



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σύγκριση των στρατηγικών ελέγχου
κυκλοφορίας TUC και Max Pressure κάνοντας
χρήση προσομοίωσης στο οδικό δίκτυο των
Χανίων

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ ΙΩΑΚΕΙΜΙΔΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΡΚΟΣ ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ

Χανιά 2020

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους τους ανθρώπους που συνέβαλλαν στο να φέρω εις πέρας την παρούσα διπλωματική εργασία.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδακτορικό ερευνητή του τμήματος κ. Μανώλη Διαμαντή για την πολύτιμη βοήθεια και τη διαρκή υποστήριξή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του τμήματος κ. Παπαγεωργίου Μάρκο για την εμπιστοσύνη του και την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ με τα μέλη του εργαστηρίου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και προ πάντων κατανόηση και ανοχή καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| Περίληψη..... | 1 |
| 1 Εισαγωγή | 3 |
| 2 Βασικές Έννοιες και Ορισμοί..... | 5 |
| 2.1 Αστικό κυκλοφοριακό δίκτυο..... | 5 |
| 2.2 Τρόποι ελέγχου κυκλοφορίας μέσω σηματοδοτών..... | 8 |
| 2.3 Ταξινόμηση στρατηγικών ελέγχου | 10 |
| 3 Η στρατηγική ελέγχου TUC | 13 |
| 3.1 Εισαγωγή | 13 |
| 3.2 Traffic-responsive Urban control strategy (TUC) | 13 |
| 3.3 Η δομή της στρατηγικής TUC | 14 |
| 4 Η στρατηγική ελέγχου Max Pressure | 23 |
| 4.1 Εισαγωγή | 23 |
| 4.2 Max-Pressure..... | 24 |
| 4.3 Υπολογισμός της πίεσης..... | 26 |
| 4.4 Εφαρμογή της Max Pressure | 27 |
| 5 Προτεινόμενες παραλλαγές της στρατηγικής Max-Pressure..... | 29 |
| 5.1 MP χωρίς πληροφορία από τους γειτονικούς κόμβους | 29 |
| 5.2 MP με πληροφορία από τους κατάντη γειτονικούς κόμβους | 30 |
| 5.3 MP με πληροφορία από τους ανάντη γειτονικούς κόμβους | 31 |
| 5.4 MP με πληροφορία από τους ανάντη και τους κατάντη γειτονικούς κόμβους | 32 |
| 6 Οδικό δίκτυο Χανίων | 33 |
| 7 Προβλήματα και αποφυγή τους | 35 |
| 7.1 Downstream Information..... | 35 |
| 7.2 Smoothing | 37 |
| 8 Προσομοιώσεις | 38 |
| 8.1 Ο προσομοιωτής AIMSUN..... | 38 |
| 8.2 Μοντέλο προσομοίωσης..... | 40 |
| 9 Αποτελέσματα προσομοιώσεων | 42 |
| 9.1 Συγκριτικοί πίνακες | 42 |
| 9.2 Αποτελέσματα που αφορούν μέρος του δικτύου | 45 |
| 9.2.1 Πράσινος χρόνος | 45 |
| 9.2.2 Occurancy | 53 |

| | | |
|-------|--|----|
| 9.3 | Αποτελέσματα συνολικά για το δίκτυο..... | 63 |
| 9.3.1 | Incoming flow | 63 |
| 9.3.2 | Occurancy | 65 |
| 10 | Συμπεράσματα | 69 |
| | Βιβλιογραφία | 72 |

Σε μια εποχή όπου η κυκλοφοριακή συμφόρηση στα αστικά κέντρα ολοένα και μεγαλώνει, η αξιοποίηση του οδικού δικτύου μέσω της εφαρμογής σύγχρονων στρατηγικών κυκλοφοριακού ελέγχου είναι κάτι παραπάνω από επιβεβλημένη. Επομένως, ένα σημαντικό πρόβλημα που απαιτεί τη βέλτιστη δυνατή λύση είναι αυτό της επιλογής της καταλληλότερης στρατηγικής κυκλοφοριακού ελέγχου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη στρατηγική τοπικού ελέγχου Max-Pressure (και στις παραλλαγές της) και στη στρατηγική κεντρικού ελέγχου TUC (Traffic Responsive Urban Control). Σκοπός της εργασίας είναι η σύγκριση αυτών των δύο στρατηγικών ελέγχου σε τρία διαφορετικά σενάρια ζήτησης (ελαφρύ, βαρύ, συμφόρηση). Για την πραγματοποίηση των συγκρίσεων αυτών λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς ο έλεγχος σταθερού χρόνου και η μελέτη αφορά το οδικό κυκλοφοριακό δίκτυο των Χανίων.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη βοήθεια του μικροσκοπικού προσομοιωτή AIMSUN, φανερώνουν την καταλληλότητα των στρατηγικών που εξετάστηκαν ανάλογα με τις συνθήκες κορεσμού που επικρατούν κάθε φορά στο δίκτυο.

Η έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι στο σενάριο με μικρή ζήτηση ο σταθερός έλεγχος είναι καλύτερος από τις στρατηγικές πραγματικού χρόνου, ενώ στα σενάρια με αυξημένη ζήτηση και συνθήκες κορεσμού του δικτύου (βαρύ και συμφόρηση) τα δυναμικά σενάρια αποδίδουν καλύτερα. Πιο συγκεκριμένα, η στρατηγική Max-Pressure με χρήση πληροφορίας από τους κατάντη γειτονικούς κόμβους φαίνεται να είναι η πιο κατάλληλη για τα σενάρια αυξημένης ζήτησης καθώς κατά την εφαρμογή της παρουσιάζεται ο μικρότερος χρόνος καθυστέρησης των οχημάτων στο δίκτυο, ενώ η Max-Pressure με χρήση πληροφορίας από όλους τους γειτονικούς κόμβους (ανάντη και κατάντη) εξάγει χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με τα υπόλοιπα δυναμικά σενάρια.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα εργασία, προκειμένου να υπάρχει μια πιο δίκαιη σύγκριση μεταξύ των μεθόδων TUC και Max-Pressure, δεν χρησιμοποιήθηκε έλεγχος κύκλου και offset για την TUC, γεγονός που της στέρησε δύο από τα βασικά πλεονεκτήματα μιας στρατηγικής κεντρικού ελέγχου. Με τον έλεγχο του offset και του κύκλου, η στρατηγική TUC θα ήταν καλύτερη της Max-Pressure κυρίως στις περιπτώσεις υψηλής ζήτησης.

Οι περισσότερες πόλεις διεθνώς, ανάμεσα τους και αυτή των Χανίων, σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν χωρίς να προβλεφθεί η ταχεία εξάπλωση της χρήσης των μηχανοκίνητων μέσων μετακίνησης. Το γεγονός αυτό αποτελεί την κυριότερη αιτία εμφάνισης του κυκλοφοριακού προβλήματος στις πόλεις αυτές. Το συγκεκριμένο πρόβλημα επιδεινώνεται συνεχώς με την αύξηση του πληθυσμού, των δραστηριοτήτων και της επιφάνειας των αστικών περιοχών, του αριθμού των οχημάτων που κυκλοφορούν και του βαθμού χρησιμοποίησής τους.

Αποτέλεσμα της έξαρσης του κυκλοφοριακού προβλήματος που παρατηρείται καθημερινά σε μεγάλα, αλλά και σε μικρότερα οδικά δίκτυα, είναι ένας μεγάλος αριθμός δυσμενών επιπτώσεων σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας. Πέρα από τη συνεχώς αυξανόμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση και την αντίστοιχη απώλεια χρόνου, οι επιπτώσεις είναι σοβαρές και στην κυκλοφοριακή ασφάλεια, την ατμοσφαιρική ρύπανση, την κατανάλωση καυσίμου και γενικότερα στην ποιότητα ζωής.

Δυστυχώς στη χώρα μας το πρόβλημα παρουσιάζεται εντονότερο από διάφορες αιτίες όπως: κακή διαχείριση της κυκλοφορίας, παράνομη στάθμευση, έλλειψη συστηματικής αστυνόμευσης, κακή σήμανση, λανθασμένη διάταξη οδικού δικτύου κλπ. Η επέκταση της διαθέσιμης υποδομής δεν αποτελεί πλέον λύση του προβλήματος καθώς είναι αδύνατη στις περισσότερες περιπτώσεις. Αντίθετα, η λύση βρίσκεται στη βέλτιστη αξιοποίηση της υπάρχουσας υποδομής η οποία επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής σύγχρονων στρατηγικών κυκλοφοριακού ελέγχου. Οι κλάδοι της τεχνολογίας των επικοινωνιών και των υπολογιστών, του αυτομάτου ελέγχου και των μεθοδολογιών βελτιστοποίησης συμβάλλουν σημαντικά στην προσπάθεια αυτή.

Η επιλογή της στρατηγικής ελέγχου που θα χρησιμοποιηθεί αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα σημεία της διαδικασίας σχεδιασμού ενός συστήματος σηματοδότησης, καθώς αυτή θα καθορίσει την αποτελεσματικότητα και την επιτυχία του όλου συστήματος. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι ελέγχου της ροής σε ένα δίκτυο. Ο κεντρικός έλεγχος που εξετάζει συνολικά το δίκτυο και ο αποκεντρωμένος (τοπικός) που εξετάζει τον κάθε κόμβο του δικτύου ξεχωριστά. Συνήθως οι ερευνητές ασχολούνται με τον κεντρικό έλεγχο, αλλά τον τελευταίο καιρό παρατηρείται μια στροφή στον αποκεντρωμένο λόγω του χαμηλότερου κόστους.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές στρατηγικές κυκλοφοριακού ελέγχου που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις και τις ιδιαιτερότητες του κάθε δικτύου. Στην παρούσα εργασία επικεντρωνόμαστε στη στρατηγική τοπικού ελέγχου Max-Pressure (και στις παραλλαγές της) και στη στρατηγική κεντρικού ελέγχου TUC (Traffic Responsive Urban Control). Σκοπός της εργασίας είναι η σύγκριση αυτών των δύο στρατηγικών ελέγχου σε τρία διαφορετικά σενάρια ζήτησης (ελαφρύ, βαρύ, συμφόρηση), λαμβάνοντας ως σημείο αναφοράς τον σταθερού χρόνου (fixed-time)

έλεγχο στο οδικό κυκλοφοριακό δίκτυο των Χανίων. Για τον σκοπό αυτό έγινε χρήση του μικροσκοπικού προσομοιωτή AIMSUN, όπου εκτελέστηκαν πολλαπλές προσομοιώσεις αυτών των στρατηγικών ελέγχου και δημιουργήθηκαν πίνακες και συγκριτικά γραφήματα.

2.1 Αστικό κυκλοφοριακό δίκτυο

Ένα αστικό δίκτυο αποτελείται από *οδούς (streets)* οι οποίες συναντιούνται στους *κόμβους (junctions ή intersections)*. Οι αστικές διασταυρώσεις αποτελούνται από έναν αριθμό *προσβάσεων (approaches)* και από μία κοινή ζώνη διέλευσης, δηλαδή την *περιοχή διασταύρωσής τους (crossing area)* (σχήμα 2.1), η οποία μπορεί να ελέγχεται ή όχι από φωτεινούς σηματοδότες. Μία πρόσβαση μπορεί να περιλαμβάνει μια ή περισσότερες *λωρίδες (lanes)*, οι λωρίδες όμως αυτές συνιστούν μια μοναδική και ανεξάρτητη *ουρά οχημάτων (queue)*. Ένα *κυκλοφοριακό ρεύμα (traffic stream)* αποτελείται από όλα τα οχήματα που διασχίζουν την διασταύρωση από την ίδια κατεύθυνση. Όταν δύο κυκλοφοριακά ρεύματα μπορούν ταυτόχρονα να διασχίσουν την διασταύρωση με ασφάλεια λέγονται *συμβατά (compatible)*, διαφορετικά λέγονται *ασύμβατα ή ανταγωνιστικά (incompatible or conflicting)*.

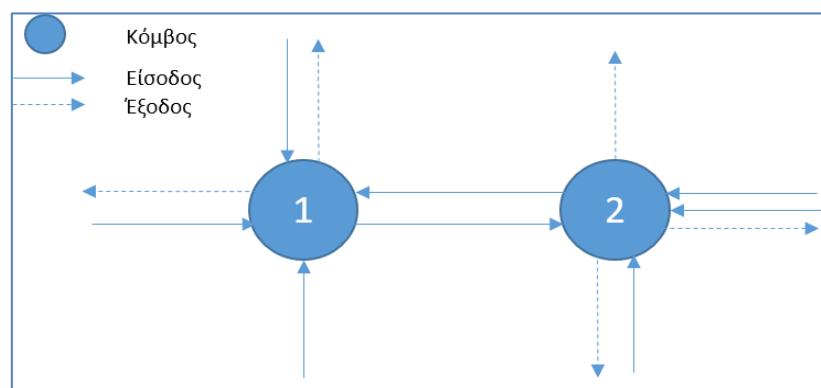
Η *στάθμη εξυπηρέτησης (service level)* είναι ένα ποιοτικό μέγεθος που εκφράζει τις συνθήκες λειτουργίας μέσα σε ένα ρεύμα κυκλοφορίας όπως τις αντιλαμβάνονται οι χρήστες του, ενώ η *σύνθεση κυκλοφορίας (traffic composition)* αντιπροσωπεύει την ποσοστιαία κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου κατά είδος οχήματος.

Ο *κυκλοφοριακός φόρτος ή κυκλοφοριακή ροή (traffic flow)* εκφράζει τον συνολικό αριθμό οχημάτων που διέρχονται από ένα σημείο ή διατομή της οδού στη μονάδα του χρόνου. Ως μονάδα χρόνου χρησιμοποιείται συνήθως (και ανάλογα με τους σκοπούς της ανάλυσης) το έτος, η ημέρα ή η ώρα. Στην ανάλυση της κυκλοφοριακής ροής χρησιμοποιείται ο *ρυθμός ροής (flow rate)*, ο οποίος εκφράζει τον συνολικό αριθμό των οχημάτων που διέρχονται από ένα σημείο ή διατομή οδού σε μία περίοδο μικρότερη της ώρας, συνήθως το 15λεπτο (Transportation Research Board-HCM, 2010). Η μαθηματική σχέση που χρησιμοποιείται για την κυκλοφοριακή ροή είναι $Q=N/T$, όπου Q είναι ο αριθμός των οχημάτων ανά ώρα που διασχίζουν το σημείο του οδοστρώματος που είναι τοποθετημένος ο ανιχνευτής (detector), T είναι η διακριτή περίοδος ελέγχου και N είναι ο αριθμός των οχημάτων που μετράει ο ανιχνευτής κατά το χρονικό διάστημα T .

Η *κυκλοφοριακή ικανότητα (capacity)* αντιπροσωπεύει τον μέγιστο αριθμό οχημάτων που μπορεί να εξυπηρετηθεί από ένα συγκεκριμένο σημείο ή ομοιόμορφο τμήμα λωρίδας κυκλοφορίας ή οδού, κατά τη μία κατεύθυνση ή και κατά τις δύο κατευθύνσεις κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου, με τις οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες καθώς και τις συνθήκες ελέγχου της κυκλοφορίας που

επικρατούν. Όταν η κυκλοφοριακή ικανότητα αναφέρεται σε μία συγκεκριμένη πρόσβαση (approach capacity) που ελέγχεται με σηματοδότηση, ορίζεται ως ο μέγιστος ρυθμός ροής για την εν λόγω πρόσβαση που μπορεί να πραγματοποιηθεί υπό τις επικρατούσες οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες και τις συνθήκες σηματοδότησης της πρόσβασης.

Η *ροή κορεσμού (saturation flow)* ορίζεται ως η μέγιστη κυκλοφοριακή ροή που διέρχεται από τη γραμμή διακοπής πορείας (stop line) μιας πρόσβασης, όταν το αντίστοιχο κυκλοφοριακό ρεύμα έχει προτεραιότητα, η ανάντη ζήτηση ή αλλιώς η ουρά των οχημάτων που βρίσκονται σε αναμονή για να διασχίσουν τον κόμβο είναι αρκούντως μεγάλη και οι κατάντη οδοί δεν είναι φραγμένες από ουρές οχημάτων.



Σχήμα 2.1: Δίκτυο δύο κόμβων

Για να διασφαλιστεί η ασφαλής διέλευση ανταγωνιστικών ρευμάτων κυκλοφορίας καθώς και η διέλευση των πεζών, αλλά και γενικότερα για τον έλεγχο της κυκλοφορίας στους κόμβους χρησιμοποιούνται *φωτεινοί σηματοδότες (traffic signals)*. *Όψη σηματοδότη (signal face)* είναι το τμήμα του σηματοδότη που ελέγχει μία ή περισσότερες κινήσεις προς μία κατεύθυνση. *Κύκλος σηματοδότησης (signal cycle)* λέγεται μια πλήρης διαδοχή όλων των ενδείξεων των σηματοδοτών ενός κόμβου, ενώ *περίοδος (cycle time)* είναι η χρονική διάρκεια που απαιτείται για μια πλήρη διαδοχή αυτών των ενδείξεων.

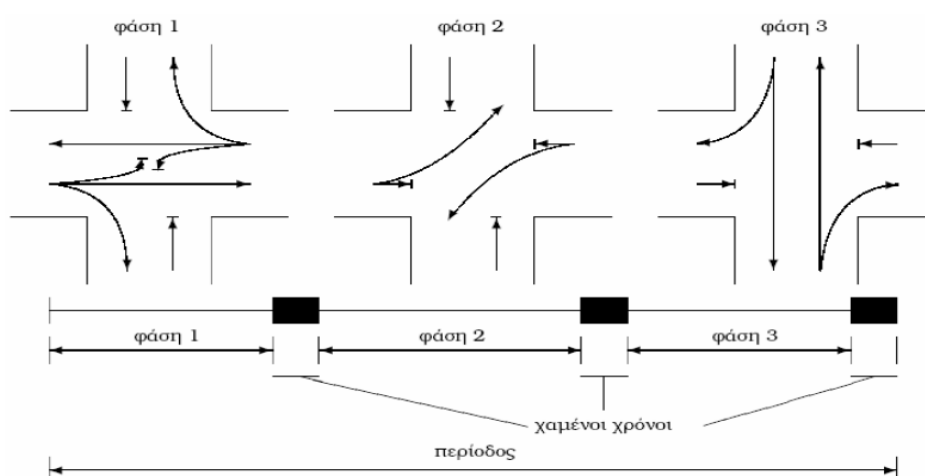
Ένας κύκλος σηματοδότησης αποτελείται από *φάσεις (phases)* ή *στάδια (stages)*, τα οποία δεν μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα. Με τον όρο φάση ή στάδιο εννοούμε το τμήμα της περιόδου στο οποίο δίνεται προτεραιότητα σε μία κίνηση ή έναν συνδυασμό κινήσεων. Ο αριθμός των φάσεων δεν είναι ο ίδιος σε κάθε σηματοδοτούμενο κόμβο, αλλά καθορίζεται με βάση τις επικρατούσες συνθήκες (αριθμό κυκλοφοριακών ρευμάτων και λωρίδων, διαβάσεις πεζών κτλ.). Οι φάσεις

διαδέχονται η μία την άλλη κατά μία προκαθορισμένη κυκλική φορά και αυτό καλείται *διαδοχή φάσεων (phase sequence)*.

Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η όψη του σηματοδότη παρουσιάζει πράσινο χρώμα, λέγεται *χρόνος πράσινης ένδειξης*, ενώ αντίστοιχα το χρονικό διάστημα που η όψη του σηματοδότη παρουσιάζει κόκκινο χρώμα λέγεται *χρόνος κόκκινης ένδειξης*. Σε κάποιες περιπτώσεις, συνήθως σε μεγάλους σηματοδοτούμενους κόμβους με αυξημένη διέλευση πεζών, υπάρχει η καθολική κόκκινη ένδειξη (all-red-period), μία ιδιαίτερη φάση κατά την οποία όλοι οι σηματοδότες που ελέγχουν τις κινήσεις οχημάτων έχουν κόκκινη ένδειξη για λόγους ασφαλείας. *Χρόνος κίτρινης ένδειξης* είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η όψη του σηματοδότη φέρει το κίτρινο χρώμα και έχει αποδειχθεί ότι πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 3 και 5 δευτερολέπτων.

Το χρονικό διάστημα που ορίζεται από το τέλος της πράσινης ένδειξης της φάσης που τερματίζεται μέχρι την αρχή της πράσινης ένδειξης της επόμενης φάσης είναι σταθερό και λέγεται *ενδιάμεσος χρόνος μεταξύ πράσινων ενδείξεων* ή *ενδιάμεσος χρόνος (intergreen)*. Ο ενδιάμεσος χρόνος ισούται περίπου με τον χρόνο της κίτρινης ένδειξης και είναι απαραίτητος για την αποφυγή ενδεχόμενης εμπλοκής των ανταγωνιστικών κυκλοφοριακών ρευμάτων των διαδοχικών φάσεων.

Σε πραγματικά οδικά κυκλοφοριακά δίκτυα και πραγματικές συνθήκες υπάρχει πάντα το χρονικό διάστημα μιας φάσης που καταναλώνεται στις εκκινήσεις των οχημάτων μετά την κόκκινη ένδειξη, την εκκένωση του κόμβου από τα οχήματα και σε τυχόν περιόδους καθολικής κόκκινης ένδειξης. Αυτός είναι ο *απολυμένος ή χαμένος χρόνος (lost time)*. Αν από την περίοδο αφαιρέσουμε τον χαμένο χρόνο, προκύπτει ο *χρησιμοποιούμενος χρόνος (effective time)*, που είναι αυτός που χρησιμοποιείται ουσιαστικά για τις κινήσεις των οχημάτων και κατανέμεται στις διάφορες φάσεις του κύκλου.

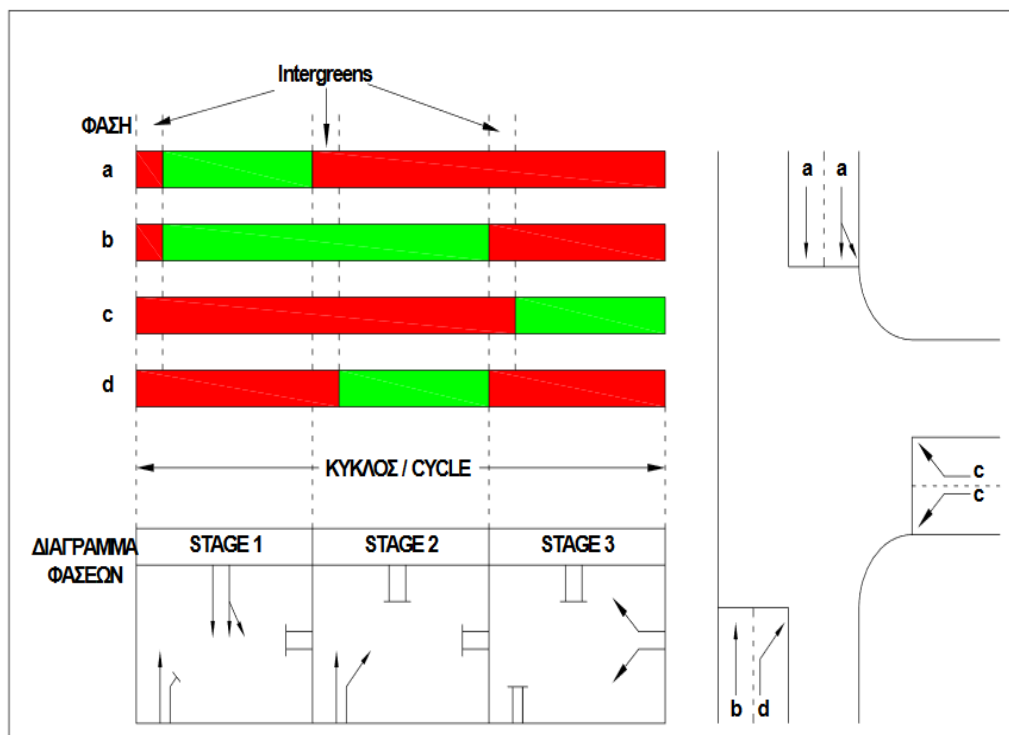


Σχήμα 2.2 : Δομή σηματοδότησης κόμβου

2.2 Τρόποι ελέγχου κυκλοφορίας μέσω σηματοδοτών

Για τον έλεγχο των κυκλοφοριακών συνθηκών μέσω σηματοδοτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν τέσσερις διαφορετικοί τρόποι.

- *Καθορισμός φάσεων (signal phasing)*. Είναι η διαδικασία κατά την οποία πρέπει να καθοριστεί η σύνθεση, ο βέλτιστος αριθμός και η διαδοχή των φάσεων σε έναν σηματοδοτούμενο κόμβο, ώστε να μην συναντιούνται ανταγωνιστικά ρεύματα κυκλοφορίας και η πρόσβαση στον κόμβο να γίνεται με ασφάλεια τόσο για τα οχήματα όσο και για τους πεζούς. Εύκολα αντιλαμβανόμαστε ότι η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει αρκετά σύνθετη όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα του κόμβου που εξετάζεται. Ο αριθμός των φάσεων εξαρτάται από το μέγεθος και το πλήθος των κυκλοφοριακών ρευμάτων του κόμβου και γίνεται πάντα προσπάθεια περιορισμού του στις ελάχιστες απαιτούμενες φάσεις, με από κοινού εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων κινήσεων, προκειμένου να μειωθούν οι καθυστερήσεις λόγω περιττών φάσεων. Για τον ίδιο λόγο (μείωση καθυστερήσεων) ή ακόμα και για λόγους ασφαλείας σε έκτακτες περιπτώσεις, ορισμένες φάσεις μπορεί να παραλειφθούν, εάν δεν κρίνονται απαραίτητες.



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα διαδοχής φάσεων

- *Καθορισμός της σχετικής διάρκειας των χρόνων πράσινου των φάσεων σηματοδότησης (green split).* Αυτό το μέγεθος αντιπροσωπεύει τη σχετική διάρκεια του πράσινου κάθε φάσης ως ποσοστό της περιόδου σηματοδότησης. Ανάλογα με τη ζήτηση των εμπλεκόμενων κυκλοφοριακών ρευμάτων, το green split πρέπει να βελτιστοποιηθεί με σκοπό την καλύτερη εξυπηρέτηση του δικτύου.
- *Καθορισμός περιόδου σηματοδότησης.* Η περίοδος σηματοδότησης ισούται με το άθροισμα των επιμέρους φάσεων συν τον ενδιάμεσο χρόνο (intergreen). Ο καθορισμός της περιόδου αυτής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ποσοστό κορεσμού των κυκλοφοριακών συνθηκών. Μεγαλύτερες περίοδοι εξυπηρετούν καλύτερα κορεσμένα δίκτυα, καθώς το ποσοστό των ενδιάμεσων χρόνων μεταξύ των πράσινων ενδείξεων μειώνεται αντίστοιχα. Αντίθετα, σε περιπτώσεις μη κορεσμένων κυκλοφοριακών συνθηκών, μεγάλες περίοδοι μπορεί να αυξήσουν τις καθυστερήσεις των οχημάτων λόγω των αυξημένων χρόνων αναμονής κατά τη διάρκεια του κόκκινου. Επίσης, μεγάλες περίοδοι δεν ενδείκνυνται στις περιπτώσεις ιδιαίτερα κορεσμένων κυκλοφοριακών συνθηκών. Η συνήθης διάρκεια μιας περιόδου κυμαίνεται μεταξύ 50 και 70 sec, ενώ σε περίπτωση μεγάλων κυκλοφοριακών φόρτων μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 120 sec. Η βέλτιστη διάρκεια περιόδου σηματοδότησης (που δίνει τις ελάχιστες καθυστερήσεις και τις υψηλότερες στάθμες εξυπηρέτησης) υπολογίστηκε από τους Webster – Cobbe.
- *Καθορισμός χρονικής μετατόπισης (offset).* Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις συντονισμένου ελέγχου μιας σειράς κόμβων για τη δημιουργία πράσινου κύματος (green wave) και φανερώνει το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ ενός χρονικού σημείου αναφοράς του συστήματος και της πρώτης εμφάνισης της πράσινης ένδειξης σε μία από τις όψεις ενός σηματοδότη.

2.3 Ταξινόμηση στρατηγικών ελέγχου

Στρατηγική ελέγχου είναι ένας αλγόριθμος που καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο θα ρυθμίζεται η κυκλοφορία οχημάτων και πεζών στον ή στους ελεγχόμενους κόμβους. Η καταλληλότητα των διάφορων στρατηγικών ελέγχου εξαρτάται από τη φύση και τις ιδιαιτερότητες του εξεταζόμενου κόμβου ή δικτύου. Θεωρητικά λοιπόν, υπάρχει μία βέλτιστη στρατηγική ελέγχου που μπορεί να εξασφαλίσει την ικανοποιητική λειτουργία του δικτύου, δηλαδή να ελαχιστοποιήσει τον συνολικό χρόνο παραμονής των οχημάτων στο δίκτυο. Με βάση κάποια λειτουργικά χαρακτηριστικά, οι στρατηγικές ελέγχου μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες.

- *Στρατηγικές ελέγχου σταθερού χρόνου (fixed-time control strategies)*. Οι στρατηγικές αυτές χρησιμοποιούν σταθερά δεδομένα ζήτησης και ποσοστών στροφής για τα διαφορετικά κυκλοφοριακά ρεύματα, τα οποία έχουν προκύψει από ιστορικές ή προσωρινές μετρήσεις off-line. Το σημαντικό μειονέκτημα αυτών των στρατηγικών είναι το γεγονός ότι οι ρυθμίσεις είναι σταθερές, πράγμα που δε συμβαίνει στην πραγματικότητα. Οι συνθήκες κυκλοφορίας αλλάζουν ανάλογα με την ώρα της ημέρας, από μέρα σε μέρα ή λόγω κάποιου απρόοπτου γεγονότος (ατύχημα, εργασίες οδού, καιρικές συνθήκες κτλ.), συνεπώς η θεώρηση των σταθερών τιμών αποτελεί μία απλοποίηση που μπορεί να έχει σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση και αποτελεσματικότητα των αντίστοιχων συστημάτων ελέγχου.

Οι στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου (*real-time control strategies*) ή στρατηγικές ελέγχου επενεργούμενου από την κυκλοφορία (*traffic-responsive* ή *traffic-actuated control strategies*) χρησιμοποιούν μετρήσεις πραγματικού χρόνου και προσαρμόζουν τις αποφάσεις με σκοπό την καλύτερη εξυπηρέτηση του εξεταζόμενου κόμβου ή δικτύου υπό τις κυκλοφοριακές συνθήκες που ισχύουν τη δεδομένη χρονική στιγμή. Για την παροχή των πραγματικών μετρήσεων είναι απαραίτητη η εγκατάσταση φωρατών (συνήθως ένας ή δύο ανά κυκλοφοριακό ρεύμα, λίγα μέτρα πριν τη γραμμή διακοπής πορείας), ρυθμιστών, Η/Υ κ.τ.λ.. Συνεπώς οι στρατηγικές πραγματικού χρόνου είναι πολύ πιο αποτελεσματικές συγκριτικά με τις στρατηγικές σταθερού χρόνου, απαιτούν όμως περισσότερα χρήματα για την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος.

- *Στρατηγικές μεμονωμένου ελέγχου (isolated control strategies)*. Οι αποφάσεις σε αυτήν την κατηγορία στρατηγικών ελέγχου λαμβάνονται σε επίπεδο μεμονωμένου κόμβου. Λαμβάνονται δηλαδή υπόψη μόνο οι τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες και στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης καθυστέρησης μόνο στον κόμβο αυτό. Για την λειτουργία μίας τέτοιας στρατηγικής χρειάζεται η εγκατάσταση κατάλληλων αναλογικών ή ψηφιακών ηλεκτρικών κυκλωμάτων, ή κατάλληλα προγραμματισμένων μικροϋπολογιστών.

Οι στρατηγικές συντονισμένου ελέγχου (*coordinated control strategies*) θεωρούν ένα τμήμα δικτύου ή και όλο το δίκτυο σαν ένα σύνολο και λαμβάνουν αποφάσεις ελέγχου με βάση τις συνθήκες κυκλοφορίας στο σύνολο του δικτύου, με σκοπό την καλύτερη εξυπηρέτηση όλου του δικτύου. Οι στρατηγικές αυτές προτιμώνται όταν υπάρχουν σηματοδοτούμενοι κόμβοι σε μικρές αποστάσεις που είναι εύκολο να συντονιστούν. Για την υλοποίηση των στρατηγικών αυτών είναι απαραίτητη η εγκατάσταση μιας ιεραρχικής δομής υπολογιστών, με τουλάχιστον δύο ιεραρχικές βαθμίδες.

Οι στρατηγικές ιεραρχικού ελέγχου (*hierarchical control strategies*) είναι μια ενδιάμεση κατηγορία μεταξύ αυτών που αναφέρθηκαν παραπάνω και οι αποφάσεις λαμβάνονται σε διάφορα επίπεδα.

- Στρατηγικές ελέγχου που εφαρμόζονται σε μη κορεσμένα δίκτυα. Στην περίπτωση των μη κορεσμένων δικτύων, η ζήτηση είναι χαμηλότερη από την κυκλοφοριακή ικανότητα, συνεπώς δε σχηματίζονται ουρές από οχήματα που περιμένουν να εξυπηρετηθούν, παρά μόνο κατά τη διάρκεια του κόκκινου σήματος. Στις περιπτώσεις αυτές δε δημιουργείται πρόβλημα κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Οι στρατηγικές ελέγχου που είναι κατάλληλες για κορεσμένα δίκτυα είναι ελάχιστες. Στην περίπτωση των κορεσμένων δικτύων η ζήτηση υπερβαίνει την κυκλοφοριακή ικανότητα. Τότε σχηματίζονται μεγάλες ουρές οχημάτων που δεν προλαβαίνουν να εξυπηρετηθούν κατά τον πράσινο χρόνο και σε μερικές περιπτώσεις εκτείνονται μέχρι την ανάντη διασταύρωση, φράζοντας το κάθετο ρεύμα κυκλοφορίας με αποτέλεσμα τη μείωση της κυκλοφοριακής ικανότητας.

3.1 Εισαγωγή

Το σημαντικότερο και πιο κρίσιμο σημείο στον σχεδιασμό ενός συστήματος σηματοδότησης είναι η επιλογή της στρατηγικής ελέγχου, καθώς είναι αυτή που θα καθορίσει την αποτελεσματικότητα και επιτυχία του συστήματος. Πολλές είναι οι στρατηγικές που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και όπως είδαμε παραπάνω έχουν χωριστεί σε κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά τους, δεν είναι όμως όλες το ίδιο κατάλληλες για κάθε εξεταζόμενο κόμβο ή δίκτυο.

Μέχρι σήμερα δεν έχει βρεθεί μία στρατηγική που να ικανοποιεί όλες τις ανάγκες που έχουν εκφραστεί κατά καιρούς σχετικά με τον συντονισμένο έλεγχο μεγάλων αστικών δικτύων σε πραγματικό χρόνο. Δύο από τα πιο δημοφιλή συστήματα αυτής της κατηγορίας είναι το βρετανικό σύστημα SCOOT και το αυστραλέζικο σύστημα SCATS, τα οποία λαμβάνουν μετρήσεις πραγματικού χρόνου από φωρατές και καλούνται να αποφασίσουν για ενδεχόμενη αυξομείωση της περιόδου και της σχετικής διάρκειας των φάσεων. Τα συστήματα αυτά έχει αποδειχθεί ότι δεν ανταποκρίνονται ικανοποιητικά σε απότομες αλλαγές των κυκλοφοριακών συνθηκών. OPAC, PRODYN, RHODES και CRONOS είναι κάποια από τα προηγμένα συστήματα που αναπτύχθηκαν αργότερα και χρησιμοποιούν διακριτές μεταβλητές, συνεπώς οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται είναι εκθετικής πολυπλοκότητας. Λόγω της εκθετικής πολυπλοκότητας αυτές οι στρατηγικές δεν είναι πολύ αποτελεσματικές στο συντονισμένο έλεγχο αστικών δικτύων με πολλούς κόμβους, εμπίπτουν συνεπώς στην κατηγορία των αποκεντρωμένων στρατηγικών και η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται σε συνθήκες κυκλοφοριακού κορεσμού.

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα ασχοληθούμε την στρατηγική ελέγχου TUC, μια στρατηγική ελέγχου κυκλοφορίας που ανήκει στην κατηγορία συντονισμένου ελέγχου πραγματικού χρόνου. Σε αντίθεση με τις στρατηγικές που αναφέρθηκαν παραπάνω, η TUC χρησιμοποιεί μια αποτελεσματική μέθοδο βελτιστοποίησης και ελέγχου που την καθιστά ικανή να αντιμετωπίσει προβλήματα που δημιουργούνται ακόμα και σε περιπτώσεις κορεσμένων κυκλοφοριακών συνθηκών.

3.2 Traffic-responsive Urban control strategy (TUC)

Η TUC (Traffic-responsive Urban Control) είναι μία ελληνική στρατηγική ελέγχου πραγματικού χρόνου που αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει προβλήματα

συντονισμένου ελέγχου σε μεγάλα αστικά δίκτυα. Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος SMARTNESS, η TUC υλοποιήθηκε σε μέρος του αστικού δικτύου της Γλασκώβης (Σκωτία), του Σαουθάμπτον (Αγγλία), του Μονάχου (Γερμανία) και στο αστικό δίκτυο των Χανίων (Ελλάδα). Τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από αυτήν τη συγκριτική αξιολόγηση είναι ότι η TUC είναι μία πολύ αποτελεσματική στρατηγική που εφαρμόζεται χωρίς δυσκολία και με μικρό κόστος. Συγκεντρώνει επιπλέον, χαρακτηριστικά όπως η εύκολη εγκατάσταση και συντήρηση, η ανεκτικότητα σε μικρές ανακρίβειες μετρήσεων καθώς και μικρές απαιτήσεις όσον αφορά τις αναγκαίες μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Η πρώτη έκδοση της στρατηγικής TUC χειριζόταν μόνο τη διάρκεια φάσεων, ενώ επιπλέον ανάπτυξη οδήγησε σε πραγματικό έλεγχο της διάρκειας της περιόδου σηματοδότησης και της χρονικής διαφοράς έναρξης των πρασίνων μεταξύ διαδοχικών διασταυρώσεων που αποτελούν τμήματα μίας αρτηρίας. Μια επιπλέον επέκταση που έχει σήμερα η στρατηγική είναι αυτή της παροχής προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς.

Η υλοποίηση της TUC είναι πολύ απλή και πραγματοποιείται με την βοήθεια ενός κεντρικού υπολογιστή. Στον κεντρικό υπολογιστή είναι αποθηκευμένο το απαιτούμενο λογισμικό και όλα τα απαραίτητα στατιστικά δεδομένα. Απαραίτητη επίσης είναι η εγκατάσταση φωρατών τουλάχιστον στις σημαντικότερες οδούς του δικτύου, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την συλλογή μετρήσεων κατάληψης. Η ιδανική θέση για την τοποθέτηση του φωρατή είναι περίπου στο μέσο της οδού. Ο κεντρικός υπολογιστής λαμβάνει τις μετρήσεις που συλλέγονται κατά την προηγούμενη περίοδο, εκτελεί τους υπολογισμούς που χρειάζονται με βάση την εικόνα που παρουσιάζει το δίκτυο και μεταβιβάζει τις τελικές αποφάσεις ελέγχου στους τοπικούς ρυθμιστές κάθε κόμβου για εφαρμογή κατά την επόμενη περίοδο. Οι τοπικοί ρυθμιστές καλούνται να εφαρμόσουν προκαθορισμένα πλάνα σε περίπτωση που δεν είναι δυνατή η επικοινωνία με τον κεντρικό υπολογιστή.

3.3 Η δομή της στρατηγικής TUC

Η στρατηγική TUC αποτελείται από πέντε τμήματα:

- Έλεγχος διάρκειας φάσεων (Split Control).
Είναι το πρώτο τμήμα της στρατηγικής TUC που αναπτύχθηκε και εκφράζεται ως ένα βέλτιστο Γραμμικό-Τετραγωνικό (Linear-Quadratic, LQ) πρόβλημα ελέγχου. Το αντικείμενο ελέγχου είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου υπερκορεσμού του δικτύου και της διάχυσης των ουρών στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της κατάλληλης διαχείρισης της διάρκειας του πρασίνου στις σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις για σταθερή περίοδο και σταθερή διαφορά χρόνων έναρξης πρασίνου διαδοχικών διασταυρώσεων. Μέσω ενός απλού κανόνα ελέγχου με ανατροφοδότηση, προκύπτουν τα απαραίτητα αποτελέσματα όσον αφορά τις συνθήκες σηματοδότησης.
Θεωρούμε μία διασταύρωση με σηματοδότηση $j \in J$ και περίοδο C_j η οποία περιλαμβάνει ένα σύνολο σταδίων i που ανήκουν στο σύνολο F'_j και μπορούν να διαχωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Μεταβλητά στάδια τα οποία ανήκουν στο σύνολο F_j και υπόκεινται σε τροποποιήσεις μέσα σε δεδομένα όρια.
- Σταθερά στάδια που ανήκουν στο σύνολο $F'_j - F_j$ τα οποία έχουν σχεδιαστεί για λόγους ασφαλείας και οποιαδήποτε τροποποίησή τους απαγορεύεται.

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

$$\sum_{i \in F_j} g_{j,i} + L_j = C_j$$

$$g_{j,i_{\min}} \leq g_{j,i} \leq g_{j,i_{\max}} \quad \forall j \in J \quad (3.1)$$

Όπου:

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

Από την επίλυση του Γραμμικού-Τετραγωνικού προβλήματος που παρουσιάστηκε παραπάνω, προκύπτει η ακόλουθη σχέση που σκοπό έχει τον υπολογισμό των νέων χρόνων πράσινου για τα μεταβλητά στάδια $i \in F_j$ των διασταυρώσεων $j \in J$:

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

Όπου:

- g είναι το διάνυσμα των νέων χρόνων πράσινου $G_{j,i}$, $\forall i \in F_j, \forall j \in J$
- g^N είναι το διάνυσμα των ονομαστικών τιμών του πράσινου $g_{j,i}^N$ για τα μεταβλητά στάδια $\forall i \in F_j$ των διασταυρώσεων $\forall j \in J$
- x' είναι το διάνυσμα με στοιχεία $x'_z(k) = \frac{x_z(k)}{1 - \frac{bx_z(k)}{x_{z,max}}}$, όπου x_z είναι ο αριθμός των οχημάτων μέσα στο σύνδεσμο $z \in Z$, $x_{z,max}$ είναι η ικανότητα αποθήκευσης οχημάτων του συνδέσμου $z \in Z$ και $b \in [0,1)$ είναι μία παράμετρος που επιλέγεται με τη μέθοδο δοκιμής σφάλματος για ένα δεδομένο δίκτυο έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η εσωτερική τάση της στρατηγικής να προστατεύει τους συνδέσμους από υπερκορεσμό.
- L είναι ένας σταθερός πίνακας διαστάσεων $n \times m$ όπου n είναι ο αριθμός όλων των σταδίων $i \in F_j$ όλων των διασταυρώσεων $j \in J$ και m είναι ο αριθμός όλων των συνδέσμων $z \in Z$. Ο πίνακας L αποτελεί το υπολογιστικό αποτέλεσμα του προβλήματος LQ και ο υπολογισμός του γίνεται off-line και σχετίζεται με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του δικτύου (αριθμός κόμβων, μήκη δρόμων, χωρητικότητα δρόμων κλπ.).

- Έλεγχος διάρκειας περιόδου (Cycle Control).

Αυτό το τμήμα αποτελεί μια επέκταση της TUC. Η τροποποίηση της διάρκειας της περιόδου είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος επηρεασμού των κυκλοφοριακών συνθηκών. Μεγαλύτερες περίοδοι συνήθως εξυπηρετούν περισσότερα οχήματα ανά ώρα, αυξάνουν δηλαδή την κυκλοφοριακή ικανότητα ενός κόμβου, καθώς το ποσοστό των σταθερών ενδιάμεσων χρόνων μεταξύ πράσινων ενδείξεων μειώνεται αντίστοιχα. Από την άλλη όμως μπορεί να αυξήσουν τις καθυστερήσεις των οχημάτων ιδίως σε μη κορεσμένες κυκλοφοριακές συνθήκες λόγω των αυξημένων χρόνων αναμονής κατά τη διάρκεια του κόκκινου, αλλά και σε ιδιαίτερα κορεσμένες κυκλοφοριακές συνθήκες όπου παρατηρούνται μπλοκαρίσματα οδών, παράνομη στάθμευση οχημάτων κτλ.

Σκοπός του ελέγχου της διάρκειας της περιόδου είναι η αύξηση της χωρητικότητας των διασταυρώσεων τόσο όσο απαιτείται για την ελαχιστοποίηση των μέγιστων παρατηρούμενων επιπέδων κορεσμού στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής ενός απλού, βασισμένου σε ανατροφοδότηση αλγόριθμου, ο οποίος χρησιμοποιεί ως κριτήριο για την αυξομείωση της περιόδου, το τρέχον μέγιστο επίπεδο κορεσμού ενός προκαθορισμένου ποσοστού συνδέσμων του δικτύου.

Ο αλγόριθμος αυτός αποτελείται από τρία στάδια. Τα δύο πρώτα στάδια προσπαθούν να ρυθμίσουν την διάρκεια της περιόδου του δικτύου στο μέγιστο επίπεδο κορεσμού. Το τρίτο στάδιο αποσκοπεί στην εξάλειψη των καθυστερήσεων που θα μπορούσαν να προκύψουν σε διασταυρωμένους κόμβους.

Τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα:

- Το ποσοστό ρ των συνδέσμων των δικτύων με το μέγιστο φορτίο $\sigma_z(k) = x_z(k)/x_{z,max}$ (3.3).
- Η διάρκεια της περιόδου του δικτύου υπολογίζεται από τον νόμο ελέγχου ανατροφοδότησης (αναλογικός ελεγκτής).

$$C(k) = C^N + K^C [\sigma(k) - \sigma^N] \quad (3.4)$$

Όπου:

C^N : ονομαστική διάρκεια της περιόδου του δικτύου

σ^N : ονομαστικό μέσο φορτίο

K^C : παράμετρος ελέγχου, η τιμή της επηρεάζει την ένταση των αντιδράσεων ελέγχου

Μετά την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης, η υπολογισμένη διάρκεια περιόδου περιορίζεται μεταξύ ενός εύρους επιτρεπτών περιόδων $[C_{min}, C_{max}]$, εάν είναι απαραίτητο.

- Εάν η περίοδος $C(k)$ του δικτύου που θα προκύψει είναι αρκετά μεγάλη, ενώ όλοι οι σύνδεσμοι που προσεγγίζουν συγκεκριμένες διασταυρώσεις έχουν αρκετά χαμηλά επίπεδα κορεσμού, τότε η διάρκεια της περιόδου αυτών των διασταυρώσεων υπολογίζεται ξανά.

Η σχέση (3.4) δείχνει την σχέση αναλογικότητας μεταξύ της διάρκειας περιόδου και της χωρητικότητας της διασταύρωσης. Επίσης, η χωρητικότητα του δικτύου και το φορτίο των συνδέσμων είναι αντιθέτως ανάλογα μεγέθη, καθώς αύξηση στην χωρητικότητα οδηγεί σε μείωση του φορτίου μέχρι ένα νέο σημείο ισορροπίας. Ως εκ τούτου, ένας αναλογικός ελεγκτής είναι κατάλληλος για την ρύθμιση των φορτίων των συνδέσμων γύρω από μια επιθυμητή τιμή.

- Έλεγχος χρονικής διαφοράς (Offset control).
Αυτό το τμήμα αποτελεί ακόμα μία επέκταση της TUC. Ως χρονική διαφορά ορίζεται το χρονικό διάστημα μεταξύ ενός σημείου αναφοράς και της πρώτης εμφάνισης της πράσινης ένδειξης σε μία από τις όψεις ενός σηματοδότη. Οι κυκλοφοριακές συνθήκες μπορούν να επηρεαστούν με την τροποποίηση της χρονικής διαφοράς έναρξης των πράσινων μεταξύ διαδοχικών διασταυρώσεων που αποτελούν τμήματα αρτηρίας. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής ενός αποκεντρωμένου κανόνα ελέγχου με ανατροφοδότηση και στόχο έχει την δημιουργία πράσινου κύματος (green wave) σε μία αρτηρία. Ο καθορισμός αυτής της χρονικής διαφοράς πρέπει να λαμβάνει υπόψη την πιθανή ύπαρξη ουρών οχημάτων στις αντίστοιχες προσβάσεις του δικτύου.

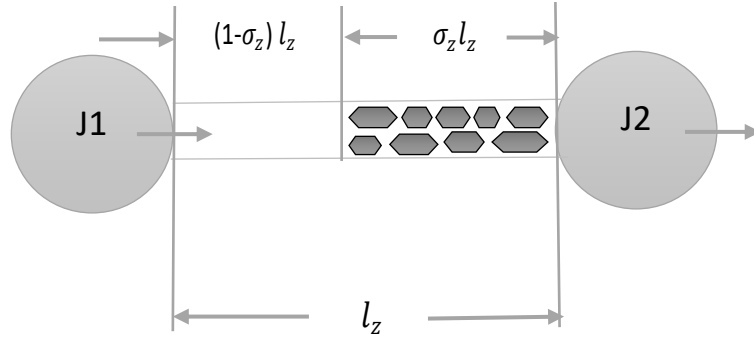
Ο έλεγχος της χρονικής διαφοράς βασίζεται στις ακόλουθες υποθέσεις:

- Αρχικά η χρονική διαφορά προσδιορίζεται για αρτηρίες μιας κατεύθυνσης που δε διασταυρώνονται. Οι αρτηρίες ορίζονται ως μία προκαθορισμένη συνέχεια από συνδέσμους που δεν αντιστοιχούν κατ' ανάγκη σε φυσικές αρτηρίες του δικτύου.
- Στην περίπτωση των αρτηριών με δύο διευθύνσεις, η χρονική διαφορά προσδιορίζεται ξεχωριστά για την κάθε διεύθυνση και η χρονική διαφορά που θα εφαρμοστεί είναι ο σταθμευμένος μέσος των δύο. Εναλλακτικά, η πιο βεβαρημένη κατεύθυνση θα μπορούσε να καθορίσει τη συνολική χρονική διαφορά.
- Όσον αφορά τις αρτηρίες που διασταυρώνονται, η TUC καθορίζει μία σειρά προτεραιότητας των αρτηριών ανάλογα με τη σημαντικότητά τους στον προσδιορισμό της χρονικής διαφοράς και ο έλεγχος εκτελείται για κάθε αρτηρία ξεκινώντας από αυτήν που έχει ταξινομηθεί ως πρώτη. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στα σημεία διασταυρώσεως των αρτηριών. Η προαναφερθείσα ταξινόμηση των αρτηριών πραγματοποιείται από τις αρχές του δικτύου.

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

Ο προσδιορισμός της ιδανικής χρονικής διαφοράς λαμβάνει υπόψη την ουρά των οχημάτων στις αντίστοιχες προσβάσεις του δικτύου. Συγκεκριμένα, εάν τα δύο ακόλουθα κύματα κυκλοφοριακής ροής συναντηθούν ακριβώς στην άκρη της υπάρχουσας ουράς οχημάτων, τότε υπάρχει η ιδανική χρονική διαφορά.

Κύμα ροής (Flow wave): Το κύμα ροής δημιουργείται όταν στον σηματοδότη της ανάντη διασταύρωσης που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (J1) ανάβει η πράσινη ένδειξη. Το κύμα αυτό κινείται προς την κατάντη διασταύρωση με ταχύτητα v_z και αναμένεται να φτάσει στην άκρη της υπάρχουσας ουράς οχημάτων σε χρόνο $[1 - \sigma_z(k)] * l_z / v_z$, μετά την έναρξη του πράσινου χρόνου.



Σχήμα 3.1 – Σύνδεσμος z μεταξύ δύο διασταυρώσεων.

Κινηματικό κύμα (Kinematic wave) : Το κινηματικό κύμα δημιουργείται με την έναρξη του πράσινου χρόνου στην κατάντη διασταύρωση του σχήματος (J2) και κινείται προς την ανάντη κατεύθυνση με ταχύτητα v^c . Η ταχύτητα v^c υπολογίζεται περίπου στα 15 km/h. Το κινηματικό κύμα αναμένεται να φτάσει στην άκρη της ουράς σε χρόνο $\sigma_z(k) * l_z / v^c$. Η ιδανική χρονική διαφορά μεταξύ των διασταυρώσεων J1 και J2, στην κατεύθυνση που φαίνεται στο σχήμα, πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση:

$$\frac{[1 - \sigma_z(k)] * l_z}{v_z} = t_{j1,j2}(k) + \frac{\sigma_z(k) * l_z}{v_z} \quad (3.5)$$

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση, ο κανόνας ελέγχου ανατροφοδότησης της χρονικής διαφοράς δίνεται από την σχέση:

$$t_{j1,j2}(k) = \frac{l_z}{v_z} - l_z * K_z^0 \frac{x_{z(k)}}{x_{z,max}} \quad (3.6)$$

Όπου K_z^0 είναι η παράμετρος ελέγχου που εξάγεται από την σχέση $\frac{v^c - v_z}{v^c + v_z}$.

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

Το τμήμα αυτό της στρατηγικής αποσκοπεί στην παροχή προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς μέσω κατάλληλης τροποποίησης των αποτελεσμάτων των προηγούμενων τμημάτων της στρατηγικής TUC. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τις ακόλουθες δύο προσεγγίσεις.

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

Η πρώτη προσέγγιση είναι κατάλληλη για δίκτυα με πολλές διασταυρούμενες γραμμές μέσων μαζικής μεταφοράς και συχνή κίνηση των μέσων αυτών στο δίκτυο, και απαιτεί μόνο γνώση του αριθμού των οχημάτων μαζικής μεταφοράς που βρίσκονται στους συνδέσμους του δικτύου. Αυτός ο αριθμός χρησιμοποιείται για την κατάλληλη απόδοση βαρών στις μετρήσεις που χρησιμοποιούνται από την στρατηγική, με αποτέλεσμα να αναγκάζεται ο έλεγχος της διάρκειας των φάσεων να ευνοεί τους συνδέσμους που έχουν αξιοσημείωτες κινήσεις οχημάτων μαζικής μεταφοράς.

Η δεύτερη προσέγγιση δεν είναι κατάλληλη για δίκτυα σαν αυτά της προηγούμενης προσέγγισης διότι θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη η τροποποίηση της κατάστασης σηματοδότησης τόσες πολλές φορές ώστε να εξυπηρετούνται τα μέσα μαζικής μεταφοράς. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, εάν ένα όχημα μαζικής μεταφοράς ανιχνευθεί σε ένα σύνδεσμο, η κατάσταση της σηματοδότησης τροποποιείται αυτόματα ώστε το όχημα να περάσει τη διασταύρωση το νωρίτερο δυνατόν. Παρ' όλο που η τροποποίηση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, στη στρατηγική TUC η προτεραιότητα παρέχεται μόνο με την επέκταση της διάρκειας του πράσινου ή με ανάκληση σταδίων καθώς όλες οι άλλες μέθοδοι παρουσιάζουν μεγάλες δυσκολίες σε υπερκορεσμένες συνθήκες κυκλοφορίας.

- Επεξεργασία δεδομένων (Data Processing).

Αυτό το τμήμα είναι υπεύθυνο για τη συλλογή, συμπλήρωση και επεξεργασία των στοιχείων πραγματικού χρόνου που συλλέγονται από το δίκτυο που εξετάζεται με σκοπό την προετοιμασία των απαιτούμενων δεδομένων εισόδου για κάθε ένα από τα τμήματα της στρατηγικής που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Για την εκτέλεση των τμημάτων της στρατηγικής TUC που αναφέρθηκαν, δηλαδή για τους ελέγχους της διάρκειας φάσεων, περιόδου και χρονικής διαφοράς καθώς και της παροχής προτεραιότητας στα μέσα μαζικής μεταφοράς, απαραίτητη είναι η γνώση του αριθμού των οχημάτων που

υπάρχουν στο υπό εξέταση δίκτυο σε πραγματικό χρόνο. Τα στοιχεία που επεξεργάζεται το τμήμα της επεξεργασίας δεδομένων ανακλούν τις μέσες κυκλοφοριακές συνθήκες και όχι τις περιοδικές αυξομειώσεις στις κυκλοφοριακές συνθήκες που παρατηρούνται στο δίκτυο.

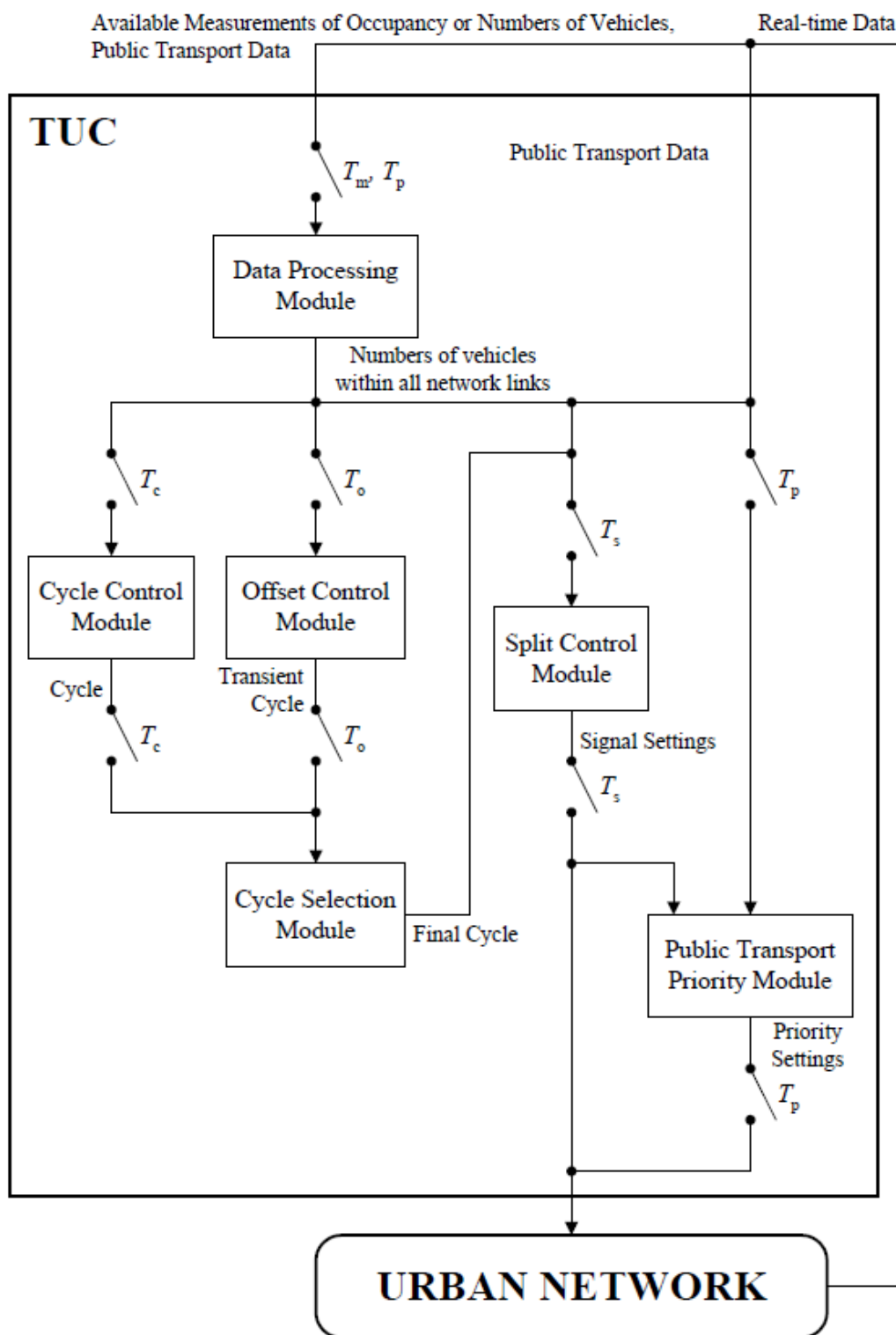
Συνεπώς, ο αριθμός των οχημάτων που χρησιμοποιείται από τον έλεγχο διάρκειας των φάσεων είναι οι μέσες τιμές που αντιστοιχούν στο προηγούμενο διάστημα ελέγχου T_s και ο αριθμός των οχημάτων που χρησιμοποιείται από τον έλεγχο περιόδου, χρονικής διαφοράς και της παροχής προτεραιότητας είναι ο αριθμός που προέκυψε από τον έλεγχο της διάρκειας των φάσεων κατά τη διάρκεια του τελευταίου διαστήματος T_s . Ως εκ τούτου, όλα τα τμήματα της στρατηγικής βασίζουν τις αποφάσεις τους στις πιο πρόσφατες παρατηρούμενες κυκλοφοριακές συνθήκες.

Για τις μετρήσεις κατάληψης στις οδούς των δικτύων συνήθως χρησιμοποιούνται οι παραδοσιακοί μαγνητικοί ανιχνευτές (φωρατές), οι οποίοι δεν μετρούν απευθείας τον αριθμό των οχημάτων μέσα σε ένα σύνδεσμο, αντιθέτως, ο αριθμός αυτός υπολογίζεται με έμμεσο τρόπο. Διαφορετικά, η άμεση γνώση του αριθμού των οχημάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσω προηγμένων συστημάτων οπτικής ανίχνευσης, που δε χρησιμοποιούνται συχνά στα κυκλοφοριακά δίκτυα λόγω του υψηλού κόστους.

Για το σχεδιασμό και την εφαρμογή της τεχνικής, το δίκτυο μπορεί να χωριστεί σε μικρότερα δίκτυα. Το κριτήριο του διαχωρισμού αυτού είναι να μην επηρεάζουν σημαντικά οι κυκλοφοριακές συνθήκες ενός υποδικτύου τις κυκλοφοριακές συνθήκες στα άλλα υποδίκτυα, ενώ ταυτόχρονα να υπάρχει μεγάλη συσχέτιση και αλληλεπίδραση μεταξύ των διασταυρώσεων μέσα σε κάθε υποδίκτυο. Κάθε υποδίκτυο αποτελείται από συνδέσμους $z \in Z$ όπου Z είναι το σύνολο όλων των συνδέσμων που αποτελούν τις κατευθύνσεις που έχουν την ίδια στιγμή προτεραιότητα, και διασταυρώσεις $j \in J$ με J το σύνολο των διασταυρώσεων όπου οι κατευθύνσεις διασταυρώνονται. Επιπλέον, I_j και O_j είναι το σύνολο όλων των συνδέσμων εισόδου και εξόδου αντίστοιχα, από τη δεδομένη διασταύρωση του δικτύου j .

Πρέπει να τονίσουμε ότι για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε μόνο το split control. Ο έλεγχος του offset και του κύκλου δεν χρησιμοποιήθηκαν για να έχουμε μια πιο δίκαιη σύγκριση ανάμεσα στις μεθόδους TUC και Max-Pressure (βλέπε επόμενο κεφάλαιο). Η TUC ως μέθοδος κεντρικού ελέγχου μπορεί να κάνει χρήση και ελέγχου offset και κύκλου οπότε θα οδηγούσε σίγουρα σε καλύτερα αποτελέσματα.

Στο σχήμα που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα απεικονίζεται γραφικά η δομή της στρατηγικής TUC και ο τρόπος σύνδεσης και λειτουργίας των επιμέρους τμημάτων της.



Σχήμα 3.2- Γραφική αναπαράσταση της στρατηγικής TUC

4 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ MAX PRESSURE

4.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί μέχρι τώρα, η ραγδαία εξέλιξη στις τεχνολογίες καθώς και η συνεχόμενη αύξηση των οχημάτων στα περισσότερα οδικά δίκτυα, έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη πολλών και διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου των κυκλοφοριακών συνθηκών. Ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει το κάθε δίκτυο, επιλέγεται η κατάλληλη στρατηγική ελέγχου. Οι στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου που ανταποκρίνονται στις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες θεωρούνται περισσότερο αποδοτικές συγκριτικά με τις στρατηγικές σταθερού χρόνου που βασίζονται σε σταθερές μετρήσεις. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί πολλές στρατηγικές ελέγχου, κάποιες από τις οποίες έχουν εφαρμοστεί σε πραγματικά οδικά δίκτυα και έχουν βελτιστοποιηθεί, ενώ κάποιες άλλες βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο.

Τα συστήματα SCOOT και SCATS ανήκουν μεταξύ άλλων, στις πρώτες προσπάθειες για την ανάπτυξη προσαρμοστικών συστημάτων ελέγχου της κυκλοφορίας για οδικά δίκτυα και βασίζονται πάνω σε ευρετικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Άλλα συστήματα βελτιστοποίησης που ακολουθούν έναν κεντρικό έλεγχο είναι τα OPAC, PROLYN και RHODES που βασίζονται στον δυναμικό προγραμματισμό και στο σχήμα ελέγχου κυλιόμενου ορίζοντα. Πιο πρόσφατα, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε σε οδικά δίκτυα της Ευρώπης και της Ν. Αμερικής το σύστημα TUC, που εφαρμόζει έναν ρυθμιστή ανατροφοδότησης πολλαπλών μεταβλητών και βασίζεται στο πρόβλημα του Γραμμικού- Τετραγωνικού ελέγχου.

Τα συστήματα που προαναφέρθηκαν αποτελούν παραδείγματα στρατηγικών συντονισμένου ελέγχου, συνεπώς τα στοιχεία εισόδου είναι συνάρτηση όλων των μετρήσεων του δικτύου. Προκειμένου να εφαρμοστεί κάποια από τις παραπάνω στρατηγικές, είναι απαραίτητη η συλλογή πληροφοριών από όλους τους κόμβους του δικτύου και η μεταφορά τους σε ένα κεντρικό σημείο. Τα έξοδα για την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τη συντήρηση αυτών των συστημάτων είναι ιδιαίτερα υψηλά, συνεπώς, παρ' όλο που τα συστήματα συντονισμένου ελέγχου είναι πολύ αποδοτικά, χρησιμοποιούνται ελάχιστα λόγω του αυξημένου κόστους. Αντίθετα, οι τοπικοί ελεγκτές είναι πολύ εύκολο να εφαρμοστούν καθώς χρησιμοποιούν μετρήσεις μόνο γύρω από μία συγκεκριμένη περιοχή και συμφέρουν οικονομικά.

Στην συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται ο τοπικός ελεγκτής ανατροφοδότησης Max-Pressure ο οποίος εφαρμόζεται ανά κόμβο και χρησιμοποιεί μόνο τις παρακείμενες μετρήσεις του μήκους ουράς του εξεταζόμενου κόμβου και όχι τις

μετρήσεις όλων των κόμβων του δικτύου, με τη δυνατότητα να λάβουμε πληροφορία και από τους γειτονικούς μόνο κόμβους. Ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες και τις συνθήκες που επικρατούν στο εξεταζόμενο δίκτυο, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες παραλλαγές του max-pressure σε πραγματικό χρόνο.

4.2 Max-Pressure

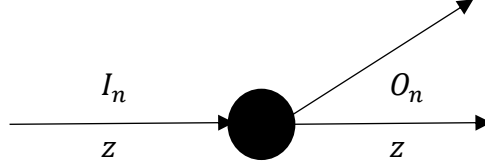
Ο max-pressure είναι ένας τοπικός ελεγκτής ανατροφοδότησης πραγματικού χρόνου. Η απόφαση σε κάθε κόμβο εξαρτάται μόνο από τις μετρήσεις που αφορούν τον παρακείμενο κόμβο και όχι από τις μετρήσεις στους κόμβους όλου του δικτύου, με τη δυνατότητα όμως να λάβουμε πληροφορία από τους γειτονικούς κόμβους. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, δεδομένου ότι η υποδομή που απαιτείται για την υλοποίηση του max pressure είναι πολύ πιο απλή να κατασκευαστεί. Κάτι ίσως ακόμα σημαντικότερο είναι ότι ο Max Pressure μπορεί να εφαρμοστεί κλιμακωτά, δηλαδή αν ένας νέος κόμβος προστεθεί στο δίκτυο, η στρατηγική Max Pressure για το αρχικό δίκτυο δεν αλλάζει. Αυτός ο τοπικός ελεγκτής δεν απαιτεί καμία γνώση των τωρινών ή μελλοντικών μετρήσεων ζήτησης του δικτύου, απαιτεί όμως γνώση των μέσων αναλογιών στροφής (turn ratios) και του ποσοστού κορεσμού (saturation rates), τα οποία μπορούν να εκτιμηθούν από τις μετρήσεις της ουράς ή να ανακτηθούν από ιστορικά δεδομένα. Ο Max Pressure σταθεροποιεί το δίκτυο όταν η ζήτηση του link είναι μεταξύ συγκεκριμένων ορίων κι έτσι μεγιστοποιεί την απόδοση του δικτύου.

Η μεθοδολογία αυτή αρχικά εισήχθη λαμβάνοντας υπόψη το πρόβλημα της δρομολόγησης και προγραμματισμού πακέτων μεταδόσεων σε ένα ασύρματο δίκτυο. Στα δίκτυα πακέτων έχει υιοθετηθεί ο όρος «backpressure», ενώ στον προγραμματισμό και τη δρομολόγηση ευέλικτων δικτύων παραγωγής επικρατεί ο όρος «max pressure», που έχει παρουσιαστεί από τους Dai και Lin (2005). Υπάρχει μεγάλη θεωρία γύρω από τους max pressure και backpressure αλγόριθμους.

Ο αλγόριθμος Max Pressure θεωρεί τα εισερχόμενα οχήματα σε έναν κόμβο ως «πελάτες» (clients) που πρέπει να εξυπηρετηθούν από έναν αριθμό «εξυπηρετητών» (servers). Οι διαθέσιμοι εξυπηρετητές αντιστοιχούν στα διάφορα στάδια του κόμβου. Τα στάδια ενός κόμβου δεν μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα. Ο γενικός στόχος της στρατηγικής είναι η εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων οχημάτων από το δίκτυο, κι έτσι επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση του συστήματος. Τα οχήματα καταφθάνουν στον κόμβο ανεξάρτητα και κατανεμημένα πανομοιότυπα (Pravin Varaiya 2013).

Το αρτηριακό (οδικό) δίκτυο παρουσιάζεται ως ένα κατευθυνόμενο γράφημα που αποτελείται από δρόμους (links) $z \in Z$ και κόμβους (nodes) $n \in N$. Για κάθε σηματοδοτούμενο κόμβο n καθορίζουμε ένα σύνολο από εισερχόμενα I_n και εξερχόμενα O_n links. Υποτίθεται πως η χρονική διαφορά (offset) και η περίοδος ενός

κύκλου C_n του κόμβου n είναι σταθερά ή υπολογίζονται σε πραγματικό χρόνο μέσω ενός άλλου αλγορίθμου. Συνήθως υποθέτουμε ότι $C_n = C$ για κάθε $n \in N$.



Σχήμα 4.1 – Γραφική αναπαράσταση κόμβου με εισερχόμενα και εξερχόμενα links.

Ο έλεγχος της σηματοδότησης του κόμβου n -συμπεριλαμβανομένου του σταθερού χαμένου χρόνου (fixed lost lime) L_n - βασίζεται σε έναν σταθερό αριθμό σταδίων j που ανήκουν στο σύνολο F_n . Η ροή κορεσμού (saturation flow) S_z του link $z \in Z$ και τα ποσοστά στροφής (turning rates) $\beta_{i,w}$, όπου $i \in I_n$ και $w \in O_n$, υποτίθεται πως είναι γνωστά και μπορεί να είναι σταθερά ή να διακυμαίνονται με τον χρόνο.

Για κάθε κόμβο n ισχύει ο περιορισμός:

$$\sum_{j \in F_n} g_{n,j}(k_n) + L_n = (\text{ή } \leq) C_n \quad (4.1)$$

Όπου $k_n = 0, 1, 2, \dots$ είναι ο δείκτης ελέγχου διακριτού χρόνου και $g_{n,j}$ είναι ο πράσινος χρόνος του σταδίου j . Η ανισότητα μπορεί να φανεί χρήσιμη σε περιπτώσεις μεγάλης κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Επιπλέον, ο περιορισμός

$$g_{n,j}(k_n) \geq g_{n,j,min} , \quad j \in F_n \quad (4.2)$$

Όπου $g_{n,j,min}$ είναι ο ελάχιστος επιτρεπτός πράσινος χρόνος για το στάδιο j στον κόμβο n και παρουσιάζεται ώστε να εγγυηθεί την κατανομή του επαρκή πράσινου χρόνου στους πεζούς. Οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος είναι $g_{n,j}(k_n)$ και απεικονίζουν τον αποδοτικό πράσινο χρόνο για κάθε στάδιο $j \in F_n$ κάθε κόμβου $n \in N$.

4.3 Υπολογισμός της πίεσης

Η βασική ιδέα του τοπικού ελεγκτή Max-Pressure βασίζεται στον υπολογισμό και τη χρησιμοποίηση μιας «πίεσης» για κάθε σηματοδοτούμενο link του δικτύου. Η πίεση σχετίζεται με το μήκος των ουρών και την χωρητικότητά τους. Η πίεση ενός link μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση (Kouvelas et al. 2014):

$$p_z(k_n) = \left[\frac{x_z(k_n)}{x_{z,max}} - \sum_{w \in O_n} \frac{\beta_{z,w} x_w(k_n)}{x_{w,max}} \right] * S_z \quad (4.3)$$

Όπου:

z : το εξεταζόμενο link

w : ένα από τα κατάντη links του link z

p_z : η πίεση του link z

k_n : ($=0, 1, 2, \dots$) ο δείκτης ελέγχου διακριτού χρόνου

x_z : ο αριθμός των οχημάτων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν στο link z

$x_{z,max}$: η χωρητικότητα του link z σε οχήματα

O_n : το σύνολο των εξερχόμενων links

$\beta_{z,w} x_w$: το ποσοστό στροφής των οχημάτων από το link z στο link w

x_w : ο αριθμός των οχημάτων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν στο link w

$x_{w,max}$: η χωρητικότητα του link w σε οχήματα

S_z : η ροή κορεσμού του link z

Η χωρητικότητα των links σε οχήματα χρησιμοποιείται στον παρονομαστή της σχέσης (4.3), ώστε να ληφθεί υπόψη το μήκος των links, έτσι ώστε η πίεση σε ένα μικρό link με έναν αριθμό οχημάτων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν να είναι υψηλότερη από την πίεση ενός μεγαλύτερου link με τον ίδιο αριθμό οχημάτων.

Η πίεση του link z κατά τη διάρκεια του κύκλου ελέγχου k_n , είναι το μήκος ουράς του link (πρώτος όρος στην σχέση (4.3) εντός της παρένθεσης) μείον το μέσο μήκος ουράς όλων των εξερχόμενων links (δεύτερος όρος στην σχέση (4.3) εντός της παρένθεσης). Θεωρώντας τον δεύτερο όρο ως το (μέσο) μήκος ουράς των κατάντη links και τον πρώτο ως το ανάντη μήκος ουράς, ο ορισμός της πίεσης είναι απλά η διαφορά μεταξύ

των ανάντη και των κατάντη μηκών ουράς. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που όλα τα εξερχόμενα links εξέρχονται από το δίκτυο (υποθέτουμε ότι τα εξερχόμενα links έχουν απεριόριστη χωρητικότητα, άρα δεν παρουσιάζουν κανένα κατάντη μπλοκάρισμα), ο δεύτερος όρος της σχέσης (4.3) γίνεται ίσος με μηδέν. Οπότε, η πίεση του link είναι το μήκος της ουράς πολλαπλασιασμένο με το αντίστοιχο ποσοστό κορεσμού.

Εάν η σχέση (4.3) εφαρμοστεί $\forall z \in I_n$, υπολογίζονται οι πιέσεις όλων των εισερχόμενων links του κόμβου n . Η πίεση του κάθε σταδίου j της διασταύρωσης μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$P_{n,j}(k_n) = \max \left\{ 0, \sum_{z \in v_j} p_z(k_n) \right\}, j \in F_n \quad (4.4)$$

Όπου v_j είναι το σύνολο των links που έχουν δικαίωμα διέλευσης στο στάδιο j .

Αυτή η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των splits των αλληλοσυγκρουόμενων σταδίων του κόμβου.

4.4 Εφαρμογή της Max Pressure

Η MP παρουσιάζει κάποιες ιδιαιτερότητες κατά την εφαρμογή της που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Πρέπει αρχικά να αναφερθεί ότι είναι απαραίτητος ο ακριβής υπολογισμός των οχημάτων σε κάθε προσέγγιση την κάθε χρονική στιγμή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ανιχνευτών σε κάθε ελεγχόμενο link. Ο ένας ανιχνευτής βρίσκεται στην είσοδο του link και ο άλλος στη γραμμή διακοπής πορείας.

Υπό πραγματικές συνθήκες ο ακριβής υπολογισμός των οχημάτων δεν είναι πάντα εφικτός, καθώς μπορεί να προκληθεί μια ενδεχόμενη υπερεκτίμηση ή υποτίμηση από ανιχνευτές που μετράνε περισσότερα ή λιγότερα οχήματα από αυτά που πραγματικά διασχίζουν το link. Όταν το πρόβλημα συμβαίνει στους ανιχνευτές εισόδου, ενώ οι αντίστοιχοι ανιχνευτές στην γραμμή διακοπής πορείας μετράνε με ακρίβεια, τότε η εκτιμώμενη ουρά (queue) για την πρώτη περίπτωση δεν έχει ξεκάθαρη τιμή ή η τιμή της είναι μικρότερη από 0.

Σε περίπτωση υποτίμησης, όταν για παράδειγμα η εκτίμηση του αριθμού των οχημάτων είναι μικρότερη από 0, το σύστημα έχει τη δυνατότητα να μεταβάλει αυτή την τιμή σε ίση με το 0 ώστε να αποφευχθεί η διαιώνιση αυτού του σφάλματος. Αντίθετα, στην περίπτωση της υπερεκτίμησης της ουράς προκαλείται σπατάλη πράσινου χρόνου -waste of green time-, επειδή παρέχεται μεγαλύτερη παράταση πράσινου χρόνου -green extension- χωρίς να είναι απαραίτητη. Για την αντιμετώπιση τέτοιων περιπτώσεων, έχει οριστεί ένας μετρητής που παίρνει την τιμή 1 εάν ένα

όχημα διασχίζει τον ανιχνευτή που βρίσκεται στην γραμμή διακοπής πορείας, και την τιμή 0 σε διαφορετική περίπτωση. Αν κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου χρονικού κενού (6s) ο μετρητής παραμένει στην τιμή 0, τότε η ουρά παίρνει την τιμή 0.

Για την εφαρμογή της MP θα πρέπει να καθορίσουμε κάποιες παραμέτρους. Αρχικά, θα πρέπει να καθοριστεί το ποσοστό του κάθε link που συμμετέχει σε κάθε φάση του ελεγχόμενου κόμβου. Αν ένα link έχει δικαίωμα διέλευσης -right of way- σε παραπάνω από μία φάση, τότε πρέπει να δημιουργηθεί ένας πίνακας με τα ποσοστά της συμμετοχής του link σε κάθε φάση. Αν ένα link έχει δικαίωμα διέλευσης σε μόνο μία φάση, τότε το ποσοστό αυτό ισούται με 1. Ωστόσο, πρέπει να προσδιοριστούν και τα ποσοστά που το κάθε link συμμετέχει στα κατάντη links. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ιστορικών δεδομένων των turning rates.

Ο αλγόριθμος MP μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για αποφάσεις ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα π.χ. ανά δύο δευτερόλεπτα να αποφασίζουμε αν θα επιμηκύνουμε τον τρέχων πράσινο χρόνο για 2 sec ή αν θα δώσουμε δικαίωμα διέλευσης στην επόμενη φάση. Σε αυτήν την περίπτωση ο κύκλος αλλάζει συνεχώς διάρκεια ανάλογα με την ζήτηση του κόμβου. Το πλεονέκτημα είναι ότι μειώνουμε στο ελάχιστο την πιθανότητα υπερχειλίσης. Το ελάττωμα είναι ότι δεν μπορούμε να κάνουμε έλεγχο του offset λόγω των διαφορετικών κύκλων από κόμβο σε κόμβο. Σε αυτήν την περίπτωση σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου κατέχει ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται η απόφαση για την αλλαγή σταδίου. Για όλους τους ελεγχόμενους κόμβους υπολογίζεται η πίεση σε όλα τα στάδια. Ο αλγόριθμος βρίσκει το στάδιο με τη μέγιστη πίεση και αν το στάδιο με τη μέγιστη πίεση είναι ενεργό τη δεδομένη στιγμή, τότε αυτό λαμβάνει μια παράταση στον πράσινο χρόνο. Διαφορετικά, αν η μέγιστη πίεση ανήκει σε άλλο στάδιο, ο αλγόριθμος θα συνεχίσει στο επόμενο στάδιο. Για να αποφευχθεί η συνεχής αλλαγή σταδίου για στάδια που έχουν σχεδόν την ίδια πίεση, ορίζεται ένας περιορισμός. Εάν η ουρά του τρέχοντος ενεργού σταδίου είναι υψηλότερη κατά ένα ποσοστό από την ουρά του σταδίου με τη μέγιστη πίεση, ο αλγόριθμος δε θα αλλάξει το στάδιο. Αυτό γίνεται προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο συνολικός χαμένος χρόνος -lost time- στο δίκτυο. Ο αλγόριθμος λαμβάνει απόφαση όταν το ελάχιστο πράσινο έχει ολοκληρωθεί ή η προηγούμενη απόφαση έχει λήξει.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούμε μια παραλλαγή του αλγορίθμου MP. Αντί να χρησιμοποιούμε τις πιέσεις για να υπολογίσουμε τη μέγιστη και να δώσουμε πράσινο σε αυτήν, χρησιμοποιούμε τις πιέσεις του κάθε approach για να μοιράσουμε τον ενεργό πράσινο χρόνο σε κάθε φάση αναλογικά με τις αντίστοιχες πιέσεις. Οπότε ο πράσινος χρόνος g_z για την z φάση υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο ως το ποσοστό της πίεσης της z φάσης ως προς τη συνολική πίεση του κόμβου πολλαπλασιασμένο με τον προαποφασισμένο κύκλο του κόμβου.

$$g_z = \frac{p_z(k_n)}{\sum p_i(k_n)} * Cycle\ time \quad (4.5)$$

Άρα σε αυτήν την περίπτωση μπορούμε έχουμε ίδιο κύκλο για όλους τους κόμβους.

5 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ MAX- PRESSURE

Στις παραγράφους που προηγούνται έγινε αναφορά στην στρατηγική τοπικού ελέγχου Max Pressure (MP) και στον γενικό τύπο που περιγράφει την πίεση που ασκείται στα link. Ο τύπος της πίεσης που σχετίζεται με το μήκος των ουρών και τη χωρητικότητά τους είναι ο εξής:

$$p_z(k_n) = \left[\frac{x_z(k_n)}{x_{z,max}} - \sum_{w \in O_n} \frac{\beta_{z,w} x_w(k_n)}{x_{w,max}} \right] * S_z$$

Ωστόσο, κατά καιρούς πολλές είναι οι παραλλαγές της Max Pressure που έχουν εισαχθεί και εφαρμοστεί ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες και τις γνώσεις που υπάρχουν για τον εκάστοτε εξεταζόμενο κόμβο.

Όπως γνωρίζουμε ο MP είναι ένας τοπικός ελεγκτής ανατροφοδότησης πραγματικού χρόνου. Η απόφαση σε κάθε κόμβο εξαρτάται μόνο από τις μετρήσεις που αφορούν τον παρακείμενο κόμβο και όχι από τις μετρήσεις στους κόμβους όλου του δικτύου, με τη δυνατότητα όμως να λάβουμε πληροφορία από τους γειτονικούς κόμβους. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εισάγονται κάποιες διαφορετικές προσεγγίσεις της στρατηγικής, οι οποίες σχετίζονται με την γνώση που έχουμε για τις συνθήκες κυκλοφορίας που επικρατούν στους γειτονικούς κόμβους και εφαρμόζονται στο οδικό δίκτυο της πόλης των Χανίων. Σε κάθε παραλλαγή της Max Pressure, ο αρχικός τύπος της πίεσης διαμορφώνεται αναλόγως.

5.1 MP χωρίς πληροφορία από τους γειτονικούς κόμβους

Σε αυτή την προσέγγιση δεν έχουμε πληροφορία από τον ανάντη, αλλά ούτε και από τον κατάντη κόμβο. Η πίεση του link που εξετάζεται εξαρτάται μόνο από τις μετρήσεις του παρακείμενου δρόμου και δεν υπάρχουν μετρήσεις που αφορούν τον αμέσως ανάντη και τον αμέσως κατάντη κόμβο. Στα επόμενα κεφάλαια, όπου εφαρμόζεται αυτή η στρατηγική, θα εμφανίζεται με την συντομογραφία MP_no.

Ο τύπος της πίεσης διαμορφώνεται ως εξής:

$$p_z(k_n) = \frac{x_z(k_n)}{x_{z,max}} * S_z \quad (5.1)$$

Όπου:

z : το εξεταζόμενο link

p_z : η πίεση του link z

k_n : (=0, 1, 2,...) ο δείκτης ελέγχου διακριτού χρόνου

x_z : ο αριθμός των οχημάτων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν στο link z

$x_{z,max}$: η χωρητικότητα του link z σε οχήματα

S_z : η ροή κορεσμού του link z

5.2 MP με πληροφορία από τους κατάντη γειτονικούς κόμβους

Σε αυτή την προσέγγιση έχουμε πληροφορία μόνο από τους κατάντη (downstream) γειτονικούς κόμβους. Η λογική της προσέγγισης αυτής είναι η ελαχιστοποίηση, ακόμα και η εκμηδένιση του χαμένου πράσινου χρόνου του κόμβου που ελέγχεται, αν ο κατάντη κόμβος είναι αρκετά γεμάτος ώστε να μην μπορεί να εξυπηρετήσει τα οχήματα που θα εισέλθουν. Όταν η κατάληψη του κατάντη δρόμου είναι μεγαλύτερη από ένα όριο (70%), αλλάζουμε τον τύπο της πίεσης του link και μειώνουμε το pressure των link όχι με το pressure του κατάντη όπως ήταν η αρχική λογική και ο αρχικός τύπος, αλλά με ένα ποσοστό του (20% ή 30%). Για να το πετύχουμε αυτό εισάγουμε στην σχέση την μεταβλητή α .

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο τύπος της πίεσης διαμορφώνεται ως εξής:

$$p_z(k_n) = \left[\frac{x_z(k_n)}{x_{z,max}} - \alpha \sum_{w \in O_n} \frac{\beta_{z,w} x_w(k_n)}{x_{w,max}} \right] * S_z \quad (5.2)$$

Όπου:

z : το εξεταζόμενο link

w : ένα από τα κατάντη links του link z

p_z : η πίεση του link z

k_n : (=0, 1, 2,...) ο δείκτης ελέγχου διακριτού χρόνου

x_z : ο αριθμός των οχημάτων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν στο link z

$x_{z,max}$: η χωρητικότητα του link z σε οχήματα

O_n : το σύνολο των εξερχόμενων links

$\beta_{z,w}x_w$: το ποσοστό στροφής των οχημάτων από το link z στο link w

x_w : ο αριθμός των οχημάτων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν στο link w

$x_{w,max}$: η χωρητικότητα του link w σε οχήματα

S_z : η ροή κορεσμού του link z

Συνεπώς, όταν η κατάληψη του κατάντη δρόμου είναι μεγαλύτερη από το 70%, η μεταβλητή α παίρνει την τιμή 0.2 ή 0.3 (βλ. ενότητα 7.1), ενώ στην περίπτωση που η κατάληψη του κατάντη δρόμου είναι μικρότερη από το 70%, η μεταβλητή α ισούται με το 1.

Αν δεν υπάρχει πληροφορία για τους κατάντη κόμβους, τότε $\alpha=0$ και όπως είδαμε παραπάνω ο τύπος της πίεσης διαμορφώνεται ανάλογα (σχέση 5.1).

Εφεξής, όταν θα αναφερόμαστε σε αυτή την παραλλαγή θα χρησιμοποιούμε τη συντομογραφία MP_down.

5.3 MP με πληροφορία από τους ανάντη γειτονικούς κόμβους

Σε αυτή την περίπτωση γνωρίζουμε τον αριθμό των οχημάτων που εισέρχονται από τους ανάντη (upstream) γειτονικούς κόμβους. Για να διαμορφώσουμε τον τύπο της πίεσης του link στα δεδομένα που έχουμε, πρέπει να προσθέσουμε στην σχέση (5.1) τον όρο που σχετίζεται με τους ανάντη κόμβους, δηλαδή το μέσο μήκος ουράς των εισερχόμενων links. Στα επόμενα κεφάλαια, όταν αναφερόμαστε σε αυτή την παραλλαγή θα χρησιμοποιούμε την συντομογραφία MP_ur.

Πρακτικά, η πίεση σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται από την σχέση:

$$p_z(k_n) = \left[\frac{x_z(k_n)}{x_{z,max}} + \sum_{i \in I_n} \frac{\beta_{z,i} x_i(k_n)}{x_{i,max}} \right] * S_z \quad (5.3)$$

Όπου:

z : το εξεταζόμενο link

i : ένα από τα ανάντη links του link z

p_z : η πίεση του link z

k_n : ($=0, 1, 2, \dots$) ο δείκτης ελέγχου διακριτού χρόνου

x_z : ο αριθμός των οχημάτων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν στο link z

$x_{z,max}$: η χωρητικότητα του link z σε οχήματα

I_n : το σύνολο των εισερχόμενων links

$\beta_{z,i}x_i$: το ποσοστό στροφής των οχημάτων από το link z στο link i

x_i : ο αριθμός των οχημάτων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν στο link i

$x_{i,max}$: η χωρητικότητα του link i σε οχήματα

S_z : η ροή κορεσμού του link z

5.4 MP με πληροφορία από τους ανάντη και τους κατάντη γειτονικούς κόμβους

Σε αυτή την προσέγγιση της MP λαμβάνουμε πληροφορία σχετικά με τους αμέσως ανάντη και τους αμέσως κατάντη κόμβους, δηλαδή αυτή η προσέγγιση αποτελεί συνδυασμό των δύο προηγούμενων. Ο αρχικός τύπος της πίεσης διαμορφώνεται αναλόγως για να συμπεριλάβει όλες τις πληροφορίες που παρέχονται.

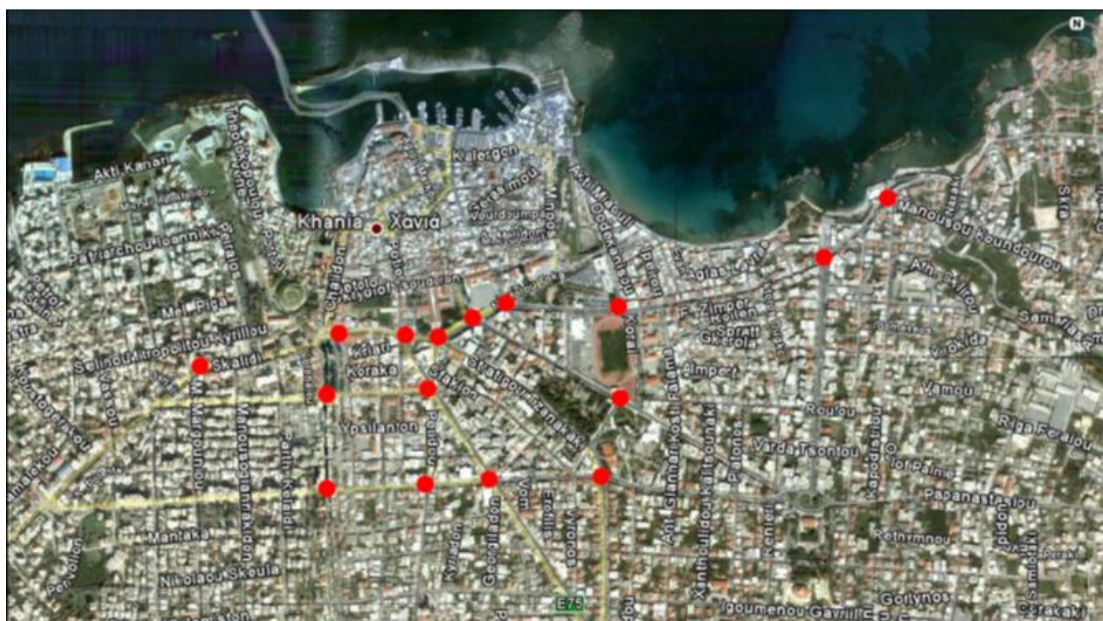
$$p_z(k_n) = \left[\frac{x_z(k_n)}{x_{z,max}} - \alpha \sum_{w \in O_n} \frac{\beta_{z,w}x_w(k_n)}{x_{w,max}} + \sum_{i \in I_n} \frac{\beta_{z,i}x_i(k_n)}{x_{i,max}} \right] * S_z \quad (5.4)$$

Ο πρώτος όρος εντός της παρένθεσης αντιστοιχεί στο μήκος ουράς του link, ο δεύτερος στο μέσο μήκος ουράς όλων των εξερχόμενων links και ο τρίτος στο μέσο μήκος ουράς όλων των εισερχόμενων links.

Στα επόμενα κεφάλαια θα χρησιμοποιείται η συντομογραφία MP_up_down όταν θα αναφερόμαστε σε αυτήν την παραλλαγή.

Όπως έχει αναφερθεί επανειλημμένα μέχρι τώρα, η παρούσα εργασία βασίζεται στο οδικό κυκλοφοριακό δίκτυο των Χανίων. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση αυτού του δικτύου.

Ένας απλοποιημένος χάρτης της πόλης φαίνεται παρακάτω.



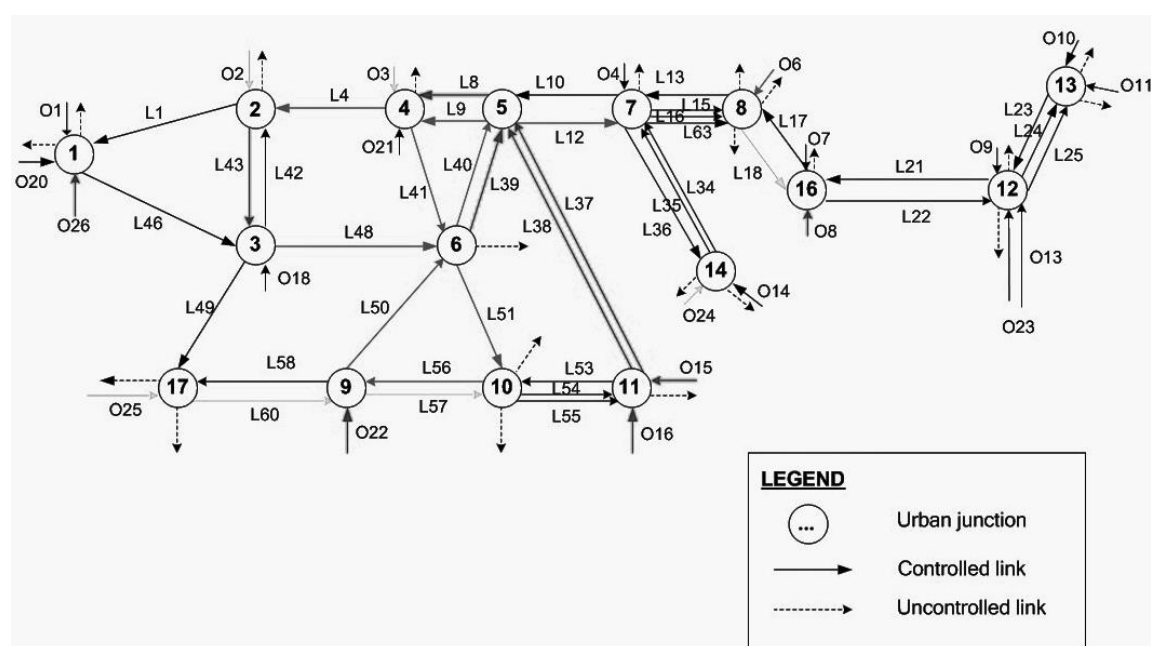
Εικόνα 6.1 - Χάρτης της πόλης των Χανίων

Το εξεταζόμενο δίκτυο έχει μήκος περίπου 12,5km και αποτελείται από 17 κόμβους ελεγχόμενους με φωτεινούς σηματοδότες, ενώ οι φάσεις είναι 42 και τα links 61.

Το γεγονός ότι οι περισσότεροι από τους συνδέσμους του δικτύου αποτελούνται από μία μόνο λωρίδα, είναι υπεύθυνο για την κυκλοφοριακή συμφόρηση σε περίπτωση που συμβεί κάτι απρόσμενο, όπως για παράδειγμα κάποιο ατύχημα. Η κατάσταση της κυκλοφορίας επηρεάζεται συνεχώς και από πολλές άλλες καθημερινές ή εποχικές παραμέτρους. Μια τέτοια παράμετρος είναι η κυκλοφορία των αστικών και των λεωφορείων καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας, τα οποία με τις συνεχείς στάσεις δυσχεραίνουν την κυκλοφορία στη μία κατεύθυνση του δρόμου. Επίσης αυξημένη κίνηση συναντάται καθημερινά στο κεντρικό και βόρειο τμήμα του δικτύου για 1-2 ώρες το πρωί και το βράδυ, όπως επίσης και το διάστημα 19:00-21:30 την Τρίτη, Πέμπτη και Παρασκευή λόγω της λειτουργίας των εμπορικών καταστημάτων.

Η παράνομη στάθμευση των οχημάτων μειώνει τη χωρητικότητα της λωρίδας με αποτέλεσμα την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Μεγάλη χρήση των οχημάτων παρατηρείται κατά τις βροχερές ημέρες σε ολόκληρο το δίκτυο, όπως επίσης και κατά τη διάρκεια της θερινής τουριστικής περιόδου. Η υπάρχουσα υποδομή του δικτύου φορτώνεται υπερβολικά με όλα τα πρόσθετα ιδιωτικά και ενοικιαζόμενα αυτοκίνητα και μοτοσικλέτες, τα τουριστικά λεωφορεία και την αυξημένη κίνηση των ταξί, με αποτέλεσμα να δημιουργείται κυκλοφοριακή συμφόρηση.

Όλα τα παραπάνω προβλήματα είναι εμφανώς μειωμένα ή ανύπαρκτα, όπως είναι λογικό, τις Κυριακές και σε σπάνιες ακόμα περιπτώσεις, όπως είναι οι ημέρες αργίας.



Εικόνα 6.2 - Οδικό κυκλοφοριακό δίκτυο Χανίων

Στο παραπάνω σχήμα (εικόνα 6.2) φαίνεται το εξεταζόμενο οδικό δίκτυο της πόλης. Με αριθμούς μέσα σε κύκλο συμβολίζονται οι κόμβοι που ελέγχονται με τους σηματοδότες, ενώ τα τόξα συμβολίζουν τα links που συνδέουν τους κόμβους.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι ο κόμβος 5 αποτελεί τον σημαντικότερο κόμβο του δικτύου καθώς βρίσκεται στο πιο κεντρικό σημείο της πόλης (Δημοτική Αγορά) όπου παρατηρείται συχνότερα κυκλοφοριακή συμφόρηση. Ιδιαιτερότητα παρατηρείται επίσης στους κόμβους 12 και 13 που βρίσκονται στο ανατολικό κομμάτι του δικτύου λόγω της αυξημένης εισόδου των οχημάτων.

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται κάποια προβλήματα που με τη σωστή διαχείριση θα μπορούσαν να βελτιώσουν τα αποτελέσματα του αλγορίθμου μας. Τα θέματα αυτά αφορούν τη χρήση της κατάντη πληροφορίας και την αποφυγή απότομων αλλαγών του πράσινου.

7.1 Downstream Information

Μια έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί και βελτίωσε τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, σχετίζεται με τη χρήση της κατάντη πληροφορίας. Η λογική της είναι η ελαχιστοποίηση, ακόμα και η εκμηδένιση του χαμένου πράσινου χρόνου του κόμβου που ελέγχεται, αν ο κατάντη κόμβος είναι αρκετά γεμάτος ώστε να μην μπορεί να εξυπηρετήσει τα οχήματα που θα εισέλθουν. Αντιλαμβανόμενοι αυτή τη λογική και όταν τα κατάντη μήκη ουράς υπερβαίνουν ένα προκαθορισμένο όριο (70%), η πίεση των link μειώνεται όχι με την πίεση του κατάντη όπως ήταν η αρχική λογική, αλλά με ένα ποσοστό της (20% ή 30%). Όπως χρησιμοποιήθηκε η κατάντη πληροφορία για να μειωθεί η πίεση ενός link, έτσι χρησιμοποιήθηκε και η ανάντη πληροφορία για να αυξήσει την πίεση του link, εφόσον ο αριθμός των οχημάτων από τους ανάντη κόμβους είναι γνωστός. Η χρήση της ανάντη πληροφορίας δε βελτίωσε τα αποτελέσματα, με ή χωρίς την χρήση της κατάντη πληροφορίας.

Παραπάνω έγινε μια αναφορά σχετικά με την χρήση της κατάντη πληροφορίας. Προκειμένου να πετύχουμε την μείωση του pressure των link με ένα ποσοστό του κατάντη, στην περίπτωση που η κατάληψη του κατάντη link υπερβαίνει το 70%, εισάγουμε στον τύπο της πίεσης την μεταβλητή α και η σχέση της πίεσης διαμορφώνεται αναλόγως.

$$p_z(k_n) = \left[\frac{x_z(k_n)}{x_{z,max}} - \alpha \sum_{w \in O_n} \frac{\beta_{z,w} x_w(k_n)}{x_{w,max}} \right] * S_z$$

Όπου:

z : το εξεταζόμενο link

w : ένα από τα κατάντη links του link z

p_z : η πίεση του link z

k_n : ($=0, 1, 2, \dots$) ο δείκτης ελέγχου διακριτού χρόνου

x_z : ο αριθμός των οχημάτων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν στο link z

$x_{z,max}$: η χωρητικότητα του link z σε οχήματα

O_n : το σύνολο των εξερχόμενων links

$\beta_{z,w}x_w$: το ποσοστό στροφής των οχημάτων από το link z στο link w

$x_{w,max}$: η χωρητικότητα του link w σε οχήματα

S_z : η ροή κορεσμού του link z

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στα τρία σενάρια ζήτησης χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση και με την μεταβλητή α να παίρνει τις τιμές 10%, 20% και 30%, ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα σχετικά με την επιρροή του ποσοστού αυτού στην καθυστέρηση των οχημάτων στο δίκτυο. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων ως βάση αναφοράς χρησιμοποιείται το $\alpha = 20\%$.

| α | Delay time per vehicle (s/km) | Improvement (%) | Served |
|----------|-------------------------------|-----------------|--------|
| 10% | 96,1 | 0 | 20/20 |
| 20% | 96,1 | - | 20/20 |
| 30% | 96,1 | 0 | 20/20 |

Πίνακας 7.1 – Σενάριο ζήτησης *light*. Σύγκριση της καθυστέρησης των οχημάτων στο δίκτυο όταν $\alpha=10\%$, $\alpha=20\%$ και $\alpha=30\%$.

| α | Delay time per vehicle (s/km) | Improvement (%) | Served |
|----------|-------------------------------|-----------------|--------|
| 10% | 190,41 | -1,03 | 19/20 |
| 20% | 188,48 | - | 19/20 |
| 30% | 189,3 | -0,44 | 19/20 |

Πίνακας 7.2 – Σενάριο ζήτησης *heavy*. Σύγκριση της καθυστέρησης των οχημάτων στο δίκτυο όταν $\alpha=10\%$, $\alpha=20\%$ και $\alpha=30\%$.

| α | Delay time per vehicle (s/km) | Improvement (%) | Served |
|----------|-------------------------------|-----------------|--------|
| 10% | 583,82 | 2,03 | 15/20 |
| 20% | 595,94 | - | 17/20 |
| 30% | 582,58 | 2,24 | 13/20 |

Πίνακας 7.3 – Σενάριο ζήτησης *very heavy*. Σύγκριση της καθυστέρησης των οχημάτων στο δίκτυο όταν $\alpha=10\%$, $\alpha=20\%$ και $\alpha=30\%$.

Στο light σενάριο (πίνακας 7.1) επειδή ο αριθμός των οχημάτων στο δίκτυο είναι μικρός, η κατάληψη του κατάντη δρόμου δεν υπερβαίνει ποτέ το 70% και δεν ενεργοποιείται η χρήση της μεταβλητής α . Συνεπώς και στις τρεις περιπτώσεις εξάγονται ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα.

Στις δοκιμές του heavy σεναρίου (πίνακας 7.2) τα αποτελέσματα διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους και ο μικρότερος χρόνος καθυστέρησης σημειώνεται όταν χρησιμοποιείται το 20% της πληροφορίας του κατάντη δρόμου, με τιμή 188,48 s/km. Στο σύνολο των περιπτώσεων, σε 1 από τις 20 δοκιμές υπήρχαν οχήματα που παρέμειναν στο δίκτυο και μετά το τέλος της προσομοίωσης.

Τέλος, στην περίπτωση του very heavy σεναρίου (πίνακας 7.3), στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται το 10% και το 30% της πληροφορίας του κατάντη link παρατηρείται μικρότερη καθυστέρηση των οχημάτων συγκριτικά με την περίπτωση που χρησιμοποιείται το 20%. Πολύ σημαντικό όμως είναι το γεγονός ότι σε αυτές τις περιπτώσεις υπήρχαν πολλές δοκιμές στις οποίες το δίκτυο δεν κατάφερε να εξυπηρετήσει το σύνολο των οχημάτων που υπήρχαν σε αυτό, 5/20 και 7/20 αντίστοιχα. Παρά τη μεγαλύτερη καθυστέρηση που παρατηρείται όταν $\alpha=20\%$, σε μόνο 3 από τις 20 δοκιμές υπήρχαν οχήματα που παρέμειναν στο δίκτυο και μετά το τέλος της προσομοίωσης. Εφόσον η διαφορά στους χρόνους καθυστέρησης των οχημάτων και στις τρεις περιπτώσεις ήταν μικρή, θεωρούμε και στην περίπτωση του very heavy σεναρίου ότι καλύτερα αποτελέσματα εξάγονται όταν χρησιμοποιείται το 20% της πληροφορίας των κατάντη link.

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το ποσοστό συμμετοχής 20% της κατάντη πληροφορίας εξάγει καλύτερα αποτελέσματα στα σενάρια ζήτησης heavy και very heavy, ενώ στο light σενάριο δεν είναι απαραίτητη η χρήση του.

7.2 Smoothing

Το smoothing των τιμών του πράσινου χρόνου αποσκοπεί στην αποφυγή των απότομων αλλαγών του πράσινου από κύκλο σε κύκλο, πράγμα που θα μπορούσε να δώσει περισσότερη ασφάλεια αλλά και ηρεμία στου οδηγούς. Έγιναν δοκιμές για smoothing των τιμών του πράσινου στην Max-Pressure ώστε να δούμε πως αυτό επηρεάζει τα αποτελέσματά μας και αν μπορεί να προταθεί το smoothing σαν παραλλαγή της MP που θα έδινε καλύτερα αποτελέσματα.

Από τις προσομοιώσεις συμπεράναμε ότι η χρήση smoothing δεν βελτιώνει την κυκλοφοριακή κατάσταση με κάποιον συστηματικό τρόπο μιας και η στρατηγική MP θεωρείται bang-bang. Οπότε στα αποτελέσματα που θα παρουσιάσουμε δεν υπάρχει smoothing (ομαλοποίηση) των μετρήσεών μας.

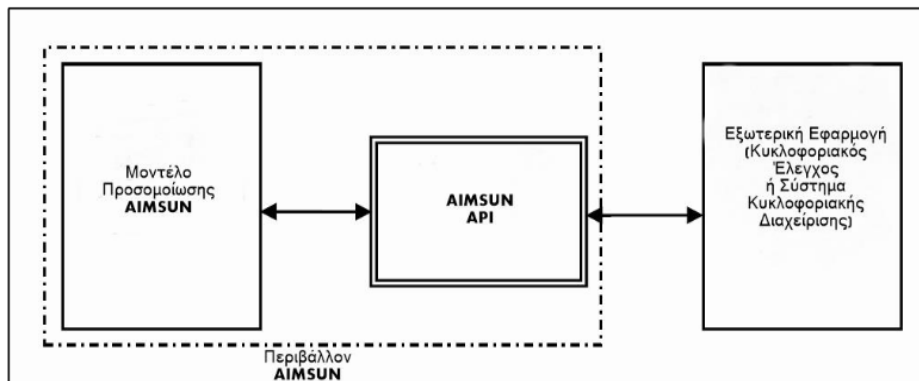
Για τον σκοπό της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές προσομοιώσεις στο οδικό κυκλοφοριακό δίκτυο της πόλης των Χανίων με την βοήθεια του μικροσκοπικού προσομοιωτή οδικών δικτύων AIMSUN. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται κάποια στοιχεία που αφορούν τον προσομοιωτή AIMSUN, το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και κάποιες ιδιαιτερότητες που συνδέονται με την εφαρμογή της στρατηγικής Max Pressure.

8.1 Ο προσομοιωτής AIMSUN

Ο προσομοιωτής AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) είναι ένας μικροσκοπικός προσομοιωτής κυκλοφορίας οδικών δικτύων. Για την λειτουργία του χρειάζεται ένα σενάριο προσομοίωσης και ένα σύνολο παραμέτρων που καθορίζουν το πείραμα. Το σενάριο αποτελείται από ένα σχέδιο οδικού δικτύου, δεδομένα κυκλοφοριακής ζήτησης, δεδομένα κυκλοφοριακού ελέγχου και σχέδια μέσων μαζικής μεταφοράς. Τα δεδομένα ζήτησης και κυκλοφοριακού ελέγχου μπορεί να είναι είτε σταθερά, είτε και να αλλάζουν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Όπως προαναφέρθηκε, ο AIMSUN είναι ένας μικροσκοπικός προσομοιωτής κυκλοφορίας οδικών δικτύων. Αυτό σημαίνει ότι η συμπεριφορά του κάθε οχήματος στο δίκτυο συνεχώς μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο AIMSUN είναι ένας συνδυασμός διακριτού και συνεχούς προσομοιωτή. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν στοιχεία στο δίκτυο, όπως τα οχήματα και οι φωρατές, των οποίων η κατάσταση αλλάζει συνεχώς κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, σε σύντομα χρονικά διαστήματα. Επίσης υπάρχουν στοιχεία στο δίκτυο, όπως τα σήματα κυκλοφορίας, που η κατάστασή τους στο δίκτυο αλλάζει διακριτά κατά τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Γενικότερα, ο προσομοιωτής AIMSUN μπορεί να απεικονίσει λεπτομερώς ένα οδικό δίκτυο κυκλοφορίας και έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιήσει τα περισσότερα από τα στοιχεία που υπάρχουν σε ένα πραγματικό οδικό δίκτυο όπως φωρατές, σήματα κυκλοφορίας κλπ.

Για την εξαγωγή και τροποποίηση διαφόρων παραμέτρων της προσομοίωσης, ο AIMSUN παρέχει τη δυνατότητα χρήσης API (Application Programming Interface). Ουσιαστικά, η API δίνει τη δυνατότητα επικοινωνίας και ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ του περιβάλλοντος του AIMSUN και μίας εξωτερικής εφαρμογής ή του χρήστη. Η επικοινωνία μεταξύ της API και του AIMSUN πραγματοποιείται αυτόματα, με ειδικές εσωτερικές διαδικασίες του προγράμματος, ενώ υπεύθυνος για την επικοινωνία με την εξωτερική εφαρμογή είναι ο χρήστης.



Εικόνα 8.1: Διαδικασία ανταλλαγής πληροφορίας μεταξύ του AIMSUN και μιας εξωτερικής εφαρμογής μέσω χρήσης API

Επίσης ο προσομοιωτής AIMSUN διαθέτει ένα ειδικό πακέτο που ονομάζεται GETRAM Extensions. Αυτό διαθέτει μια βιβλιοθήκη από αρχεία τύπου dll μέσω των οποίων μπορούμε να προσθέσουμε οποιαδήποτε πολιτική ή στρατηγική θέλουμε, πέρα από αυτές που διαθέτει ο προσομοιωτής από μόνος του, κάνοντας χρήση της C++ .

Απαραίτητη για μια σωστή προσομοίωση είναι η επανάληψη. Κάθε επανάληψη χρησιμοποιεί διαφορετικό seed για την γεννήτρια τυχαίων αριθμών και ως αποτέλεσμα κάθε επανάληψη δίνει διαφορετικά αποτελέσματα. Για να έχουμε σωστά συμπεράσματα πρέπει να γίνει αρκετός αριθμός επαναλήψεων με διαφορετικά seeds για να εξαλειφθεί η επίδραση της στοχαστικότητας της ζήτησης.

Τα αποτελέσματα που εξάγονται από το AIMSUN είναι μέσοι όροι που αναφέρονται σε ολόκληρο το δίκτυο. Αυτά είναι:

- Delay time (sec/km): μέσος χρόνος καθυστέρησης ανά όχημα ανά χιλιόμετρο.
- Density (veh/km): μέση πυκνότητα οχημάτων σε ολόκληρο το δίκτυο.
- Harmonic Mean Speed (km/h): αρμονική μέση ταχύτητα για τα οχήματα που έχουν εγκαταλείψει το δίκτυο.
- Total Distance Travelled (km): συνολικός αριθμός χιλιομέτρων που διανύθηκαν από όλα τα οχήματα που έχουν περάσει από το δίκτυο.
- Total Travel Time (h): συνολικός χρόνος ταξιδιού από όλα τα οχήματα που έχουν περάσει από το δίκτυο.
- Number of stops (stops/veh/km): μέσος αριθμός στάσεων ανά όχημα ανά χιλιόμετρο.
- Vehicle out: αριθμός των οχημάτων που εξυπηρετήθηκαν από το δίκτυο.
- Vehicle in: αριθμός των οχημάτων που παρέμειναν στο δίκτυο μετά το τέλος της προσομοίωσης.

Με τη χρήση λοιπόν του προσομοιωτή AIMSUN έγινε η προσομοίωση του δικτύου των Χανίων. Προστέθηκαν σχετικά σενάρια ζήτησης καθώς και οι διάφορες στρατηγικές ελέγχου (TUC – Max-Pressure) για τις οποίες γίνεται αναφορά στα κεφάλαια [3], [4] και [5]. Από τον προσομοιωτή είναι δυνατόν να ληφθούν και κάποια

μετρήσιμα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας για το δίκτυο, όπως αυτά που θα συζητηθούν στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων, όπως π.χ. η καθυστέρηση των οχημάτων, τα ποσοστά κατάληψης των οδών κ.α.

Η version του AIMSUN που χρησιμοποιήθηκε ήταν η 7.0.4 (R25783 x32)

8.2 Μοντέλο προσομοίωσης

Για τον σκοπό της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μια σειρά από προσομοιώσεις στο οδικό κυκλοφοριακό δίκτυο της πόλης των Χανίων. Σκοπός της έρευνας είναι η σύγκριση στρατηγικών ελέγχου με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου καθυστέρησης των οχημάτων (delay time per vehicle) στο δίκτυο και τη βελτιστοποίηση του πράσινου χρόνου σε κάθε φάση και κάθε κόμβο του δικτύου.

Προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός της εργασίας, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των παρακάτω στρατηγικών κυκλοφοριακού ελέγχου:

- Fixed-time έλεγχος σε ολόκληρο το δίκτυο. Αυτή η στρατηγική αναπτύχθηκε με σκοπό να υπάρχει μία βάση σύγκρισης μεταξύ των υπόλοιπων στρατηγικών ελέγχου κυκλοφορίας και περιλαμβάνει σταθερά δεδομένα και καθορισμένους πράσινους χρόνους για κάθε φάση και κάθε κόμβο. Επίσης εισάγεται μια χρονική καθυστέρηση μεταξύ του χρόνου έναρξης της περιόδου των κόμβων προκειμένου να δημιουργηθεί πράσινο κύμα -green wave- μεταξύ των αρτηριών.
- Στρατηγική TUC.
- Διαφορετικές προσεγγίσεις της στρατηγικής Max Pressure. Οι προσεγγίσεις αυτές διαφέρουν ως προς την γνώση που παρέχεται σχετικά με τους αμέσως ανάντη και τους αμέσως κατάντη κόμβους και έχουν παρουσιαστεί πιο αναλυτικά στο κεφάλαιο 5 της εργασίας.
MP_no. Σε αυτή την περίπτωση δεν παρέχεται καμία πληροφορία για τους αμέσως ανάντη και τους αμέσως κατάντη κόμβους.
MP_up. Σε αυτή την περίπτωση παρέχονται πληροφορίες μόνο σχετικά με τους αμέσως ανάντη κόμβους.
MP_down. Σε αυτή την περίπτωση παρέχονται πληροφορίες μόνο σχετικά με τους αμέσως κατάντη κόμβους.
MP_up_down. Σε αυτή την περίπτωση παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τους αμέσως ανάντη και τους αμέσως κατάντη κόμβους.

Τα τρία διαφορετικά σενάρια ζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν στις παραπάνω στρατηγικές παρουσιάζονται εδώ:

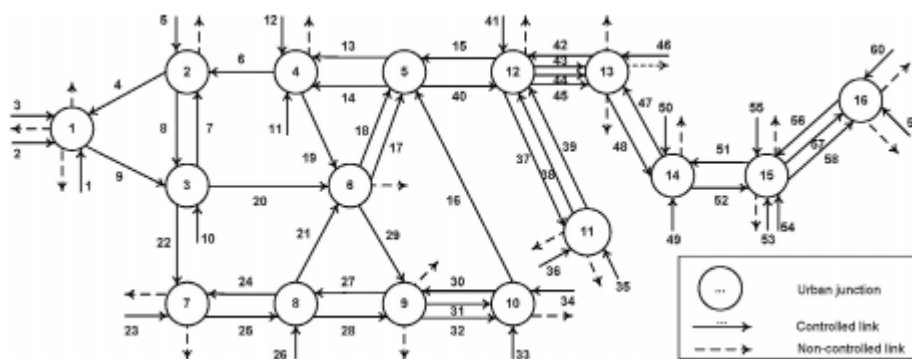
- **Light.** Πρόκειται για ένα «ελαφρύ» σενάριο με χαμηλή ζήτηση καθ' όλη την χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Σε αυτό το σενάριο ο αριθμός των

οχημάτων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν στο δίκτυο είναι μικρός, συνεπώς δεν δημιουργούνται προβλήματα κυκλοφοριακής συμφόρησης.

- **Heavy.** Πρόκειται για ένα σενάριο στο οποίο ο αριθμός των οχημάτων που βρίσκεται στο δίκτυο είναι αυξημένος, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται μεγάλες ουρές σε κάποιες χρονικές περιόδους της προσομοίωσης και μερικές φορές να δημιουργούνται προβλήματα στην κυκλοφορία.
- **Very heavy.** Χαρακτηριστικό αυτού του σεναρίου είναι η υπερβολικά αυξημένη ζήτηση που πολλές φορές εμποδίζει την εξυπηρέτηση πολλών οχημάτων (συμφόρηση). Συχνά παρατηρείται να έχουν παραμείνει οχήματα μέσα στο δίκτυο μετά το τέλος της προσομοίωσης (gridlock).

Η διάρκεια των προσομοιώσεων είναι 2,5 ώρες και στο πέρας της κάθε προσομοίωσης έχει προστεθεί χρόνος με μηδενική ζήτηση ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η εκκένωση του δικτύου. Ο χρόνος αυτός είναι 10 λεπτά για το σενάριο της χαμηλής ζήτησης και μεγαλώνει για τα άλλα δύο σενάρια. Σε όλες τις περιπτώσεις η ζήτηση έχει τη μορφή τραπεζίου. Με λίγα λόγια ξεκινάμε με άδειο το δίκτυο και μικρή ζήτηση στην αρχή η οποία μεγαλώνει σταδιακά στη μέγιστη τιμή της. Από εκεί και πέρα υπάρχει μια σταδιακή μείωση της ζήτησης μέχρι να μηδενίσει.

Στην εικόνα 8.2 φαίνεται το αστικό δίκτυο των Χανίων το οποίο αποτελείται από 16 κόμβους και 42 διαφορετικές φάσεις.



Εικόνα 8.2: Το αστικό δίκτυο των Χανίων

Σε αυτό το κεφάλαιο συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Ακολουθούν πίνακες και γραφήματα που επιτρέπουν τη σύγκριση μεταξύ των στρατηγικών ελέγχου που εφαρμόστηκαν, είτε σε έναν μεμονωμένο κόμβο του δικτύου, είτε στο σύνολο του εξεταζόμενου δικτύου.

Ακολουθεί μία σύντομη αναφορά στις στρατηγικές που εξετάστηκαν και στα σενάρια ζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν.

- *Fixed-time (FT)* έλεγχος σε ολόκληρο το δίκτυο. Αυτή η στρατηγική περιλαμβάνει καθορισμένους πράσινους χρόνους για κάθε φάση και κάθε κόμβο και αποτελεί βάση σύγκρισης για τις υπόλοιπες στρατηγικές.
- Στρατηγική *TUC*.
- Διαφορετικές προσεγγίσεις της στρατηγικής *Max Pressure*. Οι προσεγγίσεις αυτές διαφέρουν ως προς τη γνώση που παρέχεται σχετικά με τους αμέσως ανάντη και τους αμέσως κατάντη κόμβους.

MP_no. Σε αυτήν την περίπτωση δεν παρέχεται καμία πληροφορία για τους αμέσως ανάντη και τους αμέσως κατάντη κόμβους.

MP_up. Σε αυτήν την περίπτωση παρέχονται πληροφορίες μόνο σχετικά με τους αμέσως ανάντη κόμβους.

MP_down. Σε αυτήν την περίπτωση παρέχονται πληροφορίες μόνο σχετικά με τους αμέσως κατάντη κόμβους.

MP_up_down. Σε αυτήν την περίπτωση παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τους αμέσως ανάντη και τους αμέσως κατάντη κόμβους.

Τα σενάρια ζήτησης που εφαρμόστηκαν είναι τα εξής:

- *Light*. Σενάριο με χαμηλή ζήτηση.
- *Heavy*. Σενάριο με υψηλή ζήτηση.
- *Very heavy*. Σενάριο με υπερβολικά αυξημένη ζήτηση που πολλές φορές εμποδίζει την εξυπηρέτηση πολλών οχημάτων (gridlock).

9.1 Συγκριτικοί πίνακες

Οι πίνακες που παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα συγκεντρώνουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των στρατηγικών και αφορούν την καθυστέρηση των οχημάτων στο δίκτυο. Η καθυστέρηση των οχημάτων (delay time per vehicle) είναι ένα σημαντικό μέγεθος που εξάγεται από τον προσομοιωτή AIMSUN και μας επιτρέπει να σχηματίσουμε συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου που εφαρμόζεται. Όσο μικρότερη είναι

η καθυστέρηση των οχημάτων στο δίκτυο, τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματά μας.

Πραγματοποιήθηκαν 20 επαναλήψεις της κάθε στρατηγικής σε κάθε ένα από τα σενάρια ζήτησης.

Στη δεύτερη στήλη κάθε πίνακα (delay time per vehicle) παρουσιάζεται ο μέσος όρος της χρόνου καθυστέρησης των οχημάτων σε s/km.

Στη τρίτη στήλη κάθε πίνακα (improvement) παρουσιάζεται το ποσοστό βελτίωσης του χρόνου καθυστέρησης των οχημάτων στο δίκτυο, της εκάστοτε στρατηγικής που χρησιμοποιήθηκε συγκριτικά με τον fixed time αλγόριθμο.

Στη τέταρτη στήλη κάθε πίνακα (served) φαίνεται ο αριθμός των επαναλήψεων (από τις 20 συνολικά) κατά τις οποίες το δίκτυο κατάφερε να εξυπηρετήσει το σύνολο των οχημάτων που υπήρχαν σε αυτό κατά την χρονική διάρκεια της προσομοίωσης.

Στόχος μας είναι να εξάγουμε αποτελέσματα σχετικά με την καταλληλότητα των στρατηγικών που εξετάζονται ανάλογα με τις συνθήκες κορεσμού που επικρατούν στο δίκτυο.

Οι συγκριτικοί πίνακες για τα τρία σενάρια ζήτησης φαίνονται παρακάτω.

| Control Cases | Delay time per vehicle (s/km) | Improvement (%) | Served |
|---------------|-------------------------------|-----------------|--------|
| Fixed Time | 90,37 | - | 20/20 |
| TUC | 93,52 | -3,49 | 20/20 |
| MP_no | 96,1 | -6,34 | 20/20 |
| MP_up | 103,37 | -14,39 | 20/20 |
| MP_down | 96,1 | -6,34 | 20/20 |
| MP_up_down | 103,22 | -14,22 | 20/20 |

Πίνακας 9.1- Σενάριο ζήτησης *light*. Σύγκριση της καθυστέρησης των οχημάτων στο δίκτυο μεταξύ των στρατηγικών FT, TUC, MP_no, MP_up, MP_down και MP_up_down.

| Control Cases | Delay time per vehicle (s/km) | Improvement (%) | Served |
|---------------|-------------------------------|-----------------|--------|
| Fixed Time | 236,13 | - | 17/20 |
| TUC | 195,15 | 17,36 | 18/20 |
| MP_no | 191,74 | 18,80 | 15/20 |
| MP_up | 198,53 | 15,92 | 17/20 |
| MP_down | 188,48 | 20,18 | 19/20 |
| MP_up_down | 198,71 | 15,85 | 19/20 |

Πίνακας 9.2- Σενάριο ζήτησης *heavy*. Σύγκριση της καθυστέρησης των οχημάτων στο δίκτυο μεταξύ των στρατηγικών FT, TUC, MP_no, MP_up, MP_down και MP_up_down.

| Control Cases | Delay time per vehicle (s/km) | Improvement (%) | Served |
|---------------|-------------------------------|-----------------|--------|
| Fixed Time | 889,2 | - | 2/20 |
| TUC | 621,9 | 30,06 | 8/20 |
| MP_no | 603,8 | 32,10 | 16/20 |
| MP_up | 630,3 | 29,12 | 17/20 |
| MP_down | 582,6 | 34,48 | 13/20 |
| MP_up_down | 632,1 | 28,91 | 16/20 |

Πίνακας 9.3- Σενάριο ζήτησης very heavy. Σύγκριση της καθυστέρησης των οχημάτων στο δίκτυο μεταξύ των στρατηγικών FT, TUC, MP_no, MP_up, MP_down και MP_up_down.

Με βάση τους πίνακες που παρουσιάστηκαν παραπάνω, μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Όσον αφορά την περίπτωση του light σεναρίου (πίνακας 9.1), παρατηρείται αύξηση στον χρόνο καθυστέρησης των οχημάτων όταν εφαρμόζονται δυναμικά σενάρια έναντι του fixed time. Ειδικά στην περίπτωση του MP_up ο χρόνος καθυστέρησης των οχημάτων στο σύστημα αυξάνεται σε ποσοστό 14,39%, ενώ με την στρατηγική TUC η διαφορά είναι σχετικά μικρή (3,49%). Όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της μικρής ζήτησης που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο σενάριο, δεν υπάρχουν οχήματα που δεν έχουν εξυπηρετηθεί μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι όταν στο εξεταζόμενο δίκτυο η ζήτηση είναι μικρή, ο fixed time αλγόριθμος αποτελεί την καλύτερη επιλογή. Σε αυτό το σενάριο η οποιαδήποτε βελτίωση επιτυγχάνεται από την αλλαγή των πράσινων χρόνων εξουδετερώνεται από την απορρύθμιση του offset. Υπενθυμίζουμε ότι για την δικαιότερη σύγκριση των 2 στρατηγικών δε χρησιμοποιήσαμε έλεγχο κύκλου και offset για την TUC πράγμα που της στέρησε δύο από τα βασικά πλεονεκτήματα μιας στρατηγικής κεντρικού ελέγχου. Γι' αυτό ακόμα και η TUC παρουσιάζεται ελαφρά χειρότερη από τη στρατηγική σταθερών χρόνων.

Τα αποτελέσματα διαφέρουν στην περίπτωση του heavy σεναρίου (πίνακας 9.2). Σε όλες τις περιπτώσεις των δυναμικών σεναρίων υπάρχει βελτιστοποίηση στον χρόνο καθυστέρησης των οχημάτων συγκριτικά με τον έλεγχο σταθερού χρόνου και ιδιαίτερα στην περίπτωση του MP_down όπου το ποσοστό βελτιστοποίησης φτάνει το 20,18%. Παρατηρείται επίσης ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπήρχε τουλάχιστον μία επανάληψη κατά την οποία υπήρξαν οχήματα που δεν κατάφεραν να εξυπηρετηθούν και παρέμειναν μέσα στο δίκτυο και μετά το τέλος της προσομοίωσης. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο στην περίπτωση του MP_no (served 15/20). Σύμφωνα με τον συγκριτικό πίνακα η στρατηγική MP_down εξάγει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Στην περίπτωση του very heavy σεναρίου (πίνακας 9.3) τα αποτελέσματα μοιάζουν πιο πολύ με αυτά του προηγούμενου σεναρίου καθώς και εδώ ο χρόνος καθυστέρησης βελτιστοποιείται σε όλα τα δυναμικά σενάρια. Όπως στο heavy σενάριο, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση η μεγαλύτερη βελτιστοποίηση

παρατηρείται στο MP_down που φτάνει στο ποσοστό 34,48% σε σχέση με τον έλεγχο σταθερού χρόνου. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της αυξημένης ζήτησης που χαρακτηρίζει το very heavy σενάριο είναι πολλές οι περιπτώσεις που κάποια οχήματα δεν προλαβαίνουν να εξυπηρετηθούν και παραμένουν μέσα στο δίκτυο μετά το τέλος της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του fixed time μόνο 2 από τις 20 προσομοιώσεις κατάφεραν να εξυπηρετήσουν το σύνολο των οχημάτων και στην περίπτωση της TUC μόνο 8 από τις 20. Καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την εξυπηρέτηση των οχημάτων παρατηρούνται στο MP_up, όπου στις 17 από τις 20 προσομοιώσεις εξυπηρετήθηκε το σύνολο των οχημάτων.

Εάν χρησιμοποιούσαμε τον έλεγχο του offset και του κύκλου, η στρατηγική TUC θα ήταν καλύτερη της Max-Pressure κυρίως στα σενάρια με υψηλή ζήτηση.

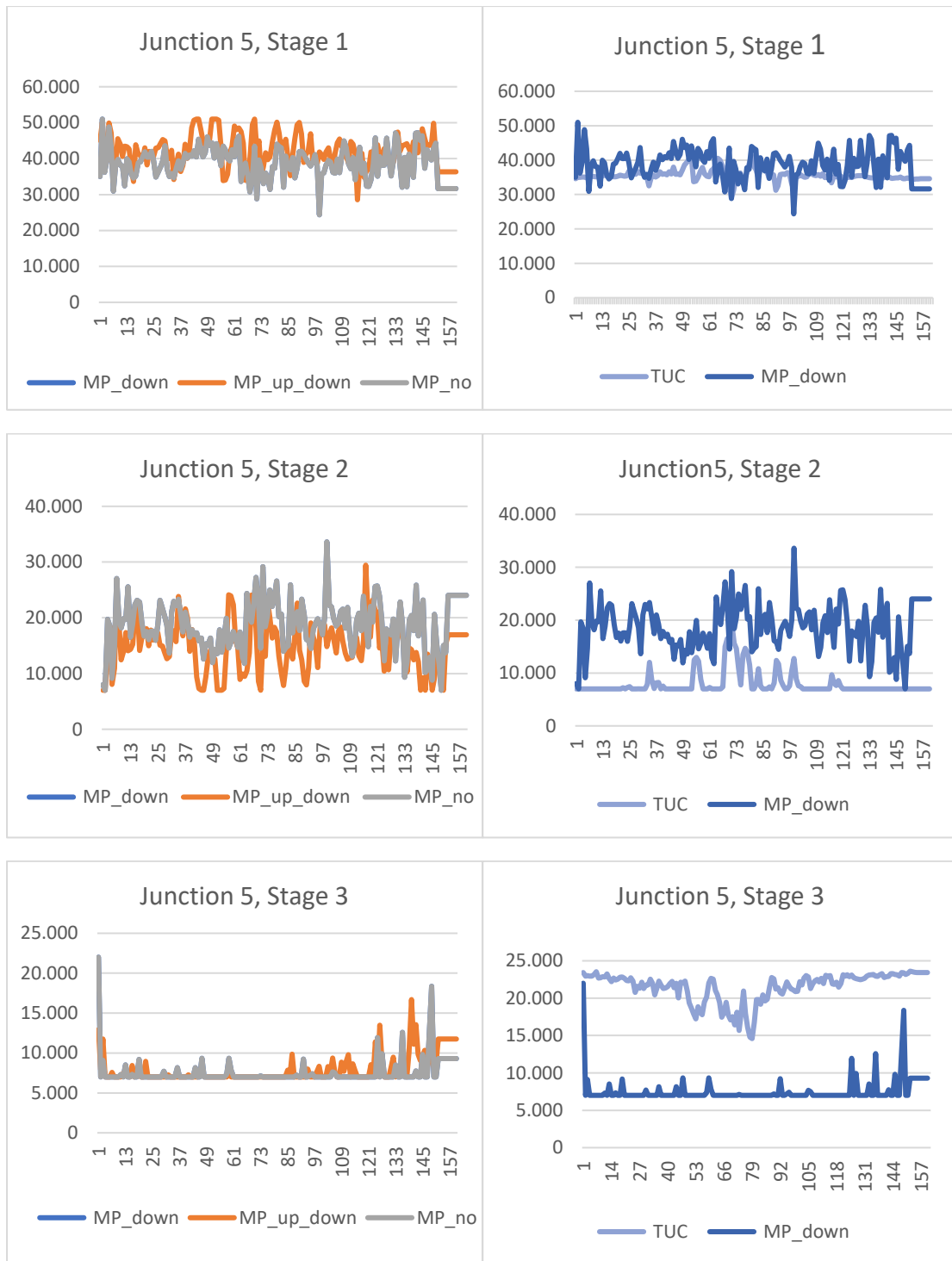
Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στο MP_up_down εξάγονται χειρότερα αποτελέσματα σε όλες τις προσομοιώσεις, συγκριτικά με τα υπόλοιπα δυναμικά σενάρια που εξετάστηκαν.

9.2 Αποτελέσματα που αφορούν μέρος του δικτύου

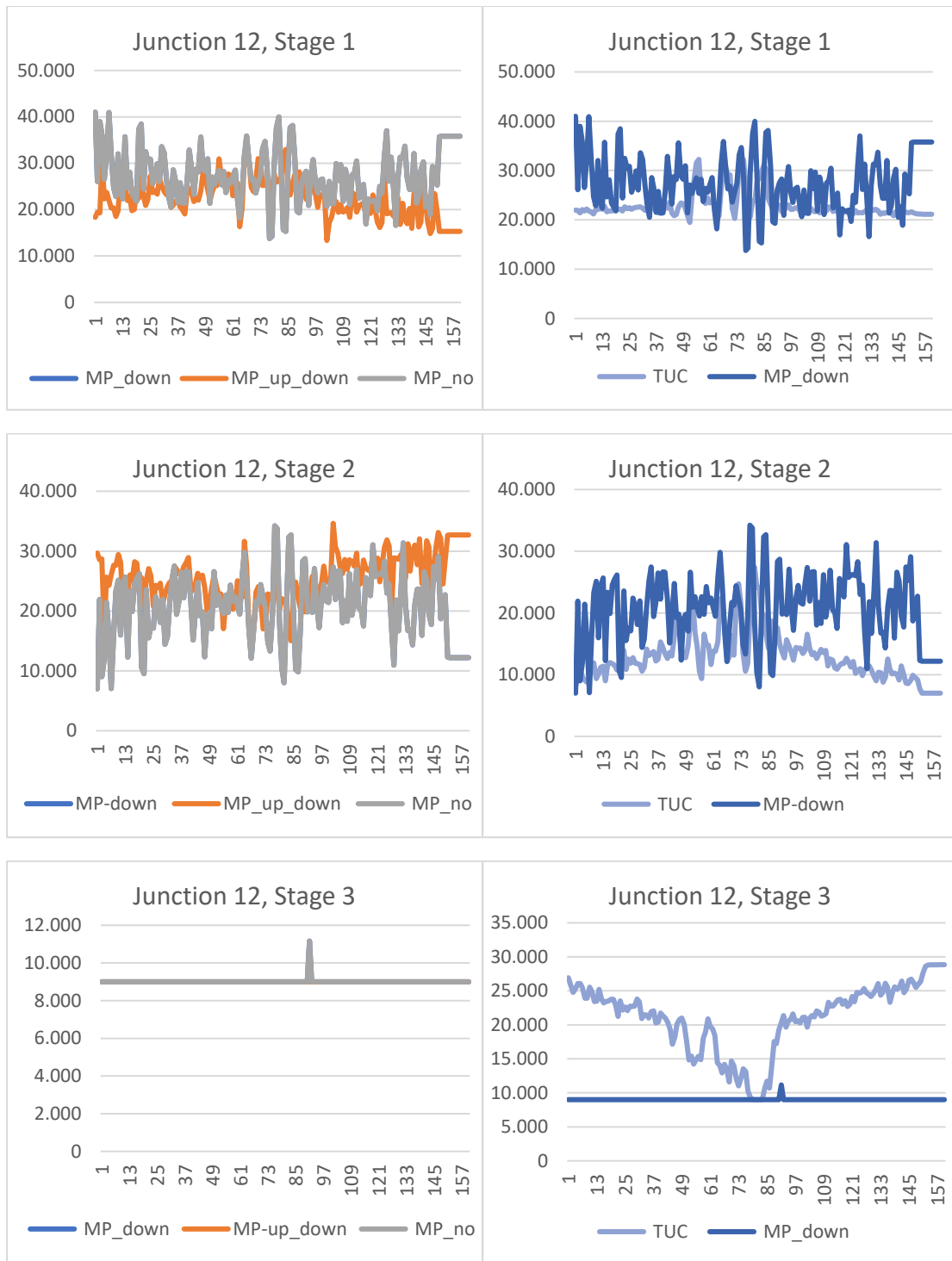
Η παρούσα ενότητα αναφέρεται σε αποτελέσματα που σχετίζονται με κάποιον κόμβο ή link του δικτύου και όχι με το σύνολο του δικτύου. Ως μέτρο σύγκρισης επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η τιμή του πράσινου χρόνου (green time) ενδεικτικά σε κάποιους σημαντικούς κόμβους του δικτύου, ο μέσος αριθμός των οχημάτων (x) που βρίσκονται μέσα σε συγκεκριμένα links και εισέρχονται στον κόμβο 5 του δικτύου και η κατάληψη (occupancy) ανά link του κόμβου 5.

9.2.1 Πράσινος χρόνος

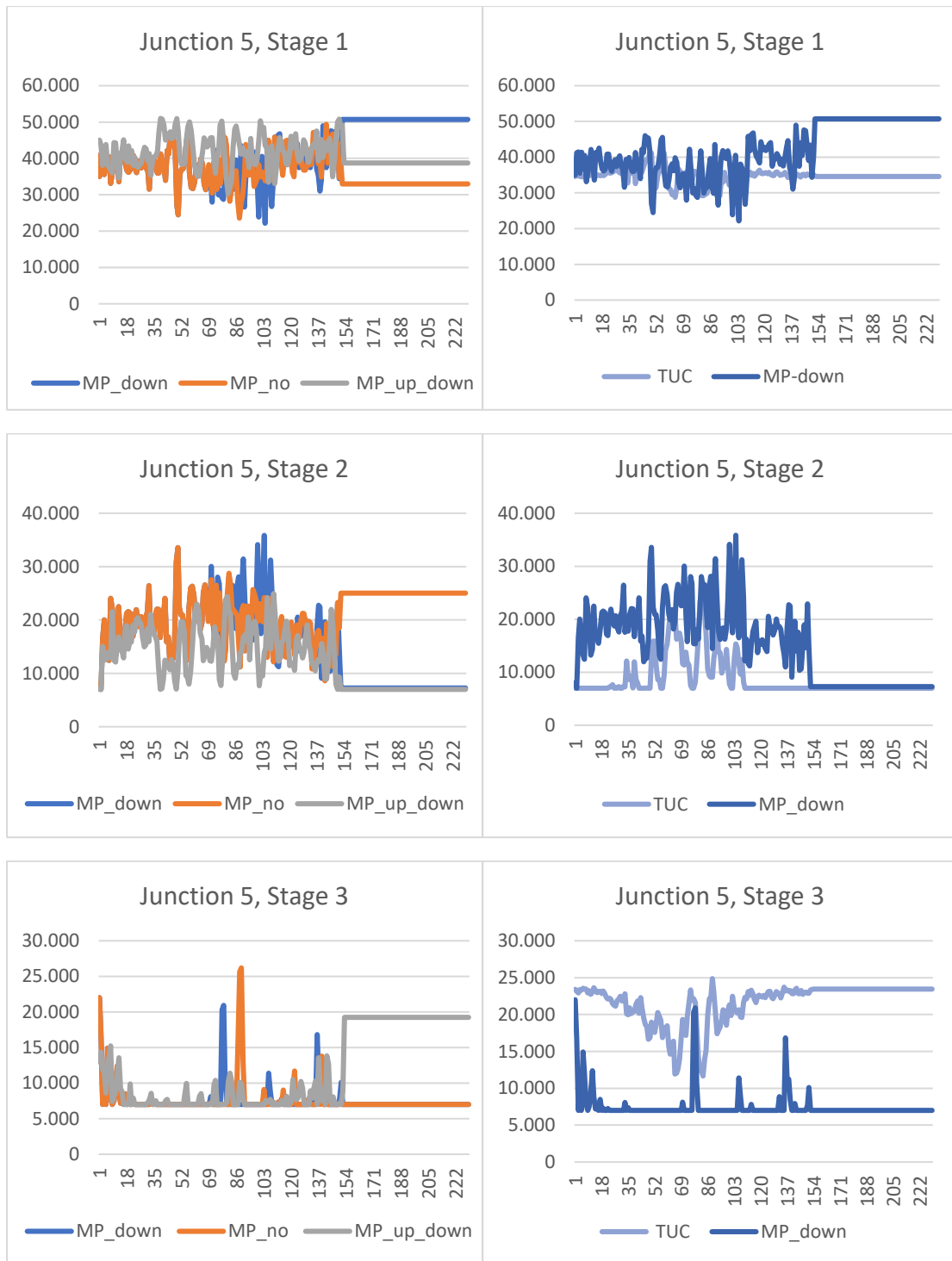
Χρόνος πράσινης ένδειξης, ή πιο απλά πράσινος χρόνος είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η όψη του σηματοδότη παρουσιάζει πράσινο χρώμα. Τα γραφήματα που ακολουθούν αφορούν τις φάσεις των κόμβων 5 και 12 και δείχνουν την διαφορά των ενεργών πράσινων χρόνων συναρτήσει του χρόνου μεταξύ των στρατηγικών MP_down, MP_no και MP_up_down και αντίστοιχα μεταξύ των στρατηγικών TUC και MP_down, στα τρία σενάρια ζήτησης.



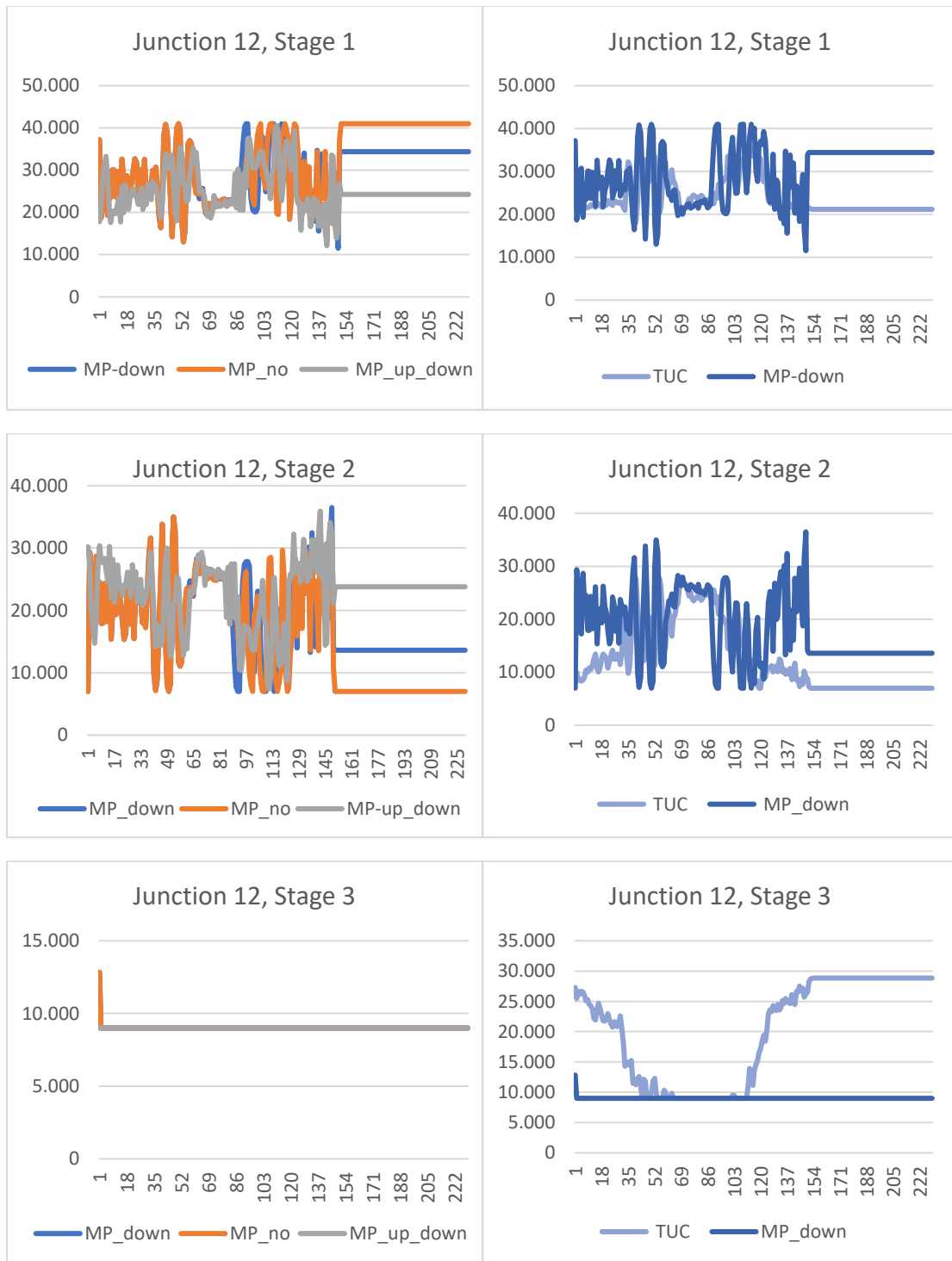
Διαγράμματα 9.1- Κόμβος 5, σενάριο ζήτησης light. Σύγκριση του πράσινου χρόνου στις τρεις φάσεις του κόμβου 5, μεταξύ των μεθόδων MP_down, MP_up_down και MP_no (αριστερά) και μεταξύ των μεθόδων TUC και MP_down (δεξιά).



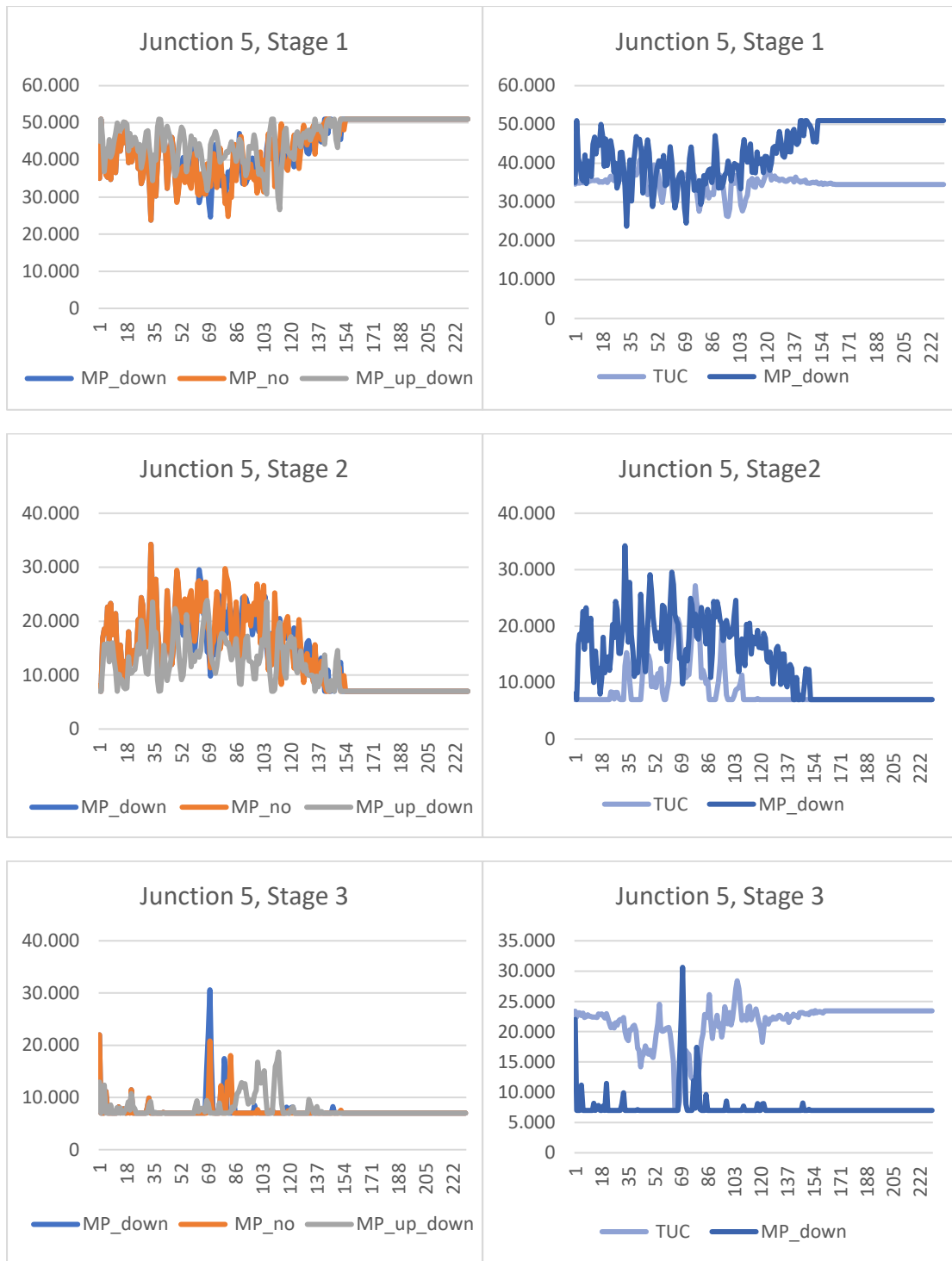
Διαγράμματα 9.2- Κόμβος 12, σενάριο ζήτησης light. Σύγκριση του πράσινου χρόνου στις τρεις φάσεις του κόμβου 12, μεταξύ των μεθόδων MP_down, MP_up_down και MP_no (αριστερά) και μεταξύ των μεθόδων TUC και MP_down (δεξιά).



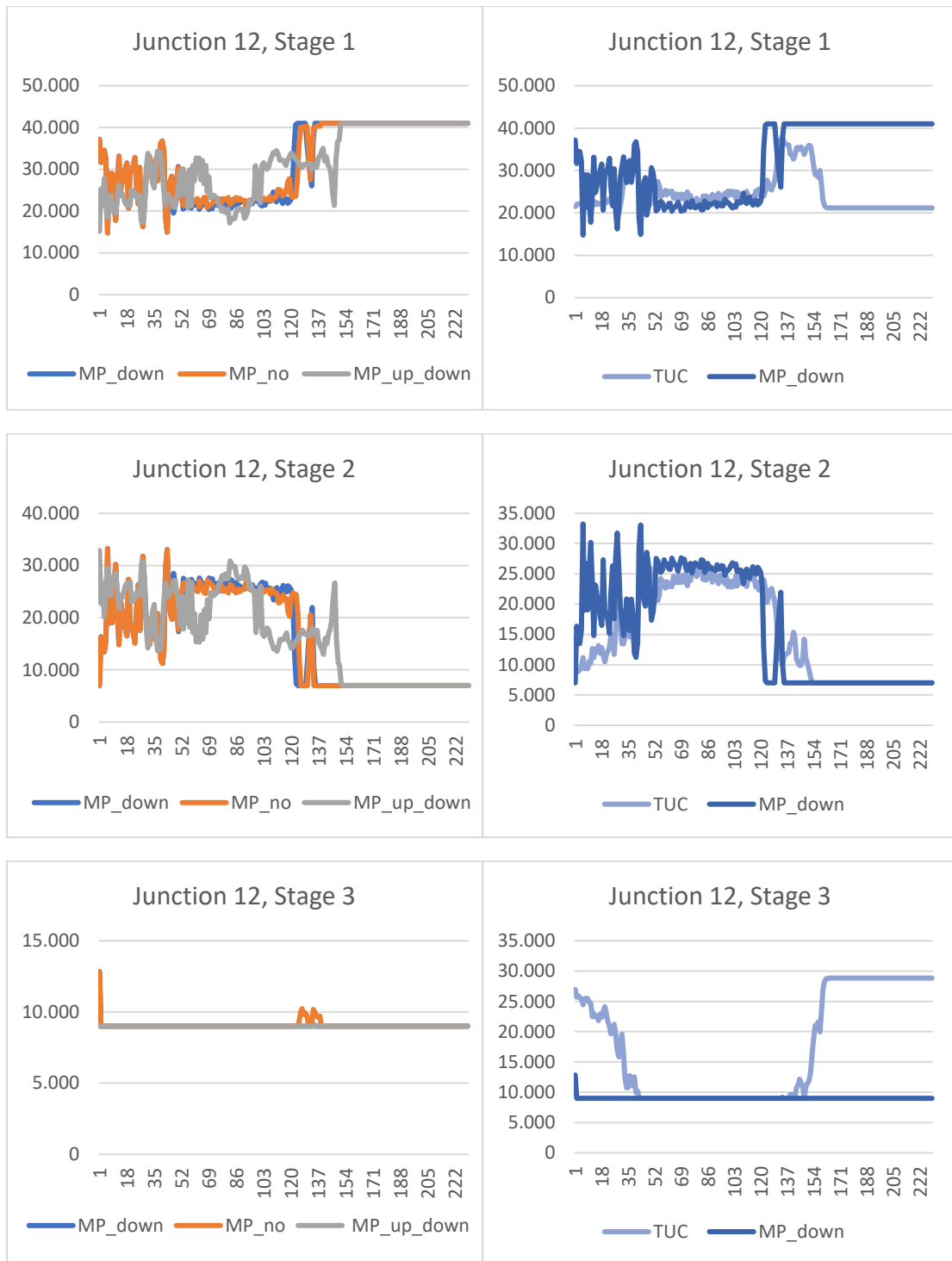
Διαγράμματα 9.3- Κόμβος 5, σενάριο ζήτησης heavy. Σύγκριση του πράσινου χρόνου στις τρεις φάσεις του κόμβου 5, μεταξύ των μεθόδων MP_down, MP_up_down και MP_no (αριστερά) και μεταξύ των μεθόδων TUC και MP_down (δεξιά).



Διαγράμματα 9.4- Κόμβος 12, σενάριο ζήτησης heavy. Σύγκριση του πράσινου χρόνου στις τρεις φάσεις του κόμβου 12, μεταξύ των μεθόδων MP_down, MP_up_down και MP_no (αριστερά) και μεταξύ των μεθόδων TUC και MP_down (δεξιά).



Διαγράμματα 9.5 - Κόμβος 5, σενάριο ζήτησης very heavy. Σύγκριση του πράσινου χρόνου στις τρεις φάσεις του κόμβου 5, μεταξύ των μεθόδων MP_down, MP_up_down και MP_no (αριστερά) και μεταξύ των μεθόδων TUC και MP_down (δεξιά).



Διαγράμματα 9.6- Κόμβος 12, σενάριο ζήτησης very heavy. Σύγκριση του πράσινου χρόνου στις τρεις φάσεις του κόμβου 12, μεταξύ των μεθόδων MP_down, MP_up_down και MP_no (αριστερά) και μεταξύ των μεθόδων TUC και MP_down (δεξιά).

Από τα διαγράμματα 9.1 και 9.2 που αφορούν το light σενάριο ζήτησης για τους κόμβους 5 και 12, φαίνεται ότι η διαφορά στους πράσινους χρόνους μεταξύ των παραλλαγών της MP που συγκρίνονται στα αριστερά είναι σχετικά μικρή. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 9.1 που προηγήθηκε για το light σενάριο, οι MP_down

και MP_no παρουσιάζουν ίδια αποτελέσματα, σε όλες τις φάσεις του light σεναρίου. Από τα διαγράμματα 9.1 και 9.2 στα δεξιά, που αποτελούν σύγκριση της TUC και της MP_down, βλέπουμε ότι στην πρώτη φάση η MP_down παρουσιάζει ελάχιστα μεγαλύτερους πράσινους χρόνους. Κατά τη δεύτερη φάση παρατηρείται έντονη διαφορά στα πράσινα μεταξύ των δύο στρατηγικών, με την MP_down να εμφανίζει μεγαλύτερους πράσινους χρόνους. Η διαφορά γίνεται ακόμη πιο έντονη κατά την τρίτη φάση των κόμβων 5 και 12, όπου οι τιμές του πράσινου στην MP_down είναι πολύ χαμηλές και η διαφορά με την TUC είναι μεγάλη.

Τα διαγράμματα 9.3 και 9.4 αφορούν το heavy σενάριο και την διαφορά του πράσινου χρόνου στις φάσεις των κόμβων 5 και 12 αντίστοιχα. Σε αυτήν την περίπτωση, όπως και στην προηγούμενη, παρατηρούνται μικρές διαφορές στον πράσινο χρόνο όταν εφαρμόζονται οι παραλλαγές της MP. Οι διαφορές στον πράσινο χρόνο είναι έντονες όταν πρόκειται για την σύγκριση μεταξύ της MP_down και της TUC (δεξιά διαγράμματα), ειδικά κατά τη δεύτερη και τρίτη φάση των εξεταζόμενων κόμβων. Στην πρώτη φάση οι τιμές του πράσινου παρουσιάζουν μικρή διαφορά όταν εφαρμόζονται οι δύο στρατηγικές, ενώ ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται όταν εφαρμόζεται η MP_down έναντι της TUC. Στην δεύτερη φάση παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις τιμές του πράσινου, με την MP_down να εμφανίζει και πάλι μεγαλύτερες τιμές. Τα αποτελέσματα διαφέρουν σημαντικά στην τρίτη φάση που όπως φαίνεται από τα διαγράμματα η MP_down παρουσιάζει συνολικά πολύ μικρές τιμές πράσινου και η διαφορά με την TUC είναι μεγάλη.

Παρόμοια αποτελέσματα εξάγονται και στην περίπτωση του very heavy σεναρίου όπως φαίνεται από τα διαγράμματα 9.5 και 9.6. Σε αυτό το σενάριο ζήτησης, οι διαφορές στον πράσινο χρόνο μεταξύ των παραλλαγών της MP εξακολουθούν να είναι μικρές. Μεγαλύτερες διαφορές εντοπίζονται στα διαγράμματα που συγκρίνουν τον πράσινο χρόνο μεταξύ της μεθόδου MP_down και TUC. Όπως προηγουμένως, έτσι και εδώ η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρείται κατά την τρίτη φάση των κόμβων 5 και 12, όπου η MP_down παρουσιάζει χαμηλές τιμές πράσινου και η διαφορά με την TUC είναι εμφανής.

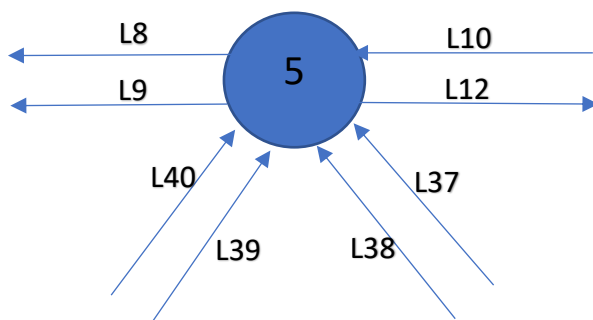
Για το σύνολο των διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι όταν εφαρμόζονται οι παραλλαγές της MP, ο πράσινος χρόνος μοιράζεται κατά παρόμοιο τρόπο στις φάσεις των κόμβων 5 και 12, δηλαδή η διαφορά στον πράσινο χρόνο μεταξύ των μεθόδων αυτών είναι μικρή σε κάθε περίπτωση που εξετάστηκε. Αντίθετα, κατά την εφαρμογή της TUC ο πράσινος χρόνος διανέμεται διαφορετικά στις φάσεις των κόμβων 5 και 12. Σε όλα τα σενάρια ζήτησης η διαφορά είναι έντονη κατά τη δεύτερη φάση των κόμβων όπου η TUC παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές πράσινου χρόνου και ακόμη εντονότερη κατά τη τρίτη φάση των κόμβων όπου η TUC παρουσιάζει αρκετά υψηλότερες τιμές πράσινου χρόνου. Αυτό οφείλεται στα διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά αυτών των στρατηγικών. Όπως είναι γνωστό, η MP είναι μία στρατηγική μεμονωμένου ελέγχου και η απόφαση σε κάθε κόμβο εξαρτάται μόνο από τις μετρήσεις που αφορούν τον παρακείμενο κόμβο - με τη δυνατότητα να λάβουμε πληροφορία και από τους γειτονικούς

κόμβους- και όχι από τις μετρήσεις στους κόμβους όλου του δικτύου. Συνεπώς η απόφαση για την παράταση του πράσινου χρόνου λαμβάνεται ανάλογα με τις κυκλοφοριακές συνθήκες που επικρατούν στον παρακείμενο κόμβο ή και στους γειτονικούς κόμβους. Αντίθετα, η TUC είναι μια στρατηγική συντονισμένου ελέγχου, που σημαίνει ότι οι αποφάσεις για κάθε κόμβο εξαρτώνται από τις συνθήκες κυκλοφορίας που επικρατούν στο σύνολο του δικτύου.

9.2.2 Occurancy

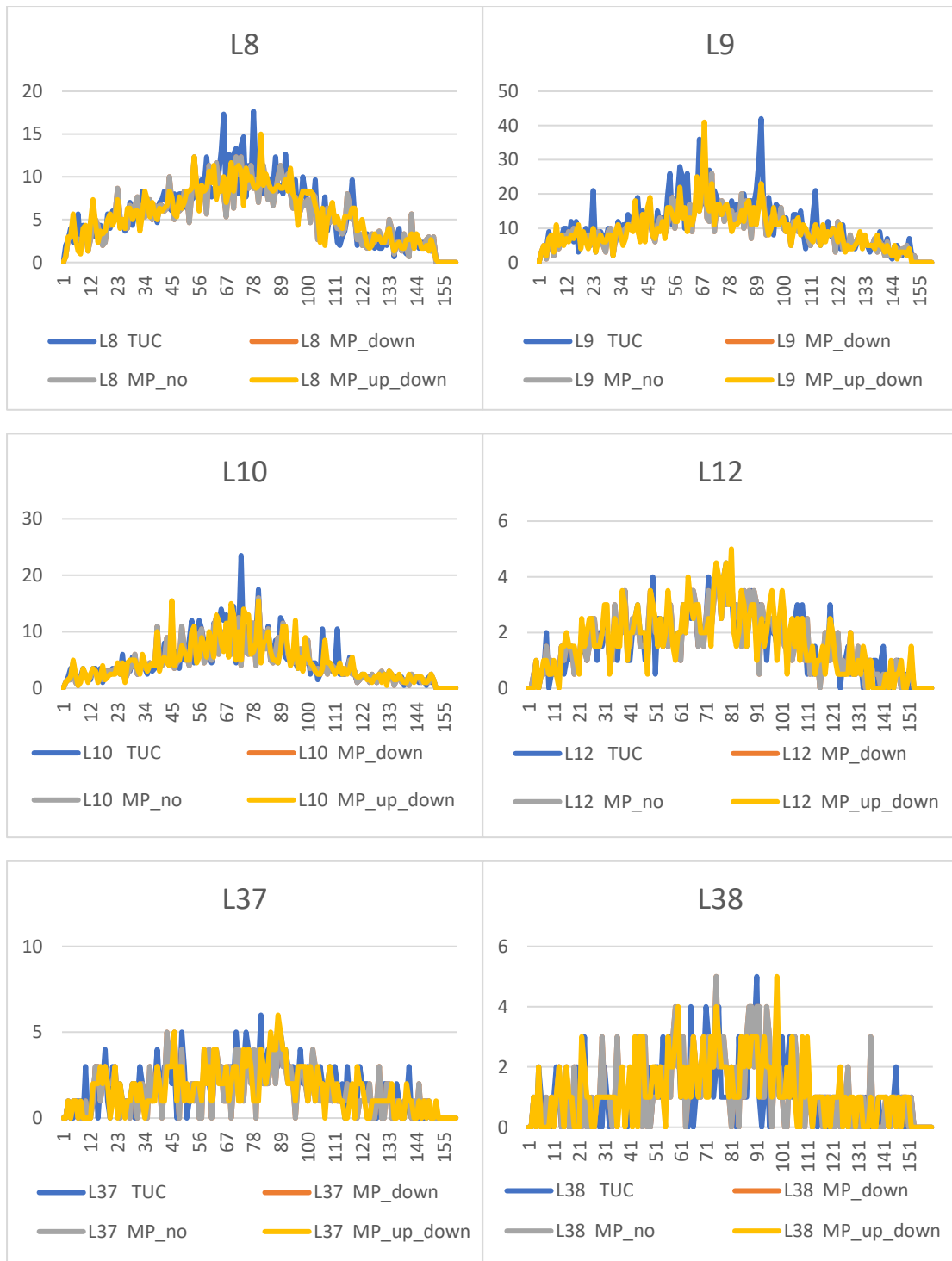
Η κατάληψη (occupancy) ενός link είναι το μέγεθος που φανερώνει το ποσοστό πληρότητας του link και ισούται με τον αριθμό των οχημάτων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν στο link κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου προς την κυκλοφοριακή ικανότητα (capacity) του link, δηλαδή τον μέγιστο αριθμό οχημάτων που μπορεί να εξυπηρετηθεί από το εν λόγω link κατά την ίδια χρονική περίοδο, που εξαρτάται από το μήκος του link. Μικρές τιμές στην κατάληψη των οδών υποδηλώνουν ομαλές κυκλοφοριακές συνθήκες, ενώ αντίθετα υψηλές τιμές στην κατάληψη των οδών και κυρίως ποσοστά που αγγίζουν το 100% προδίδουν φραγμένες οδούς και προβληματικές κυκλοφοριακές συνθήκες για το δίκτυο.

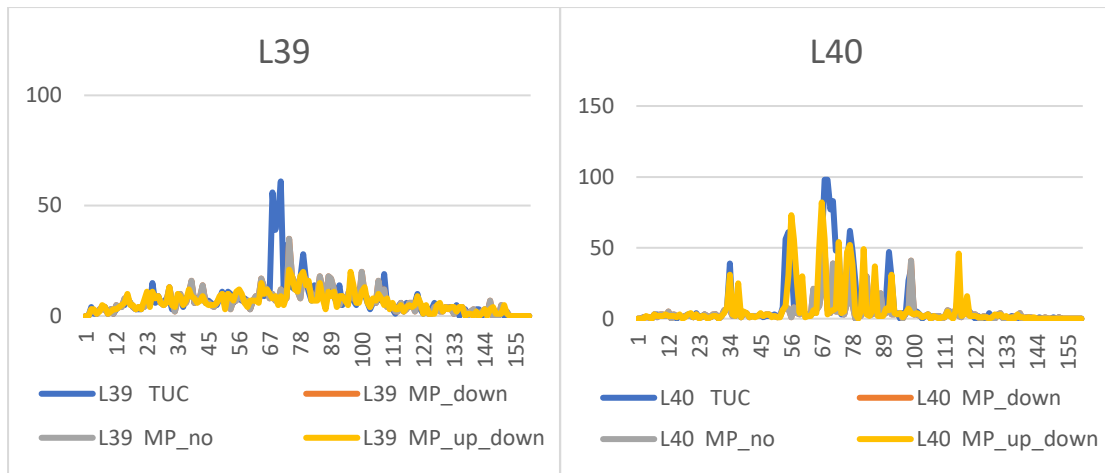
Σε αυτή την ενότητα επιλέχθηκε ενδεικτικά ο κόμβος 5 για την σύγκριση στα ποσοστά κατάληψης των οδών, καθώς αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς και κεντρικούς κόμβους του εξεταζόμενου δικτύου.



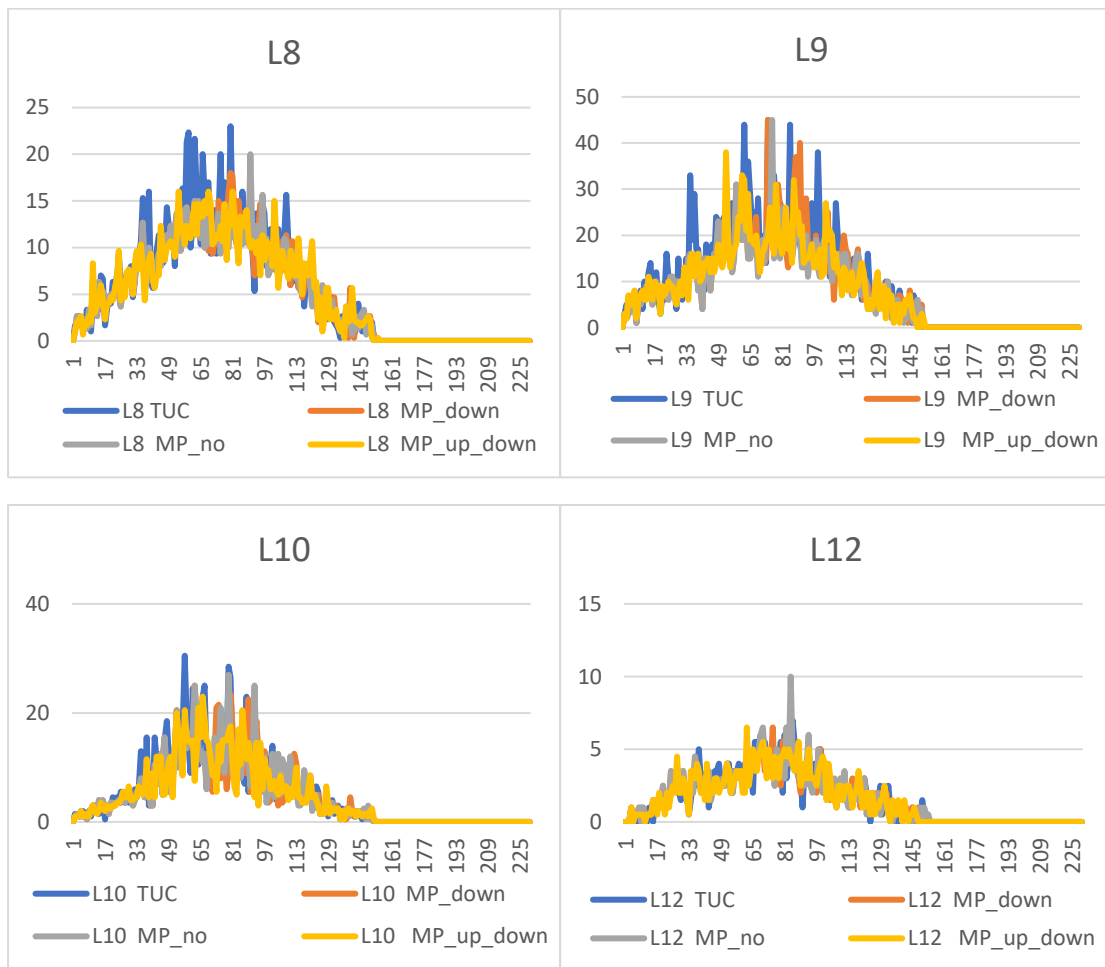
Σχήμα 9.1- Γραφική αναπαράσταση του κόμβου 5.

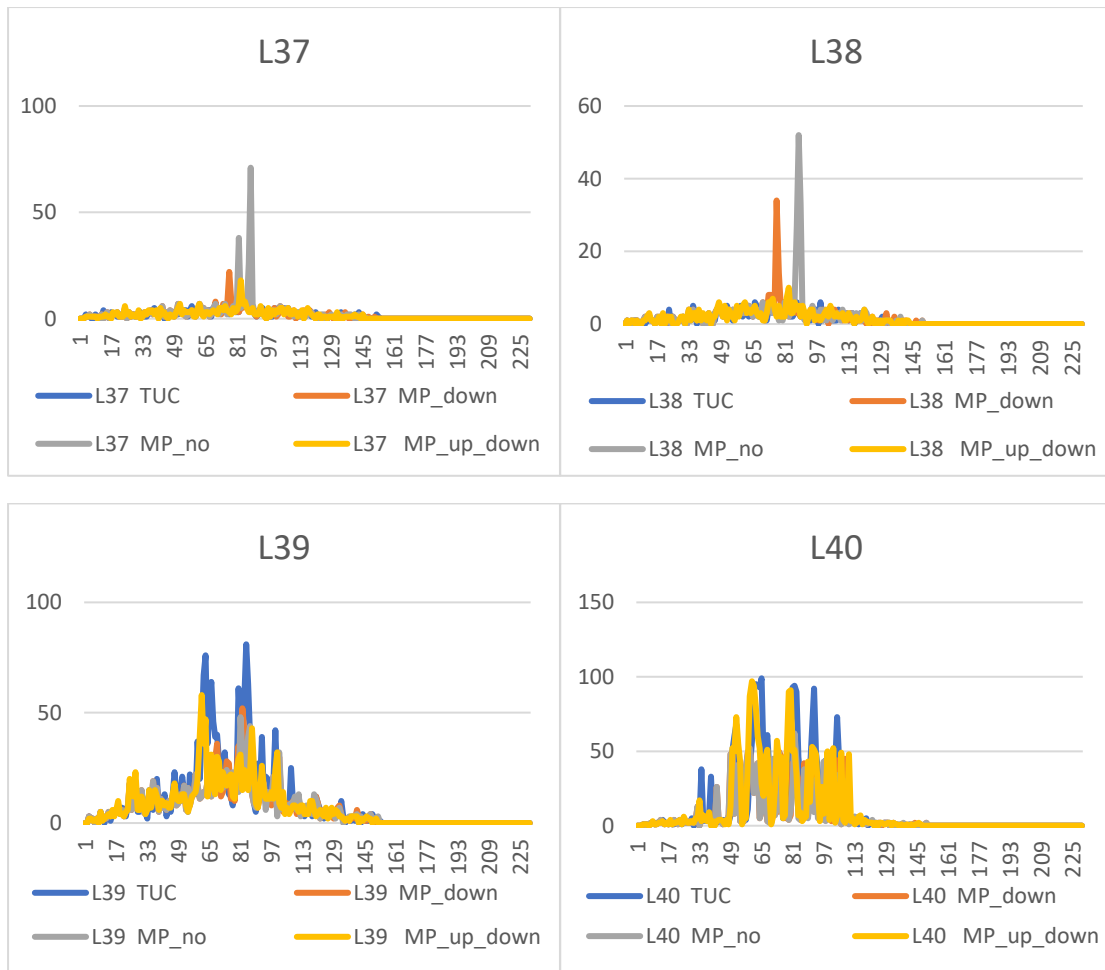
Ακολουθούν τα διαγράμματα που παρουσιάζουν τα ποσοστά κατάληψης του κόμβου 5 ανά link (link L8, L9, L10, L12, L37, L38, L39 και L40) στα σενάρια ζήτησης light, heavy και very heavy συναρτήσεως του χρόνου, με σκοπό να συγκριθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν έπειτα από την εφαρμογή των στρατηγικών TUC, MP_down, MP_no και MP_up_down.



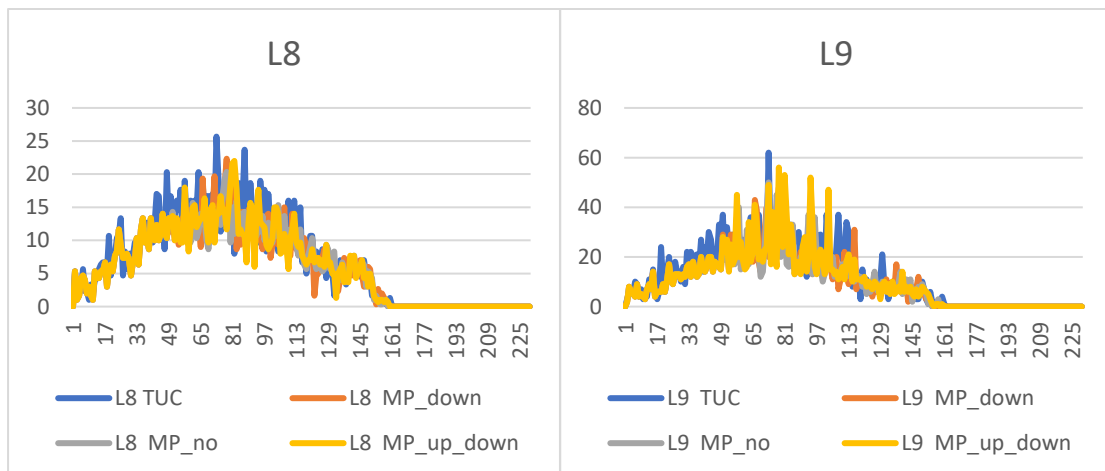


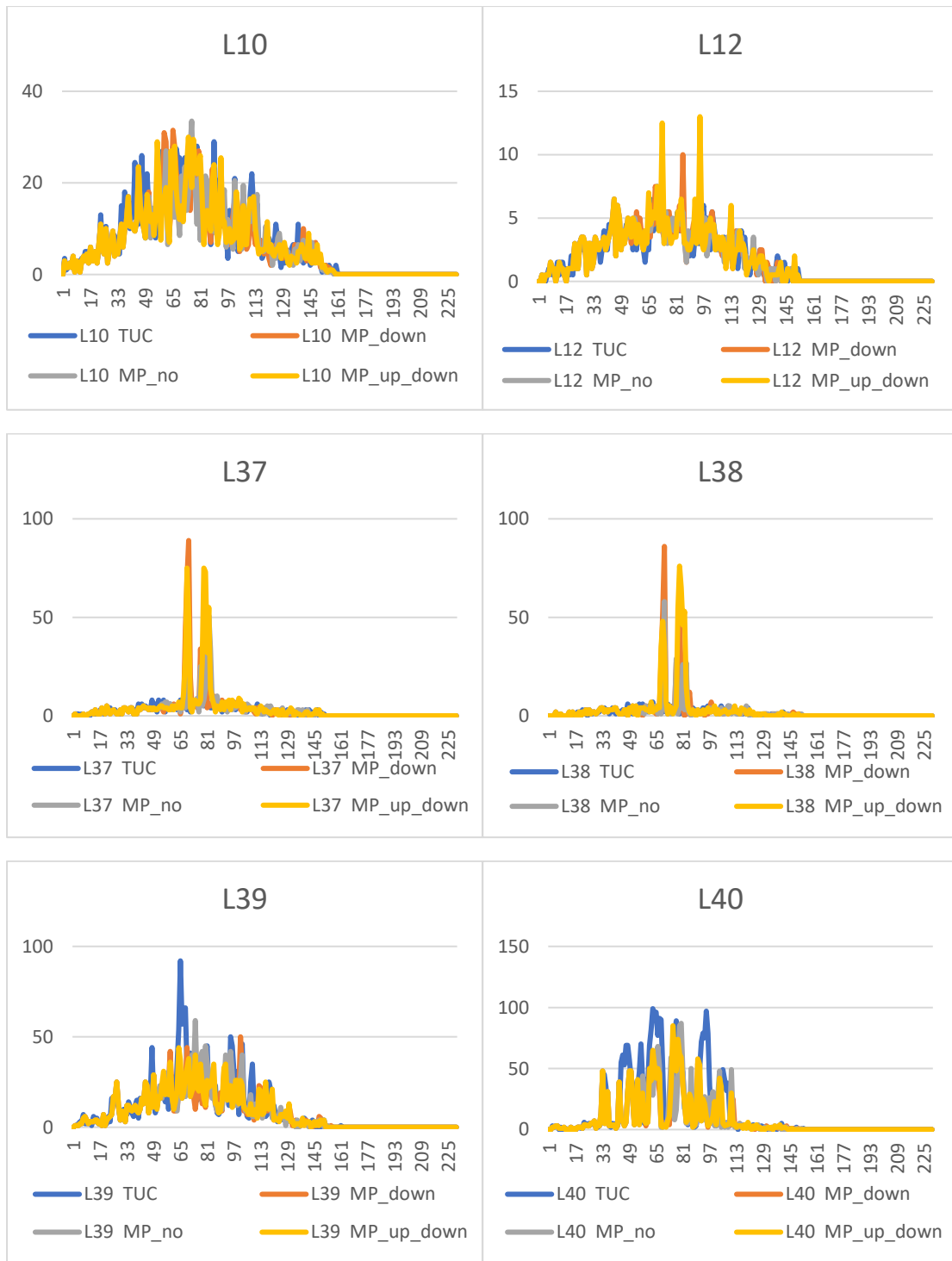
Διαγράμματα 9.7 – Σενάριο ζήτησης light. Σύγκριση του ποσοστού κατάληψης ανά link του κόμβου 5, μεταξύ των στρατηγικών TUC, MP_down, MP_no και MP_up_down.





Διαγράμματα 9.8 – Σενάριο ζήτησης heavy. Σύγκριση του ποσοστού κατάληψης ανά link του κόμβου 5, μεταξύ των στρατηγικών TUC, MP_down, MP_no και MP_up_down.





Διαγράμματα 9.9 – Σενάριο ζήτησης *very heavy*. Σύγκριση του ποσοστού κατάληψης ανά *link* του κόμβου 5, μεταξύ των στρατηγικών TUC, MP_down, MP_no και MP_up_down.

Τα διαγράμματα που έχουν προκύψει για κάθε *link* έχουν παρόμοια μορφή στις περισσότερες περιπτώσεις των στρατηγικών που εφαρμόστηκαν. Το *link* L40 παρουσιάζει γενικά την μεγαλύτερη κατάληψη, ενώ το L12 την μικρότερη. Χαμηλές τιμές παρουσιάζονται επίσης στα *links* L37 και L38, με κάποιες απότομες αλλαγές να

εμφανίζονται στο ποσοστό κατάληψης κυρίως όταν εφαρμόζονται οι παραλλαγές της MP.

Στο light σενάριο τα ποσοστά κατάληψης του κάθε link κατά τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης έχουν μικρή διαφορά από στρατηγική σε στρατηγική. Μεγαλύτερη διαφορά εντοπίζεται στο L39, που η TUC παρουσιάζει κατά την περίοδο αιχμής υψηλότερα ποσοστά συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους. Στο L40 εμφανίζονται γενικά αυξημένα ποσοστά κατάληψης που σε ορισμένες περιπτώσεις πλησιάζουν και ξεπερνούν το 50%, κατά την εφαρμογή της TUC και της MP_up_down. Στο light σενάριο που χαρακτηρίζεται από χαμηλή ζήτηση και μικρό αριθμό οχημάτων μέσα στο δίκτυο, δεν παρατηρούνται προβλήματα πληρότητας των οδών που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε κυκλοφοριακή συμφόρηση.

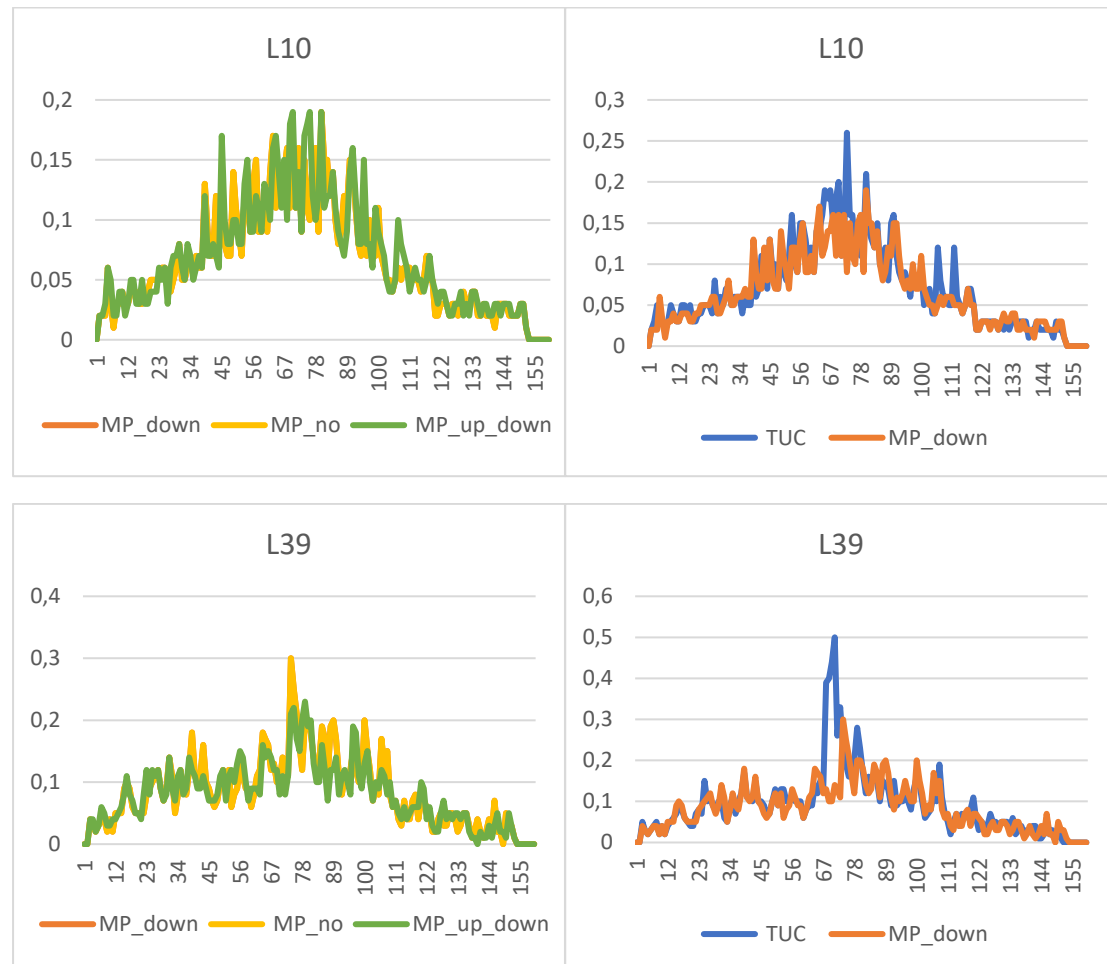
Στο heavy σενάριο ζήτησης, στα περισσότερα links δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στο ποσοστό κατάληψης μεταξύ των στρατηγικών. Στην περίπτωση του L8, υψηλότερα ποσοστά εμφανίζονται όταν εφαρμόζεται η TUC, ενώ χαμηλότερα όταν εφαρμόζεται η MP_up_down. Στα links L37 και L38 το occupancy γενικά παρουσιάζει πολύ χαμηλές τιμές, αλλά παρατηρείται μεγάλη διακύμανση σε μικρές χρονικές περιόδους κατά την εφαρμογή των MP_down και MP_no. Το L40 εμφανίζει υψηλά ποσοστά, κυρίως όταν εφαρμόζονται οι TUC και MP_up_down.

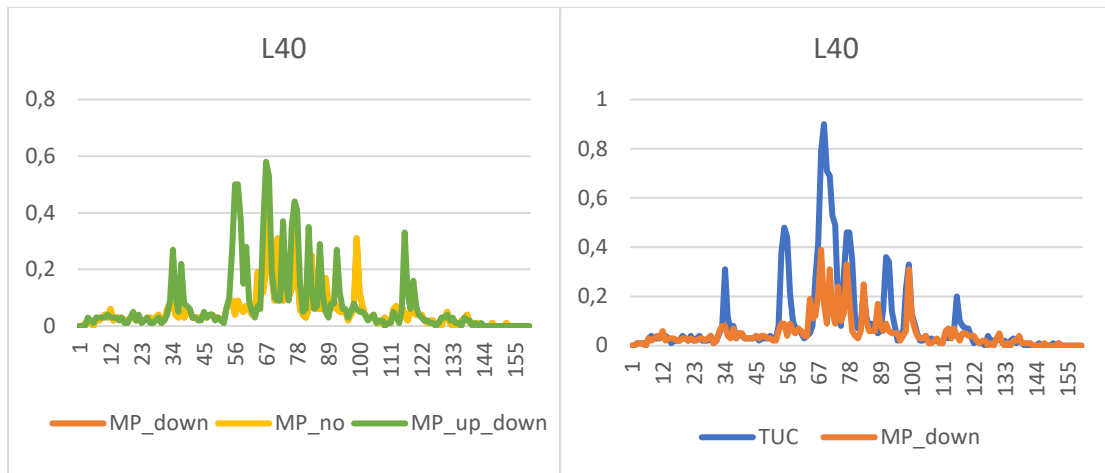
Στα διαγράμματα 9.9 που σχετίζονται με το very heavy σενάριο, σημειώνονται συνολικά μεγαλύτερα ποσοστά κατάληψης που οφείλονται στην αυξημένη ζήτηση που χαρακτηρίζει το σενάριο. Όσον αφορά τα links L8, L9 και L10, η διαφορά στα ποσοστά κατάληψης μεταξύ των μεθόδων είναι μικρή. Το L12 που χαρακτηρίζεται από χαμηλά ποσοστά, εμφανίζει υψηλότερες τιμές όταν εφαρμόζεται η MP_up_down. Στα links L37 και L38 ενώ τα ποσοστά κατάληψης στο μεγαλύτερο μέρος της προσομοίωσης είναι πολύ χαμηλά, παρατηρούνται απότομες αλλαγές όταν εφαρμόζονται οι παραλλαγές της MP έναντι της TUC. Στο link L40 τα ποσοστά κατάληψης είναι υψηλά, ειδικά όταν εφαρμόζεται η στρατηγική TUC, που σε ορισμένες περιπτώσεις αγγίζουν το 100%. Η πληρότητα που εμφανίζει το link L40 το καθιστά φραγμένη οδό και εμποδίζει τον ανάντη κόμβο (κόμβος 7) να παραπέμψει οχήματα σε αυτό το link, με συνέπεια την δημιουργία κυκλοφοριακών προβλημάτων στο δίκτυο.

Συνοψίζοντας, όσο χαμηλότερα είναι τα ποσοστά κατάληψης των οδών, τόσο πιο ομαλές είναι οι κυκλοφοριακές συνθήκες στο δίκτυο. Σύμφωνα με τα διαγράμματα που προηγήθηκαν, θα μπορούσαμε να πούμε ότι όσον αφορά τον κόμβο 5, κατά την εφαρμογή των μεθόδων MP_down και MP_no εξάγονται καλύτερα αποτελέσματα, δηλαδή χαμηλότερα ποσοστά πληρότητας στα εξεταζόμενα links. Προβλήματα μπορεί να δημιουργηθούν σε ορισμένες περιπτώσεις (L40) μόνο κατά την εφαρμογή της TUC.

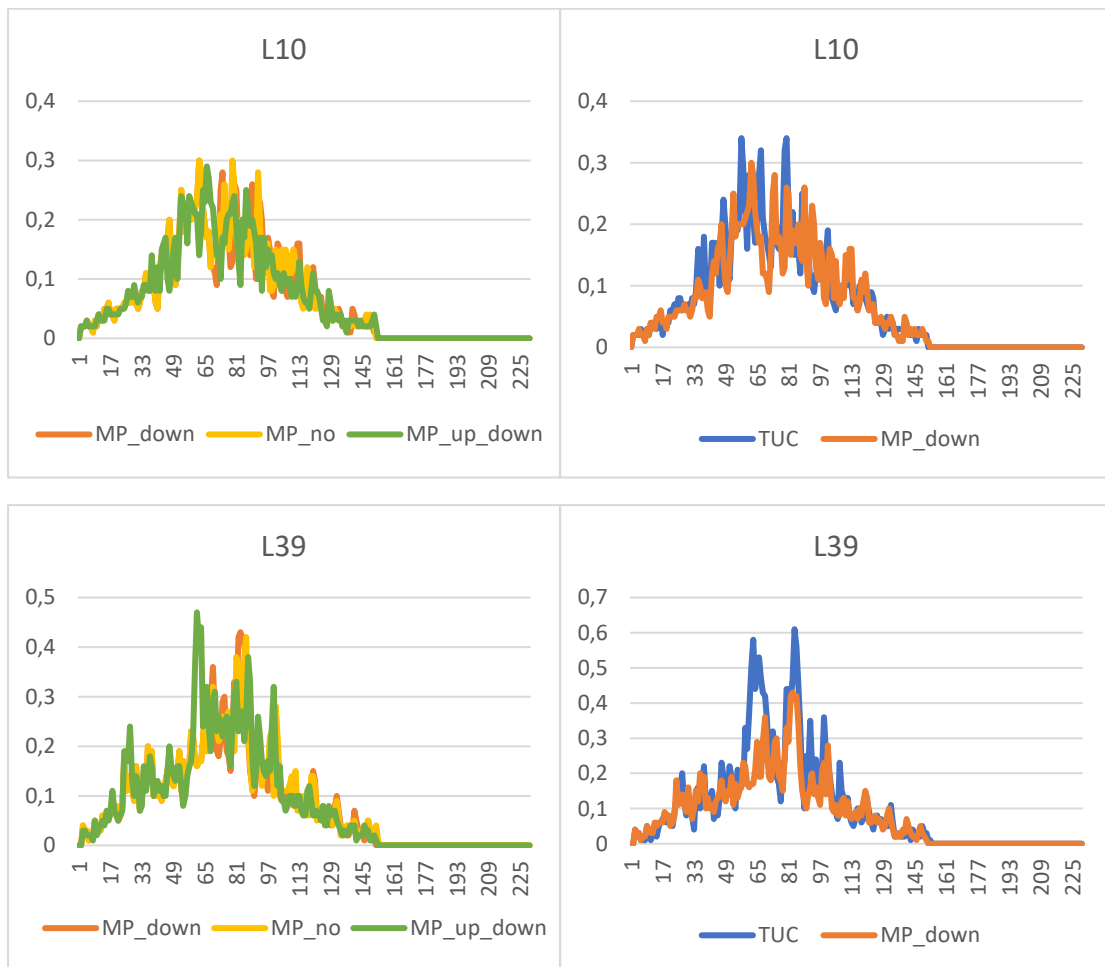
Ένα μέγεθος παρόμοιο με το occupancy που εξετάστηκε προηγουμένως, είναι ο μέσος αριθμός των οχημάτων μέσα στο link κατά τη διάρκεια του κύκλου και συμβολίζεται με x . Η σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πίεσης (κεφάλαιο 4) απαιτεί την γνώση του αριθμού των οχημάτων που βρίσκονται μέσα στο link. Μάλιστα, ο αριθμός x χρησιμοποιείται στον αριθμητή της σχέσης, που σημαίνει ότι μεγαλύτερος αριθμός οχημάτων μέσα στο link συνεπάγεται και μεγαλύτερη πίεση στο link.

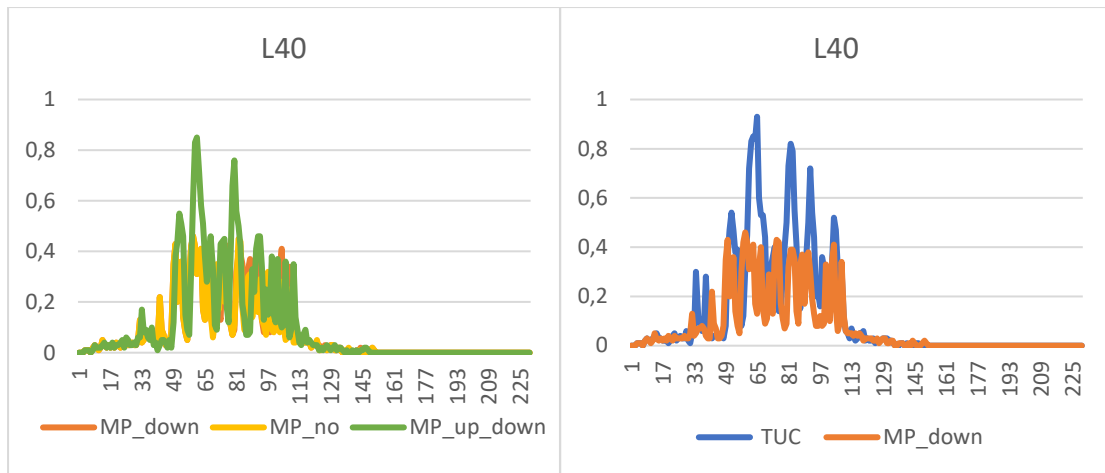
Για την σύγκριση αυτού του μεγέθους μεταξύ των στρατηγικών TUC, MP_down, MP_no και MP_up_down, επιλέχθηκαν κάποια από τα links που εισέρχονται στον κόμβο 5 (L10, L39, L40) και δημιουργήθηκαν συγκριτικά διαγράμματα στα σενάρια ζήτησης light, heavy και very heavy. Στα διαγράμματα που βρίσκονται στα αριστερά συγκρίνονται οι παραλλαγές της MP, ενώ στα δεξιά συγκρίνονται οι στρατηγικές TUC και MP_down.



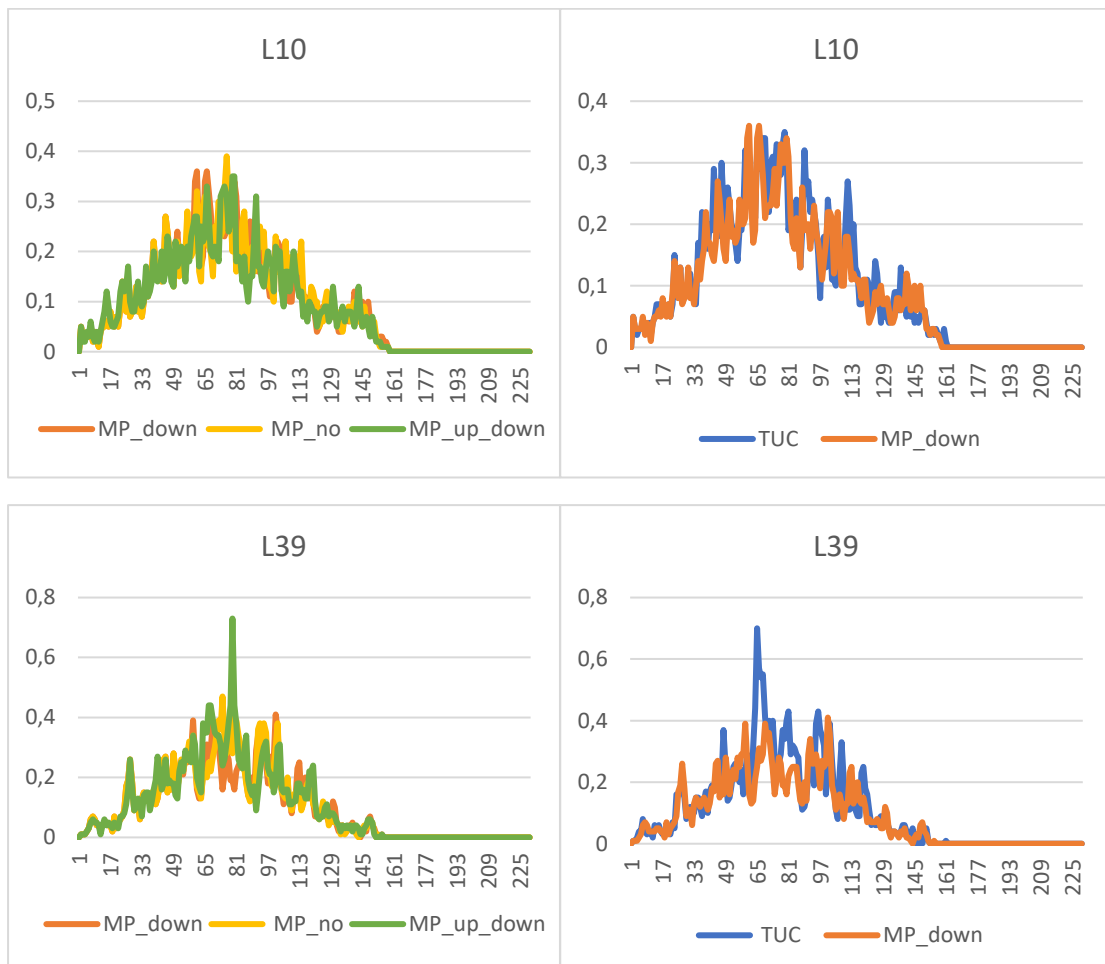


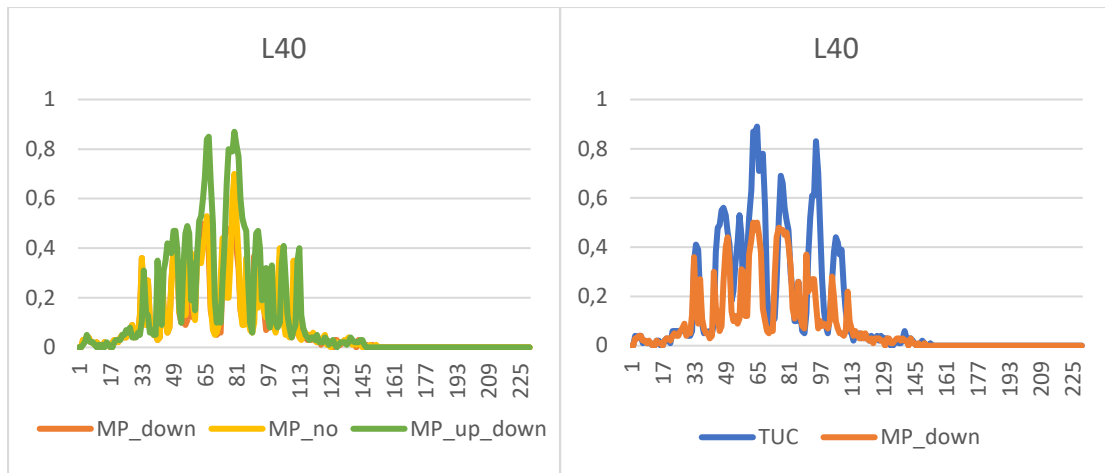
Διαγράμματα 9.10 – Σενάριο ζήτησης light. Σύγκριση του μέσου αριθμού οχημάτων ανά link του κόμβου 5, μεταξύ των στρατηγικών MP_down, MP_no και MP_up_down (αριστερά) και των στρατηγικών TUC και MP_down (δεξιά).





Διαγράμματα 9.11 – Σενάριο ζήτησης heavy. Σύγκριση του μέσου αριθμού οχημάτων ανά link του κόμβου 5, μεταξύ των στρατηγικών MP_down, MP_no και MP_up_down (αριστερά) και των στρατηγικών TUC και MP_down (δεξιά).





Διαγράμματα 9.12 – Σενάριο ζήτησης *very heavy*. Σύγκριση του μέσου αριθμού οχημάτων ανά link του κόμβου 5, μεταξύ των στρατηγικών MP_down, MP_no και MP_up_down (αριστερά) και των στρατηγικών TUC και MP_down (δεξιά).

Τα αποτελέσματα που εξάγονται από τα παραπάνω διαγράμματα είναι παρόμοια με αυτά του occupancy. Καλύτερα αποτελέσματα θεωρούνται αυτά που χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές του χ , καθώς ταυτίζονται με ομαλές κυκλοφοριακές συνθήκες και την απουσία κυκλοφοριακής συμφόρησης. Αντίθετα, υψηλές τιμές του χ προδίδουν υψηλά ποσοστά κατάληψης της οδού που μπορεί να οδηγήσουν σε φραγμένες οδούς και καθυστέρηση στην κυκλοφορία.

Στα διαγράμματα 9.10 φαίνεται η σύγκριση των εξεταζόμενων στρατηγικών στο σενάριο ζήτησης *light*. Από τα διαγράμματα στα αριστερά, παρατηρούνται ίδια αποτελέσματα κατά την εφαρμογή των στρατηγικών MP_down και MP_no, όπως ήταν αναμενόμενο. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και από την στρατηγική MP_up_down με μια εμφανή διαφορά στο link 40, στο οποίο παρουσιάζει μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων. Από τα διαγράμματα στα δεξιά, παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις τιμές του χ μεταξύ των μεθόδων TUC και MP_down. Μάλιστα, κατά την εφαρμογή της TUC εμφανίζεται αυξημένος αριθμός οχημάτων σε όλα τα links που εξετάστηκαν.

Όσον αφορά το *heavy* σενάριο ζήτησης (διαγράμματα 9.11) και την σύγκριση του αριθμού των οχημάτων μέσα στα link, τα αποτελέσματα μεταξύ των παραλλαγών της MP μοιάζουν μεταξύ τους, με εξαίρεση τα αποτελέσματα στο link 40, όπου παρατηρείται αυξημένος αριθμός οχημάτων μέσα στο link όταν εφαρμόζεται η MP_up_down. Από τα διαγράμματα στα δεξιά που φανερώνουν την σύγκριση μεταξύ των μεθόδων TUC και MP_down, μεγάλη είναι η διαφορά στα αποτελέσματα μεταξύ των στρατηγικών σε όλα τα εξεταζόμενα links και ιδιαίτερα στο link 40, με τον μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων να εμφανίζεται κατά την εφαρμογή της TUC.

Από τα διαγράμματα 9.12 που σχετίζονται με το *very heavy* σενάριο ζήτησης, παρατηρούνται παρόμοιες τιμές του χ στο link 10 όταν εφαρμόζονται οι παραλλαγές της MP. Στο link 39 τα αποτελέσματα των μεθόδων MP_down και MP_no μοιάζουν

πολύ μεταξύ τους, ενώ η μεγαλύτερη τιμή του x εμφανίζεται κατά την εφαρμογή της MP_up_down. Στο link 40 τα αποτελέσματα της MP_down φανερώνουν συγκριτικά μικρότερο αριθμό οχημάτων, ενώ και πάλι η μεγαλύτερη τιμή του x εμφανίζεται κατά την εφαρμογή της MP_up_down. Όσον αφορά τα διαγράμματα στα δεξιά τα αποτελέσματα μοιάζουν πολύ μεταξύ τους στο link 10, ενώ στα links 39 και 40 ο αριθμός των οχημάτων είναι μεγαλύτερος όταν εφαρμόζεται η TUC έναντι της MP_down.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω, είναι ότι κατά την εφαρμογή της TUC ο αριθμός των οχημάτων μέσα στα links είναι μεγαλύτερος, ανεξαρτήτως σεναρίου. Συνεπώς θεωρούμε ότι όσον αφορά τον μέσο αριθμό των οχημάτων μέσα στα links, η TUC εξάγει χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με την MP_down. Καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν όταν εφαρμόζονται οι στρατηγικές MP_down και MP_no, καθώς μικρότερες τιμές του x σχετίζονται με μικρότερες τιμές του link-pressure.

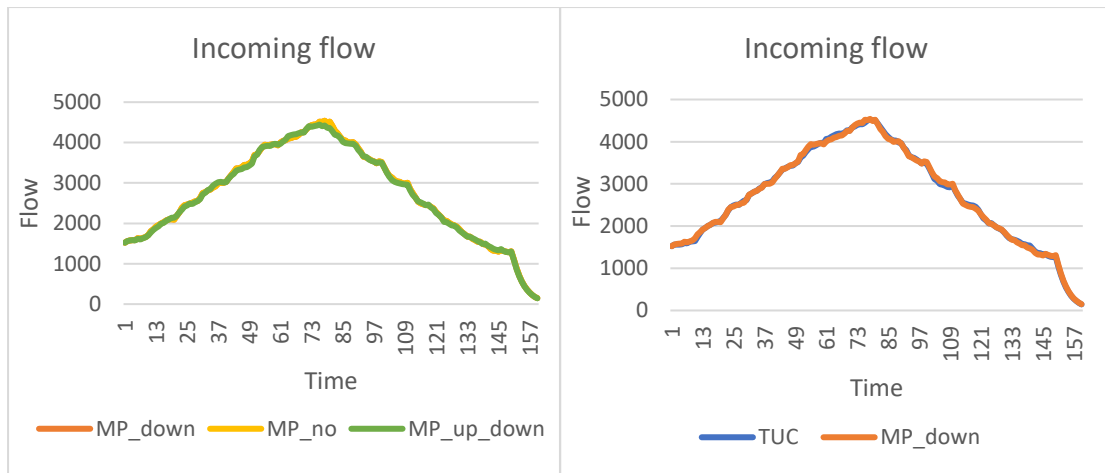
9.3 Αποτελέσματα συνολικά για το δίκτυο

Μέχρι τώρα παρουσιάστηκαν κάποια αποτελέσματα που αφορούσαν μεμονωμένους κόμβους ή μεμονωμένα links του δικτύου. Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν αποτελέσματα που αφορούν το σύνολο του εξεταζόμενου δικτύου. Όπως έγινε προηγουμένως, έτσι και σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται συγκρίσεις μεγεθών ανάμεσα στις στρατηγικές που εφαρμόσθηκαν στα σενάρια ζήτησης light, heavy και very heavy.

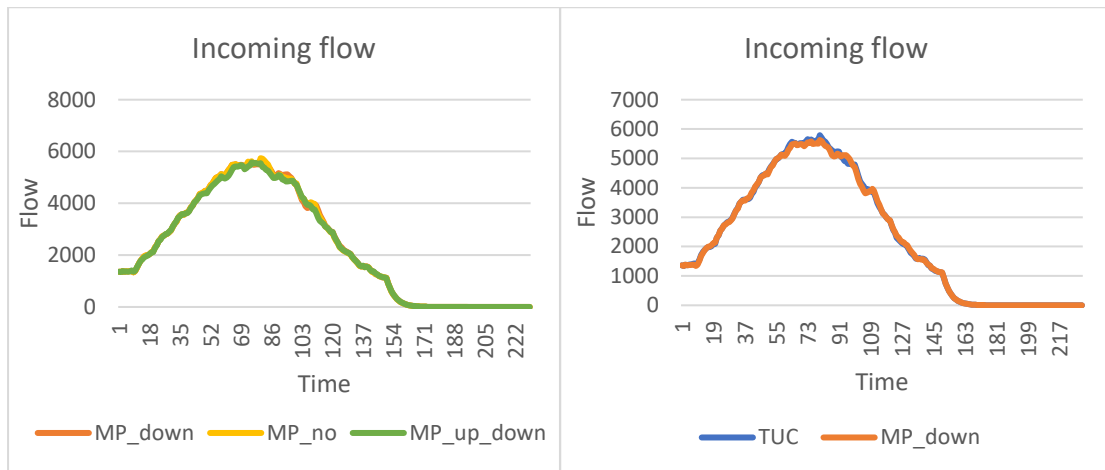
9.3.1 Incoming flow

Η κυκλοφοριακή ροή (traffic flow) εκφράζει τον συνολικό αριθμό οχημάτων που διέρχονται από ένα σημείο ή διατομή της οδού στη μονάδα του χρόνου. Η μαθηματική σχέση που χρησιμοποιείται για την κυκλοφοριακή ροή είναι $Q=N/T$, όπου Q είναι ο αριθμός των οχημάτων ανά ώρα που διασχίζουν το σημείο του οδοστρώματος που είναι τοποθετημένος ο ανιχνευτής (detector), T είναι η διακριτή περίοδος ελέγχου και N είναι ο αριθμός των οχημάτων που μετράει ο ανιχνευτής κατά το χρονικό διάστημα T .

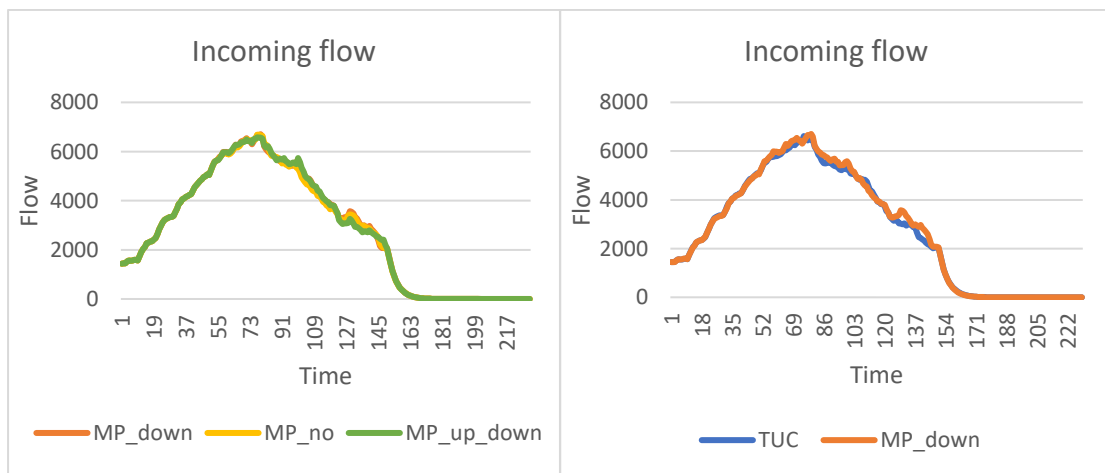
Το μέγεθος που συγκρίνεται σε αυτή την ενότητα είναι η συνολική εισερχόμενη ροή των οχημάτων στο δίκτυο, δηλαδή ο συνολικός αριθμός των οχημάτων που εισέρχονται στο εξεταζόμενο δίκτυο στη μονάδα του χρόνου. Για την πραγματοποίηση του σκοπού υπολογίστηκε το άθροισμα της ροής όλων των εισερχόμενων links στο δίκτυο, για κάθε χρονική περίοδο και τα διαγράμματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω.



Διαγράμματα 9.13- Σενάριο ζήτησης light. Σύγκριση της συνολικής εισερχόμενης ροής στο δίκτυο μεταξύ των μεθόδων MP_down, MP_no και MP_up_down (αριστερά) και των μεθόδων TUC και MP_down (δεξιά).



Διαγράμματα 9.14- Σενάριο ζήτησης heavy. Σύγκριση της συνολικής εισερχόμενης ροής στο δίκτυο μεταξύ των μεθόδων MP_down, MP_no και MP_up_down (αριστερά) και των μεθόδων TUC και MP_down (δεξιά).



Διαγράμματα 9.15- Σενάριο ζήτησης very heavy. Σύγκριση της συνολικής εισερχόμενης ροής στο δίκτυο μεταξύ των μεθόδων MP_down, MP_no και MP_up_down (αριστερά) και των μεθόδων TUC και MP_down (δεξιά).

Σε όλα τα σενάρια ζήτησης η διαφορά στο incoming flow μεταξύ των μεθόδων είναι μικρή και τα διαγράμματα που προέκυψαν έχουν την ίδια μορφή. Η εισερχόμενη ροή στο δίκτυο ξεκινάει από σχετικά χαμηλές τιμές και αυξάνεται μέχρι το χρονικό σημείο που λαμβάνει την μέγιστη τιμή της, την περίοδο αιχμής. Από εκείνο το σημείο και έπειτα, η τιμή της εισερχόμενης ροής μειώνεται μέχρι το σημείο που κατά τα σενάρια heavy και very heavy λαμβάνει τιμή ίση με 0.

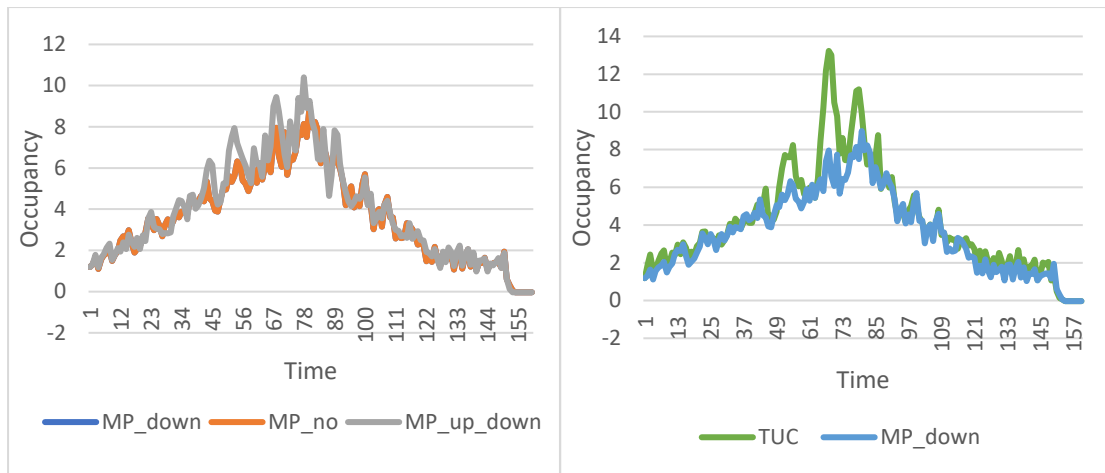
Στα διαγράμματα που βρίσκονται στα αριστερά και παρουσιάζουν τη σύγκριση της εισερχόμενης ροής μεταξύ των μεθόδων MP_down, MP_no και MP_up_down βλέπουμε ότι στο σενάριο light οι MP_down και MP_no εμφανίζουν ίδια αποτελέσματα και μάλιστα όταν εφαρμόζονται αυτές οι μέθοδοι παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή της εισερχόμενης ροής. Στα σενάρια ζήτησης heavy και very heavy οι MP_down και MP_no εμφανίζουν ίδιες τιμές μέχρι ένα χρονικό σημείο. Στην περίπτωση του heavy σεναρίου η μέγιστη τιμή την εισερχόμενης ροής παρατηρείται όταν εφαρμόζεται η στρατηγική MP_no, ενώ στην περίπτωση του very heavy σεναρίου ζήτησης η μέγιστη τιμή της εισερχόμενης ροής παρατηρείται όταν εφαρμόζεται η MP_down.

Όσον αφορά τα διαγράμματα που βρίσκονται στα δεξιά και τη σύγκριση μεταξύ TUC και MP_down, στο light σενάριο οι διαφορές είναι πολύ μικρές και η μέγιστη τιμή της εισερχόμενης ροής παρατηρείται με πολύ μικρή διαφορά όταν εφαρμόζεται η MP_down. Στο heavy σενάριο οι διαφορές εξακολουθούν να είναι μικρές, ενώ η μέγιστη τιμή εμφανίζεται όταν εφαρμόζεται η TUC. Στο very heavy σενάριο από το διάγραμμα φαίνεται ότι όταν εφαρμόζεται η MP_down η εισερχόμενη ροή λαμβάνει υψηλότερες τιμές στα περισσότερα χρονικά διαστήματα.

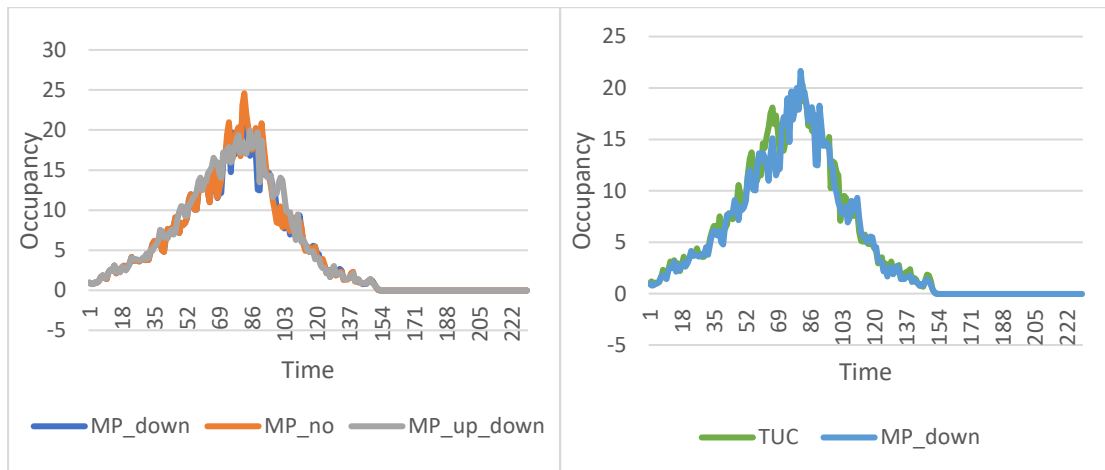
9.3.2 Occupancy

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 9.2.2, η κατάληψη (occupancy) ενός link είναι το μέγεθος που φανερώνει το ποσοστό πληρότητας του link και ισούται με τον αριθμό των οχημάτων που περιμένουν να εξυπηρετηθούν στο link κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου προς την κυκλοφοριακή ικανότητα (capacity) του link, δηλαδή τον μέγιστο αριθμό οχημάτων που μπορεί να εξυπηρετηθεί από το εν λόγω link κατά την ίδια χρονική περίοδο.

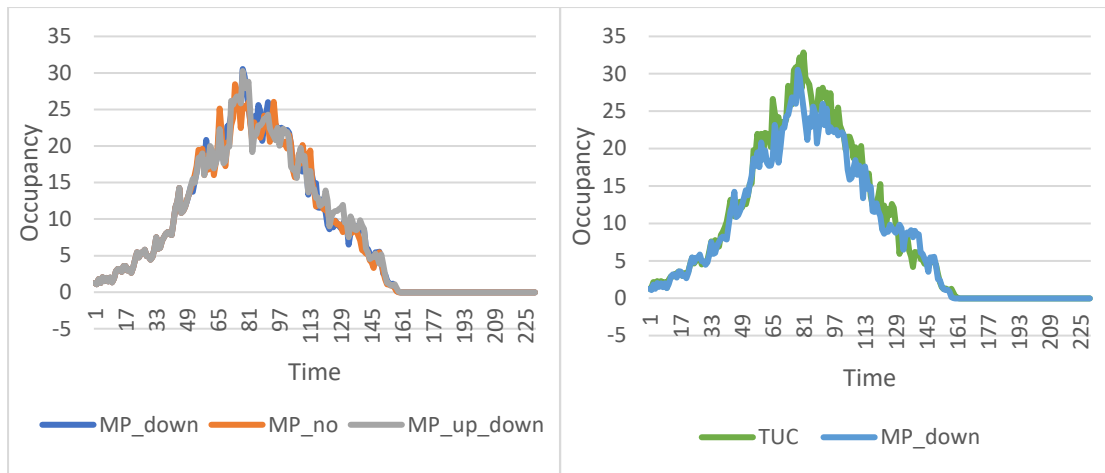
Το μέγεθος που εξετάζεται σε αυτή την ενότητα είναι το occupancy των links για το σύνολο του δικτύου και για τον λόγο αυτό υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών του από όλα τα links που συνθέτουν το δίκτυο, για κάθε χρονική περίοδο. Τα συγκριτικά διαγράμματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω.



Διαγράμματα 9.16- Σενάριο ζήτησης *light*. Σύγκριση της κατάληψης του δικτύου μεταξύ των μεθόδων MP_down, MP_no και MP_up_down (αριστερά) και των μεθόδων TUC και MP_down (δεξιά).



Διαγράμματα 9.17- Σενάριο ζήτησης *heavy*. Σύγκριση της κατάληψης του δικτύου μεταξύ των μεθόδων MP_down, MP_no και MP_up_down (αριστερά) και των μεθόδων TUC και MP_down (δεξιά).



Διαγράμματα 9.18- Σενάριο ζήτησης *very heavy*. Σύγκριση της κατάληψης του δικτύου μεταξύ των μεθόδων *MP_down*, *MP_no* και *MP_up_down* (αριστερά) και των μεθόδων *TUC* και *MP_down* (δεξιά).

Ο Μ.Ο. της τιμής του occupancy όλων των link που συνθέτουν το εξεταζόμενο δίκτυο είναι ένας τρόπος για να έχουμε εικόνα σχετικά με το πως διαμορφώνεται το occupancy στο δίκτυο κατά διάρκεια της προσομοίωσης. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι το occupancy ξεκινάει από χαμηλές τιμές και αυξάνεται μέχρι το χρονικό σημείο που λαμβάνει την μέγιστη τιμή του. Από το σημείο εκείνο κι έπειτα η τιμή του occupancy για το δίκτυο μειώνεται και μάλιστα προς το τέλος της προσομοίωσης λαμβάνει τιμές λίγο μικρότερες του μηδενός. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι στο πέρας της κάθε προσομοίωσης έχει προστεθεί χρόνος με μηδενική ζήτηση ώστε να επιτευχθεί η εκκένωση του δικτύου. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν παρόμοια μορφή σε όλα τα σενάρια ζήτησης.

Από τα διαγράμματα 9.16 φαίνεται ότι οι τιμές που λαμβάνει το occupancy είναι σχετικά χαμηλές και αυτό οφείλεται στη χαμηλή ζήτηση που χαρακτηρίζει το σενάριο *light*. Από το διάγραμμα στα αριστερά βλέπουμε ότι δεν υπάρχει διαφορά ανάμεσα στις μεθόδους *MP_down* και *MP_no* όσον αφορά τις τιμές που λαμβάνει το occupancy, ενώ η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται όταν εφαρμόζεται η μέθοδος *MP_up_down*. Από το διάγραμμα στα δεξιά παρατηρείται ότι όταν εφαρμόζεται η μέθοδος *TUC* έναντι της *MP_down*, το occupancy εμφανίζει συνολικά υψηλότερες τιμές και η διαφορά που προκύπτει είναι αξιοσημείωτη.

Από τα διαγράμματα 9.17 που αφορούν το *heavy* σενάριο φαίνεται ότι οι τιμές που λαμβάνει το occupancy είναι εμφανώς υψηλότερες σε σχέση με το *light* σενάριο, όπως είναι λογικό λόγω της μεγαλύτερης ζήτησης που χαρακτηρίζει αυτό το σενάριο. Τα αποτελέσματα μοιάζουν όταν εφαρμόζεται η *MP_down* και η *MP_up_down*, ενώ η μέγιστη τιμή παρατηρείται όταν εφαρμόζεται η *MP_no*. Οι τιμές που λαμβάνει το occupancy στις μεθόδους *TUC* και *MP_down* διαφέρουν ελάχιστα και η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στην *MP_down*.

Στα διαγράμματα 9.18, που αφορούν το very heavy σενάριο, παρατηρείται η μεγαλύτερη ομοιότητα στις τιμές που λαμβάνει το occupancy μεταξύ των τριών παραλλαγών της MP. Όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ των μεθόδων TUC και MP_down, φαίνεται ότι στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της προσομοίωσης το occupancy λαμβάνει υψηλότερες τιμές όταν εφαρμόζεται η TUC. Κατά την εφαρμογή της TUC επίσης, εντοπίζεται η μέγιστη τιμή της κατάληψης.

Η έξαρση του κυκλοφοριακού προβλήματος που παρατηρείται καθημερινά σε πολλά οδικά δίκτυα έχει στρέψει την προσοχή πολλών επιστημονικών κλάδων στην προσπάθεια ανάπτυξης και εφαρμογής της καταλληλότερης στρατηγικής κυκλοφοριακού ελέγχου. Οι στρατηγικές αυτές διαφέρουν ως προς τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους και δεν είναι εξίσου αποδοτικές για όλα τα κυκλοφοριακά δίκτυα, αλλά η καταλληλότητά τους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά, τις απαιτήσεις και τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει το δίκτυο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε με σκοπό τη σύγκριση δύο στρατηγικών ελέγχου πραγματικού χρόνου σε τρία διαφορετικά σενάρια ζήτησης. Για την πραγματοποίηση των συγκρίσεων αυτών λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς ο έλεγχος σταθερού χρόνου και η μελέτη αφορά το οδικό κυκλοφοριακό δίκτυο των Χανίων.

Η TUC είναι μία ελληνική στρατηγική πραγματικού χρόνου που αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει προβλήματα συντονισμένου ελέγχου σε μεγάλα αστικά δίκτυα. Ο Max-Pressure είναι ένας τοπικός ελεγκτής ανατροφοδότησης πραγματικού χρόνου που εφαρμόζεται ανά κόμβο και χρησιμοποιεί μόνο τις παρακείμενες μετρήσεις του μήκους ουράς του εξεταζόμενου κόμβου και όχι τις μετρήσεις όλων των κόμβων του δικτύου, με τη δυνατότητα να λάβουμε πληροφορία και από τους γειτονικούς κόμβους. Πρέπει να τονίσουμε ότι στην παρούσα εργασία, προκειμένου να έχουμε μια πιο δίκαιη σύγκριση των μεθόδων TUC και Max-Pressure, δεν χρησιμοποιήσαμε έλεγχο κύκλου και offset για την TUC, γεγονός που της στέρησε δύο από τα βασικά πλεονεκτήματα μιας στρατηγικής κεντρικού ελέγχου.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του μικροσκοπικού προσομοιωτή AIMSUN, όπου πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις των στρατηγικών στα τρία σενάρια ζήτησης (ελαφρύ, βαρύ, συμφόρηση) και προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Στο σενάριο με μικρή ζήτηση παρατηρήθηκε αύξηση στον χρόνο καθυστέρησης των οχημάτων όταν εφαρμόστηκαν δυναμικά σενάρια έναντι του ελέγχου σταθερού χρόνου. Από τη σύγκριση μεταξύ των στρατηγικών πραγματικού χρόνου, καλύτερα αποτελέσματα παρουσίασε η μέθοδος TUC, ενώ η Max-Pressure με χρήση πληροφορίας από τους ανάντη γειτονικούς κόμβους φαίνεται να είναι η λιγότερο κατάλληλη στρατηγική για αυτό το σενάριο. Το γεγονός ότι στερήσαμε από την TUC τον έλεγχο του offset καθιστά την TUC ελαφρώς χειρότερη από την στρατηγική σταθερού χρόνου, με ποσοστό 3,49%.

Διαφορετικά αποτελέσματα παρουσιάστηκαν όταν εφαρμόστηκαν τα σενάρια με υψηλή ζήτηση (βαρύ, συμφόρηση). Σε όλες τις περιπτώσεις των σεναρίων πραγματικού χρόνου υπήρξε βελτιστοποίηση στον χρόνο καθυστέρησης των οχημάτων συγκριτικά με τον fixed time έλεγχο. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε

βελτίωση της τάξης του 15,85% έως 20,18% όταν εφαρμόστηκε το βαρύ σενάριο ζήτησης, ενώ στην περίπτωση της συμφόρησης το ποσοστό βελτίωσης ανήλθε στο 28,91% έως 34,48%. Στα δύο σενάρια υψηλής ζήτησης (βαρύ, συμφόρηση), το υψηλότερο ποσοστό βελτίωσης (20,18% και 34,48% αντίστοιχα) ανήκει στην Max-Pressure με χρήση πληροφορίας από τους κατάντη γειτονικούς κόμβους, ενώ η Max-Pressure με χρήση πληροφορίας από όλους τους γειτονικούς κόμβους (ανάντη και κατάντη) παρουσιάζει το μικρότερο ποσοστό βελτίωσης (15,85% και 28,91% αντίστοιχα) σε σχέση με τα υπόλοιπα δυναμικά σενάρια. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της αυξημένης ζήτησης που χαρακτηρίζει αυτά τα σενάρια, είναι πολλές οι περιπτώσεις που κάποια οχήματα δεν προλαβαίνουν να εξυπηρετηθούν και παραμένουν μέσα στο δίκτυο μετά το τέλος της προσομοίωσης (gridlock).

Η έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι όταν στο δίκτυο υπάρχουν συνθήκες υψηλής ζήτησης και κυκλοφοριακής συμφόρησης, οι στρατηγικές πραγματικού χρόνου αποδίδουν καλύτερα. Με τον έλεγχο του offset η στρατηγική Max-Pressure θα ήταν υποδεέστερη της TUC, αλλά και πάλι καλύτερη από αυτή του σταθερού κύκλου.

1. Διακάκη Χ., Δινοπούλου Β., Παπαγεωργίου Μ., Έλεγχος της Κυκλοφορίας και Συστήματα Σηματοδότησης.
2. A. Kouvelas, J. Lioris, S. A. Fayazi, P. Varaiya, Max-Pressure Controller for stabilizing the queues in signalized arterial networks, TRB 2014 Annual Meeting.
3. Pravin Varaiya, Max-Pressure control of a network of signalized intersections, Transportation Research Part C 36 (2013) 177-195.
4. Xiao – Feng Xie, Stephen F. Smith, Liang Lu, Gregory J. Barlow, Schedule – driven intersection control, Transportation Research Part C 24 (2012) 168-189.
5. Pappa Theodora, Comparison of decentralized and centralized signal control methods on a large-scale urban network, Chania 2016.
6. Αντιγόνη Βάκουλη, Ανάλυση μιας νέας μεθοδολογίας βελτιστοποίησης παραμέτρων συστημάτων ελέγχου με εφαρμογή στην στρατηγική ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. TUC, Χανιά 2006.
7. Ανυφαντής Σταύρος, Προσομοίωση της κυκλοφορίας του αστικού δικτύου των Χανίων με χρήση του μικροσκοπικού προσομοιωτή AIMSUN και εφαρμογή της στρατηγικής ελέγχου φωτεινής σηματοδότησης. TUC, Χανιά 2007.

