για  $K \geq 2$  δεν υπάρχει μεγάλη μεταβολή των κριτηρίων αξιολόγησης τόσο για το βαρύ σενάριο ζήτησης 4 όσο και για το βαρύ και ισχυρά χρονικά μεταβαλλόμενο σενάριο 5. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην πλήρη έλλειψη πληροφορίας για την ζήτηση στο μέλλον ( $\mathbf{d} \equiv \mathbf{0}$ ) η οποία επηρεάζει μακροπρόθεσμες αποφάσεις. Ο απαιτούμενος υπολογιστικός φόρτος για την επίλυση του προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού αυξάνεται όσο αυξάνεται ο ορίζοντας βελτιστοποίησης  $K$ , συνεπώς  $K = 2$  δείχνει να είναι μία κατάλληλη τιμή για την προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα QPC-A. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.5 με αυτά του Πίνακα 4.4, η προσέγγιση QPC-A δείχνει να είναι πάντα καλύτερη από τις FT-A, FT-B και LQ-A. Συγκρίνοντας με την LQ-B, η QPC-A δείχνει να είναι καλύτερη για τα σενάρια 1–

Πίνακας 4.5: Κριτήρια αξιολόγησης για την προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα QPC-A.

| K        | 1   |        | 2   |        | 3   |        | 4   |        | 5   |        | 6   |        |
|----------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|
| Scenario | TTS | RQB    | TTS | RQB    | TTS | RQB    | TTS | RQB    | TTS | RQB    | TTS | RQB    |
| 1        | 13  | 568    | 13  | 578    | 13  | 576    | 13  | 578    | 13  | 580    | 13  | 579    |
| 2        | 36  | 5827   | 36  | 5844   | 36  | 5838   | 36  | 5832   | 36  | 5811   | 36  | 5792   |
| 3        | 145 | 44056  | 145 | 44286  | 144 | 44259  | 144 | 44292  | 144 | 44236  | 144 | 44262  |
| 4        | 284 | 97398  | 283 | 97391  | 283 | 97096  | 283 | 97793  | 284 | 97970  | 283 | 97753  |
| 5        | 317 | 113221 | 318 | 113325 | 318 | 113364 | 318 | 113446 | 317 | 113158 | 317 | 112835 |
| Average  | 159 | 52214  | 159 | 52285  | 159 | 52227  | 159 | 52388  | 159 | 52351  | 159 | 52244  |

Πίνακας 4.6: Κριτήρια αξιολόγησης για την προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα QPC-B.

| K        | 1   |       | 2   |       | 3   |       | 5   |       | 9   |       | 20  |       | 25  |       |
|----------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| Scenario | TTS | RQB   | TTS | RQB   | TTS | RQB   | TTS | RQB   | TTS | RQB   | TTS | RQB   | TTS | RQB   |
| 1        | 11  | 281   | 11  | 280   | 11  | 280   | 11  | 280   | 11  | 280   | 11  | 279   | 11  | 279   |
| 2        | 30  | 4116  | 30  | 4087  | 30  | 4067  | 30  | 4043  | 30  | 4040  | 30  | 4030  | 30  | 4032  |
| 3        | 132 | 39447 | 133 | 39463 | 132 | 39413 | 132 | 39407 | 132 | 40079 | 132 | 40372 | 132 | 40688 |
| 4        | 248 | 83183 | 248 | 83144 | 249 | 82828 | 246 | 81182 | 252 | 84246 | 253 | 85072 | 253 | 85112 |
| 5        | 282 | 97630 | 281 | 97236 | 280 | 96292 | 278 | 94940 | 270 | 89694 | 266 | 87251 | 266 | 87795 |
| Average  | 141 | 44931 | 141 | 44842 | 140 | 44576 | 139 | 43970 | 139 | 43668 | 138 | 43401 | 138 | 43581 |

3 αλλά ελαφρώς χειρότερη για τα βαριά σενάρια 4 και 5. Αυτό οφείλεται στο βελτιστοποιημένο διάνυσμα ονομαστικών τιμών  $\mathbf{g}^N$  που χρησιμοποιεί η LQ-B το οποίο υπολογίσθηκε με πλήρη γνώση της ζήτησης, η οποία δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη στην προσέγγιση QPC-A.

Ο Πίνακας 4.6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για την προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα QPC-B για διαφορετικούς ορίζοντες προσομοίωσης  $K$ . Στην περίπτωση αυτή, η πρόγνωση της ζήτησης επιτρέπει την πρόβλεψη της κυκλοφοριακής κατάστασης του δικτύου στο μέλλον και ως εκ τούτου τα δύο κριτήρια αξιολόγησης φαίνεται να βελτιώνονται ελαφρώς σε μερικά σενάρια όσο ο ορίζοντας βελτιστοποίησης  $K$  αυξάνεται. Πιο συγκεκριμένα, για το βαρύ σενάριο ζήτησης 4 όσο και για το βαρύ και ισχυρά χρονικά μεταβαλλόμενο σενάριο 5, τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα με βάση και τα δύο κριτήρια αποτελεσματικότητας λαμβάνονται για  $K = 20$  (1/2 h). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.6 με αυτά του Πίνακα 4.5, η προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα QPC-B υπερέχει της QPC-A για όλα τα σενάρια ζήτησης το οποίο υπογραμμίζει την εκτίμηση της ζήτησης συγκρινόμενη με την υπόθεση μηδενικής ζήτησης. Συγκρίνοντας με τον Πίνακα 4.4, η προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα QPC-B υπερέχει των FT-A, FT-B, LQ-A και LQ-B για όλα τα σενάρια ζήτησης, αφού εμπεριέχει όλη την απαραίτητη πληροφορία κατά την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή πλήρη γνώση της ζήτησης στο ορίζοντα βελτιστοποίησης και ενσωμάτωση όλων των περιορισμών ((3.1), (3.2), (3.3), (3.10) και (3.11)) του προβλήματος ρύθμισης φωτεινής σηματοδότησης.

Πίνακας 4.7: Σύγκριση των κριτηρίων αξιολόγησης.

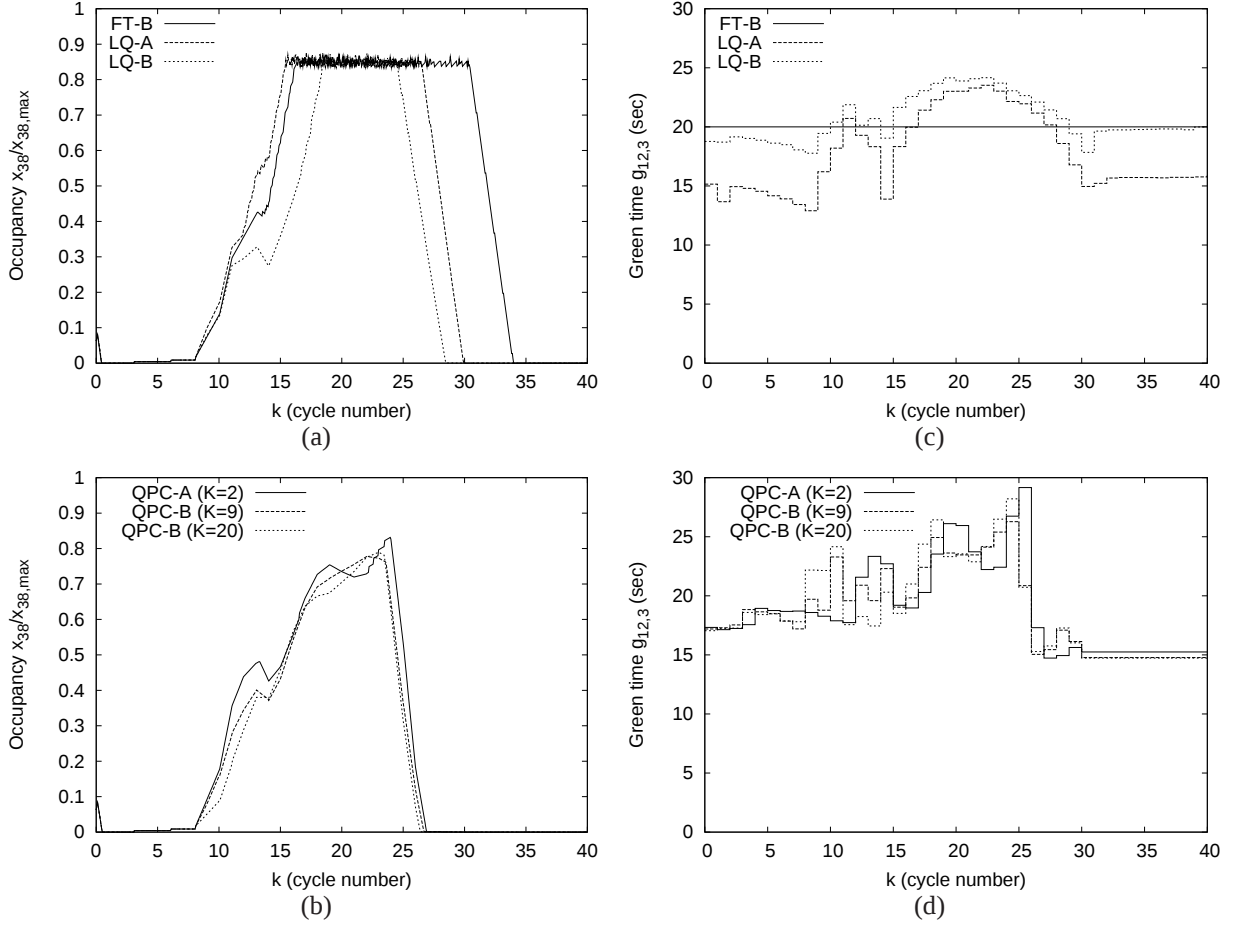
| Strategy | LQ-A vs FT-B |      | LQ-B vs LQ-A |      | QPC-A (K=2) vs LQ-A |      | QPC-B (K=9) vs QPC-A (K=2) |      |
|----------|--------------|------|--------------|------|---------------------|------|----------------------------|------|
| Scenario | TTS          | RQB  | TTS          | RQB  | TTS                 | RQB  | TTS                        | RQB  |
| 1        | -7%          | -60% | 0%           | 25%  | -7%                 | 3%   | -15%                       | -52% |
| 2        | -21%         | -46% | -7%          | -2%  | -18%                | -20% | -17%                       | -31% |
| 3        | -18%         | -32% | -11%         | -11% | -12%                | -18% | -9%                        | -9%  |
| 4        | -19%         | -30% | -12%         | -10% | -1%                 | -3%  | -11%                       | -13% |
| 5        | -16%         | -23% | -11%         | -8%  | -9%                 | -13% | -15%                       | -21% |
| Average  | -17%         | -28% | -11%         | -9%  | -7%                 | -11% | -13%                       | -16% |

Ο Πίνακας 4.7 παρουσιάζει τις ποσοστιαίες μεταβολές των δύο κριτηρίων αξιολόγησης για μερικές από τις έξι περιπτώσεις ελέγχου σηματοδότησης. Οι ποσοστιαίες μεταβολές LQ-A vs. FT-B δείχνουν την υπεροχή του ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης σε πραγματικό χρόνο ως προς το βελτιστοποιημένο πλάνο σταθερού χρόνου. Οι ποσοστιαίες μεταβολές LQ-B vs. LQ-A δείχνουν την δυνατότητα βελτίωσης της προσέγγισης LQ από την χρήση βελτιστοποιημένου πλάνου ονομαστικών τιμών  $g^N$  στην (3.8). Οι QPC-A vs. LQ-A δείχνουν την βελτίωση που επιτεύχθηκε από την ενσωμάτωση στο πρόβλημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης των περιορισμών (3.1), (3.2), (3.3) και τον ορισμό χρόνων πρασίνου (ανεξάρτητων μεταβλητών) για κάθε σύνδεσμο  $G_z$  (περιορισμός (3.10)). Είναι ολοφάνερο, ότι η επίλυση σε πραγματικό χρόνο ενός πιο περίπλοκου προβλήματος βελτιστοποίησης QP (συγκρινόμενο με τον πιο απλό πολυμεταβλητό ρυθμιστή LQ του οποίου η αναλυτική λύση υπολογίζεται εκτός γραμμής στο εργαστήριο) είναι το τίμημα για την επίτευξη αυτής της βελτίωσης. Τέλος, οι ποσοστιαίες μεταβολές QPC-B vs. QPC-A δείχνουν την μέγιστη επιτευχθείσα βελτίωση της προσέγγισης QPC από την πρόγνωση της ζήτησης στο ορίζοντα βελτιστοποίησης.

#### 4.6.4 Λεπτομερή αποτελέσματα

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε μερικά πιο λεπτομερή αποτελέσματα της προσομοίωσης τα οποία εστιάζονται στην κεντρική αγορά της πόλης (κόμβοι 2, 4, 5, 6, 12 στο Σχήμα 4.3). Αυτή η περιοχή του δικτύου παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα συμφόρησης τις πρωινές και απογευματινές ώρες αιχμής που μπορούν να οδηγήσουν σε υπερχείλιση των ουρών και πιθανό μπλοκάρισμα του δικτύου.

Για παράδειγμα, στα σενάρια ζήτησης 4 και 5 σημαντικά προβλήματα κυκλοφοριακής συμφόρησης εμφανίζονται στους συνδέσμους 6 και 8 στους κόμβους 2 και 3, αντιστοίχως. Η συμφόρηση αυτή μεταφέρεται στους ανάντη συνδέσμους 13, 15 και φτάνει μέχρι και τον σύνδεσμο 38 (κόμβος 12). Σημειώνεται ότι και στην πραγματικότητα αντιμετωπίζονται καθημερινά παρόμοια προβλήματα κυκλοφοριακής συμφόρησης σε αυτό το μέρος του δικτύου για περίπου μία έως δύο ώρες το πρωί και



**Σχήμα 4.6:** Σύγκριση των διαφορετικών εκδοχών LQ, QPC, και FT-B για το σενάριο ζήτησης 5: (a), (b) κατάληψη στον σύνδεσμο 38 στον κόμβο 12. (c), (d) χρόνοι πρασίνου στη φάση 3 του κόμβου 12 όπου ο σύνδεσμος 38 έχει προτεραιότητα κίνησης.

το βράδυ (όταν είναι ανοικτά τα εμπορικά καταστήματα). Τα Σχήματα 4.6(a), (b) απεικονίζουν την εξέλιξη στο χρόνο της κατάληψης  $x_z/x_{z,max}$  στο σύνδεσμο 38 από την εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου σταθερού χρόνου FT-B, των παραλλαγών LQ και των παραλλαγών QPC για το σενάριο ζήτησης 5. Επιπλέον, για τις ίδιες στρατηγικές ελέγχου στο σενάριο ζήτησης 5, τα Σχήματα 4.6(c), (d) απεικονίζουν την εξέλιξη στο χρόνο της φάσης 3 στον κόμβο 12 όπου ο σύνδεσμος 38 έχει προτεραιότητα κίνησης. Από την εξέταση των βέλτιστων τροχιών μπορούμε να κάνουμε τις ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Η εφαρμογή των στρατηγικών ελέγχου FT-B, LQ-A, LQ-B οδηγεί στην ανάπτυξη σημαντικής συμφόρησης στο σύνδεσμο 38 (Σχήμα. 4.6(a)), που διαρκεί περισσότερο για την στρατηγική ελέγχου σταθερού χρόνου FT-B λόγω της σταθερής πράσινης ένδειξης στη φάση 3 του κόμ-

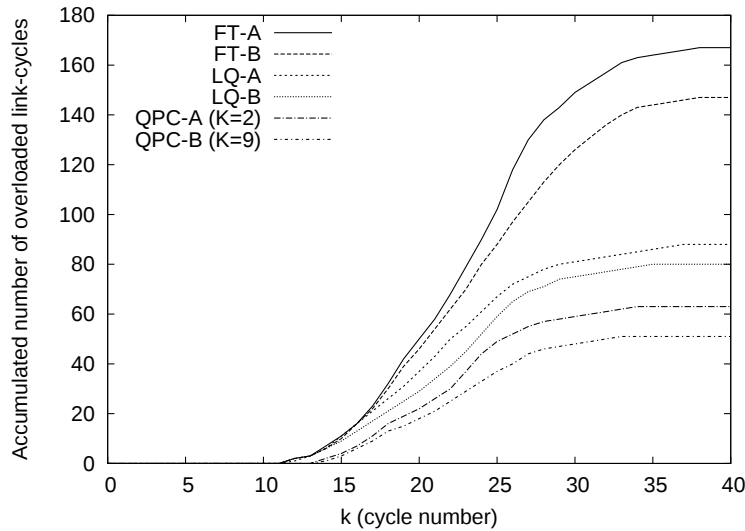
βου 12 όπου ο σύνδεσμος 38 έχει προτεραιότητα κίνησης. Αντίθετα, οι στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου LQ-A και LQ-B εφαρμόζουν μεγαλύτερους χρόνους πράσινης ένδειξης κατά την διάρκεια που αναπτύσσεται η συμφόρηση (Σχήμα 4.6(c)). Σημειώνεται ότι οι χρόνοι πρασίνου για τις LQ-A και LQ-B γίνονται ίσες με τις ονομαστικές τιμές τους  $g^N$  σύμφωνα με την (3.8) όταν οι ουρές είναι σχεδόν μηδενικές, δηλαδή στην αρχή και στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης.

- Συγκρίνοντας την στρατηγική ελέγχου QPC-B (για  $K = 9$  ή  $K = 20$ ) με την QPC-A, το σχήμα της τροχιάς ελέγχου (Σχήμα 4.6(d)) μετακινήθηκε (οριζοντίως) προς τα αριστερά κατά 4–5 περιόδους σηματοδότησης. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην ακριβή πρόγνωση της ζήτησης για την στρατηγική ελέγχου QPC-B που επιτρέπει την πρόβλεψη της κυκλοφοριακής κατάστασης του δικτύου στο άμεσο μέλλον (σε αντίθεση με την QPC-A όπου  $d = 0$ ) και την λήψη κατάλληλων αποφάσεων ελέγχου. Για τον ίδιο λόγο, η κατάληψη στον σύνδεσμο 38 (και σε πολλούς άλλους συνδέσμους του ελεγχόμενου δικτύου) είναι ελαφρώς μικρότερη και πιο ομαλή στην περίπτωση που γίνεται ακριβής εκτίμηση της ζήτησης (Σχήμα 4.6(b)).
- Στην περίπτωση των στρατηγικών ελέγχου τύπου LQ οι τροχιές ελέγχου (Σχήμα 4.6(c)) είναι πιο ομαλές συγκρινόμενες με αυτές των στρατηγικών ελέγχου τύπου QPC (Σχήμα 4.6(d)). Αυτή είναι μια γενική παρατήρηση η οποία οφείλεται στο άπειρο ορίζοντα βελτιστοποίησης του κριτηρίου αξιολόγησης (3.7) που υιοθετούν οι στρατηγικές ελέγχου τύπου LQ σε αντίθεση με τον πεπερασμένο ορίζοντα βελτιστοποίησης του κριτηρίου αξιολόγησης (3.12) που υιοθετούν οι στρατηγικές ελέγχου τύπου QPC, αλλά και της εκ των υστέρων θεώρησης των περιορισμών (3.1), (3.2) στην προσέγγιση LQ.

#### 4.6.5 Αξιολόγηση βάσει του συσσωρευμένου αριθμού υπερφορτωμένων συνδέσμων

Για να κάνουμε μια πιο γενική διερεύνηση όσο αφορά τον αριθμό των υπερφορτωμένων συνδέσμων (και ως εκ τούτου του κινδύνου κυκλοφοριακού κορεσμού του δικτύου), ορίζουμε ως υπερφορτωμένο ένα σύνδεσμο του δικτύου αν η κατάληψη τού  $x_z/x_{z,\max}$  είναι μεγαλύτερη από 0.8. Έστω  $m(k)$  ο αριθμός των υπερφορτωμένων συνδέσμων στο τέλος της περιόδου σηματοδότησης  $k$  για μια συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου και έστω

$$\mathcal{M}(k) = \sum_{\kappa=0}^k m(\kappa)$$



**Σχήμα 4.7:** Συσσωρευμένος αριθμός υπερφορτωμένων συνδέσμων για κάθε στρατηγική ελέγχου.

ο συσσωρευμένος αριθμός των υπερφορτωμένων συνδέσμων μέχρι το τέλος της περιόδου σηματοδότησης  $k$ . Είναι φανερό, ότι  $\mathcal{M}(K_s)$  είναι ο συνολικός αριθμός των υπερφορτωμένων συνδέσμων στο τέλος ( $K_s = 40$ ) του οριζοντα προσομοίωσης. Το Σχήμα 4.7 παρουσιάζει τις ποσότητες  $\mathcal{M}(k)$  για κάθε στρατηγική ελέγχου που εξετάζεται για το σενάριο 5. Όπως αναμενόταν, η κατάταξη των στρατηγικών σε σχέση με το κριτήριο αυτό είναι σε συμφωνία με τις διαπιστώσεις της ενότητας 4.6.3. Ειδικότερα, στο τέλος της προσομοίωσης (περίοδος σηματοδότησης  $K_s = 40$ ), οι συνολικοί αριθμοί των υπερφορτωμένων συνδέσμων είναι 167 για την FT-A, 147 για την FT-B, 88 για την LQ-A, 80 για την LQ-B, 63 για την QPC-A και 51 για την QPC-B.

Το Σχήμα 4.7 καταδεικνύει τη σαφή υπεροχή που έχουν κατάλληλα σχεδιαζόμενες στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου σε σχέση με (ακόμα και βελτιστοποιημένες) στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου για τη διαχείριση του κυκλοφοριακού κορεσμού σε αστικά οδικά δίκτυα. Το σχήμα καταδεικνύει επίσης την βελτίωση που επιτυγχάνει η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου QPC σε σχέση με την προσέγγιση LQ και την αξία της πληροφορίας από την εκτίμηση της ζήτησης στους συνδέσμους του ελεγχόμενου δικτύου.

#### 4.6.6 Αξιολόγηση βάσει θεμελιωδών διαγραμμάτων των στρατηγικών ελέγχου

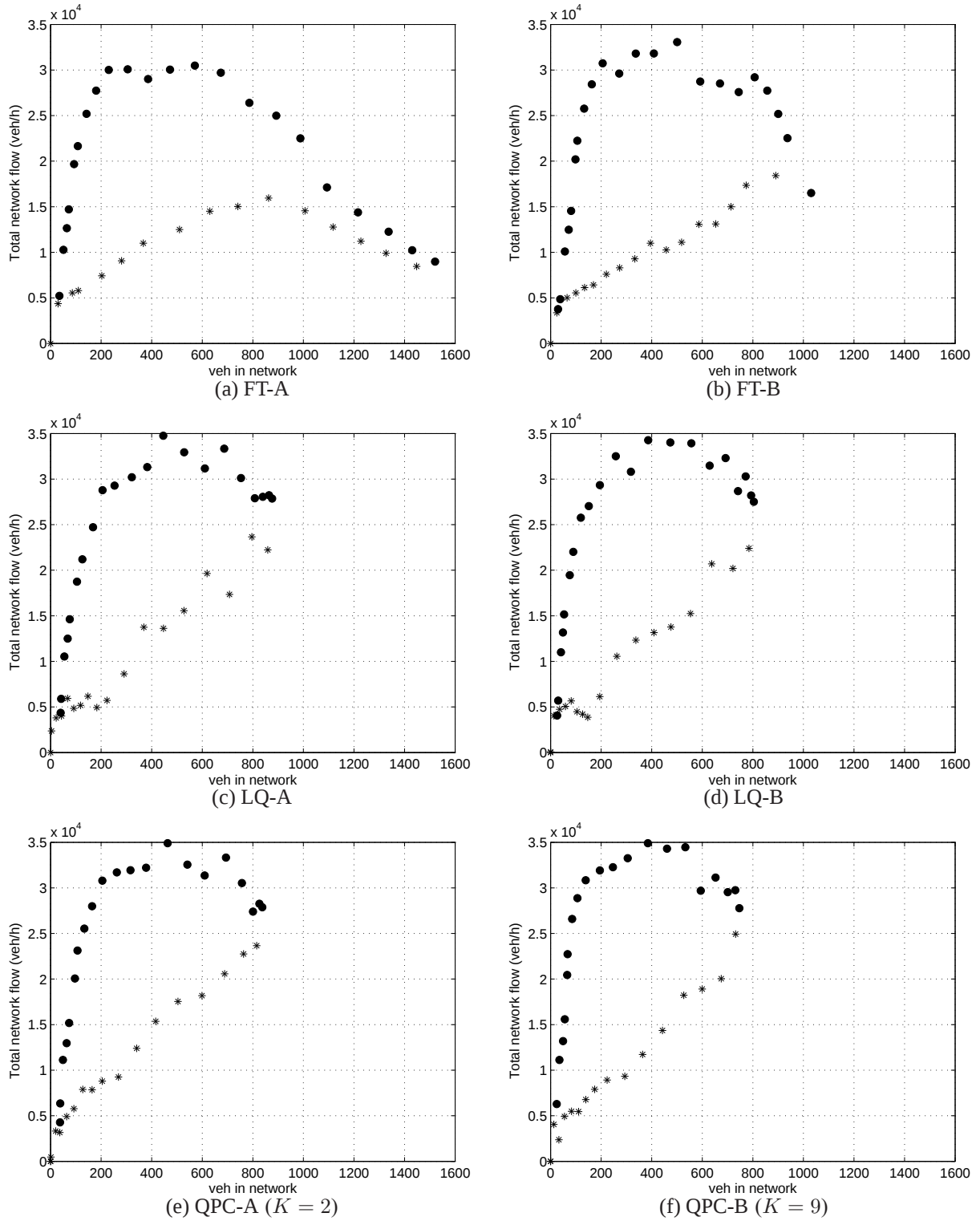
Το θεμελιώδες διάγραμμα του αστικού δικτύου από την εφαρμογή διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να εξαχθούν πρόσθετα χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις επιπτώσεις και την απόδοση του εφαρμοζόμενου ελέγχου. Το Σχήμα 4.8 παρουσιάζει τα θεμελιώδη

διαγράμματα που προκύπτουν για το σενάριο 5 όταν εφαρμόζονται οι έξι διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου. Κάθε σημείο στα διαγράμματα αντιστοιχεί σε μια περίοδο σηματοδότησης 90 sec.

Καταρχάς, το Σχήμα 4.8 επιβεβαιώνει την ύπαρξη ενός θεμελιώδους διαγράμματος για αστικά οδικά δίκτυα, το σχήμα του οποίου φαίνεται να εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη στρατηγική ελέγχου. Είναι αξιοσημείωτο, ότι τα θεμελιώδη διαγράμματα εμφανίζουν μια υστέρηση, δηλαδή έχουμε ένα διαφορετικό μονοπάτι σημείων (μετρήσεις που σημειώνονται με μαύρους κύκλους) όταν το δίκτυο γεμίζει από όταν το δίκτυο αδειάζει (μετρήσεις που σημειώνονται με αστερίσκους). Αυτή η υστέρηση μαρτυρά ότι για τον ίδιο αριθμό οχημάτων στο δίκτυο (οριζόντιος άξονας) μπορεί να εμφανισθεί διαφορετική συνολική ροή (κάθετος άξονας) όταν το δίκτυο γεμίζει από όταν αδειάζει. Αυτή η διαφορά οφείλεται κατά ένα μέρος στην κατανομή της κυκλοφορίας κατά την διάρκεια του γεμίσματος και αδειάσματος του δικτύου και κατά ένα άλλο μέρος στην έλλειψη κατά την διάρκεια της προσομοίωσης μιας μεθοδολογίας ελέγχου κατανομής της κυκλοφορίας η οποία θα γέμιζε του συνδέσμους του δικτύου με πιο ομοιογενή τρόπο. Μολονότι ένα παρόμοιο φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί και στην πραγματικότητα, πιστεύουμε ότι η υστέρηση είναι πιο εμφανής στην προσομοίωση λόγω της τελικής φάσης μηδενικής ζήτησης που χρησιμοποιείται για το πλήρες άδειασμα του δικτύου στο τέλος της προσομοίωσης και την προαναφερόμενη έλλειψη ελέγχου για τον καταμερισμό της κυκλοφορίας. Στα σχόλια που θα ακολουθήσουν, θα εστιάσουμε την προσοχή μας μόνο στο κομμάτι του θεμελιώδους διαγράμματος που αφορά το γέμισμα του δικτύου (μετρήσεις που σημειώνονται με μαύρους κύκλους).

Όσον αφορά την περιοχή A του θεμελιώδους διαγράμματος (Σχήμα 2.4), η οποία δείχνει να εμφανίζεται στο δίκτυο εφαρμογής για αριθμούς οχημάτων μέχρι 200, η κλίση (μέση ταχύτητα) είναι μεγαλύτερη για το QPC-B (Σχήμα 4.8(f)) και ακολουθούν τα LQ-B (Σχήμα 4.8(d)), QPC-A (Σχήμα 4.8(e)) και FT-B (Σχήμα 4.8(b)), ενώ τα LQ-A (Σχήμα 4.8(c)) και FT-A (Σχήμα 4.8(a)) είναι λίγο χειρότερα αφού τα σχέδια ρύθμισης σηματοδότησής τους δεν είναι πλήρως προσαρμοσμένα στο σενάριο ζήτησης.

Για την περιοχή B, παρατηρούμε ότι το δίκτυο έχει χαμηλότερη ικανότητα ροής για την FT-A (περίπου 30,000 veh/h), αυξάνει περίπου στα 32,000 veh/h για την FT-B, αυξάνει ακόμη περισσότερο για τις LQ-A, LQ-B και QPC-A φτάνοντας περίπου στα 34,000 veh/h για την QPC-B. Σημειώνεται ότι, λόγω της απουσίας ελέγχου της περιόδου σηματοδότησης και της χρονικής μετατόπισης σε πραγματικό χρόνο, αυτή η αύξηση της ικανότητας της ροής του δικτύου οφείλεται κυρίως στην μικρότερη υπερχειλίση των ουρών στους συνδέσμους του δικτύου, δηλαδή στη λιγότερη σπατάλη



Σχήμα 4.8: Θεμελιώδη διαγράμματα για κάθε στρατηγική ελέγχου.

χρόνων πρασίνου λόγω υπερφόρτωσης κατάντη συνδέσμων.

Η διαφορά στα επίπεδα ροής κατά τη διάρκεια των συνθηκών κυκλοφορίας μερικού κορεσμού στην περιοχή Β συνεπάγεται αντίστοιχες διαφορές του αριθμού οχημάτων στο δίκτυο από την εφαρμογή κάθε στρατηγικής ελέγχου. Έτσι, η FT-A φαίνεται να εμφανίζει μέχρι 1500 οχήματα στο δίκτυο, με μια πλήρως σχηματιζόμενη περιοχή κυκλοφοριακής συμφόρησης C και κατά συνέπεια χαμηλότερη ροή (λιγότερη από 10,000 veh/h), που οφείλεται σε υπερχειλίσεις των συνδέσμων και σε μερικό μπλοκάρισμα του δικτύου. Η FT-B εμφανίζει μέχρι 1000 οχήματα στο δίκτυο με τη συνολική ροή να μειώνεται στα 17,000 veh/h, δηλαδή σχηματίζεται μόνο ένα μέρος της περιοχής C. Με την εφαρμογή της LQ-A, ο αριθμός των οχημάτων στο δίκτυο δεν υπερβαίνει τα 900, ενώ με τις LQ-B και QPC-A ο μέγιστος αριθμός φτάνει τα 800 οχήματα με την QPC-B να εμφανίζει ακόμη λιγότερα. Η συνολική ροή για όλες τις στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου φαίνεται ελαφρώς να μειώνεται στα 28,000 veh/h κατά τη διάρκεια γεμίσματος του δικτύου (τελευταίος μαύρος κύκλος στο δεξί μέρος των θεμελιωδών διαγραμμάτων).

Τα αποτελέσματα αυτά είναι απολύτως σύμφωνα με τα κριτήρια αξιολόγησης των Πινάκων 4.4–4.6, ενώ παρέχουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τους λόγους και τους τρόπους με τους οποίους επιφέρουν βελτιώσεις οι στρατηγικές ελέγχου προς διερεύνηση. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα των θεμελιωδών διαγραμμάτων δείχνουν ότι στρατηγικές έλεγχου πραγματικού χρόνου οι οποίες σχεδιάζονται κατάλληλα ώστε να είναι αποτελεσματικές σε συνθήκες κυκλοφορίας κορεσμού μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις επιδόσεις του δικτύου και να επιβραδύνουν ή αποφύγουν τις αρνητικές επιπτώσεις των υπερχειλίσεων στους συνδέσμους και του μερικού μπλοκαρίσματος του δικτύου.

#### 4.6.7 Ανάλυση ευαισθησίας και η επίδραση της ανάδρασης

Υπάρχει μια θεμελιώδης διαφορά στη χρήση και σπουδαιότητα των μοντέλων κυκλοφοριακής ροής στο τομέα του σχεδιασμού συγκοινωνιακών δικτύων συγκρινόμενα με τον τομέα του σχεδιασμού συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας. Κατά τον σχεδιασμό συγκοινωνιακών δικτύων, ο τυπικός στόχος είναι να προβλέψουμε (μέσω ενός κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου) την ενδεχόμενη συμπεριφορά (λειτουργία) συγκοινωνιακών υποδομών που δεν υφίστανται ώστε να αποτιμήσουμε διαφορετικές προτάσεις σχεδιασμού, κλπ. Για να το πετύχουμε αυτό, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της σχεδιαζόμενης υποδομής (και συνεπώς του χρησιμοποιούμενου μαθηματικού μοντέλου) πρέπει να είναι

όσο περισσότερο ακριβής γίνεται δεδομένου ότι αν σχεδιασθεί πλέον είναι δύσκολη (ή ακόμη και αδύνατη στις περισσότερες περιπτώσεις) η αλλαγή της υποδομής. Κατά τον σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου της κυκλοφορίας, η υποδομή πάνω στην οποία θα εφαρμοσθεί ο έλεγχος είναι δεδομένη και μας παρέχει (μέσω κατάλληλων ανιχνευτών) πολύτιμη πληροφορία για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το ελεγχόμενο δίκτυο. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται σε ένα κλειστό βρόχο ανάδρασης (π.χ. από τον πολυμεταβλητό ρυθμιστή ανάδρασης LQ μέσω της (3.8) ή από το σχήμα κυλιόμενου ορίζοντα της ενότητας 3.8) ώστε να ανανεώνει συχνά τις αποφάσεις της στρατηγικής ελέγχου με βάση την τρέχουσα κατάσταση της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Με άλλα λόγια, η επίδραση της ανακρίβειας του μαθηματικού μοντέλου (π.χ. ανακρίβεια στις παραμέτρους του μοντέλου) στην ποιότητα των αποφάσεων ελέγχου μειώνεται σημαντικά χάρη στην ανάδραση σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, κάποιο μοντέλο μπορεί να προβλέπει (ολοένα και αυξανόμενα) λάθος την μελλοντική εξέλιξη των ουρών στους συνδέσμους του δικτύου αν τα χρησιμοποιούμενα ποσοστά στροφής  $t_{w,z}$  είναι διαφορετικά από τα πραγματικά (π.χ. γιατί τα ποσοστά στροφής μπορούν να αλλάξουν λόγω του εφαρμοζόμενου ελέγχου ή της επιλογής εναλλακτικών διαδρομών από τους χρήστες του δικτύου). Ωστόσο, οποιαδήποτε ανακρίβεια πρόβλεψης που έγινε στο παρελθόν από το χρησιμοποιούμενο μοντέλο ουσιαστικά ακυρώνεται όταν καταφθάνει νέα πληροφορία (ανάδραση) η οποία αντικατοπτρίζει την τρέχουσα κατάσταση των ουρών στους συνδέσμους του δικτύου και είναι η βάση για την ανανέωση των αποφάσεων ελέγχου. Συνεπώς, η ανάλυση της ευαισθησίας των αποφάσεων ελέγχου στην περίπτωση ανακρίβειας κυκλοφοριακών παραμέτρων που επιδρούν στο χρησιμοποιούμενο μαθηματικό μοντέλο, πρέπει να αντιμετωπίζεται από αυτή την οπτική γωνία. Στο συνέχεια θα ακολουθήσουν μια σειρά διερευνήσεων για να δείξουμε ότι χάριν της ανάδρασης είναι μικρή η ευαισθησία του ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης σε πραγματικό χρόνο σε ανακρίβειες των ποσοστών στροφής.

Ο πολυμεταβλητός ρυθμιστής (3.8) περιέχει το πίνακα ανάδρασης  $\mathbf{L}$  τα στοιχεία του οποίου εξαρτώνται από τους πίνακες  $\mathbf{B}$  από την (3.6) και  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{R}$  από την (3.7). Τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{B}$  εξαρτώνται από τα ποσοστά στροφής  $t_{w,z}$ . Στην προσέγγιση LQ ο πίνακας  $\mathbf{B}$  είναι σταθερός και συνεπώς τα ποσοστά στροφής πρέπει να προεπιλεγούν και μπορεί να αποκλίνουν από τις πραγματικές τους τιμές. Αν τα πραγματικά ποσοστά στροφής είναι πολύ διαφορετικά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές της ημέρας (π.χ. για τις πρωινές ώρες αιχμής συγκρινόμενα με τις απογευματινές ώρες αιχμής) τότε θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί πίνακες ανάδρασης  $\mathbf{L}$ . Ωστόσο οι διερευνήσεις που ακολουθούν δείχνουν ότι αυτό θα ήταν αναγκαίο μόνο στην περίπτωση που οι διαφορές είναι

πολύ ισχυρές.

Η προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα QPC χρησιμοποιεί το γραμμικό μοντέλο (3.11) με τον πίνακα  $\bar{B}$  επίσης να εξαρτάται από τα ποσοστά στροφής. Ωστόσο, επειδή το μοντέλο χρησιμοποιείται σε πραγματικό χρόνο (σύμφωνα με την ενότητα 3.8), ο πίνακας  $\bar{B}$  μπορεί να μεταβάλλεται με τον χρόνο και ακόμη μπορεί να ανανεώνεται από χρονική στιγμή σε χρονική στιγμή με βάση εκτιμήσεις των ποσοστών στροφής σε πραγματικό χρόνο. Και στην περίπτωση αυτή, οι διερευνήσεις που ακολουθούν δείχνουν ότι εκτιμήσεις των ποσοστών στροφής σε πραγματικό χρόνο θα ήταν αναγκαίες μόνο στην περίπτωση που οι αντίστοιχες διαφορές είναι πολύ ισχυρές.

Οι διερευνήσεις που ακολουθούν έχουν ως στόχο την ανάλυση ευαισθησίας των προσεγγίσεων LQ και κυλιόμενου ορίζοντα QPC σε ανακρίβειες των ποσοστών στροφής. Για το σκοπό αυτό, διερευνώνται μέσω προσομοίωσης για τα πέντε σενάρια ζήτησης οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- Εφαρμογή της προσέγγισης LQ χρησιμοποιώντας τον πίνακα ανάδρασης  $L$  που παράχθηκε με τα αρχικά ποσοστά στροφής (LQ-A και LQ-B όπως περιγράφηκαν στο τμήμα 4.6.2).
- Εφαρμογή της προσέγγισης LQ χρησιμοποιώντας τον πίνακα ανάδρασης  $L^*$  που παράχθηκε από σημαντικά διαφορετικά ποσοστά στροφής σε όλους του κόμβους του δικτύου. Τα ποσοστά αυτά τροποποιήθηκαν τυχαία ώστε να είναι διαφορετικά κατά 40% ως προς τα αρχικά ποσοστά στροφής (π.χ. για ένα ζεύγος αρχικών ποσοστών στροφής 0.5, 0.5 μπορεί τώρα να έχουμε ποσοστά στροφής 0.3, 0.7 ή 0.7, 0.3).
- Εφαρμογή της προσέγγισης κυλιόμενου ορίζοντα QPC χρησιμοποιώντας διαφορετικά ποσοστά στροφής στο γραμμικό μοντέλο (3.11) (QPC-A και QPC-B όπως περιγράφηκαν στο τμήμα 4.6.2).
- Εφαρμογή της προσέγγισης κυλιόμενου ορίζοντα QPC\* χρησιμοποιώντας όπως παραπάνω σημαντικά διαφορετικά ποσοστά στροφής σε όλους τους κόμβους του δικτύου στο γραμμικό μοντέλο (3.11).

Σε όλες τις περιπτώσεις, το μοντέλο προσομοίωσης (3.14) με εκροή την (4.1) χρησιμοποιεί τα αρχικά ποσοστά στροφής. Η στρατηγική QPC-A εφαρμόζεται με ορίζοντα βελτιστοποίησης  $K = 2$  όπως υποδείχθηκε στο τμήμα 4.6.3. Για την στρατηγική QPC-B διερευνώνται δύο διαφορετικοί ορίζοντες βελτιστοποίησης, οι  $K = 3$  και  $K = 9$ .

**Πίνακας 4.8:** Κριτήρια αποτελεσματικότητας των διερευνήσεων ευαισθησίας για την προσέγγιση LQ, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς πίνακες ελέγχου στην (3.8) λόγω διαφορετικών τιμών των ποσοστών στροφής.

| Strategy<br>Scenario | LQ-A |        | LQ-A* |        | LQ-B |        | LQ-B* |        |
|----------------------|------|--------|-------|--------|------|--------|-------|--------|
|                      | TTS  | RQB    | TTS   | RQB    | TTS  | RQB    | TTS   | RQB    |
| 1                    | 13   | 561    | 14    | 554    | 14   | 702    | 14    | 700    |
| 2                    | 44   | 7341   | 45    | 7720   | 41   | 7187   | 40    | 6829   |
| 3                    | 164  | 53993  | 170   | 56442  | 146  | 48282  | 152   | 51561  |
| 4                    | 285  | 100136 | 295   | 103942 | 250  | 89946  | 253   | 90420  |
| 5                    | 348  | 130891 | 339   | 122754 | 311  | 120760 | 315   | 119270 |
| Average              | 171  | 58584  | 173   | 58282  | 152  | 53375  | 155   | 53756  |

\* denotes that the LQ approach uses the modified gain matrix  $L^*$

**Πίνακας 4.9:** Κριτήρια αποτελεσματικότητας των διερευνήσεων ευαισθησίας για την προσέγγιση QPC, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές των ποσοστών στροφής σε όλους τους κόμβους του δικτύου.

| Strategy<br>Scenario | QPC-A (K=2) |        | QPC-A* (K=2) |        | QPB-B (K=3) |       | QPB-B* (K=3) |       | QPB-B (K=9) |       | QPB-B* (K=9) |        |
|----------------------|-------------|--------|--------------|--------|-------------|-------|--------------|-------|-------------|-------|--------------|--------|
|                      | TTS         | RQB    | TTS          | RQB    | TTS         | RQB   | TTS          | RQB   | TTS         | RQB   | TTS          | RQB    |
| 1                    | 13          | 578    | 13           | 686    | 11          | 280   | 12           | 423   | 11          | 280   | 12           | 423    |
| 2                    | 36          | 5844   | 40           | 7099   | 30          | 4067  | 37           | 5767  | 30          | 4040  | 37           | 5736   |
| 3                    | 145         | 44286  | 152          | 46226  | 132         | 39413 | 149          | 47158 | 132         | 40079 | 149          | 47458  |
| 4                    | 283         | 97391  | 277          | 92451  | 249         | 82828 | 272          | 94498 | 252         | 84246 | 271          | 93659  |
| 5                    | 318         | 113325 | 305          | 103113 | 280         | 96292 | 261          | 84659 | 270         | 89694 | 290          | 100391 |
| Average              | 159         | 52285  | 157          | 49915  | 140         | 44576 | 146          | 46501 | 139         | 43668 | 152          | 49533  |

\* denotes that the QPC approach uses the modified turning rates

Ο Πίνακας 4.8 συνοψίζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από την εφαρμογή των παραλλαγών LQ. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι αν και τα ποσοστά στροφής που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του πίνακα ανάδρασης δεν είναι ακριβή, η απόδοση των παραλλαγών LQ δεν επηρεάζεται σημαντικά. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί βασισμένα σε εκτενείς διερευνήσεις προσομοίωσης της στρατηγικής ελέγχου TUC όσο αφορά ανακρίβειες παραμέτρων της κυκλοφοριακής ροής όπως ποσοστά στροφής και ροές κορεσμού (Diakaki, 1999). Σημειώνεται ότι, σε μερικά σενάρια, η ανακρίβεια των ποσοστών στροφής μπορεί σε περιορισμένο βαθμό να οδηγήσει ακόμη και σε μικρή βελτίωση της αποτελεσματικότητας. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι η στρατηγική LQ είναι υποβέλτιστη και ως εκ τούτου η αποδοτικότητα της μπορεί σε περιορισμένο βαθμό ακόμη και να βελτιωθεί στην περίπτωση μέτρων ανακριβιών.

Ο Πίνακας 4.9 συνοψίζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από την εφαρμογή των παραλλαγών QPC. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι παραλλαγές QPC επηρεάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό από τις αντίστοιχες παραλλαγές LQ από την ανακρίβεια των ποσοστών στροφής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την κυκλοφοριακή ροή χρησιμοποιείται ρητά (σε πραγματικό χρόνο) στην προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα QPC. Για την παραλλαγή QPC-B\*, φαίνεται ότι η χρήση μικρότερου ορίζοντα βελτιστοποίησης  $K = 3$  (συγκρινόμενο με το  $K = 9$ ) οδηγεί σε μικρότερες αποκλίσεις των κριτηρίων αξιολόγησης όσο αφορά τους μέσους όρους επειδή

**Πίνακας 4.10:** Σύγκριση κριτηρίων αποτελεσματικότητας των διερευνήσεων ευαισθησίας για τις προσεγγίσεις LQ και QPC.

| Strategy | LQ-A* vs LQ-A |     | LQ-B* vs LQ-B |     | QPC-A* vs QPC-A (K=2) |     | QPC-B* vs QPC-B (K=3) |      | QPC-B* vs QPC-B (K=9) |     |
|----------|---------------|-----|---------------|-----|-----------------------|-----|-----------------------|------|-----------------------|-----|
| Scenario | TTS           | RQB | TTS           | RQB | TTS                   | RQB | TTS                   | RQB  | TTS                   | RQB |
| 1        | 8%            | -1% | 0%            | 0%  | 0%                    | 19% | 9%                    | 51%  | 9%                    | 51% |
| 2        | 2%            | 5%  | -2%           | -5% | 11%                   | 21% | 23%                   | 42%  | 23%                   | 42% |
| 3        | 4%            | 5%  | 4%            | 7%  | 5%                    | 4%  | 13%                   | 20%  | 13%                   | 18% |
| 4        | 4%            | 4%  | 1%            | 1%  | -2%                   | -5% | 9%                    | 14%  | 8%                    | 11% |
| 5        | -3%           | -6% | 1%            | -1% | -4%                   | -9% | -7%                   | -12% | 7%                    | 12% |
| Average  | 1%            | -1% | 2%            | 1%  | -1%                   | -5% | 4%                    | 4%   | 9%                    | 13% |

μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της ζήτησης ( $K = 9$ ) τείνει να είναι αυξητικά πιο ανακριβής.

Συνεπώς, ο ορίζοντας βελτιστοποίησης  $K$  είναι καλό να επιλέγεται μέσω μιας διαδικασίας δοκιμής-και-σφάλματος έτσι ώστε να αποφευχθούν μυωπικές πολιτικές ελέγχου (αρκούντως μικρός) και το μαθηματικό μοντέλο της κυκλοφοριακής ροής να παρουσιάζει σχετικά μικρή ευαισθησία σε ανακρίβειες των παραμέτρων κυκλοφορίας (αρκούντως μεγάλος). Συγκρίνοντας τον Πίνακα 4.9 με τον Πίνακα 4.8, οι παραλλαγές QPC-A\* και QPC-B\* δείχνουν να είναι καλύτερες ακόμη και από τις LQ-A και LQ-B, αντιστοίχως. Φυσικά οι QPC-A\* και QPC-B\* παραμένουν ακόμη πολύ καλύτερες από τα δύο σχέδια σηματοδότησης σταθερού χρόνου τα οποία υπολογίσθηκαν με βάση τις πραγματικές τιμές των ποσοστών στροφής.

Ο Πίνακας 4.10 παρουσιάζει τις ποσοστιαίες μεταβολές των δύο κριτηρίων αξιολόγησης για τις τέσσερις περιπτώσεις ελέγχου σηματοδότησης. Οι ποσοστιαίες μεταβολές LQ-A\* vs. LQ-A και LQ-B\* vs. LQ-B δείχνουν την μικρή ευαισθησία της προσέγγισης LQ σε λάθη των ποσοστών στροφής. Οι ποσοστιαίες μεταβολές QPC-A\* vs. QPC-A δείχνουν την μικρή ευαισθησία της προσέγγισης QPC-A για  $K = 2$ . Οι μεταβολές QPC-B\* vs. QPC-B δείχνουν την μέτρια ευαισθησία της προσέγγισης QPC-B για αυξανόμενο ορίζοντα βελτιστοποίησης  $K$ .

Γενικά, η προσέγγιση LQ δείχνει να είναι λιγότερο ευαίσθητη από την προσέγγιση κυλιόμενου ορίζοντα QPC σε ανακρίβειες των παραμέτρων κυκλοφορίας. Αυτό οφείλεται στην λύση κλειστής μορφής (αναλυτική) του αναδραστικού κανόνα ελέγχου (3.8) σε αντίθεση με την άμεση ανάδραση του σχήματος κυλιόμενου ορίζοντα (Dreyfus, 1964).

## Κεφάλαιο 5

### Αποτελέσματα μικροσκοπικής προσομοίωσης

#### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, η προτεινόμενη μεθοδολογία τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα ενσωματώνεται στο λογισμικό που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης για την εφαρμογή της στρατηγικής TUC σε πραγματικό χρόνο στο πεδίο. Το λογισμικό υλοποίησης της στρατηγικής TUC έχει αναπτυχθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η άμεση υλοποίηση της στρατηγικής χωρίς επιπλέον μετατροπές σε οποιοδήποτε κέντρο ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης το οποίο διαθέτει την δυνατότητα κεντρικού ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. Σημειώνεται ότι, εκτός του ελέγχου ποσοστών χρόνων πράσινου (κανόνα ελέγχου LQ), η στρατηγική TUC διαθέτει επίσης ειδικά σχεδιασμένο αναδραστικό έλεγχο περιόδου σηματοδότησης, αναδραστικό έλεγχο χρονικής μετατόπισης που λαμβάνει υπόψη την παρουσία ουρών αναμονής εντός των συνδέσμων, καθώς και παροχή προτεραιότητας σε οχήματα μαζικής μεταφοράς.

Για την ανάλυση της προτεινόμενης μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα, ενσωματωμένη στο λογισμικό υλοποίησης της στρατηγικής TUC, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα προσομοίωσης μικροσκοπικής κυκλοφορίας AIMSUN. Κάνοντας χρήση του προγράμματος αυτού, μοντελοποιείται το αστικό δίκτυο των Χανίων και γίνεται σύγκριση της συμπεριφοράς του προσομοιωμένου αστικού δικτύου των Χανίων για διαφορά ρεαλιστικά σενάρια κυκλοφοριακής ζήτησης όταν εφαρμόζονται οι παρακάτω στρατηγικές ελέγχου:

- Στρατηγική ελέγχου που βασίζεται σε πρόγραμμα σταθερής σηματοδότησης (βελτιστοποιημένο κάθε φορά για τις συνθήκες κυκλοφοριακής ζήτησης).
- Στρατηγική ελέγχου TUC.

- Στρατηγική ελέγχου που βασίζεται στην προτεινόμενη μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα.

Για την σύγκριση των στρατηγικών χρησιμοποιήθηκαν καθιερωμένοι στον τομέα του ελέγχου κυκλοφορίας δείκτες σύγκρισης, όπως, μέσες ταχύτητες, συνολικοί χρόνοι διαδρομής και συνολικοί χρόνοι αναμονής εντός του αστικού δικτύου.

## 5.2 Ο μικροσκοπικός προσομοιωτής AIMSUN

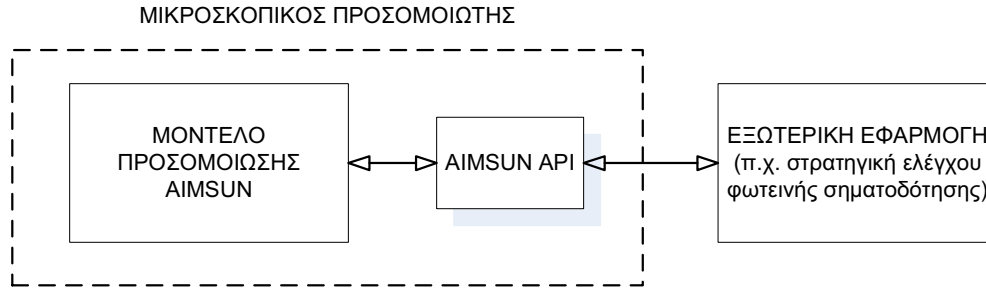
Ο προσομοιωτής AIMSUN (TSS-Transport Simulation Systems, 2008) είναι ένα λογισμικό μοντελοποίησης και μικροσκοπικής προσομοίωσης συγκοινωνιακών δικτύων τυχαίας τοπολογίας και χαρακτηριστικών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση κυκλοφοριακών συστημάτων και στρατηγικών ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης που βασίζονται είτε σε παραδοσιακές τεχνικές, είτε στην εφαρμογή ευφύων συστημάτων μεταφορών.

Η αξιολόγηση εναλλακτικών στρατηγικών ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης επιτυγχάνεται στο AIMSUN μέσω της διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών AIMSUN API (Application Programming Interface), έναν δίαυλο επικοινωνίας μεταξύ του προσομοιωτή και του χρήστη. Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης μπορεί να αξιολογήσει οποιαδήποτε εξωτερική εφαρμογή, για παράδειγμα κάποια στρατηγική ελέγχου, που χρειάζεται πρόσβαση σε εσωτερικά δεδομένα (π.χ. κατάσταση του δικτύου) του προσομοιωτή AIMSUN ή/και που απαιτεί τη δυναμική αλλαγή της κατάστασης τους (π.χ. αλλαγή φωτεινών σηματοδοτών).

Το AIMSUN API (Σχήμα 5.1) τοποθετείται, από λειτουργική άποψη, ανάμεσα στο μοντέλο προσομοίωσης AIMSUN και την εξωτερική εφαρμογή (π.χ. στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης) που ορίζεται από το χρήστη. Υπάρχουν δηλαδή δύο τύποι επικοινωνίας. Από τη μια μεριά υπάρχει επικοινωνία μεταξύ του AIMSUN και του AIMSUN API και από την άλλη μεριά μεταξύ του AIMSUN API και της εξωτερικής εφαρμογής, που καθορίζεται από το χρήστη ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

## 5.3 Κριτήρια αξιολόγησης

Για κάθε διαφορετικό σενάριο ζήτησης και κάθε στρατηγική ελέγχου, τέσσερα κριτήρια αξιολόγησης συλλέχθηκαν από τον μακροσκοπικό προσομοιωτή AIMSUN:



**Σχήμα 5.1:** Η αρχιτεκτονική της διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών AIMSUN API.

1. Η μέση (αρμονική) ταχύτητα (σε km/h)

$$MS = \frac{MS_s}{N_s}, \quad \text{όπου} \quad MS_s = 3.6 \sum_{i=1}^{N_s} \frac{D_i}{TEX_i - TEN_i}$$

2. Η συνολική διανυθείσα απόσταση (σε km)

$$TDT = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{N_s} D_i$$

3. Ο συνολικός χρόνος διαδρομής (σε h)

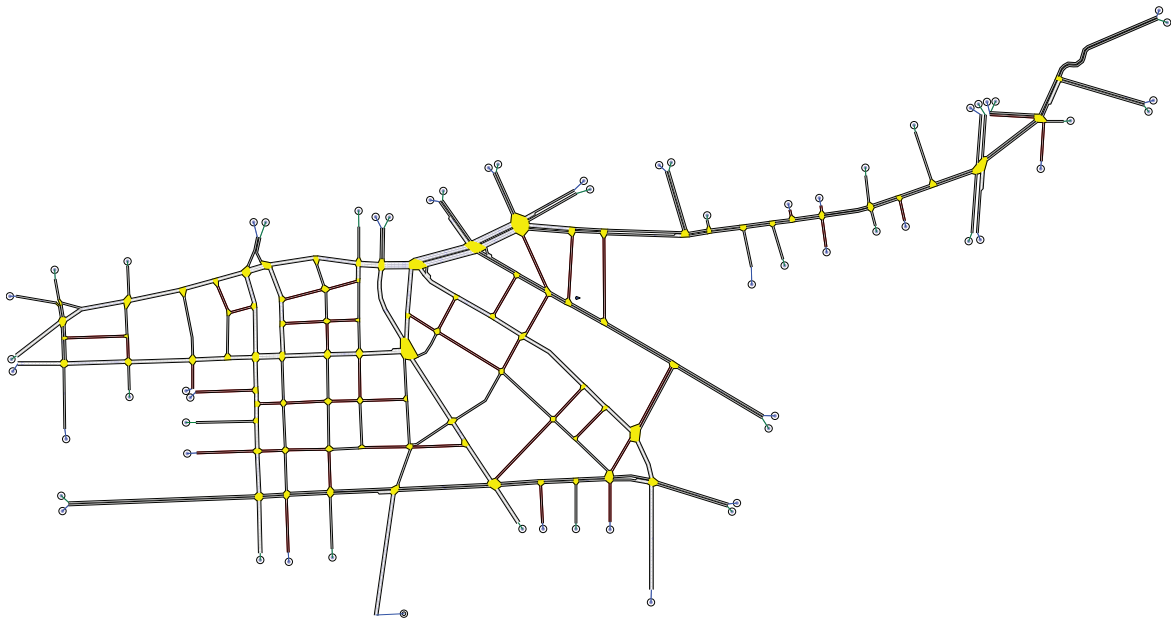
$$TTS = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^{N_s} (TEX_i - TEN_i)$$

όπου

- $N_s$ : Αριθμός των οχημάτων που εξέρχονται από το δίκτυο κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.  
 $TEN_i$ : Χρόνος εισόδου του οχήματος  $i$  στο δίκτυο (s).  
 $TEX_i$ : Χρόνος εξόδου του οχήματος  $i$  στο δίκτυο (s).  
 $D_i$ : Συνολική διανυθείσα απόσταση ταξιδιού του οχήματος  $i$  στο δίκτυο (m).

#### 5.4 Μοντέλο ελέγχου του αστικού δικτύου των Χανίων και περιγραφή σεναρίων

Για την διερεύνηση της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα QPC, ενσωματωμένη στο λογισμικό υλοποίησης της στρατηγικής TUC σε πραγματικό χρόνο στο πεδίο, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης μικροσκοπικής κυκλοφορίας AIMSUN και μοντελοποιήθηκε το αστικό δίκτυο των Χανίων όπως αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2. Το μοντέλο ελέγχου της στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης QPC είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε και στο Κεφάλαιο 4, ήτοι το συμπαγές μοντέλο ελέγχου που



**Σχήμα 5.2:** Το μοντέλο ελέγχου του αστικού οδικού δικτύου των Χανίων στο πρόγραμμα προσομοίωσης μικροσκοπικής κυκλοφορίας AIMSUN.

απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3. Στην πραγματικότητα, ένα απλοποιημένο μοντέλο του αστικού δικτύου χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό της στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης QPC (Σχήμα 4.3) και ένα διαφορετικό (Σχήμα 5.2), δηλαδή πιο ρεαλιστικό μοντέλο, χρησιμοποιείται για σύγκριση και αξιολόγηση της στρατηγικής QPC που αναπτύχθηκε, κάτω από διάφορα ρεαλιστικά σενάρια κυκλοφοριακής ζήτησης πριν την υλοποίηση σε πραγματικές συνθήκες.

Στρατηγική ελέγχου που βασίζεται σε πρόγραμμα σταθερής σηματοδότησης (βελτιστοποιημένο κάθε φορά για τις συνθήκες κυκλοφοριακής ζήτησης), στρατηγική ελέγχου που βασίζεται στην προτεινόμενη μεθοδολογία τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα QPC και στρατηγική ελέγχου TUC διερευνήθηκαν ως προς την αποτελεσματικότητα και την συμπεριφορά τους μέσω προσομοίωσης για τρία σενάρια ζήτησης στο αστικό δίκτυο των Χανίων. Ο ορίζοντας προσομοίωσης για το κάθε σενάριο είναι 5 ώρες. Τα τρία σενάρια ζήτησης έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

**Σενάριο 1.** Χαμηλή ζήτηση.

**Σενάριο 2.** Μέτρια ζήτηση.

**Σενάριο 3.** Υψηλή ζήτηση που μεταβάλλεται έντονα με την πάροδο του χρόνου, το δίκτυο στο σενάριο αυτό εμφανίζει σημαντικά προβλήματα συμφόρησης για περίπου 1 ώρα με τις ουρές σε μερικούς συνδέσμους να υπερχειλίζουν σε ανάντη συνδέσμους.

Για τα πρώτα δύο σενάρια ζήτησης, το σχήμα των τροχιών ζήτησης στο χρόνο είναι τραπεζοειδές εμφανίζοντας μια σταθερή ζήτηση την περίοδο αιχμής. Στο τρίτο σενάριο, η σταθερή ζήτηση την ώρα αιχμής μεταβάλλεται έντονα με την πάροδο του χρόνου, προκειμένου να επιτραπεί η διερεύνηση της εκάστοτε εφαρμοζόμενης στρατηγικής ελέγχου σε δυναμικά μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες. Τα σενάρια περιλαμβάνουν μια τελική φάση μηδενικής ζήτησης η οποία είναι αρκετή για την εκκένωση του δικτύου κατά την εφαρμογή όλων των στρατηγικών ελέγχου έτσι ώστε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να είναι συγκρίσιμα.

Η εφαρμογή των προς διερεύνηση στρατηγικών ελέγχου πραγματικού χρόνου (εκτός του προγράμματος σταθερής σηματοδότησης) στο μικροσκοπικό προσομοιωτή AIMSUN πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών AIMSUN API. Πιο συγκεκριμένα, στο τέλος κάθε περιόδου ελέγχου το AIMSUN API λαμβάνει μετρήσεις ποσοστού κατάληψης στους συνδέσμους του δικτύου και τις διοχετεύει στην εκάστοτε εφαρμοζόμενη στρατηγική ελέγχου. Μια φορά ανά περίοδο και με βάση τις παραληφθείσες μετρήσεις, το λογισμικό της εκάστοτε στρατηγικής ελέγχου (QPC ή TUC) υπολογίζει το νέο πρόγραμμα φωτεινής σηματοδότησης, το οποίο εν συνεχεία αποστέλλεται πίσω στον προσομοιωτή για εφαρμογή στο προσομοιωμένο δίκτυο, κ.ο.κ. Δεδομένου ότι η στρατηγική TUC διαθέτει επίσης ειδικά σχεδιασμένο αναδραστικό έλεγχο περιόδου σηματοδότησης και αναδραστικό έλεγχο χρονικής μετατόπισης, η συχνότητα υπολογισμού νέας περιόδου και χρονικών μετατοπίσεων πραγματοποιείται μία φορά κάθε 10 λεπτά (εφαρμογές της TUC σε προσομοίωση και στο πεδίο έδειξαν ότι δεν είναι σκόπιμο να γίνεται συχνότερα ο υπολογισμός τους).

Για τον μικροσκοπικό προσομοιωτή AIMSUN θεωρούμε βήμα προσομοίωσης  $t = 0.5 \text{ sec}$ . Σημειώνεται ότι το AIMSUN είναι ένας στοχαστικός προσομοιωτής και κάθε επανάληψη μιας προσομοίωσης του δικτύου χρησιμοποιεί διαφορετικό σπόρο για τις γεννήτριες τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιούν τα μοντέλα κυκλοφοριακής ροής του προσομοιωτή. Για το λόγο αυτό κάθε επανάληψη μιας προσομοίωσης μπορεί να δώσει διαφορετικά αποτελέσματα των κριτηρίων αξιολόγησης. Ως εκ τούτου, για την αποφυγή της στοχαστικότητας των αποτελεσμάτων για κάθε εξεταζόμενο σενάριο ζήτησης πραγματοποιούνται δέκα επαναλήψεις μιας προσομοίωσης και τελικά υπολογίζεται η μέση τιμή των κριτηρίων αξιολόγησης προκειμένου να συγκριθούν οι προς διερεύνηση στρατηγικές ελέγχου.

## 5.5 Στρατηγικές ελέγχου που εφαρμόστηκαν

Διερευνήθηκαν οι ακόλουθες παραλλαγές των τριών στρατηγικών ελέγχου:

Πίνακας 5.1: Κριτήρια αξιολόγησης για τις στρατηγικές ελέγχου FT, TUC-A, TUC-B, QPC.

| Scenario<br>Strategy | 1     |     |       | 2     |      |       | 3     |      |      |
|----------------------|-------|-----|-------|-------|------|-------|-------|------|------|
|                      | TDT   | TTS | MS    | TDT   | TTS  | MS    | TDT   | TTS  | MS   |
| FT                   | 13017 | 694 | 17.96 | 20010 | 2415 | 7.10  | 20290 | 3195 | 5.24 |
| TUC-A                | 13018 | 695 | 16.90 | 19056 | 2018 | 9.49  | 19523 | 2733 | 6.94 |
| TUC-B                | 13018 | 698 | 17.00 | 19803 | 1846 | 10.22 | 19004 | 2388 | 7.66 |
| QPC                  | 13017 | 696 | 16.95 | 20000 | 1770 | 10.43 | 19038 | 2411 | 7.61 |

- Στρατηγική σταθερής σηματοδότησης FT που βασίζεται σε ένα πλάνο σηματοδότησης βελτιστοποιημένο ξεχωριστά για το κάθε σενάριο ζήτησης.
- Στρατηγική ελέγχου TUC-A που βασίζεται στον πολυμεταβλητό ρυθμιστή ανάδρασης (3.8) με μη βελτιστοποιημένο διάνυσμα ονομαστικών τιμών  $\mathbf{g}^N$ .
- Στρατηγική ελέγχου TUC-B που βασίζεται στον πολυμεταβλητό ρυθμιστή ανάδρασης (3.8) με βελτιστοποιημένο διάνυσμα ονομαστικών τιμών  $\mathbf{g}^N$  για κάθε σενάριο ζήτησης.
- Στρατηγική ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα QPC ενσωματωμένη στο λογισμικό της TUC χωρίς πληροφορία για την εξέλιξη της ζήτησης  $\mathbf{d}$  στο χρόνο.

Η στρατηγική σταθερής σηματοδότησης FT εφαρμόστηκε με διάστημα ελέγχου  $T_c = 90$  sec ενώ οι στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου εφαρμόστηκαν με διάστημα ελέγχου  $T_c = C$  (όπου  $C$  η περίοδος σηματοδότησης που υπολογίζεται από τον αναδραστικό έλεγχο περιόδου σηματοδότησης της TUC), δηλαδή να λαμβάνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο στο τέλος κάθε περιόδου σηματοδότησης με βάση μετρήσεις του αριθμού οχημάτων  $x$  (ανάδραση) που παρέχονται από τον μικροσκοπικό προσομοιωτή. Η στρατηγική ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα QPC, δεδομένου ότι το λογισμικό της στρατηγικής TUC δεν διαθέτει μοντέλο εκτίμησης της μελλοντικής ζήτησης στους συνδέσμους του δικτύου, εφαρμόστηκε με μία σταθερή τιμή  $K = 10$  περιόδων σηματοδότησης ώστε τα οχήματα να μπορούν να κινηθούν μέσα στο δίκτυο. Σημειώνεται ότι η στρατηγική ελέγχου TUC-A δεν λαμβάνει υπόψη την ζήτηση στους συνδέσμους του δικτύου εκ του σχεδιασμού της, δηλαδή  $\mathbf{d}(k) = \mathbf{0}$ . Ωστόσο, η παραλλαγή TUC-B λαμβάνει έμμεσα υπόψη την ζήτηση στους συνδέσμους του δικτύου μέσω του βελτιστοποιημένου διανύσματος ονομαστικών τιμών  $\mathbf{g}^N$ .

## 5.6 Αξιολόγηση των στρατηγικών

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του σχεδίου ρύθμισης σταθερής σηματοδότησης FT, των παραλλαγών TUC-A και TUC-B, και της στρατηγικής τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου

Πίνακας 5.2: Σύγκριση των κριτηρίων αξιολόγησης.

| Scenario<br>Strategy | 1      |        |        | 2      |         |        | 3      |         |        |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|
|                      | TDT    | TTS    | MS     | TDT    | TTS     | MS     | TDT    | TTS     | MS     |
| TUC-B vs FT          | 0.01%  | 0.58%  | -5.35% | -1.03% | -23.56% | 43.94% | -6.34% | -25.26% | 46.18% |
| QPC vs FT            | 0.00%  | 0.29%  | -5.62% | -0.05% | -26.71% | 46.90% | -6.17% | -24.54% | 45.23% |
| QPC vs TUC-A         | -0.01% | 0.14%  | 0.30%  | 4.95%  | -12.29% | 9.91%  | -2.48% | -11.78% | 9.65%  |
| QPC vs TUC-B         | -0.01% | -0.29% | -0.29% | 0.99%  | -4.12%  | 2.05%  | 0.18%  | 0.96%   | -0.65% |

ορίζοντα QPC. Για το σενάριο χαμηλής ζήτησης 1, όλες οι στρατηγικές δείχνουν να έχουν παρόμοια αποτελεσματικότητα με το σχέδιο ρύθμισης σταθερής σηματοδότησης FT να δίνει την καλύτερη μέση ταχύτητα. Η υπεροχή αυτή του σχεδίου σταθερής σηματοδότησης FT βρέθηκε, μετά από προσεκτική επισκόπηση των στρατηγικών ελέγχου πραγματικού χρόνου, ότι οφείλεται στον αναδραστικό έλεγχο περιόδου σηματοδότησης της TUC ο οποίος δεν είναι πλήρως βελτιστοποιημένος. Για τα σενάρια ζήτησης 2 και 3, ο Πίνακας 5.1 δείχνει ότι και οι τρεις στρατηγικές πραγματικού χρόνου οδηγούν σε σημαντική βελτίωση των κριτηρίων αξιολόγησης συγκρινόμενες με το βελτιστοποιημένο πλάνο σταθερού χρόνου FT που καταδεικνύει την ανωτερότητα που μπορεί να έχουν κατάλληλα σχέδια ρύθμισης φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου ακόμη και στην περίπτωση που το πλάνο σταθερού χρόνου είναι βελτιστοποιημένα. Στην στρατηγική TUC-B η χρήση του βελτιστοποιημένου διανύσματος ονομαστικών τιμών  $g^N$  οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα από το TUC-A. Συγκρίνοντας την QPC με τις FT και TUC-A, η QPC δείχνει να είναι πάντα καλύτερη για τα σενάρια ζήτησης 2 και 3. Συγκρίνοντας την QPC με την TUC-B, η QPC δείχνει να είναι ελαφρώς καλύτερη για το σενάριο ζήτησης 2 και ελαφρώς χειρότερη για το σενάριο ζήτησης 3. Αυτό οφείλεται στο βελτιστοποιημένο διάνυσμα ονομαστικών τιμών  $g^N$  που χρησιμοποιεί η TUC-B για κάθε σενάριο ζήτησης, σε αντίθεση με την στρατηγική QPC η οποία δεν έχει πληροφορία για την εξέλιξη της ζήτησης στο χρόνο.

Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει τις ποσοστιαίες μεταβολές των τριών κριτηρίων αξιολόγησης για τις τέσσερις περιπτώσεις ελέγχου σηματοδότησης. Οι ποσοστιαίες μεταβολές TUC-B vs. FT και QPC vs. FT δείχνουν την υπεροχή του ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης σε πραγματικό χρόνο ως προς το βελτιστοποιημένο πλάνο σταθερού χρόνου. Οι ποσοστιαίες μεταβολές QPC vs. TUC-A δείχνουν την βελτίωση που επιτεύχθηκε από την ενσωμάτωση στο πρόβλημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης των περιορισμών (3.1), (3.2), (3.3) και τον ορισμό χρόνων πρασίνου (ανεξάρτητων μεταβλητών) για κάθε σύνδεσμο  $G_z$  (περιορισμός (3.10)). Τέλος, οι ποσοστιαίες μεταβολές QPC vs. TUC-B δείχνουν την επιτευχθείσα βελτίωση (ή χειροτέρευση) της προσέγγισης QPC στην περίπτωση μη χρήσης πρόγνωσης της ζήτησης στο ορίζοντα βελτιστοποίησης, δεδομένου ότι το λογισμικό της στρατηγικής TUC στο οποίο ενσωματώθηκε η στρατηγική QPC δεν διαθέτει μοντέλο εκτίμησης της μελλοντικής ζήτησης

στους συνδέσμους του δικτύου.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης είναι απολύτως σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μακροσκοπικής προσομοίωσης που είδαμε στο Κεφάλαιο 4 και καταδεικνύουν ότι στρατηγικές έλεγχου πραγματικού χρόνου οι οποίες σχεδιάζονται κατάλληλα ώστε να είναι αποτελεσματικές σε συνθήκες κυκλοφορίας κορεσμού μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις επιδόσεις του δικτύου και να επιβραδύνουν ή αποφύγουν τις αρνητικές επιπτώσεις των υπερχειλίσεων στους συνδέσμους και του μερικού μπλοκαρίσματος του δικτύου.

### 5.7 Ανάλυση απαιτήσεων υλοποίησης της στρατηγικής TUC σε αστικά οδικά δίκτυα

Στο παρόν κεφάλαιο, η προτεινόμενη μεθοδολογία τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα ενσωματώθηκε στο λογισμικό που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης για την εφαρμογή της στρατηγικής TUC σε πραγματικό χρόνο στο πεδίο. Το λογισμικό υλοποίησης της στρατηγικής TUC έχει αναπτυχθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η άμεση υλοποίηση της στρατηγικής χωρίς επιπλέον μετατροπές σε οποιοδήποτε κέντρο ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης το οποίο διαθέτει την δυνατότητα κεντρικού ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. Στόχος του παρόντος τμήματος είναι η ανάλυση των απαιτήσεων υλοποίησης εφαρμογής της στρατηγικής TUC σε οποιοδήποτε αστικό οδικό δίκτυο. Συνολικά, μετά και την ενσωμάτωση της μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα, το λογισμικό της στρατηγικής TUC αποτελείται από 4 τμήματα (α) έλεγχος ποσοστού πρασίνου φάσεων μέσω του αναδραστικού κανόνα ελέγχου LQ, (β) έλεγχος ποσοστού πρασίνου φάσεων μέσω της μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα QPC, (γ) έλεγχος περιόδου σηματοδότησης και (δ) έλεγχος χρονικής μετατόπισης.

Τα στοιχεία υλοποίησης της στρατηγικής TUC είναι τα ακόλουθα:

- Ένας φωρατής για κάθε λωρίδα κάθε συνδέσμου των κόμβων του αστικού δικτύου. Η βέλτιστη θέση των φωρατών είναι περίπου στο μέσον του συνδέσμου. Οι φωρατές μετρούν ροή και κατάληψη.
- Ένας τοπικός ρυθμιστής ανά κόμβο σηματοδότησης για την εφαρμογή των πλάνων φωτεινής σηματοδότησης που υπολογίζονται από το λογισμικό της στρατηγικής TUC.

- Κατάλληλος εξοπλισμός επικοινωνίας κάθε τοπικού ρυθμιστή με τους φωρατές του αντίστοιχου κόμβου μέσω του οποίου θα αποστέλλονται οι μετρήσεις κατάληψης και ροής όλων των φωρατών του κόμβου στον τοπικό ρυθμιστή.
- Ένας κεντρικός υπολογιστής (PC) στον οποίο θα εγκατασταθεί το λογισμικό της TUC.
- Κατάλληλος εξοπλισμός αμφίδρομης επικοινωνίας του κεντρικού υπολογιστή (ΚΥ) με κάθε τοπικό ρυθμιστή.
- Ο ΚΥ διαθέτει κατάλληλο λογισμικό διεπικοινωνίας χρήστη-υπολογιστή (Graphical User Interface - GUI) που επιτρέπει στον χρήστη του συστήματος να επιβλέπει σε πραγματικό χρόνο τις αποφάσεις του λογισμικού TUC και την τρέχουσα κατάσταση στους κόμβους (μετρήσεις φωρατών και τρέχουσα κατάσταση φωτεινής σηματοδότησης) καθώς και να μεταβάλλει τις τιμές των παραμέτρων της TUC. Σαν βάση του λογισμικού διεπικοινωνίας χρήστη-υπολογιστή μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υπάρχον λογισμικό διεπικοινωνίας χρήστη-υπολογιστή το οποίο αναπτύχθηκε από την SIEMENS για την εφαρμογή της στρατηγικής TUC στο αστικό οδικό δίκτυο των Χανίων.

Η λειτουργία σε πραγματικό χρόνο της περιγραφείσας διάταξης έχει ως εξής:

- Στο τέλος της περιόδου σηματοδότησης του αντίστοιχου κόμβου, κάθε τοπικός ρυθμιστής υπολογίζει τα ακόλουθα μεγέθη για κάθε φωρατή που του αντιστοιχεί:
  - Κατάληψη (σε επί τοις εκατό ποσοστό).
  - Κυκλοφοριακή ροή (σε αριθμό οχημάτων ανά ώρα).

Οι μετρήσεις αυτές αφορούν όλη την αντίστοιχη περίοδο σηματοδότησης και αποστέλλονται (μέσω του αντίστοιχου συστήματος επικοινωνίας) στον ΚΥ. Έχουμε επομένως μια και μόνη αποστολή δεδομένων από κάθε τοπικό ρυθμιστή προς τον ΚΥ ανά περίοδο. Σημειώνεται ότι η χρονική στιγμή αποστολής είναι κατά κανόνα διαφορετική για κάθε τοπικό ρυθμιστή, αφού αντίστοιχα διαφορετικό (λόγω χρονικής μετατόπισης) είναι το τέλος της περιόδου κάθε κόμβου. Σε περίπτωση βλάβης κάποιου φωρατή, αποστέλλεται, π.χ., μια αρνητική τιμή.

- Μια φορά ανά περίοδο και με βάση τις πιο πρόσφατες παραληφθείσες μετρήσεις, το λογισμικό υλοποίησης της TUC υπολογίζει το νέο πρόγραμμα φωτεινής σηματοδότησης κάθε κόμβου, το οποίο αποτελείται από:

- Την νέα διάρκεια περιόδου σηματοδότησης για κάθε ελεγχόμενο κόμβο (σε δευτερόλεπτα) μέσω του τμήματος (γ) της στρατηγικής TUC. Η διάρκεια αυτή μπορεί να λαμβάνει όλες τις δυνατές τιμές εντός προκαθορισμένων ελάχιστων και μέγιστων ορίων.
- Τους νέους χρόνους πράσινου (σε δευτερόλεπτα) κάθε φάσης σηματοδότησης κάθε ελεγχόμενου κόμβου, οι οποίοι μπορούν να λαμβάνουν όλες τις δυνατές τιμές εντός προκαθορισμένων ελάχιστων και μέγιστων ορίων. Οι νέοι χρόνοι πράσινου μπορούν να προσδιορισθούν είτε από το τμήμα (α) του αναδραστικού κανόνα ελέγχου LQ, είτε από το τμήμα (β) της μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα QPC, της στρατηγικής TUC

Σημειώνεται ότι, σε περίπτωση βλάβης μεμονωμένων φωρατών, το λογισμικό της TUC εκτιμά αυτομάτως τις τιμές μετρήσεων με κατάλληλο τρόπο, ανάλογα με την έκταση των βλαβών.

- Τα νέα προγράμματα φωτεινής σηματοδότησης αποστέλλονται (μέσω του αντίστοιχου συστήματος επικοινωνίας) από τον ΚΥ στους τοπικούς ρυθμιστές, έχουμε δηλαδή μια και μόνη αποστολή εντολών από τον ΚΥ προς κάθε τοπικό ρυθμιστή ανά περίοδο.
- Οι τοπικοί ρυθμιστές παραλαμβάνουν τα νέα προγράμματα φωτεινής σηματοδότησης και τα εφαρμόζουν μόλις τελειώσει το τρέχον πρόγραμμα φωτεινής σηματοδότησης τους. Σε περίπτωση καθυστερημένης παραλαβής του νέου προγράμματος φωτεινής σηματοδότησης από κάποιον τοπικό ρυθμιστή, εφαρμόζεται πάλι το προηγούμενο πρόγραμμα φωτεινής σηματοδότησης στον αντίστοιχο κόμβο. Σε περίπτωση πλήρους απώλειας επικοινωνίας μεταξύ κάποιου τοπικού ρυθμιστή και του ΚΥ, ο τοπικός ρυθμιστής εφαρμόζει ένα προκαθορισμένο (αποθηκευμένο) πρόγραμμα φωτεινής σηματοδότησης.

Η στρατηγική TUC υπολογίζει ανά περίοδο τις νέες διάρκειες πρασίνων (τμήμα (α) ή (β)). Αντιθέτως, η συχνότητα υπολογισμού νέας περιόδου και χρονικών μετατοπίσεων (τμήματα (γ), (δ)) δεν είναι σκόπιμο να υπερβαίνει κάποια όρια, π.χ. μια φορά ανά 10 λεπτά. Η αλλαγή χρονικής μετατόπισης λαμβάνει χώρα μέσω εφαρμογής σε κάθε κόμβο μιας αντίστοιχης μεταβατικής περιόδου έτσι ώστε να εξασφαλισθεί η μετάβαση από την προηγούμενη χρονική μετατόπιση στην νέα. Σε περίπτωση όμως απώλειας συγχρονισμού μεταξύ ΚΥ και τοπικών ρυθμιστών (που μπορεί να επέλθει για διάφορους λόγους), οι μεταβατικές περίοδοι που υπολογίζει η TUC μπορεί να μην οδηγήσουν στις επιθυμητές χρονικές μετατοπίσεις στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό, ο ΚΥ θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να ελέγχει (εκτός λογισμικού της στρατηγικής TUC) σε κάθε περίοδο ότι οι χρονικές

μετατοπίσεις που εφαρμόζονται στο πεδίο από τους τοπικούς ρυθμιστές αντιστοιχούν στις τιμές που υπολογίσθηκαν από την στρατηγική TUC.

## Κεφάλαιο 6

### Συμπεράσματα

#### 6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Οι οδικές μεταφορές αντιμετωπίζουν ολοένα και αυξανόμενα προβλήματα καθώς η κινητικότητα των προσώπων και αγαθών ακολουθεί σταθερά αυξητική πορεία. Το αποτέλεσμα είναι κυκλοφοριακή συμφόρηση να παρουσιάζεται πλέον όχι μόνο στις μεγάλες πόλεις αλλά και στις μικρότερες με επακόλουθα καθυστερήσεις, μειωμένη οδική ασφάλεια, αυξημένη κατανάλωση καυσίμων και σοβαρή ατμοσφαιρική ρύπανση. Η συνεχής επέκταση της υπάρχουσας υποδομής δεν μπορεί πλέον να εξαλείψει πλήρως την κυκλοφοριακή συμφόρηση και τις αρνητικές συνέπειές της για λόγους οικονομικούς, οικολογικούς ή και απλά έλλειψης χώρου. Μια εναλλακτική και εφικτή προσέγγιση προς την επίλυση των κυκλοφοριακών προβλημάτων στα αστικά δίκτυα, η οποία δέχτηκε 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. Από πλευράς ελέγχου, αυτή η προσέγγιση συνεπάγεται την ανάπτυξη και χρήση συστημάτων ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου τα οποία θα έχουν τη δυνατότητα να ανταποκρίνονται αυτομάτως στις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες.

Τα συστήματα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου αποτελούν έναν επιστημονικό χώρο με μακρόχρονη και πλούσια ερευνητική δραστηριότητα. Σήμερα όλες σχεδόν οι μεγάλες πόλεις των προηγμένων χωρών διαθέτουν συστήματα ελεγχόμενης φωτεινής σηματοδότησης, στα οποία οι μετρήσεις πραγματικού χρόνου (ενδείξεις φωρατών) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο φωτεινής σηματοδότησης σε πραγματικό χρόνο. Παρά το γεγονός ότι η εφαρμογή των συστημάτων αυτών βελτίωσε σημαντικά τις κυκλοφοριακές συνθήκες σε σχέση με τα συστήματα σταθερού χρόνου στα οποία ο έλεγχος φωτεινής σηματοδότησης βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα και όχι σε μετρήσεις

πραγματικού χρόνου, είναι σήμερα κοινώς αποδεκτό (όχι μόνο από τους χρήστες των συστημάτων αυτών αλλά και από τους ίδιους τους σχεδιαστές/κατασκευαστές τους) ότι τα υπάρχοντα συστήματα δεν μπορούν να ανταποκριθούν αποτελεσματικά στις ολοένα αυξανόμενες ανάγκες κυκλοφοριακής ζήτησης.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης η στρατηγική TUC, μια καινοτόμος και πρωτοποριακή μεθοδολογία ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου, που μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού. Η στρατηγική TUC βασίζεται σε ρεαλιστικά αλλά ταυτοχρόνως απλά (από την άποψη υπολογιστικών απαιτήσεων) μοντέλα κυκλοφοριακής ροής, τα οποία μοντελοποιούν αποτελεσματικά την κυκλοφοριακή ροή τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού. Ο σχεδιασμός της στρατηγικής TUC βασίζεται σε μεθόδους βέλτιστου ελέγχου γραμμικών συστημάτων, και έχει σαν αποτέλεσμα η στρατηγική TUC να «κληρονομεί» τις ιδιότητες ευρωστίας και αξιοπιστίας οι οποίες είναι «ενσωματωμένες» στις προηγμένες αυτές μεθόδους αυτόματου ελέγχου. Για την ανάπτυξη της απαιτείται ο εκ των προτέρων σχεδιασμός και εν συνεχεία η υλοποίηση σε πραγματικό χρόνο ενός απλού αναδραστικού κανόνα ελέγχου για τον υπολογισμό της σχετικής διάρκειας των φάσεων στους κόμβους του δικτύου. Ωστόσο, από εφαρμογές της στρατηγικής TUC τόσο σε επίπεδο – μακροσκοπικής ή μικροσκοπικής – προσομοίωσης όσο και σε επίπεδο υλοποίησης στο πεδίο, διαπιστώθηκε ότι παρά τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα υπάρχουν ορισμένα προβλήματα τα οποία οφείλονται (α) στο γεγονός ότι ο αναδραστικός κανόνας ελέγχου της TUC που προκύπτει από την εφαρμογή μεθόδων γραμμικού τετραγωνικού βέλτιστου ελέγχου δεν λαμβάνει υπόψη όλους τους περιορισμούς του προβλήματος κυκλοφορίας (εφαρμόζονται αυτοί εκ των υστέρων κατά την εφαρμογή του κανόνα ελέγχου σε πραγματικό χρόνο) και (β) στο μαθηματικό πρότυπο της TUC το οποίο βασίζεται στην παραδοχή ότι το αποτελεσματικό πράσινο των φάσεων ταυτίζεται με το πραγματικό πράσινο της φάσης, ή με άλλα λόγια, ότι όσο διαρκεί το πράσινο της φάσης ενός συνδέσμου υπάρχουν πάντα οχήματα εντός του συνδέσμου τα οποία εξέρχονται απρόσκοπτα του συνδέσμου.

Στόχος της παρούσας διατριβής ήταν η αντιμετώπιση των δύο προαναφερθέντων προβλημάτων της στρατηγικής TUC μέσω της ανάπτυξης μιας νέας στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης, η οποία κάνοντας χρήση τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα θα αντικαταστήσει τις απλούστερες μεθόδους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί η TUC. Η βασική λογική ανάπτυξης της νέας στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης είναι η διατύπωση του

προβλήματος ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης ως προβλήματος περιορισμένου βέλτιστου ελέγχου του οποίου το βασικό μοντέλο της κυκλοφορίας είναι παρόμοιο με αυτό της TUC, αλλά λαμβάνονται ρητώς και εκ των προτέρων υπόψη όλοι οι περιορισμοί του αντίστοιχου προβλήματος κυκλοφορίας. Για το σκοπό αυτό δύο διαφορετικές μεθοδολογίες διερευνήθηκαν:

- Με κατάλληλη αναπροσαρμογή του βασικού μοντέλου κυκλοφορίας της στρατηγικής TUC, οι περιορισμοί του προβλήματος κυκλοφορίας μοντελοποιήθηκαν μαθηματικά σαν γραμμικοί περιορισμοί. Δεδομένου του γεγονότος ότι το βασικό μοντέλο της κυκλοφορίας είναι και αυτό γραμμικό, το πρόβλημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης μοντελοποιήθηκε σαν ένα πρόβλημα τετραγωνικού ελέγχου υπό γραμμικούς περιορισμούς. Με βάση την μεθοδολογία αυτή, το παραπάνω πρόβλημα επιλύεται σε κάθε περίοδο για ένα μεγάλο χρονικό ορίζοντα θεωρώντας ότι η τρέχουσα περίοδος είναι η αρχική και οι χρόνοι πράσινου που εφαρμόζονται είναι αυτοί που αντιστοιχούν στις τιμές της πρώτης χρονικής περιόδου βελτιστοποίησης.
- Στα πλαίσια της δεύτερης μεθοδολογίας, το πρόβλημα ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης αντιμετωπίστηκε σαν ένα πρόβλημα μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου. Σύμφωνα με την μεθοδολογία αυτή η εισερχόμενη και εξερχόμενη στους κόμβους ροή των οχημάτων, μοντελοποιήθηκε ως ένα μη γραμμικό φαινόμενο ενώ ως διάστημα διακριτού χρόνου δεν θεωρείται η περίοδος φωτεινής σηματοδότησης – όπως συμβαίνει στην πρώτη μεθοδολογία – αλλά μικρότερα χρονικά διαστήματα (π.χ., 5 δευτερόλεπτα) της περιόδου. Ως αποτέλεσμα, το μαθηματικό μοντέλο της μεθοδολογίας αυτής μοντελοποιεί ακριβέστερα την κυκλοφοριακή ροή αστικών οδικών δικτύων σε σχέση με αυτό της πρώτης μεθοδολογίας.

Η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας και της δυνατότητας εφαρμογής σε πραγματικό χρόνο των προτεινόμενων δύο μεθοδολογιών τετραγωνικού προγραμματισμού και μη γραμμικού προγραμματισμού πραγματοποιήθηκε μέσω σύγκρισης τους, με βελτιστοποιημένα προγράμματα σταθερού χρόνου φωτεινής σηματοδότησης και τον αναδραστικό κανόνα ελέγχου της στρατηγικής TUC. Για την σύγκριση και αξιολόγηση των δύο μεθοδολογιών, χρησιμοποιήθηκαν καθιερωμένοι στον τομέα του ελέγχου κυκλοφορίας δείκτες σύγκρισης, όπως συνολικοί χρόνοι διαδρομής εντός του αστικού δικτύου καθώς και ποιοτικά μέτρα σύγκρισης όπως (α) στιγμιότυπα από την προσομοίωση σε περιοχές του προς εξέταση δικτύου τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, (β) ο συσσωρευμένος αριθμός υπερφορτωμένων συνδέσμων που αντικατοπτρίζει τον κίνδυνο υπερφόρτωσης των συνδέσμων και του μπλοκαρίσματος του δικτύου και (γ) το θεμελιώδες διάγραμμα αστικών δικτύων. Για την ανάλυση

των αλγορίθμων ελέγχου ανοικτού βρόχου χρησιμοποιήθηκε ένας μακροσκοπικός προσομοιωτής που βασίζεται σε ένα αρκετά ακριβές μη γραμμικό μοντέλο κυκλοφοριακής ροής. Κάνοντας χρήση του προσομοιωτή αυτού, μοντελοποιήθηκε το αστικό δίκτυο των Χανίων και έγινε σύγκριση της συμπεριφοράς του προσομοιωμένου δικτύου για διαφορά ρεαλιστικά σενάρια κυκλοφοριακής ζήτησης.

Κατά την διερεύνηση των δύο προτεινόμενων στρατηγικών ελέγχου ανοικτού βρόχου (τετραγωνικού και μη γραμμικού προγραμματισμού) σε σύγκριση με την στρατηγική ελέγχου κλειστού βρόχου TUC (γραμμικός-τετραγωνικός έλεγχος) βρέθηκε ότι η μεθοδολογία του μη γραμμικού προγραμματισμού υπερέχει των άλλων προσεγγίσεων όσο αφορά το κριτήριο του συνολικού χρόνου διαδρομής, ενώ η μεθοδολογία του τετραγωνικού προγραμματισμού υπερέχει των άλλων προσεγγίσεων όσο αφορά το κριτήριο της εξισορρόπησης ουρών στους συνδέσμους του δικτύου. Η υπεροχή της μεθοδολογίας του μη γραμμικού προγραμματισμού είναι συνέπεια της ακρίβειας του μη γραμμικού μοντέλου που χρησιμοποιεί, εν συγκρίσει με τα γραμμικά μοντέλα των δύο άλλων προσεγγίσεων. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη ότι η μεθοδολογία του τετραγωνικού προγραμματισμού χρειάζεται πολύ λιγότερο υπολογιστικό φόρτο από την μεθοδολογία του μη γραμμικού προγραμματισμού, η μεθοδολογία του τετραγωνικού προγραμματισμού μπορεί να θεωρηθεί αρκούντως αποτελεσματική προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης αστικών δικτύων σε πραγματικό χρόνο. Ως εκ τούτου στις διερευνήσεις που ακολούθησαν η προσέγγιση τετραγωνικού προγραμματισμού ενσωματωμένη σε κυλιόμενο ορίζοντα συγκρίθηκε με των αναδραστικό κανόνα ελέγχου της στρατηγικής TUC καθώς και με σηματοδότηση σταθερού χρόνου. Σημειώνεται επίσης ότι σε αντίθεση με τον αναδραστικό κανόνα της στρατηγικής TUC, η εφαρμογή της μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού σε πραγματικό χρόνο δεν βασίζεται στη διαθεσιμότητα ονομαστικών τιμών για τη σχετική διάρκεια των χρόνων πράσινου των φάσεων σηματοδότησης των ελεγχόμενων αστικών κόμβων και ως εκ τούτου απαιτεί λιγότερη εργασία για την «βελτιστοποίηση» των παραμέτρων ελέγχου του συστήματος ελέγχου.

Σε επίπεδο κλειστού βρόχου, έγινε διερεύνηση της αποτελεσματικότητας και της δυνατότητας εφαρμογής σε πραγματικό χρόνο της μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα (με ή χωρίς γνώση της ζήτησης στους συνδέσμους του δικτύου) μέσω σύγκρισης της, με βελτιστοποιημένα προγράμματα σταθερού χρόνου φωτεινής σηματοδότησης και δύο παραλλαγές του αναδραστικού κανόνα ελέγχου της στρατηγικής TUC (με ή χωρίς βελτιστοποιημένο διάνυσμα ονομαστικών τιμών) για διαφορά ρεαλιστικά σενάρια κυκλοφοριακής ζήτησης στο προσομοιωμένο αστικό δίκτυο των Χανίων. Οι διερευνήσεις αυτές έδειξαν ότι:

- Οι δύο παραλλαγές του αναδραστικού κανόνα ελέγχου της στρατηγικής TUC οδηγούν σε σημαντική βελτίωση των κριτηρίων αξιολόγησης συγκρινόμενες με το βελτιστοποιημένο πλάνο σηματοδότησης σταθερού χρόνου. Αυτή η απόδοση των παραλλαγών της στρατηγικής TUC καταδεικνύει την ανωτερότητα που μπορεί να έχουν κατάλληλα σχέδια ρύθμισης φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου ακόμη και στην περίπτωση που το πλάνο σταθερού χρόνου είναι βελτιστοποιημένα.
- Η παραλλαγή της μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα χωρίς γνώση της ζήτησης στους συνδέσμους του δικτύου δείχνει να υπερέχει του βελτιστοποιημένου πλάνου σηματοδότησης σταθερού χρόνου καθώς και του αναδραστικού κανόνα ελέγχου της στρατηγικής TUC όταν αυτή χρησιμοποιεί ένα μη βελτιστοποιημένο διάνυσμα ονομαστικών τιμών. Ο αναδραστικός κανόνας ελέγχου της στρατηγικής TUC όταν χρησιμοποιεί ένα βελτιστοποιημένο διάνυσμα ονομαστικών τιμών δείχνει να υπερέχει της μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα χωρίς γνώση της ζήτησης στους συνδέσμους του δικτύου, το οποίο οφείλεται στο βελτιστοποιημένο διάνυσμα ονομαστικών τιμών της πρώτης σε αντίθεση με την πλήρη έλλειψη πληροφορίας για την ζήτηση στο μέλλον της δεύτερης η οποία επηρεάζει μακροπρόθεσμες αποφάσεις.
- Η παραλλαγή της μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα με πλήρη γνώση της ζήτησης στους συνδέσμους του δικτύου δείχνει να υπερέχει του βελτιστοποιημένου πλάνου σηματοδότησης σταθερού χρόνου καθώς και του αναδραστικού κανόνα ελέγχου της στρατηγικής TUC (με ή χωρίς βελτιστοποιημένο διάνυσμα ονομαστικών τιμών) για όλα τα σενάρια ζήτησης, αφού εμπεριέχει όλη την απαραίτητη πληροφορία κατά την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή πλήρη γνώση της ζήτησης στο ορίζοντα βελτιστοποίησης και ενσωμάτωση όλων των περιορισμών του προβλήματος ρύθμισης φωτεινής σηματοδότησης.

Όσο αφορά το κριτήριο του αριθμού των υπερφορτωμένων συνδέσμων (και ως εκ τούτου του κινδύνου κυκλοφοριακού κορεσμού του δικτύου) είδαμε τη σαφή υπεροχή που έχουν κατάλληλα σχεδιαζόμενες στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου σε σχέση με (ακόμα και βελτιστοποιημένες) στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου για τη διαχείριση του κυκλοφοριακού κορεσμού σε αστικά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα μέσω του αριθμού των υπερφορτωμένων συνδέσμων δείξαμε την βελτίωση που επιτυγχάνει η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου τετραγωνικού προγραμματισμού κυ-

λιόμενου ορίζοντα σε σχέση με τον αναδραστικό κανόνα ελέγχου της στρατηγικής TUC και την αξία της πληροφορίας από την εκτίμηση της ζήτησης στους συνδέσμους του ελεγχόμενου δικτύου.

Ένα άλλο εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των στρατηγικών ελέγχου πραγματικού χρόνου καθώς και των προγραμμάτων σηματοδότησης σταθερού χρόνου ήταν το θεμελιώδες διάγραμμα του αστικού δικτύου που προκύπτει από την εφαρμογή διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου. Καταρχάς, τα θεμελιώδη διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 (βλέπε Σχήμα 4.8) επιβεβαιώνουν την ύπαρξη ενός θεμελιώδους διαγράμματος για αστικά οδικά δίκτυα, το σχήμα του οποίου φαίνεται να εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη στρατηγική ελέγχου. Όσον αφορά την περιοχή A του θεμελιώδους διαγράμματος, η κλίση (μέση ταχύτητα) είναι μεγαλύτερη για τις στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου, ενώ είναι λίγο μικρότερη για τα σχέδια ρύθμισης σηματοδότησης σταθερού χρόνου τα οποία δεν είναι πλήρως προσαρμοσμένα στα σενάρια ζήτησης. Για την περιοχή B, είδαμε ότι το δίκτυο έχει χαμηλότερη ικανότητα ροής όταν εφαρμόζονται τα σχέδια ρύθμισης σηματοδότησης σταθερού χρόνου και υψηλότερη ικανότητα ροής κατά την εφαρμογή των στρατηγικών ελέγχου πραγματικού χρόνου. Σημειώνεται ότι, λόγω της απουσίας ελέγχου της περιόδου σηματοδότησης και της χρονικής μετατόπισης σε πραγματικό χρόνο, αυτή η αύξηση της ικανότητας της ροής του δικτύου οφείλεται κυρίως στην μικρότερη υπερχειλίση των ουρών στους συνδέσμους του δικτύου, δηλαδή στη λιγότερη σπατάλη χρόνων πρασίνου λόγω υπερφόρτωσης κατάντη συνδέσμων. Τέλος, η χαμηλότερη ικανότητα ροής του δικτύου για τα σχέδια ρύθμισης σηματοδότησης σταθερού χρόνου οδηγεί στον σχηματισμό της περιοχής κορεσμού C. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα των θεμελιωδών διαγραμμάτων δείχνουν ότι στρατηγικές έλεγχου πραγματικού χρόνου οι οποίες σχεδιάζονται κατάλληλα ώστε να είναι αποτελεσματικές σε συνθήκες κυκλοφορίας κορεσμού μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις επιδόσεις του δικτύου και να επιβραδύνουν ή αποφύγουν τις αρνητικές επιπτώσεις των υπερχειλίσεων στους συνδέσμους και του μερικού μπλοκαρίσματος του δικτύου.

Όσο αφορά την ευαισθησία των αποφάσεων ελέγχου στην περίπτωση ανακρίβειας κυκλοφοριακών παραμέτρων που επιδρούν στο εκάστοτε χρησιμοποιούμενο μαθηματικό μοντέλο αποθήκευσης-και-προώθησης, είδαμε ότι χάριν της ανάδρασης είναι μικρή η ευαισθησία του ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης σε πραγματικό χρόνο σε ανακρίβειες των ποσοστών στροφής. Πιο συγκεκριμένα

- Ο πολυμεταβλητός ρυθμιστής (3.8) περιέχει το πίνακα ανάδρασης  $\mathbf{L}$  τα στοιχεία του οποίου εξαρτώνται από τους πίνακες  $\mathbf{B}$  από την (3.6) και  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{R}$  από την (3.7). Τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{B}$  εξαρτώνται από τα ποσοστά στροφής  $t_{w,z}$ . Στον αναδραστικό κανόνα ελέγχου της

στρατηγικής TUC ο πίνακας  $\mathbf{B}$  είναι σταθερός και συνεπώς τα ποσοστά στροφής πρέπει να προεπιλεγούν και μπορεί να αποκλίνουν από τις πραγματικές τους τιμές. Αν τα πραγματικά ποσοστά στροφής είναι πολύ διαφορετικά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές της ημέρας (π.χ. για τις πρωινές ώρες αιχμής συγκρινόμενα με τις απογευματινές ώρες αιχμής) τότε θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί πίνακες ανάδρασης  $\mathbf{L}$ . Ωστόσο οι διερευνήσεις στην παρούσα διατριβή έδειξαν ότι αυτό είναι αναγκαίο μόνο στην περίπτωση που οι διαφορές είναι πολύ ισχυρές.

- Η μεθοδολογία τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα χρησιμοποιεί το γραμμικό μοντέλο (3.11) με τον πίνακα  $\bar{\mathbf{B}}$  επίσης να εξαρτάται από τα ποσοστά στροφής. Ωστόσο, επειδή το μοντέλο χρησιμοποιείται σε πραγματικό χρόνο (σύμφωνα με την ενότητα 3.8), ο πίνακας  $\bar{\mathbf{B}}$  μπορεί να μεταβάλλεται με τον χρόνο και ακόμη μπορεί να ανανεώνεται από χρονική στιγμή σε χρονική στιγμή με βάση εκτιμήσεις των ποσοστών στροφής σε πραγματικό χρόνο. Και στην περίπτωση αυτή, οι διερευνήσεις στην παρούσα διατριβή έδειξαν ότι εκτιμήσεις των ποσοστών στροφής σε πραγματικό χρόνο θα ήταν αναγκαίες μόνο στην περίπτωση που οι αντίστοιχες διαφορές είναι πολύ ισχυρές.
- Γενικά είδαμε ότι, ο αναδραστικός κανόνας ελέγχου της στρατηγικής TUC δείχνει να είναι λιγότερο ευαίσθητος από την μεθοδολογία τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα σε ανακρίβειες των παραμέτρων κυκλοφορίας. Αυτό οφείλεται στην λύση κλειστής μορφής (αναλυτική) του αναδραστικού κανόνα ελέγχου (3.8) σε αντίθεση με την άμεση ανάδραση του σχήματος κυλιόμενου ορίζοντα.

Τέλος, η προτεινόμενη μεθοδολογία τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα ενσωματώθηκε στο λογισμικό που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης για την εφαρμογή της στρατηγικής TUC σε πραγματικό χρόνο στο πεδίο. Το λογισμικό υλοποίησης της στρατηγικής TUC έχει αναπτυχθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η άμεση υλοποίηση της στρατηγικής χωρίς επιπλέον μετατροπές σε οποιοδήποτε κέντρο ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης το οποίο διαθέτει την δυνατότητα κεντρικού ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. Για την ανάλυση της προτεινόμενης μεθοδολογίας τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα, ενσωματωμένη στο λογισμικό υλοποίησης της στρατηγικής TUC, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης μικροσκοπικής κυκλοφορίας AIMSUN. Κάνοντας χρήση του προγράμματος αυτού, μοντελοποιήθηκε το αστικό δίκτυο των Χανίων και έγινε σύγκριση της συμπεριφοράς του προσο-

μοιωμένου αστικού δικτύου των Χανίων για διαφορά ρεαλιστικά σενάρια κυκλοφοριακής ζήτησης όταν εφαρμόζονται οι παρακάτω στρατηγικές ελέγχου: (α) στρατηγική ελέγχου που βασίζεται σε πρόγραμμα σταθερής σηματοδότησης (βελτιστοποιημένο κάθε φορά για τις συνθήκες κυκλοφοριακής ζήτησης), (β) στρατηγική ελέγχου TUC, (γ) στρατηγική ελέγχου που βασίζεται στην προτεινόμενη μεθοδολογία τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα. Για την σύγκριση των στρατηγικών χρησιμοποιήθηκαν καθιερωμένοι στον τομέα του ελέγχου κυκλοφορίας δείκτες σύγκρισης, όπως, μέσες ταχύτητες, συνολικοί χρόνοι διαδρομής και συνολικοί χρόνοι αναμονής εντός του αστικού δικτύου.

Από την διερεύνηση των στρατηγικών ελέγχου μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης βρέθηκε ότι οι στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου οδηγούν σε σημαντική βελτίωση των κριτηρίων αξιολόγησης συγκρινόμενες με το βελτιστοποιημένο πλάνο σταθερού χρόνου που καταδεικνύει την ανωτερότητα που μπορεί να έχουν κατάλληλα σχέδια ρύθμισης φωτεινής σηματοδότησης πραγματικού χρόνου ακόμη και στην περίπτωση που το πλάνο σταθερού χρόνου είναι βελτιστοποιημένα. Επίσης, βρέθηκε ότι η προτεινόμενη στρατηγική τετραγωνικού προγραμματισμού σε κυλιόμενο ορίζοντα (χωρίς πληροφορία για την εξέλιξη της ζήτησης στους συνδέσμους του δικτύου) δείχνει να είναι ελαφρώς καλύτερη ή ισάξια με την στρατηγική ελέγχου TUC που βασίζεται στον πολυμεταβλητό ρυθμιστή ανάδρασης με βελτιστοποιημένο διάνυσμα ονομαστικών τιμών.

Εν κατακλείδι, το βασικό αποτέλεσμα της διατριβής είναι μια καινοτόμος μεθοδολογία ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των κυκλοφοριακών συνθηκών και κυρίως συνθηκών κορεσμού. Βασίζόμενοι: (α) στο γεγονός ότι η αναπτυχθείσα από το Εργαστήριο Δυναμικών Συστημάτων και Προσομοίωσης στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης TUC αποδείχθηκε, κατόπιν εφαρμογής και αξιολόγησης στο πεδίο, να υπερτερεί – ή να είναι ισάξια – των πιο προηγμένων διεθνώς στρατηγικών ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης (Kosmatopoulos et al., 2006), (β) στο γεγονός ότι η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα χρησιμοποιεί παρόμοια μαθηματικά μοντέλα και εργαλεία με αυτά της στρατηγικής TUC και ως συνέπεια διατηρεί τις βασικές ιδιότητες της TUC: απλότητα στο σχεδιασμό και την υλοποίηση, εξαιρετική αποτελεσματικότητα αντιμετώπισης συνθηκών κορεσμού, αποφυγή μπλοκαρίσματος μέρους του δικτύου, ευρωστία, αξιοπιστία, κλπ., και (γ) στο γεγονός ότι η νέα αυτή στρατηγική αντιμετωπίζει αποτελεσματικά κάποια προβλήματα που εμφανίζει η στρατηγική TUC κατά την εφαρμογή της, ειδικά σε περιπτώσεις πολύπλοκης γεωμετρίας ή/και σηματοδότησης του κόμβου, όπου η εφαρμογή της στρατηγικής TUC απαιτεί ειδικό χειρισμό και προσεκτική βελτι-

στοποίηση των παραμέτρων ελέγχου από τον μελετητή, εκτιμάται ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης θα βρει εφαρμογές σε αστικά οδικά δίκτυα τόσο στην χώρα μας όσο και στο εξωτερικό. Η εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας σε αστικά οδικά δίκτυα της χώρας μας και του εξωτερικού, θα έχει ως συνέπεια την βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών εντός των αστικών αυτών δικτύων, με σημαντικά θετικά αποτελέσματα τόσο στην βελτίωση των χρόνων διαδρομής, όσο και στη κατανάλωση καυσίμων και εκπομπή ρύπων.

## 6.2 Μελλοντική έρευνα

Τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής μπορούν να χαρακτηρισθούν ικανοποιητικά. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη ανοικτές κατευθύνσεις έρευνας που μπορούν να συνεισφέρουν στην περαιτέρω μελέτη του προβλήματος ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης αστικών δικτύων. Ζητήματα στα οποία μπορεί να στραφεί η μελλοντική έρευνα είναι:

- Διερεύνηση και σύγκριση της στρατηγικής μη γραμμικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα σε επίπεδο προσομοίωσης με άλλες στρατηγικές πραγματικού χρόνου.
- Ανάπτυξη ενός μοντέλου εκτίμησης της μελλοντικής ζήτησης στους συνδέσμους του δικτύου στο ορίζοντα βελτιστοποίησης ώστε οι στρατηγικές κυλιόμενου ορίζοντα να έχουν γνώση της κυκλοφοριακής κατάστασης του δικτύου στο μέλλον.
- Σύγκριση της στρατηγικής τετραγωνικού προγραμματισμού κυλιόμενου ορίζοντα στο πεδίο με άλλες στρατηγικές πραγματικού χρόνου που έχουν προταθεί και υλοποιηθεί στο πεδίο.

## Βιβλιογραφία

- Aboudolas, K., 2003. Optimal control of traffic signals in urban road networks (in greek). M.Sc. thesis, Technical University of Crete, Chania, Greece.
- Abu-Lebdeh, G., Benekohal, R. F., 1997. Development of traffic control and queue management procedures for oversaturated arterials. *Transportation Research Record* (1603), 119–127.
- Ans, G. C. D., Gazis, D. C., 1974. Optimal control of oversaturated store-and-forward transportation networks. *Transportation Science* 10, 1–19.
- Beard, C., Ziliaskopoulos, A., 2006. A system optimal signal optimization formulation. In: *Proc. 85th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington, D.C., U.S.A.
- Bertsekas, D. P., 1999. *Nonlinear Programming*, 2nd Edition. Athena Scientific, Belmont, Massachusetts.
- Bertsekas, D. P., 2005. *Dynamic Programming and Optimal Control*, Vol. I, 3rd Edition. Athena Scientific, Belmont, Massachusetts.
- Bielefeldt, C., Busch, F., 1994. MOTION: A new on-line model for urban traffic signal control. In: *Proc. 7th IFAC/IFORS Symposium on Transportation Systems: Theory and Applications of Advanced Technology*. Tianjin, China, pp. 603–607.
- Cremer, M., 1991. Origin-destination matrix: Dynamic estimation. In: Papageorgiou, M. (Ed.), *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*. Pergamon Press, Oxford, pp. 310–315.
- Daganzo, C. F., Geroliminis, N., 2008. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research* 42B (9), 771–781.
- Davison, E. J., Özgüner, Ü., 1983. Decentralized control of traffic networks. *IEEE Transactions on Automatic Control* 28, 677–688.

- De Schutter, B., De Moor, B., 1998. Optimal traffic light control for a single intersection. *European Journal of Control* 4 (3), 260–276.
- Diakaki, C., 1999. Integrated control of traffic flow in corridor road networks. Ph.D. thesis, Technical University of Crete, Chania, Greece.
- Diakaki, C., Dinopoulou, V., Aboudolas, K., Papageorgiou, M., Ben-Shabat, E., Seider, E., Leibov, A., 2003. Extensions and new applications of the traffic-responsive urban control strategy: Coordinated signal control for urban networks. *Transportation Research Record* (1856), 202–211.
- Diakaki, C., Papageorgiou, M., Aboudolas, K., 2002. A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control. *Control Engineering Practice* 10, 183–195.
- Diakaki, C., Papageorgiou, M., McLean, T., 2000. Integrated traffic-responsive urban corridor control strategy in Glasgow, Scotland: Application and evaluation. *Transportation Research Record* (1727), 101–111.
- Dinopoulou, V., Diakaki, C., Papageorgiou, M., 2005. Application and evaluation of the signal traffic control strategy TUC in Chania. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 9 (3), 133–143.
- Dreyfus, S. E., 1964. Some types of optimal control of stochastic systems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Series A: Control* 2 (1), 120–134.
- Farges, J. L., Henry, J. J., Tufal, J., 1983. The PRODYN real-time traffic algorithm. In: *Proc. 4th IFAC Symposium on Transportation Systems*. Baden-Baden, Germany, pp. 307–312.
- Farges, J. L., Khoudour, I., Lesort, J. B., 1990. PRODYN: On site evaluation. In: *Proc. 3rd International Conference on Road Traffic Control*. London, UK, pp. 62–66.
- Farhi, N., 2008. Modélisation minplus et commande du trafic de villes régulières. Ph.D. thesis, Université de Paris I-Panthéon-Sorbonne, Paris, France.
- Gartner, N. H., 1983. OPAC: A demand-responsive strategy for traffic signal control. *Transportation Research Record* (906), 75–84.
- Gartner, N. H., 2001. Optimized policies for adaptive control (OPAC). In: *TRB Workshop on Adaptive Traffic Signal Control Systems*. Washington D.C., USA.

- Gartner, N. H., Tarnoff, P., Andrews, C., 1991. Evaluation of optimized policies for adaptive control strategy. *Transportation Research Record* (1324), 105–114.
- Gartner, N. H., Wagner, P., 2004. Analysis of traffic flow characteristics on signalized arterials. *Transportation Research Record* (1883), 94–100.
- Gazis, D. C., 1964. Optimum control of a system of oversaturated intersections. *Operations Research* 12, 815–831.
- Gazis, D. C., Potts, R. B., 1963. The oversaturated intersection. In: *Proc. 2nd International Symposium on Traffic Theory*. London, UK, pp. 221–237.
- Geroliminis, N., Daganzo, C. F., 2008. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research* 42B (9), 759–770.
- Godfrey, J. W., 1969. The mechanism of a road network. *Traffic Engineering and Control* 11 (7), 323–327.
- Helgason, R., Kennington, J., Lall, H., 1980. A polynomially bounded algorithm for a singly constrained quadratic problem. *Mathematical Programming* 18, 338–343.
- Hunt, P. B., Robertson, D. I., Bretherton, R. D., Royle, M. C., 1982. The SCOOT on-line traffic signal optimization technique. *Traffic Engineering and Control* 23, 190–192.
- Kessaci, A., Farges, J. L., Henry, J., 1990. Upper level for real time urban traffic control systems. In: *Preprints 11th IFAC World Congress*. Vol. 10. Tallinn, Estonia, pp. 226–229.
- Kim, K. J., Bell, M. G. H., 1992. Development of an integrated traffic control strategy for both urban signalised and motorway networks. In: *Proc. 1st Meeting EURO Working Group on Urban Traffic and Transportation*. Landshut, Germany.
- Kosmatopoulos, E. B., Papageorgiou, M., Bielefeldt, C., Dinopoulou, V., Morris, R., Mueck, J., Richards, A., Weichenmeier, F., 2006. International comparative field evaluation of a traffic-responsive signal control strategy in three cities. *Transportation Research* 40A (5), 399–413.
- Lim, J. H., Hwang, S. H., Suh, I. H., Bien, Z., 1981. Hierarchical optimal control of oversaturated urban networks. *International Journal of Control* 33, 727–737.
- Lo, H. K., 1999. A novel traffic signal control formulation. *Transportation Research* 33A (6), 433–448.

- Lo, H. K., Chang, E., Chan, Y. C., 2001. Dynamic network traffic control. *Transportation Research* 35A (8), 721–744.
- Lowrie, P. R., 1982. SCATS: The Sydney coordinated adaptive traffic system: Principles, methodology, algorithms. In: *Proc. IEE International Conference on Road Traffic Signalling*. London, UK, pp. 67–70.
- Mauro, V., Di Taranto, C., 1989. UTOPIA. In: *Proc. 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, Communications on Trasportations*. Paris, France, pp. 245–252.
- Michalopoulos, P. G., Stephanopoulos, G., 1977a. Oversaturated signal systems with queue length constraints: I: Single intersection. *Transportation Research* 11, 413–421.
- Michalopoulos, P. G., Stephanopoulos, G., 1977b. Oversaturated signal systems with queue length constraints: II: System of intersections. *Transportation Research* 11, 423–428.
- Mirchandani, P., Head, L., 1998. RHODES: A real-time traffic signal control system: Architecture, algorithms, and analysis. In: *Third Triennial Symposium on Transportation Analysis*. San Juan, Puerto Rico.
- Mirchandani, P., Head, L., Knyazyan, A., Wu, W., 2001. An approach towards the integration of bus priority and traffic adaptive signal control. In: *Proc. 80th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington, D.C., U.S.A.
- Papageorgiou, M., 1995. An integrated control approach for traffic corridors. *Transportation Research* 3C (1), 19–30.
- Papageorgiou, M., Kosmatopoulos, E. B., Papamichail, I., 2008. Effects of variable speed limits on motorway traffic flow. *Transportation Research Record* (2047), 37–48.
- Park, E. S., Lim, J. H., Suh, I. H., Bien, Z., 1984. Hierarchical optimal control of urban traffic networks. *International Journal of Control* 40, 813–829.
- Rathi, A. K., 1988. A control scheme for high traffic density sectors. *International Journal of Control* 22B, 81–101.
- Robertson, D. I., 1969. TRANSYT method for area traffic control. *Traffic Engineering and Control* 10, 276–281.

- Robertson, D. I., 1977. The TRANSYT method of coordinating traffic signals. *Traffic Engineering and Control* 38 (2), 76–77.
- Rosen, J. B., 1960. The gradient projection method for nonlinear programming—Part I: Linear constraints. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 8 (1), 181–217.
- Sen, S., Head, K. L., 1997. Controlled optimization of phases at an intersection. *Transportation Science* 31 (1), 5–17.
- Siemens, 2000. TASS traffic-actuated signal plan selection in MIGRA Central. Planning Manual, Reference-Number V24713-Z1991-B2, Edition 002, 2000-03-030, Germany.
- Singh, M. G., Tamura, H., 1974. Modelling and hierarchical optimization of oversaturated urban traffic networks. *International Journal of Control* 20 (6), 913–934.
- TSS-Transport Simulation Systems, 2008. Aimsun Users Manual Version 6. Barcelona, Spain.
- Valdes, D., Paz, A., 2004. An integration of adaptive traffic control and travel information. In: *Proc. 83rd Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington, D.C., U.S.A.