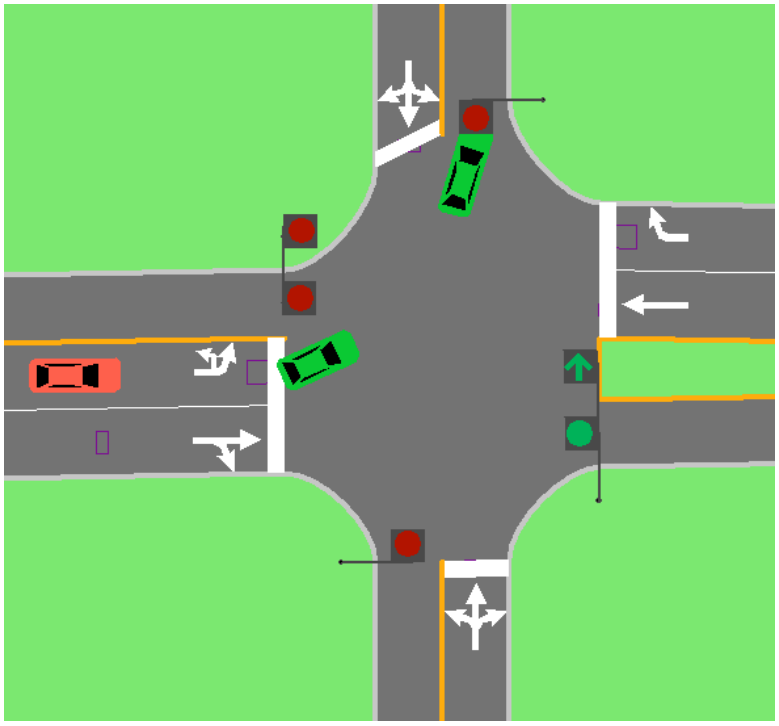
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΣΕ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΟΥΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΑ



Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνος Πανουτσάκος

Επιβλέπουσα: Ελένη Βλαχογιάννη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Αθήνα, Μάρτιος 2021

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα μου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Βλαχογιάννη Ελένη, καθώς και όλη την ερευνητική της ομάδα, για την καθοδήγηση που μου προσέφεραν και το χρόνο που διέθεσαν δίνοντάς μου χρήσιμες συμβουλές και οδηγίες για την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας. Οφείλω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους εκείνους που συνέβαλαν με τις καίριες συμβουλές τους σε θέματα γλωσσικής έκφρασης, καθώς και με τη βοήθεια και την εμψύχωση τους στην ολοκλήρωση της εργασίας μου. Τέλος, αυτονόητο είναι ένα μεγάλο ευχαριστώ στη μητέρα μου και την αδερφή μου για την ηθική υποστήριξη σε όλο το διάστημα των σπουδών μου.

Διερεύνηση Επιρροής Αναστροφής σε Σηματοδοτούμενα Δίκτυα

Κωνσταντίνος Πανουτσάκος

Επιβλέπουσα: Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ελένη Βλαχογιάννη

Σύνοψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η παραμετρική διερεύνηση της κυκλοφοριακής συμπεριφοράς ενός ισόπεδου κόμβου. Οι ισόπεδοι κόμβοι – όντας οι συνηθέστεροι κόμβοι σε αστικές περιοχές – αποτελούν στοιχεία του αστικού οδικού δικτύου ζωτικής σημασίας. Ο σωστός σχεδιασμός τους και η προσεκτική επιλογή των κυκλοφοριακών παραμέτρων είναι δυνατό να μεγιστοποιήσουν την κυκλοφοριακή τους ικανότητα, οδηγώντας σε αποτελεσματικότερα οδικά δίκτυα, προς όφελος των χρηστών. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν αφορούσαν σε χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας, όπως ο φόρτος ή αναλογία των φόρτων μεταξύ των κινήσεων, αλλά και επιλογών σηματοδότησης. Εξετάστηκε η επιρροή των παραμέτρων αυτών σε έναν ισόπεδο κόμβο τεσσάρων προσβάσεων στον οποίο επιτρέπεται – μερικά – η εκτέλεση αριστερής στροφής και αναστροφής. Μέσω των διαφόρων σεναρίων που αναπτύχθηκαν και προσομοιώθηκαν παράχθηκε πληθώρα ποσοτικών αποτελεσμάτων τα οποία αξιολογήθηκαν καταλλήλως. Από τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν και τα ανάλογα συμπεράσματα.

Λέξεις Κλειδιά: αναστροφή, αστικός κόμβος, σηματοδοτούμενος κόμβος, synchro 11, sim traffic 11

Effects of U-Turn Movements on Signalised Road Networks

Konstantinos Panoutsakos

Supervisor: Eleni Vlahogianni, Associate Professor

Abstract

The object of the present work is the parametric investigation of the traffic behavior of a road intersection. Those intersections, which are common in urban areas, are vital elements of the urban road network. Proper design and careful selection of traffic parameters can maximize their traffic capacity, leading to efficiency for the benefit of the drivers/users. The parameters examined were related to traffic characteristics, such as the traffic volumes or the ratio of those volumes between different movements, but also timing and phasing settings. The influence of these parameters was examined on a four-approach intersection where left turn and U-turn are partially allowed. Through the various scenarios developed and simulated, a variety of quantitative results were produced which were properly evaluated. The conclusions were drawn from these results.

Keywords: U-turn, urban intersection, signalized intersection, synchro 11, sim traffic 11

Διερεύνηση Επιρροής Αναστροφής σε Σηματοδοτούμενα Δίκτυα

Κωνσταντίνος Πανουτσάκος

Επιβλέπουσα: Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ελένη Βλαχογιάννη

Εκτενής Περίληψη

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η διερεύνηση του κατά πόσο μία σειρά παραμέτρων, τόσο εσωτερικών, όσο και εξωτερικών επηρεάζει την ικανότητα ενός ισόπεδου κόμβου να εξυπηρετήσει τους αναπτυσσόμενους κυκλοφοριακούς φόρτους. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στις παραμέτρους που σχετίζονται με την δυνατότητα και το πλήθος των οχημάτων που επιθυμούν να αναστρέψουν χρησιμοποιώντας λωρίδα αριστερής στροφής από μία κεντρική σε μία δευτερεύουσα οδό.

Για τον σκοπό αυτό, σχεδιάστηκε ένας θεωρητικός ισόπεδος κόμβος τεσσάρων προσβάσεων σε περιβάλλον μικροσκοπικής προσομοίωσης. Από τις τέσσερεις προσβάσεις, η μία (συγκεκριμένα η δυτική) επιλέχθηκε να εξυπηρετεί την κατευθείαν κίνηση (από μία λωρίδες) και την αριστερή στροφή από αποκλειστική λωρίδα. Από την αποκλειστική λωρίδα της αριστερής στροφής έχει επιτραπεί και η εκτέλεση αναστροφής. Οι παράγοντες, των οποίων η επιρροή έχει επιλεγεί να καταγραφεί, είναι οι εξής:

- Ο συνολικός φόρτος των οχημάτων που στρέφουν αριστερά ή αναστρέφουν από τη δυτική πρόσβαση,
- Το ποσοστό των οχημάτων που αναστρέφουν προς τον φόρτο των οχημάτων που στρέφουν αριστερά ή αναστρέφουν από τη δυτική πρόσβαση και
- Ο λόγος g/C, που εκφράζει την χρονική διάρκεια της πράσινης ένδειξης της λωρίδας αριστερής στροφής της δυτικής πρόσβασης προς τη συνολική περίοδο σηματοδότησης του κόμβου.

Η εργασία μπορεί να διακριθεί σε δύο βασικά τμήματα. Το πρώτο τμήμα αποτελεί την εισαγωγή στον αναγνώστη στη θεωρητική φύση του προβλήματος που επιχειρείται να διερευνηθεί και το τμήμα που αφορά στην ανάπτυξη των προσομοιώσεων, τα παραγόμενα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν στη βάση της παρούσας εργασίας. Το δεύτερο μέρος της εργασίας, αποτελεί το ερευνητικό τμήμα της εργασίας και περιλαμβάνει την παρουσίαση του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε την περιγραφή του πειράματος που έχει σχεδιαστεί στο πλαίσιο της εργασίας, τα εναλλακτικά σενάρια και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα έχει επιλεγεί να παρατεθούν υπό μορφή δεικτών συμπεριφοράς (Key Performance Indicators – KPI's) και η παρουσίασή τους πραγματοποιείται τόσο υπό μορφή πινάκων όσο και διαγραμματικά, ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να αντιληφθεί την επιρροή των διαφόρων παραμέτρων στη συμπεριφορά του κόμβου που εξετάζεται. Η εργασία ολοκληρώνεται με το τελευταίο

κεφάλαιο το οποίο αφορά στην παράθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Για την επίτευξη του στόχου καταστρώθηκαν διάφορα σενάρια προσομοίωσης, βάσει της παραμετρικής μεταβολής των εξής τριών παραμέτρων:

- Το σύνολο του κυκλοφοριακού φόρτου που εξυπηρετείται από την αποκλειστική λωρίδα στροφής αριστερά και αναστροφής, που έλαβε τιμές 100veh/h, 200veh/h, 300veh/h και 400veh/h
- Το ποσοστό των οχημάτων που αναστρέφουν προς το σύνολο του φόρτου της συγκεκριμένης λωρίδας, που έλαβε τις τιμές 0%, 10%, 20%, 30% και 40%
- Ο λόγος της διάρκειας της πράσινης ένδειξης της φάσης που εξυπηρετεί τη συγκεκριμένη λωρίδα προς την περίοδο σηματοδότησης του κόμβου, που έλαβε τις τιμές 0,20, 0,25 και 0,30

που έδωσαν συνολικά εξήντα διαφορετικά σενάρια.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι σαφής η σχέση των διαφόρων κυκλοφοριακών παραμέτρων που περιγράφουν έναν σηματοδοτούμενο κόμβο με αναστροφή με τη δυνατότητα του να ανταποκρίνεται επιτυχώς – και σε ποιο βαθμό – στον κυκλοφοριακό φόρτο. Ο συνδυασμός των συμπερασμάτων που προέκυψαν με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε παρέχει τη δυνατότητα να αναδειχθούν και να αναφερθούν τα πεδία στα οποία μπορεί μελλοντική έρευνα να κατευθυνθεί προκειμένου να εξεταστεί περαιτέρω και με μεγαλύτερη ακρίβεια το φαινόμενο της επιρροής της αναστροφής.

Περιεχόμενα

Ευρετήριο εικόνων III
Ευρετήριο πινάκων IV
Ευρετήριο διαγραμμάτων IV
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
1.1 Γενικά 1
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας 2
1.3 Διάρθρωση της εργασίας 2
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 4
3. Μεθοδολογική Προσέγγιση 8
3.1 Μεθοδολογία 8
3.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο 9
3.2.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη κυκλοφορίας 9
3.2.2 Κυκλοφοριακοί κόμβοι και σηματοδότηση 9
3.2.3 Σηματοδότηση 11
3.2.4 Ρύθμιση της κυκλοφορίας σε μεμονωμένο κόμβο 12
3.2.5 Βασικές έννοιες κυκλοφοριακής μελέτης σηματοδότησης 13
3.2.6 Υπολογισμός σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου 15
3.2.7 Κυκλοφοριακή ικανότητα 19
3.2.8 Στάθμες εξυπηρέτησης 22
3.3 Κυκλοφοριακή ικανότητα για ιδανικές συνθήκες 24
3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ικανότητα 24
3.5 Υπολογισμός κυκλοφοριακής ικανότητας 25
3.5.1 Ισόπεδοι σηματοδοτούμενοι κόμβοι 25
4. Ανάλυση και Αποτελέσματα 30
4.1 Παρουσίαση λογισμικού ανάλυσης 30
4.1.1 Γενικά 30
4.1.2 Synchro 11 31
4.1.3 Simtraffic 11 39
4.2 Ανάλυση παραμέτρων προσομοιώσεων 46
4.2.1 Γενικά 46
4.2.2 Γεωμετρία κόμβου 46

4.2.3 Κυκλοφοριακοί φόρτοι 48
4.2.4 Παράμετροι σηματοδότησης 53
4.2.5 Στοιχεία οχημάτων, οδηγών και προσομοίωσης 56
4.3 Αποτελέσματα 57
4.3.1 Δείκτες απόδοσης (KPI's) 57
4.3.2 Ποσοτική και διαγραμματική απεικόνιση αποτελεσμάτων 58
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 71
5.1 Βασικά συμπεράσματα 71
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα 72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 74

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1: Εναλλακτικοί τρόποι εκτέλεσης αριστερής στροφής από δευτερεύουσα οδό (Πηγή: Liu et al., 2007) 5

Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου που εξετάστηκε από το Πανεπιστήμιο του Kentucky (2004) 6

Εικόνα 3: Στοιχειώδεις Ελιγμοί 10

Εικόνα 4: Διαχωριστικές νησίδες μεταξύ λωρίδων ιδίας φοράς επί της Λ. Μεσογείων στην Αθήνα 10

Εικόνα 5: Φωτεινοί σηματοδότες άνωθεν της οδού 14

Εικόνα 6: Στάθμες Εξυπηρέτησης 23

Εικόνα 7: Δημιουργία μίας οδού στο περιβάλλον του synchro 11 32

Εικόνα 8: Δημιουργία κάθετης οδού και αυτόματης δημιουργία οδικού κόμβου στο synchro 11 32

Εικόνα 9: Εισαγωγή κυκλοφοριακών στοιχείων δυτικής πρόσβασης στην καρτέλα ιδιοτήτων λωρίδων 33

Εικόνα 10: Εισαγωγή κυκλοφοριακών στοιχείων δυτικής πρόσβασης στην καρτέλα ιδιοτήτων φόρτων 34

Εικόνα 11: Κυκλοφοριακοί φόρτοι κόμβου 35

Εικόνα 12: Εισαγωγή στοιχείων φωτεινών σηματοδοτών 36

Εικόνα 13: Οπτική παρουσίαση φάσεων σηματοδότησης στο περιβάλλον synchro 11 37

Εικόνα 14: Προκαταρκτικά αποτελέσματα ανάλυσης στο περιβάλλον του synchro 11 38

Εικόνα 15: Παράδειγμα αναφοράς του synchro 11 39

Εικόνα 16: Εισαγωγή παραμέτρων σχετιζόμενων με τα οχήματα 40

Εικόνα 17: Εισαγωγή παραμέτρων σχετιζόμενων με τους οδηγούς 42

Εικόνα 18: Εισαγωγή παραμέτρων σχετιζόμενων με την προσομοίωση 43

Εικόνα 19: Καρτέλα προετοιμασίας αναφοράς του simtraffic 11 45

Εικόνα 20: Παράδειγμα αναφοράς simtraffic 11 45

Εικόνα 21: Γεωμετρία κόμβου 47

Εικόνα 22: Οπτική απεικόνιση επιμέρους κυκλοφοριακών φόρτων σε ένα εκ των σεναρίων που εξετάστηκαν 52

Εικόνα 23: Οπτική παρουσίαση φάσεων σηματοδότησης σεναρίων στα οποία g/C=0,20 55

Εικόνα 24: Οπτική παρουσίαση φάσεων σηματοδότησης σεναρίων στα οποία g/C=0,25 55

Εικόνα 25: Οπτική παρουσίαση φάσεων σηματοδότησης σεναρίων στα οποία g/C=0,30 55

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Προτεινόμενες τιμές μειωτικού συντελεστή κατά την έρευνα των Liu et al. (2005) 6

Πίνακας 2: Κατάταξη σηματοδοτούμενων κόμβων σε στάθμες εξυπηρέτησης με βάση τη μέση καθυστέρηση 23

Πίνακας 3: Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη κυκλοφοριακή ικανότητα. 25

Πίνακας 4: Κατανομή κυκλοφοριακού φόρτου της κατευθείαν κίνησης της δυτικής πρόσβασης..... 42

Πίνακας 5: Κυκλοφοριακοί φόρτοι κινήσεων ισόπεδου κόμβου προσομοιώσεων 48

Πίνακας 6: Αναπτυσσόμενα σενάρια με μεταβλητές τον συνολικό φόρτο αριστερής στροφής και το ποσοστό οχημάτων που αναστρέφουν..... 49

Πίνακας 7: Τιμές συντελεστή f_{UT} 51

Πίνακας 8: Μίγμα σύνθεσης κυκλοφοριακού φόρτου ανά υποκατηγορία οχημάτων 51

Πίνακας 9: Κατανομή κυκλοφοριακού φόρτου στην ανατολική πρόσβαση 52

Πίνακας 10: Χρονική διάρκεια 1ης και 2ης υποφάσης συναρτήσει του λόγου g/C της 1ης υποφάσης..... 54

Πίνακας 11: Μίγμα σύνθεσης κυκλοφοριακού φόρτου ανά υποκατηγορία οχημάτων 56

Πίνακας 12: Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοιώσεων – Μέσες χρονικές καθυστερήσεις 60

Πίνακας 13: Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοιώσεων – Λόγοι v/c..... 61

Ευρετήριο διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Μεταβολή του ρυθμού αποφόρτισης μιας πρόσβασης ισόπεδου κόμβου κατά τη διάρκεια κορεσμένης πράσινης περιόδου..... 19

Διάγραμμα 2: Συγκριτική παρουσίαση προτεινόμενων τιμών του συντελεστή f_{UT} σε σχέση με το ποσοστό των αναστρεφόμενων οχημάτων (Πηγή: Hamad & Abu-Hamda, 2017)..... 51

Διάγραμμα 3: Μέση χρονική καθυστέρηση σε (s) για g/C=0,20 62

Διάγραμμα 4: Μέση χρονική καθυστέρηση σε (s) για g/C=0,25 63

Διάγραμμα 5: Μέση χρονική καθυστέρηση σε (s) για g/C=0,30 63

Διάγραμμα 6: Λόγος v/c για g/C=0,20..... 64

Διάγραμμα 7: Λόγος v/c για g/C=0,25..... 64

Διάγραμμα 8: Λόγος v/c για g/C=0,30 65
Διάγραμμα 9: Μέση χρονική καθυστέρηση σε (s) για ποσοστό αναστροφών 0% 66
Διάγραμμα 10: Μέση χρονική καθυστέρηση σε (s) για ποσοστό αναστροφών 20% 66
Διάγραμμα 11: Μέση χρονική καθυστέρηση σε (s) για ποσοστό αναστροφών 40% 67
Διάγραμμα 12: Λόγος v/c για ποσοστό αναστροφών 0% 67
Διάγραμμα 13: Λόγος v/c για ποσοστό αναστροφών 20% 68
Διάγραμμα 14: Λόγος v/c για ποσοστό αναστροφών 40% 68
Διάγραμμα 15: Λόγος v/c λωρίδας που στρέφει αριστερά και μέση χρονική καθυστέρηση κατευθείαν κίνησης δυτικής πρόσβασης για ποσοστό αναστροφών 20% 69
Διάγραμμα 16: Λόγος v/c λωρίδας που στρέφει αριστερά και μέση χρονική καθυστέρηση κατευθείαν κίνησης δυτικής πρόσβασης για ποσοστό αναστροφών 40% 70

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Το πλέον κρίσιμο στοιχείο για την ικανοποιητική απόδοση των αστικών δικτύων είναι προφανές ότι είναι οι ισόπεδοι κόμβοι. Σηματοδοτούμενοι ή μη, τριών, τεσσάρων ή και περισσότερων προσβάσεων αποτελούν τα σημεία όπου τα κινούμενα οχήματα απαιτείται είτε να περιορίσουν την ταχύτητά τους, είτε να διακόψουν την πορεία τους με στάση, ώστε να είναι δυνατή η ασφαλής διέλευση από αυτούς.

Αποτέλεσμα του τρόπου λειτουργίας των κόμβων είναι η πρόκληση χρονικών καθυστερήσεων στην κίνηση των οχημάτων.

Οι κεντρικότεροι αστικοί ισόπεδοι κόμβοι είναι συνήθως φωτεινά σηματοδοτούμενοι. Η ικανότητα αυτών των κόμβων να ανταπεξέλθουν και να εξυπηρετήσουν την ζήτηση που εκφράζεται μέσω των αναπτυσσόμενων κυκλοφοριακών φόρτων είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, εξωτερικών και ενδογενών.

Ως ενδογενείς μπορούν να θεωρηθούν οι παράγοντες που αφορούν στη μορφολογία του κόμβου, όπως είναι ο αριθμός των σκελών και τα λοιπά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, π.χ. το πλάτος και ο αριθμός των λωρίδων. Επιπλέον, ενδογενής παράγοντας μπορεί να θεωρηθεί και το είδος των επιτρεπόμενων κινήσεων σε κάθε κόμβο, όπως είναι η αριστερή στροφή ή ακόμα και η εκτέλεση αναστροφής και ο τρόπος σηματοδότησης του κόμβου.

Αντίθετα, οι εξωτερικοί παράγοντες είναι οι παράγοντες που σχετίζονται με τον κυκλοφοριακό φόρτο τον οποίο καλείται να εξυπηρετήσει ο εκάστοτε κόμβος. Ο φόρτος σε διαστάσεις αριθμού οχημάτων ανά χρόνο, τόσο για κάθε κίνηση αλλά και για κάθε πρόσβαση συνολικά, είναι η βασική έκφραση της κυκλοφορίας του κόμβου. Επιπλέον, ποιοτικά χαρακτηριστικά του κυκλοφοριακού φόρτου, όπως η σύνθεση της κυκλοφορίας ή η αναλογία των οχημάτων που εκτελούν διακριτές κινήσεις, όταν

αυτές εξυπηρετούνται από κοινές λωρίδες, αποτελούν εξωτερικούς παράγοντες, καθώς είναι εύκολο να κατανοηθεί ότι επηρεάζουν το επίπεδο εξυπηρέτησης που δύναται να παράσχει ο κόμβος.

Μεγαλύτερη ανάλυση αναφορικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ικανότητα του οδικού δικτύου και κατ' επέκταση και ενός ισόπεδου κόμβου αναλύονται εκτενώς στην αντίστοιχη ενότητα της παρούσας εργασίας.

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η διερεύνηση του κατά πόσο μία σειρά παραμέτρων, τόσο εσωτερικών, όσο και εξωτερικών επηρεάζει την ικανότητα ενός ισόπεδου κόμβου να εξυπηρετήσει τους αναπτυσσόμενους κυκλοφοριακούς φόρτους. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στις παραμέτρους που σχετίζονται με την δυνατότητα και το πλήθος των οχημάτων που επιθυμούν να αναστρέψουν χρησιμοποιώντας λωρίδα αριστερής στροφής από μία κεντρική σε μία δευτερεύουσα οδό.

Προς τούτο, έχει σχεδιαστεί ένας θεωρητικός ισόπεδος κόμβος τεσσάρων προσβάσεων. Από αυτές, η μία (συγκεκριμένα η δυτική) έχει επιλεγεί να εξυπηρετεί την κατευθείαν κίνηση (από δύο λωρίδες) και την αριστερή στροφή από αποκλειστική λωρίδα. Από την αποκλειστική λωρίδα της αριστερής στροφής έχει επιτραπεί και η εκτέλεση αναστροφής.

Οι παράγοντες, των οποίων η επιρροή έχει επιλεγεί να καταγραφεί, είναι οι εξής:

- Ο συνολικός φόρτος των οχημάτων που στρέφουν αριστερά ή αναστρέφουν από τη δυτική πρόσβαση,
- Το ποσοστό των οχημάτων που αναστρέφουν προς τον φόρτο των οχημάτων που στρέφουν αριστερά ή αναστρέφουν από τη δυτική πρόσβαση και
- Ο λόγος g/C, που εκφράζει την χρονική διάρκεια της πράσινης ένδειξης της λωρίδας αριστερής στροφής της δυτικής πρόσβασης προς τη συνολική περίοδο σηματοδότησης του κόμβου.

Συνδυαζόμενα με τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι έχει επιλεγεί να μελετηθεί η επιρροή ενός ενδογενούς παράγοντα (λόγος g/C) και δύο εξωτερικών.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια, από τα οποία τα τρία τέσσερα αποτελούν την ανάλυση του απαραίτητου θεωρητικού υποβάθρου, ένα αφορά στην παρουσίαση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε, στην περιγραφή των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν και στα αποτελέσματα ενώ το τελευταίο και τα συμπεράσματα.

Συγκεκριμένα:

- Στο **δεύτερο** κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε κατά την σύνταξη της παρούσας εργασίας.

- Το **τρίτο** κεφάλαιο αποτελεί τον πυρήνα του θεωρητικού μέρους και αποτελεί την θεωρητική εισαγωγή στο πρόβλημα που ερευνάται. Στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνονται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε αλλά και η ανάλυση των εννοιών και διαδικασιών που περιγράφουν το πρόβλημα της κυκλοφορίας και αποδοτικότητας ενός σηματοδοτούμενου οδικού δικτύου.
- Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας έχουν γίνει προσομοιώσεις σε κατάλληλο προς τούτο υπολογιστικό περιβάλλον (λογισμικό). Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι η σουίτα εφαρμογών του Synchro Plus και συγκεκριμένα οι εφαρμογές της, synchro 11 και simtraffic 11. Σε αυτό το περιβάλλον σχεδιάστηκε το πείραμα της εργασίας αυτής και μέσω των κατάλληλων παραδοχών καταστρώθηκαν τα διάφορα σενάρια που εξετάστηκαν. Όλα τα ανωτέρω μαζί με τα παραγόμενα αποτελέσματα συνιστούν το αντικείμενο του **τέταρτου** κεφαλαίου.
- Το **πέμπτο** -και τελευταίο- κεφάλαιο τα συμπεράσματα που εξήχθησαν βάσει των αποτελεσμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου, ενώ ταυτόχρονα σε αυτό επιχειρείται η διατύπωση των πεδίων στα οποία θα πρέπει να κατευθυνθεί πιθανή μελλοντική έρευνα.

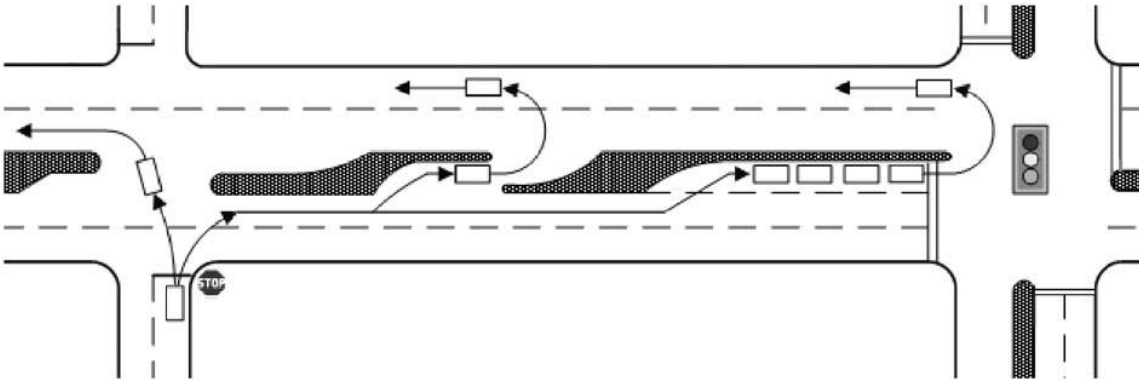
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Το μεγαλύτερο μέρος της μέχρι σήμερα έρευνας που έχει απασχοληθεί με τις αναστροφές αφορά στην επιρροή αυτών σε μη σηματοδοτούμενους κόμβους. Μόνο ένα μικρό μέρος της παγκόσμιας βιβλιογραφίας αφορά στην επιρροή της δυνατότητας αναστροφής επί της κυκλοφοριακής ικανότητας σηματοδοτούμενου κόμβου. Ιδιαίτερο πρόβλημα δημιουργείται όχι μόνο λόγω του μικρού αριθμού ερευνών αλλά και λόγω του μικρού δείγματος που χρησιμοποιήθηκε σε αυτές (Carter et al., 2005). Αποτέλεσμα είναι μην θεωρείται επαρκώς διερευνημένο το συγκεκριμένο θέμα.

Σύμφωνα με τη μέθοδο του Highway Capacity Manual (HCM2000) για ανάλυση κυκλοφοριακής ικανότητας σε σηματοδοτούμενους κόμβους περιλαμβάνει μια σειρά από διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ροή των λωρίδων που εξυπηρετούν τις αριστερές στροφές. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν -ενδεικτικά και όχι αποκλειστικά- το συνολικό κυκλοφοριακό φόρτο των λωρίδων αυτών αλλά και το ποσοστό των οχημάτων που αναστρέφουν προς το σύνολο του φόρτου (US Department of Transportation, 2021).

Η βιβλιογραφία που έχει αναπτυχθεί και αφορά στη διερεύνηση της επιρροής της αναστροφής οχημάτων επί σηματοδοτούμενων κόμβων μπορεί να διακριθεί σε δύο κύριες κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται οι έρευνες οι οποίες επιχειρούν να διαπιστώσουν την αποτελεσματικότητα της επιλογής αναστροφής αντί αριστερής στροφής είτε από μία δευτερεύουσα οδό προς μία κύρια, είτε το αντίστροφο. Αυτή η πρακτική εφαρμόζεται συχνά στις ΗΠΑ και συνίσταται στην απαγόρευση της αριστερής στροφής και στον αντίποδα τα οχήματα που επιθυμούν να στέψουν αριστερά από τη δευτερεύουσα οδό στρέφουν δεξιά στον σηματοδοτούμενο κόμβο και εν συνεχεία εκτελούν αναστροφή (μέσω αποκλειστικής λωρίδας) επί της κύριας οδού. Η αναστροφή είναι δυνατό να εκτελείται είτε σε θέση που υφίσταται κόμβος ή όχι. Η συγκεκριμένη πρακτική παρουσιάζεται ενδεικτικά στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Εναλλακτικοί τρόποι εκτέλεσης αριστερής στροφής από δευτερεύουσα οδό (Πηγή: Liu et al., 2007)

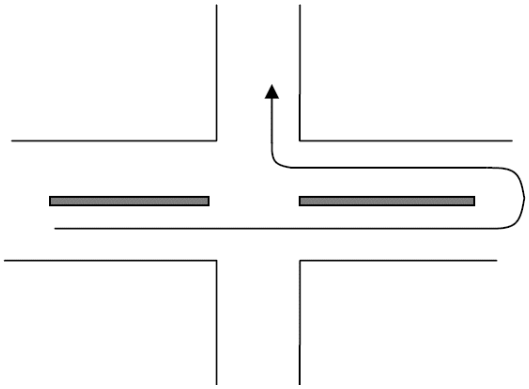
Ενδεικτική περίπτωση έρευνας αυτής της μορφής αποτελεί η μελέτη των Liu et al. (2007) οι οποίοι εξέτασαν την αποτελεσματικότητα της ανωτέρω τεχνικής. Τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν από 34 οδικά τμήματα στο οδικό δίκτυο της Florida των ΗΠΑ που συγκέντρωναν τα παραπάνω χαρακτηριστικά και αφορούσαν χρονική περίοδο τριών ετών. Οι παράμετροι οι οποίοι επιλέγηκαν για τον έλεγχο των υποθέσεων ήταν οι χρονικές καθυστερήσεις των οχημάτων που καταγράφηκαν.

Σύμφωνα με την έρευνα αυτή δεν διαπιστώνεται ιδιαίτερη μεταβολή στις χρονικές καθυστερήσεις και η μόνη παράμετρος που παρουσιάζεται να έχει σημαντική συμβολή είναι η απόσταση μεταξύ του κόμβου που εξετάζεται και της θέσης που κατάντη εκτελείται η αναστροφή.

Παρόμοια χαρακτηριστικά είχε η έρευνα των Mikhailov και Shesterov (2020) που αφορούσαν οδικό δίκτυο της Μόσχης, της Αγιοπετρούπολης, του Ιρκούτσκ και άλλων πόλεων στην Ρωσική Ομοσπονδία. Σε αυτή την περίπτωση οι κόμβοι που εξετάστηκαν ήταν μη πλήρως ανεπτυγμένοι ανισόπεδοι κόμβοι κατά τους οποίους «αριστερές στροφές» από το παρόδιο οδικό δίκτυο προς τον αστικό αυτοκινητόδρομο πραγματοποιείται μέσω εισόδου στο αντίθετο από το επιθυμητό ρεύμα του αυτοκινητοδρόμου και εν συνεχεία η εκτέλεση αναστροφής επί αυτού.

Η έρευνα αυτή κατέδειξε την υψηλή σημασία του κυκλοφοριακού φόρτου των κατευθείαν κινήσεων επί των παρατηρούμενων καθυστερήσεων στα οχήματα που επιθυμούν να αναστρέψουν.

Έρευνα που διεξήχθη από το πανεπιστήμιο του Kentucky ασχολήθηκε με την εκτέλεση αναστροφής κατάντη ενός σηματοδοτούμενου κόμβου σε αντικατάσταση των απ' ευθείας αριστερών στροφών από μία κύρια οδό προς μία δευτερεύουσα (Stamatiadis et al., 2004). Σχηματικά το αντικείμενο της έρευνας παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου που εξετάστηκε από το Πανεπιστήμιο του Kentucky (2004)

Η δεύτερη κατηγορία αφορά σε μελέτη της επιρροής της αναστροφής οχημάτων ταυτόχρονα με την εκτέλεση αριστερής στροφής, επί της ίδιας λωρίδας, από μία κύρια προς μία δευτερεύουσα οδό. Ιδιαίτερη σημασία έχει ότι οι συγκεκριμένες έρευνες αφορούν σε σηματοδοτούμενους κόμβους. Οι έρευνες αυτές έχουν οδηγήσει σε σημαντικά αποτελέσματα.

Έχει αποτυπωθεί ότι σημαντικό ρόλο παίζει η γεωμετρία του κόμβου και συγκεκριμένα κάποια χαρακτηριστικά όπως το πλάτος των λωρίδων και η ακτίνα στροφής για την αριστερή στροφή ή αναστροφή (Zheng et al. 1993). Η έρευνα αυτή αφορούσε 15 σηματοδοτούμενους κόμβους στην ευρύτερη περιοχή της Tampa στη Florida των ΗΠΑ.

Η έρευνα των Carter et al. (2005) συνέστησε τη χρήση μειωτικών συντελεστών στον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας των λωρίδων αποκλειστικής αριστερής στροφής και αναστροφής. Συγκεκριμένα, πρότεινε την μείωση της ικανότητας κατά 1,8% για κάθε 10% αύξησης του ποσοστού των οχημάτων που επιθυμούν να αναστρέψουν προς το σύνολο του φόρτου της λωρίδας και επιπλέον 1,5% στην περίπτωση που οι αναστροφές εκτελούνται παράλληλα με τις δεξιές στροφές της κάθετης οδού (και πάλι ανά 10% αύξησης του ποσοστού των οχημάτων που επιθυμούν να αναστρέψουν). Η συγκεκριμένη εργασία βασίστηκε σε στοιχεία που συλλέχθηκαν από το οδικό δίκτυο της North Carolina των ΗΠΑ.

Αντίστοιχα δεδομένα που αφορούσαν στο οδικό δίκτυο της Florida, έδωσαν τιμές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μειωτικός συντελεστές (Liu et al. 2005). Οι τιμές που προτείνονται και πάλι εξαρτώνται από το ποσοστό των οχημάτων που επιθυμούν να αναστρέψουν (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Προτεινόμενες τιμές μειωτικού συντελεστή κατά την έρευνα των Liu et al. (2005)

Ποσοστό οχημάτων που αναστρέφουν	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
Συντελεστής f_{UT}	0,99	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,84	0,82

Αντίστοιχες τιμές προτείνουν και σειρά άλλων εργασιών οι οποίες χρησιμοποίησαν εμπειρικά δεδομένα από διάφορα σημεία του πλανήτη (Wang 2008, Abuhijleh et al. 2020).

3. Μεθοδολογική Προσέγγιση

3.1 Μεθοδολογία

Ο βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση της συμπεριφοράς ενός αστικού οδικού κόμβου στον οποίο υπάρχει αποκλειστική λωρίδα αριστερής στροφής έναντι της μεταβολής διαφόρων κυκλοφοριακών παραμέτρων. Ιδιαίτερη βαρύτητα θα δοθεί στην εξέταση των μεγεθών που χαρακτηρίζουν τον κυκλοφοριακό φόρτο των οχημάτων που επιθυμούν να αναστρέψουν στην τελική απόκριση του ισόπεδου κόμβου.

Για την επίτευξη του στόχου θα σχεδιαστεί ένας εικονικός ισόπεδος κόμβος, στον οποίο θα υπάρχει μία λωρίδα αποκλειστικής αριστερής στροφής όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Επί της ουσίας θα πρόκειται για την ισόπεδη διασταύρωση μιας κεντρικής οδού με μία δευτερεύουσα με την αριστερή στροφή να αφορά την ανάγκη κίνησης οχημάτων που κινούνται επί της κύριας προς τη δευτερεύουσα οδό.

Ο κόμβος θα προσομοιωθεί σε περιβάλλον του Synchro Plus. Η σουίτα εφαρμογών Synchro Plus εφαρμόζει τη μέθοδο Intersection Capacity Utilization (ICU) για τον καθορισμό της χωρητικότητας ενός κόμβου. Επιπλέον, εφαρμόζει και μεθόδους από το εγχειρίδιο Highway Capacity Manual – HCM2000 που αφορούν σε αστικά οδικά δίκτυα με σηματοδοτούμενους ή μη κόμβους.

Κατά την προσομοίωση θα επιλεγούν οι μεταβλητές παράμετροι η μεταβολή των οποίων θα εξεταστεί τι επιρροή έχει στην κυκλοφοριακή συμπεριφορά του κόμβου. Οι διάφορες τιμές των μεταβλητών παραμέτρων θα είναι αυτές που θα καθορίσουν τον αριθμό και τη μορφή των επιμέρους διαφορετικών σεναρίων κυκλοφοριακής συμπεριφοράς που θα εξεταστούν για τον κόμβο.

Μέσω της παραμετρικής διερεύνησης του προβλήματος θα γίνει προσπάθεια να εξακριβωθεί ο τρόπος και η ένταση με την οποία κάθε μία από τις παραμέτρους επιδρά στην κυκλοφοριακή αποδοτικότητα του κόμβου. Η αξιολόγηση των επιμέρους σεναρίων θα γίνει μέσω παρακολούθησης των τιμών συγκεκριμένων δεικτών

συμπεριφοράς, όπως είναι η μέση χρονική καθυστέρηση που προκύπτει για τα οχήματα που χρησιμοποιούν τον κόμβο ή ο λόγος του φόρτου των οχημάτων προς την αντίστοιχη ικανότητα.

Αναλυτικά στοιχεία αναφορικά με τις μεταβλητές παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν και τους δείκτες συμπεριφοράς που εκτιμήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.

3.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.2.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη κυκλοφορίας

Αν και η κυκλοφορία στο σύνολό της αποτελεί μία γενική και ενδεχομένως ασαφή έννοια, εντούτοις μπορεί να περιγραφεί από στοιχεία τα οποία είναι πλήρως ποσοτικοποιημένα. Τα μεγέθη αυτά αποτελούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κυκλοφορίας και η μέτρησή πραγματοποιείται με απλές μεθόδους. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά μεγέθη της κυκλοφορίας – μετρούμενα ή θεωρούμενα – είναι οι παράμετροι βάσει των οποίων πραγματοποιείται ο σχεδιασμός τμημάτων ενός οδικού δικτύου καθώς και ο έλεγχος της λειτουργίας τους.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά μεγέθη της κυκλοφορίας σε ένα δίκτυο είναι :

α. Ο κυκλοφοριακός φόρτος

β. Η ταχύτητα κινήσεως των οχημάτων

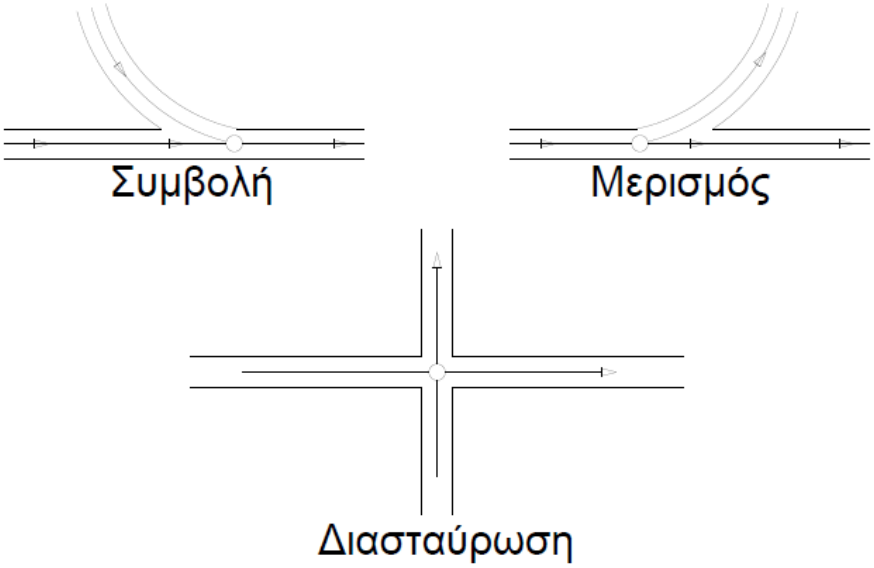
γ. Η πυκνότητα κυκλοφορίας

3.2.2 Κυκλοφοριακοί κόμβοι και σηματοδότηση

Στα σημεία συνάντησης δύο ή περισσοτέρων οδών δημιουργούνται οι ισόπεδοι ή ανισόπεδοι κυκλοφοριακοί κόμβοι με σκοπό την άνετη, γρήγορη και ασφαλή διακίνηση των διαφόρων κυκλοφοριακών ρευμάτων που διεκδικούν την προτεραιότητα στα σημεία αυτά. Οι κυκλοφοριακοί κόμβοι αποτελούν κρίσιμα στοιχεία ενός οδικού δικτύου, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές, και δεν είναι τυχαίο ότι σ' αυτούς δημιουργούνται τα μεγαλύτερα προβλήματα κυκλοφοριακής συμφόρησης λόγω καθυστερήσεων, αλλά και παρατηρούνται και τα περισσότερα ατυχήματα.

Ως κόμβος ορίζεται η συνάντηση δύο ή περισσοτέρων οδών. Αν η συνάντηση αυτή γίνεται στο ίδιο επίπεδο, τότε ο κόμβος ονομάζεται **ισόπεδος**, ενώ όταν γίνεται σε διαφορετικά επίπεδα με σύνδεση μεταξύ τους, τότε λέγεται **ανισόπεδος**.

Βασικό στοιχείο κάθε κόμβου αποτελούν οι χώροι ελιγμών στα σημεία συνάντησης των κυκλοφοριακών ρευμάτων, που ονομάζονται σημεία εμπλοκής. Διακρίνονται τρεις μορφές ελιγμών: η **διασταύρωση**, η **συμβολή** και ο **μερισμός**. Οι ελιγμοί ονομάζονται στοιχειώδεις όταν συναντώνται δύο ρεύματα και πολλαπλοί όταν συναντώνται περισσότερα ρεύματα.



Εικόνα 3: Στοιχειώδεις Ελιγμοί

3.2.2.1 Διαχωριστικές νησίδες

Οι διαχωριστικές νησίδες τοποθετούνται συνήθως μεταξύ των λωρίδων κυκλοφορίας των κατευθείαν ρευμάτων για να διαχωρίσουν τις κινήσεις αντίθετης φοράς. Μερικές φορές τοποθετούνται και μεταξύ λωρίδων της ίδιας φοράς, κυρίως για την κατεύθυνση του φόρτου των οχημάτων σε μεγάλο μήκος προ του κόμβου και την αποφυγή πλέξεων πλησίον αυτού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Λεωφόρος Μεσογείων κοντά στη συμβολή της με τη Φειδιπίδου στην Αθήνα.

Εικόνα 4: Διαχωριστικές νησίδες μεταξύ λωρίδων ιδίας φοράς επί της Λ. Μεσογείων στην Αθήνα

Οι διαχωριστικές νησίδες διακρίνονται σε περιορισμένου, μεσαίου και μεγάλου πλάτους, οι οποίες επιτρέπουν τη δημιουργία λωρίδων αναμονής ή ακόμη και χώρων πρασίνου.

3.2.2.2 Λωρίδες αναμονής για αριστερές στροφές

Όπου το πλάτος μεσαίας διαχωριστικής νησίδας το επιτρέπει, επιβάλλεται η κατασκευή ειδικών λωρίδων αναμονής πλάτους άνω των 3m για τα οχήματα που στρέφουν αριστερά, ώστε να μην εμποδίζεται η κατευθείαν κίνηση. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η παραμετρική απόκριση των στοιχείων κυκλοφορίας ισόπεδου κόμβου με παρουσία αντίστοιχης λωρίδας.

3.2.2.3 Λωρίδες επιτάχυνσης για αριστερές στροφές

Όπου το πλάτος της μεσαίας διαχωριστικής νησίδας το επιτρέπει, είναι δυνατή η δημιουργία η ειδικής λωρίδας, προκειμένου τα οχήματα να δύνανται να επιταχύνουν εισερχόμενα σε μία αρτηρία, αφού στρέψουν αριστερά. Αυτού του είδους το στοιχείο διοχέτευσης, σε αντίθεση με τις λωρίδες αναμονής, είναι επιθυμητό και όχι απαραίτητο.

3.2.2.4 Κατευθυντήριες νησίδες

Είναι συνήθως τριγωνικής μορφής και αποσκοπούν στο σαφέστερο καθορισμό της κατεύθυνσης για τα οχήματα που στρέφουν. Είναι απαραίτητες σε περιπτώσεις δεξιών στροφών, όταν δημιουργούνται μεγάλες επιφάνειες διασταύρωσης και στις περιπτώσεις λοξών συμβολών.

3.2.3 Σηματοδότηση

Η κυκλοφορία στο μεγαλύτερο ποσοστό των ισόπεδων κόμβων του κυρίου αρτηριακού οδικού δικτύου μιας πόλης, ιδιαίτερα στην κεντρική της περιοχή, ρυθμίζεται με φωτεινή σηματοδότηση ή απλά σηματοδότηση (traffic signalization).

Η κύρια λειτουργία μιας σηματοδότησης είναι να αλλάζει διαδοχικά την προτεραιότητα στην κίνηση των διαφόρων ρευμάτων, οχημάτων ή πεζών στην περιοχή ενός κυκλοφοριακού κόμβου ή σε άλλες θέσεις του οδικού δικτύου. Μια κατάλληλα μελετημένη και εγκατεστημένη σηματοδότηση παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα :

1. Δημιουργεί, με την εναλλαγή της προτεραιότητας, μια συστηματική μετακίνηση των κυκλοφοριακών ρευμάτων που, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις υψηλών κυκλοφοριακών φόρτων, αυξάνει την κυκλοφοριακή ικανότητα των σηματοδοτούμενων κόμβων.

2. Τείνει να μειώσει ορισμένες κατηγορίες ατυχημάτων και ιδιαίτερα τις συγκρούσεις υπό γωνία, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχει η κατάλληλη ορατότητα.

3. Με τις προϋποθέσεις ευνοϊκών αποστάσεων μεταξύ των σηματοδοτούμενων κόμβων και κατάλληλου συντονισμού της σηματοδότησης μιας οδού ή ενός δικτύου οδών, επιτρέπει μια σχεδόν συνεχή ροή της κυκλοφορίας με καθορισμένη ταχύτητα.

4. Όπου χρειάζεται, μπορεί να διακόψει ένα υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο, για να επιτρέψει την ασφαλή διασταύρωση ή συμβολή ενός δευτερεύοντος κυκλοφοριακού ρεύματος ή πεζών.

5. Όπου δικαιολογείται, βάσει των προϋποθέσεων που εξετάζονται παρακάτω, μια σηματοδότηση είναι πιο οικονομική και συχνά πιο αποτελεσματική από τη ρύθμιση με τροχονόμο, και λιγότερο δαπανηρή από το διαχωρισμό ορισμένων κυκλοφοριακών ρευμάτων σε ανισόπεδο κόμβο.

Η πρόωρη και μη δικαιολογημένη σηματοδότηση ενός κόμβου, όχι μόνο δεν βελτιώνει τις συνθήκες κυκλοφορίας αλλά αντίθετα μπορεί να έχει δυσάρεστες συνέπειες, όπως :

1. Τη δημιουργία μεγάλων και αδικαιολόγητων καθυστερήσεων.

2. Τη μη συμμόρφωση στις ενδείξεις των σηματοδοτών του κόμβου και κατ' επέκταση στο όλο σύστημα σηματοδότησης.

3. Την εκτροπή της κυκλοφορίας σε άλλες διαδρομές, π.χ. σε τοπικές οδούς, που δεν προσφέρονται για την εξυπηρέτηση μεγάλων κυκλοφοριακών φόρτων.

4. Την αύξηση ορισμένων κατηγοριών ατυχημάτων, κυρίως των νωτομετωπικών (rear-end) συγκρούσεων.

3.2.4 Ρύθμιση της κυκλοφορίας σε μεμονωμένο κόμβο

Αναλόγως των μέσων που χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση της κυκλοφορίας, οι ισόπεδοι κόμβοι κατατάσσονται σε επίπεδα. Το πλήθος, έκταση και είδος των μέσω που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται, κυρίως από τους κυκλοφοριακούς φόρτους των προσβάσεων που εξυπηρετούνται από τον κόμβο, αλλά και από άλλα στοιχεία κυκλοφοριακά ή ασφάλειας.

Όταν η κυκλοφορία σε ένα κόμβο είναι σημαντική και συνεχής, δεν έχει όμως φθάσει ακόμη στα όρια που επιβάλλουν την κατασκευή ανισόπεδου κόμβου, η ρύθμιση της κυκλοφορίας γίνεται με σηματοδότηση σταθερού χρόνου. Με βάση τα μεγέθη των διασταυρούμενων ρευμάτων κυκλοφορίας ετοιμάζονται προγράμματα σηματοδότησης, όπου καθορίζεται ο τρόπος λειτουργίας της σηματοδότησης για ορισμένες χαρακτηριστικές περιόδους (πρωινή ή απογευματινή αιχμή, κανονικές κυκλοφοριακές συνθήκες, περίοδος μικρής κυκλοφορίας, περίοδος βροχής κλπ.). Ανάλογα με την περίοδο της ημέρας, επιλέγεται και χρησιμοποιείται το κατάλληλο πρόγραμμα.

Όταν η κυκλοφορία σε ένα κόμβο είναι σημαντική, κατά ορισμένες χρονικές περιόδους, αλλά δεν παρουσιάζει συνέχεια και ομοιομορφία, είναι σκόπιμη η εγκατάσταση αυτόματης σηματοδότησης που η λειτουργία της επηρεάζεται με την επενέργεια της κυκλοφορίας. Ειδικοί ανιχνευτές (detectors) που τοποθετούνται στις προσβάσεις του κόμβου, καταγράφουν τη διέλευση ενός οχήματος ή πεζού και τη μεταδίδουν στη συσκευή ρύθμισης της σηματοδότησης, που στην κατάλληλη στιγμή και με τις κατάλληλες ενδείξεις των σηματοδοτών δίνει το δικαίωμα διέλευσης του οχήματος ή του πεζού που έχει καταγραφεί.

Διακρίνονται οι παρακάτω δύο τύποι σηματοδοτήσεων που επενεργούνται από την κυκλοφορία:

1. Σηματοδότηση πλήρως επενεργούμενη (Full traffic actuated), όπου καταγράφεται η κυκλοφορία σε όλες τις προσβάσεις.
2. Σηματοδότηση ημιεπενεργούμενη (Semi traffic actuated), όπου καταγράφεται η κυκλοφορία μόνο σε μία ή περισσότερες, αλλά όχι σε όλες, τις προσβάσεις.

3.2.5 Βασικές έννοιες κυκλοφοριακής μελέτης σηματοδότησης

Κάθε εγκατάσταση σηματοδότησης απαιτεί μια διεξοδική μελέτη των κυκλοφοριακών συνθηκών και του δικτύου, ώστε να επιλεγούν οι κόμβοι που είναι απαραίτητη η σηματοδότηση. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες από τις βασικές έννοιες που απαιτούνται για την εκπόνηση μιας τέτοιας μελέτης και όσες χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

3.2.5.1 Περίοδος (Cycle)

Είναι η χρονική διάρκεια που απαιτείται για μια πλήρη διαδοχή ενδείξεων των σηματοδοτών. Όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος, τόσο περισσότερα οχήματα εξυπηρετούνται, λόγω της μείωσης αναλογικά των νεκρών χρόνων, αλλά τόσο μεγαλύτερες καθυστερήσεις δημιουργούνται.

Οι συνήθεις τιμές περιόδων είναι μεταξύ 50s και 70s, αλλά σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να οριστούν από 30s έως και 120s.

Στην Αθήνα χρησιμοποιούνται περίοδοι 60s και 90s, ενώ στη Θεσσαλονίκη 70s.

3.2.5.2 Φάση (Phase)

Φάση είναι το τμήμα της περιόδου που δίνεται προτεραιότητα σε μία κίνηση ή ομάδα κινήσεων. Ο αριθμός των φάσεων σε έναν κόμβο καθορίζεται από τον αριθμό και μέγεθος των κυκλοφοριακών ρευμάτων οχημάτων και πεζών που πρόκειται να εξυπηρετηθούν.

3.2.5.3 Ταινία διαδοχής φάσεων

Ταινία διαδοχής φάσεων είναι μία συμβατική παράσταση, κατά μήκος μιας γραμμής, της διαδοχής της πράσινης, κόκκινης και κίτρινης ένδειξης μιας συγκεκριμένης όψης σηματοδότη. Η ταινία σχεδιάζεται υπό κλίμακα.

3.2.5.4 Πρόγραμμα φάσεων σηματοδότησης

Είναι η παράλληλη παράθεση των ταινιών διαδοχής φάσεων όλων των όψεων του συστήματος σηματοδότησης ενός κόμβου, ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος και η μελέτη της σύγχρονης λειτουργείας των σηματοδοτών. Σε αυτό περιλαμβάνεται τόσο η κίνηση των οχημάτων, όσο και των πεζών.

3.2.5.5 Χρόνος κίτρινης ένδειξης

Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται η κίτρινη ένδειξη των σηματοδοτών μόνο πριν την κόκκινη ένδειξη με το διπλό σκοπό:

1. Να ειδοποιήσει τους οδηγούς ότι η πράσινη ένδειξη τελειώνει, ώστε να τους επιτρέψει να σταματήσουν ομαλά.
2. Να επιτρέψει στα οχήματα ή τους πεζούς που βρίσκονται μέσα στο σηματοδοτούμενο κόμβο να αποχωρήσουν από την περιοχή των δυνατών συγκρούσεων πριν κινηθούν τα οχήματα και οι πεζοί της επόμενης φάσης.

Η χρονική διάρκεια της κίτρινης ένδειξης εξαρτάται από την ταχύτητα κίνησης. Για αστικούς κόμβους στους οποίους η επιτρεπόμενη ταχύτητα είναι 50km/h, ο χρόνος της κίτρινης ένδειξης είναι συνήθως 3s.

Εικόνα 5: Φωτεινοί σηματοδότες άνωθεν της οδού

3.2.5.6 Χρόνος πράσινης ένδειξης

Ο χρόνος πράσινης ένδειξης μπορεί να υπολογιστεί με βάση τα στοιχεία του κυκλοφοριακού φόρτου και το επιθυμητό επίπεδο εξυπηρέτησης.

Βάσει μελετών στις Η.Π.Α. έδειξαν ότι το πρώτο όχημα για να ξεκινήσει μετά την έναρξη της πράσινης ένδειξης χρειάζεται 2,5s, ενώ ο χρονικός διαχωρισμός διαδοχικών οχημάτων είναι 2s. Αυτό οδηγεί σε μια ιδανική ροή κορεσμού ίση με 1.800 οχήματα ανά ώρα πράσινης ένδειξης. Στην πραγματικότητα η ροή κορεσμού εξαρτάται από την οριζοντιογραφική κατάσταση του κόμβου, τις κατά μήκος κλίσεις, το ποσοστό οχημάτων που στρέφει, τη σύνθεση της κυκλοφορίας κ.α.

3.2.5.7 Ενδιάμεσος χρόνος μεταξύ πράσινων ενδείξεων

Είναι η χρονική περίοδος μεταξύ του τέλους της πράσινης ένδειξης μιας φάσης και της αρχής της πράσινης ένδειξης της επόμενης φάσης. Τυπικά, ο χρόνος αυτός είναι ίσος προς τη διάρκεια της κίτρινης ένδειξης, αλλά σε μεγάλους κόμβους ο ενδιάμεσος χρόνος δύναται να είναι μεγαλύτερος.

3.2.5.8 Απολυμμένος χρόνος

Είναι ο χρόνος μιας φάσης που καταναλώνεται στις εκκινήσεις των οχημάτων, την εκκένωση του κόμβου και σε τυχόν περιόδους καθολικής κόκκινης ένδειξης.

3.2.6 Υπολογισμός σηματοδότησης μεμονωμένου κόμβου

3.2.6.1 Διαδικασία υπολογισμού

Ο υπολογισμός της σηματοδότησης ενός υφιστάμενου μεμονωμένου κόμβου περιλαμβάνει συνήθως τις παρακάτω επιμέρους εργασίες:

1. Σχεδίαση σε κλίμακα της κάτοψης του κόμβου και καθορισμός καταρχήν της θέσης και αρίθμησης των σηματοδοτών, των διαβάσεων πεζών των γραμμών στάσης και των λοιπών στοιχείων της γεωμετρίας του κόμβου, τα οποία είναι απαραίτητα για διάφορους υπολογισμούς που ακολουθούν.
2. Καθορισμός των κρισίμων κυκλοφοριακών ρευμάτων, των αντίστοιχων ροών κορεσμού και των αναγκαίων φάσεων για την εξυπηρέτησή τους. Σύνταξη διαγραμμάτων κινήσεων κατά φάσεις.
3. Υπολογισμός των ενδιάμεσων χρόνων μεταξύ πράσινων ενδείξεων.
4. Επιλογή της σειράς διαδοχής των φάσεων.
5. Υπολογισμός των απολυμένων χρόνων και των χρησιμοποιούμενων χρόνων για κάθε φάση και συνολικά.
6. Επιλογή της βέλτιστης περιόδου σηματοδότησης.
7. κατανομή του χρησιμοποιούμενου χρόνου στις διάφορες φάσεις σηματοδότησης.
8. Συμπλήρωση του σχεδίου κάτοψης του κόμβου και των διαγραμμάτων κινήσεων κατά φάση και ετοιμασία του χρονικού προγράμματος σηματορρύθμισης.
9. Υπολογισμός καθυστερήσεων για κάθε ένα από τα κυκλοφοριακά ρεύματα που εξυπηρετεί ο κόμβος και συνολικά, και καθορισμός της αντίστοιχης στάθμης εξυπηρέτησης.
10. Υπολογισμός μήκους ουράς για κάθε κυκλοφοριακό ρεύμα, ώστε να υπολογιστεί το μήκος της τυχόν ειδικής λωρίδας αριστερής στροφής και να αποφευχθεί η επίδραση της ουράς στον προηγούμενο κόμβο.
11. Υπολογισμός πιθανότητας να περάσει ένα όχημα κατά την πρώτη πράσινη φάση.

3.2.6.2 Χρησιμοποιούμενοι συμβολισμοί

Κατά τους υπολογισμούς γίνεται χρήση των παρακάτω συμβόλων. Τα σύμβολα δίνονται σε αλφαβητική σειρά και αντιστοιχούν στους ορισμούς που δόθηκαν προηγουμένως κατά την ανάπτυξη των βασικών εννοιών της σηματοδότησης.

α Χρόνος κίτρινης ένδειξης. Συνήθως 3δλ. στην Ελλάδα και 5δλ. για

λεωφόρους με υψηλές ταχύτητες

C Διάρκεια περιόδου

C_o Βέλτιστη διάρκεια περιόδου, δηλαδή εκείνη που δίνει την ελάχιστη καθυστέρηση για όλα τα οχήματα που χρησιμοποιούν τον κόμβο

$$C_0 = {(1.5L + 5)}/{(1 - Y)} \qquad (1)$$

C_m Ελάχιστη διάρκεια περιόδου, δηλαδή η θεωρητικά μικρότερη περίοδος που επιτρέπει την εξυπηρέτηση όλων των οχημάτων που χρησιμοποιούν τον κόμβο

$$C_m = {L}/{(1 - Y)} \qquad (2)$$

c Κυκλοφοριακή ικανότητα (οχήματα ανά ώρα – veh/h)

$$c = s \times {g}/{C} \qquad (3)$$

d Μέση καθυστέρηση ανά όχημα σε μια πρόσβαση ενός κόμβου.

E Ποσοστό οχημάτων που σταματούν από την σηματοδότηση τουλάχιστον μια φορά

G Άθροισμα της πράσινης και αντίστοιχης κίτρινης ένδειξης

$$G = k + a = g + l \qquad (4)$$

g Χρησιμοποιούμενος Χρόνος Πράσινης ένδειξης (ΧΠΠ), δηλαδή ο χρόνος που χρησιμοποιείται ουσιαστικά από τα οχήματα για να αποφασιστεί η πρόσβαση. Ισούται με το άθροισμα της πράσινης και κίτρινης ένδειξης, μείον ο απολυμένος χρόνος για την εξεταζόμενη φάση

$$g = G - I = k + a - l \qquad (5)$$

I Ενδιάμεσος χρόνος μεταξύ πράσινων ενδείξεων

k Διάρκεια πράσινης ένδειξης ή Πραγματικός Χρόνος Πρασίνου(ΠΧΠ) δηλαδή ο χρόνος που ο σηματοδότης δείχνει πράσινο

l Απολυμένος χρόνος για μια φάση, εξαιτίας των καθυστερήσεων στην εκκίνηση των οχημάτων στην αρχή της φάσης(l1) και της πτώσης του ρυθμού εξυπηρέτησης των οχημάτων κατά την κίτρινη ένδειξη στο τέλος της φάσης (l2). Συνήθως λαμβάνεται l=2δλ

R Χρόνος καθολικής κόκκινης ένδειξης, δηλαδή οι χρόνοι που όλοι οι σηματοδότες δείχνουν κόκκινο

L Συνολικός απολυμένος χρόνος ανά περίοδο, δηλαδή το σύνολο των απολυμένων χρόνων για κάθε φάση συν τη διάρκεια της τυχόν καθολικής κόκκινης ένδειξης

$$L = \Sigma(I - \alpha) + \Sigma I + R \qquad (6)$$

λ Ο λόγος του χρησιμοποιούμενου χρόνου πράσινης ένδειξης μιας φάσεως προς τη διάρκεια της περιόδου.

$$\lambda = {}^{g}/_{C} \quad (7)$$

M Μέσος αριθμός οχημάτων που φθάνουν κατά τη διάρκεια μιας περιόδου στην εξεταζόμενη πρόσβαση

$$M = v \times C \quad (8)$$

N Μέση ουρά στην έναρξη της πράσινης ένδειξης

n Αριθμός φάσεων μιας περιόδου. Χρησιμοποιείται και σαν δείκτης για το χαρακτηρισμό μιας φάσης

v Κυκλοφοριακός φόρτος που υπάρχει στη συγκεκριμένη πρόσβαση

r Χρόνος κόκκινης ένδειξης

s Ροή κορεσμού μιας πρόσβασης

w Πλάτος της πρόσβασης στη γραμμή στοπ μετρημένο από το κράσπεδο του πεζοδρομίου μέχρι την κεντρική διαχωριστική γραμμή ή το κράσπεδο της μεσαίας διαχωριστικής νησίδας, αν η τελευταία υπάρχει. Για μονόδρομους το πλάτος μετράται φυσικά μεταξύ κρασπέδων των εκατέρωθεν πεζοδρομίων

X Βαθμός κορεσμού:Λόγος του εξυπηρετούμενου κυκλοφοριακού φόρτου προς την κυκλοφοριακή ικανότητα στην εξεταζόμενη πρόσβαση

$$X = {}^{v}/_{c} = {}^{v}/_{[\lambda \times s]} = {}^{(v \times C)}/_{[g \times s]} \quad (9)$$

X_0 Βαθμός κορεσμού για την περίπτωση της βέλτιστης περιόδου και της βέλτιστης κατανομής της σε φάσεις

y_n Ο μέγιστος από τους λόγους του εξυπηρετούμενου κυκλοφοριακού φόρτου προς την αντίστοιχη κυκλοφοριακή ικανότητα για κάθε μία από τις κινήσεις που εξυπηρετούνται από μία φάση n

$$y_n = {}^{v_n}/_{s_n} \quad (10)$$

Y Άθροισμα για όλο τον κόμβο των τιμών y της κάθε φάσης

3.2.6.3 Ενδιάμεσος χρόνος μεταξύ των πράσινων ενδείξεων

Για τον υπολογισμό του ενδιάμεσου χρόνου I για την εκκένωση του κόμβου από τα οχήματα είναι απαραίτητο να ορισθούν οι πραγματικές κρίσιμες διαδρομές των οχημάτων μέσα στον κόμβο και τα πιθανά σημεία εμπλοκής μεταξύ των τελευταίων οχημάτων που χρησιμοποιούν μια φάση σηματοδότησης και των πρώτων οχημάτων από την επόμενη φάση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$I = t_r - t_e + K + a_1 \quad (11)$$

όπου:

t_r Ο χρόνος πορείας του τελευταίου οχήματος (χρόνος εκκένωσης), για να διανύσει το διάστημα εκκένωσης S_r από τη γραμμή στάσης μέχρις ότου φθάσει στο πιθανό σημείο συνάντησης Κ με τα οχήματα της επόμενης φάσης. Συνήθως χρησιμοποιείται ταχύτητα εκκένωσης 7 m/s (25 km/h)

t_e Ο χρόνος πορείας του πρώτου οχήματος (χρόνος εκκίνησης) για να διανύσει το διάστημα εκκίνησης Se από τη γραμμή στάσης μέχρις ότου φθάσει στο πιθανό σημείο συνάντησης Κ με τα οχήματα της προηγούμενης φάσης. Συνήθως χρησιμοποιείται στις αστικές περιοχές ταχύτητα εκκίνησης 11μ/δλ (40 χλμ/ώρα) που αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη περίπτωση να φθάσει το όχημα στον κόμβο μόλις αρχίζει η πράσινη ένδειξη και να συνεχίσει την πορεία του μέσα στον κόμβο χωρίς στάση.

Κ Ο χρόνος πορείας για τη διέλευση, από την πιθανή περιοχή συγκρούσεων. Συνήθως λαμβάνεται ίσος με 1s

a_1 Μέρος της κίτρινης ένδειξης που χρησιμοποιείται από τα κινούμενα οχήματα. Συνήθως, για λόγους ασφαλείας, γίνεται η παραδοχή ότι χρησιμοποιείται από τα οχήματα όλος ο χρόνος της κίτρινης ένδειξης, οπότε, στη συνήθη περίπτωση που ο χρόνος αυτός είναι 3s. και Κ=1s

Με βάση τον απλοποιημένο τύπο μπορεί να συνταχθεί ένα διάγραμμα υπολογισμού των ενδιάμεσων χρόνων, από το οποίο υπολογίζεται ο ενδιάμεσος χρόνος μεταξύ δύο πρασίνων ενδείξεων όταν είναι γνωστή η γεωμετρία του κόμβου και πιο συγκεκριμένα, τα δυσμενέστερα διαστήματα εκκίνησης S_e και εκκένωσης S_r που αντιστοιχούν στον ενδιάμεσο αυτό χρόνο.

Ανάλογοι υπολογισμοί γίνονται και για τους ενδιάμεσους χρόνους όπου συμμετέχουν και ρεύματα πεών ή ποδηλάτων. Η ταχύτητα εκκένωσης των πεζών λαμβάνεται συνήθως ίση με 1,2m/s. (4.3 km/h) και των ποδηλάτων 5m/s (18 km/h).

3.2.6.4 Απολυμένοι χρόνοι

Ο συνολικός απολυμμένος χρόνος L για όλη την περίοδο αποτελείται από το χρόνο I που χάνεται στην αρχή και το τέλος μιας φάσης συν τον τυχόν χρόνο R καθολικής κόκκινης ενδείξεως.

Ο χρόνος I αποτελείται από:

α. το χρόνο, στην αρχή της φάσης, που χάνεται κατά την εκκίνηση των οχημάτων (I_1)

β. το χρόνο κατά τη διάρκεια της κίτρινης ένδειξης, στο τέλος της φάσης, οπότε μειώνεται ο ρυθμός εξυπηρέτησης των οχημάτων γιατί μερικά από αυτά σταματούν (I_2).

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η ένταξη των δύο αυτών χρόνων στο διάγραμμα αποφόρτισης μιας κορεσμένης πρόσβασης κόμβου. Για την απλοποίηση των υπολογισμών ο συνολικός χρόνος πράσινης και κίτρινης ένδειξης (G=k+a) αντικαθίσταται από το χρησιμοποιούμενο χρόνο πράσινης ένδειξης g όπου θεωρείται

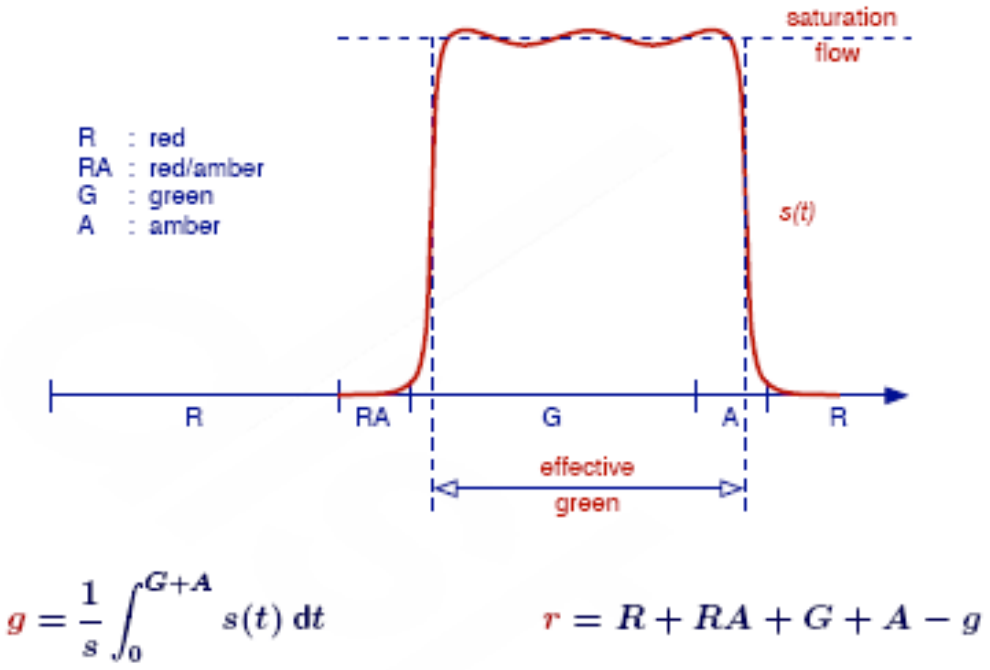
ότι τα οχήματα κινούνται σύμφωνα με τη ροή κορεσμού s, και τον απολυμμένο χρόνο I κατά τον οποίο θεωρείται ότι δεν υπάρχει ροή οχημάτων (G=g+I). Γραφικά αυτό σημαίνει την αντικατάσταση της καμπύλης του ΣΧΗΜΑΤΟΣ με ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο της ίδιας επιφάνειας. Η βάση του παραλληλόγραμμου είναι ο Χρησιμοποιούμενος Χρόνος Πράσινης Ένδειξης g και το ύψος του η ροή κορεσμού s.

Επομένως, ο συνολικός απολυμμένος χρόνος L για όλη την περίοδο, προκύπτει από τον παρακάτω τύπο, όπου τα αθροίσματα Σ νοούνται για όλες τις φάσεις της σηματοδότησης, και υποτίθεται ότι υπάρχει και καθολική κόκκινη ένδειξη διάρκειας R:

$$L = \Sigma(I - \alpha) + \Sigma I + R \qquad (12)$$

Συνήθως λαμβάνεται I=2s και a=3s οπότε ο τύπος απλοποιείται σε:

$$L = \Sigma(I - 1) + R \qquad (13)$$



Διάγραμμα 1: Μεταβολή του ρυθμού αποφόρτισης μιας πρόσβασης ισόπεδου κόμβου κατά τη διάρκεια κορεσμένης πράσινης περιόδου

Σχήμα 2: Σχηματική παράσταση μεταβολής του ρυθμού αποφόρτισης μιας πρόσβασης ισόπεδου κόμβου κατά τη διάρκεια μιας κορεσμένης πράσινης περιόδου (Πηγή: Improta 1991).

3.2.7 Κυκλοφοριακή ικανότητα

Κατά τη διεύρυνση της λειτουργίας και κατά το σχεδιασμό και τη μελέτη ενός οδικού συστήματος, είναι απαραίτητη η γνώση της ικανότητας των διαφόρων στοιχείων του συστήματος που θα εξυπηρετήσουν, υπό ορισμένες συνθήκες και δεδομένους κυκλοφοριακούς φόρτους. Για την ποσοτική έκφραση της ικανότητας αυτής έχει καθιερωθεί ο όρος κυκλοφοριακή ικανότητα (traffic capacity). Η κυκλοφοριακή ικανότητα εκφράζει το μέγιστο αριθμό οχημάτων ή πεζών που

μπορούν να περάσουν από ένα δεδομένο σημείο ή ομοιόμορφο τμήμα λωρίδας κυκλοφορίας ή οδού, κατά 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 κυκλοφορίας που επικρατούν.

Τα κύρια στοιχεία ενός οδικού συστήματος μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τα παρακάτω δύο είδη ροής που μπορεί να προσφέρουν :

- **Μη διακοπτόμενη ροή** (uninterrupted flow) όταν δεν υπάρχουν μόνιμες εγκαταστάσεις, όπως πχ σηματοδότηση, που να προκαλούν διακοπές της κυκλοφοριακής ροής.
- **Διακοπτόμενη ροή** (interrupted flow) όταν υπάρχει σηματοδότηση, σήμανση ή άλλοι τρόποι ελέγχου που να προκαλούν την περιοδική διακοπή ή ουσιαστική επιβράδυνση της κυκλοφοριακής ροής, ανεξάρτητα από το μέγεθός της.

Η ποσοτική έκφραση της κυκλοφοριακής ικανότητας έχει νόημα μόνο όταν είναι γνωστές οι επικρατούσες οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες ,οι συνθήκες ελέγχου, ή χρονική περίοδος της αναφοράς και η στάθμη εξυπηρέτησης.

Οι επικρατούσες οδικές συνθήκες αναφέρονται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού και δεν αλλάζουν χρονικά παρά μόνο όταν πραγματοποιηθούν νέες κατασκευές ή βελτιώσεις στην εξεταζόμενη οδό. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν πχ η κατηγορία της οδού και το περιβάλλον της, η οριζόντια και κατακόρυφη χάραξη, ο αριθμός και το πλάτος των λωρίδων κυκλοφορίας, το πλάτος των ερεισμάτων, η απόσταση των πλευρικών εμποδίων.

Οι επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες εξαρτώνται από τη φύση της κυκλοφορίας στο εξεταζόμενο οδικό στοιχείο και αλλάζουν χρονικά κατά τις διάφορες περιόδους της ημέρας, ή και κατά τις διάφορες ημέρες του έτους. Στην κατηγορία αυτή ανήκει πχ η σύνθεση της κυκλοφορίας και η κατανομή κατά κατεύθυνση.

Οι συνθήκες ελέγχου αναφέρονται στη ρύθμιση της κυκλοφορίας με κατάλληλα μελετημένες συσκευές και στους κανόνες κυκλοφορίας που εφαρμόζονται. Πχ η θέση, ο τύπος και η χρονική ρύθμιση των σηματοδοτών καθώς και τα διάφορα σήματα στάσης, προτεραιότητας, απαγόρευσης στροφών κτλ

Η στάθμη εξυπηρέτησης (level of service) καθορίζεται σε ένα ποιοτικό μέγεθος που εκφράζει τις συνθήκες λειτουργίας μέσα σε ένα ρεύμα κυκλοφορίας, όπως τις αντιλαμβάνονται οι οδηγοί και επιβάτες. Η στάθμη εξυπηρέτησης αποτελεί μια ποιοτική έκφραση του αποτελέσματος διαφόρων παραμέτρων όπως η ταχύτητα και ο χρόνος μετακίνησης, οι διακοπές της πορείας, η ελευθερία πραγματοποίησης ελιγμών, η οδική ασφάλεια, η άνεση οδήγησης και το κόστος λειτουργίας. Στην πράξη καθορίζονται διάφορες στάθμες εξυπηρέτησης με βάση ορισμένες οριακές τιμές μερικών από τις παραπάνω παραμέτρους που ονομάζονται δείκτες αποτελεσματικότητας.

Ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος εξυπηρέτησης (Service volume) αποτελεί το μέγιστο αριθμό οχημάτων ή πεζών που μπορούν να περάσουν από ένα οδικό στοιχείο σε μια ορισμένη χρονική περίοδο ώστε οι συνθήκες λειτουργίας να

διατηρούνται σε μια καθορισμένη στάθμη εξυπηρέτησης. Έτσι σε κάθε στάθμη αντιστοιχεί ένας μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος εξυπηρέτησης που αν ξεπεραστεί μεταφερόμαστε στη επόμενη (δυσμενέστερη) στάθμη εξυπηρέτησης.

Η χρονική περίοδος είναι απαραίτητη για τη διευκρίνιση της έννοιας της κυκλοφοριακής ικανότητας. Όταν εξετάζονται σχετικά μεγάλες χρονικές περίοδοι , πχ μια μέρα ή ένα έτος, η κυκλοφοριακή ικανότητα εξαρτάται από τις ωριαίες, ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις της κυκλοφορίας. Στην περίπτωση αυτή η πλήρης χρησιμοποίησης της οδού περιορίζεται μόνο σε ένα ποσοστό της συνολικής εξεταζόμενης περιόδου, όταν δηλαδή παρουσιάζεται η μέγιστη ζήτηση. Έτσι, η κυκλοφοριακή ικανότητα για μια μέρα είναι μικρότερη από το 24πλάσιο της ωριαίας κυκλοφοριακής ικανότητας, και εξαρτάται από την ωριαία διακύμανση της κυκλοφορίας που παρουσιάζεται στο εξεταζόμενο οδικό τμήμα. Όταν δεν ορίζεται η χρονική περίοδος, η κυκλοφοριακή ικανότητα αναφέρεται σε περίοδο μιας ώρας, οπότε αντιστοιχεί στο μέγιστο αριθμό οχημάτων που μπορούν να περάσουν στη χρονική αυτή περίοδο.

Ο συντελεστής ώρας αιχμής (ΣΩΑ) εκφράζει την ομοιομορφία της ζήτησης. Ορίζεται σαν ο λόγος του αριθμού των οχημάτων που περνούν από μια διατομή λωρίδας ή οδού σε μια ώρα, προς τον τετραπλάσιο αριθμό των οχημάτων που περνούν από την ίδια διατομή κατά τη διάρκεια των 15 συνεχόμενων λεπτών της ώρας που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο φόρτο κυκλοφορίας. Από τον ορισμό του, ο συντελεστής ώρας αιχμής μπορεί να πάρει τιμές από 0,25 έως 1,00. Η τιμή 1,00 αντιστοιχεί σε περιπτώσεις απόλυτα ομοιόμορφης κατανομής της κυκλοφορίας κατά την ώρα αιχμής ώστε στα 15 συνεχόμενα λεπτά μέγιστης κυκλοφορίας να αντιστοιχεί το ένα τέταρτο της όλης κυκλοφοριακής ροής της ώρας. Η δεύτερη οριακή τιμή του 0,25 μπορεί να συμβεί μόνο όταν όλη η κυκλοφορία παρουσιάζεται μέσα σε μία μόνη περίοδο 15 λεπτών και την υπόλοιπη ώρα δεν έχει καθόλου κυκλοφορία. Όπως είναι φυσικό, αυτή η περίπτωση είναι μόνο θεωρητική. Ο ΣΩΑ κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,85 και 0,95.

Το μέγεθος της κυκλοφορίας καθορίζεται ποσοτικά με τον κυκλοφοριακό φόρτο και το ρυθμό ροής.

Κυκλοφοριακός φόρτος (traffic volume) είναι ο συνολικός αριθμός οχημάτων που περνούν από ένα δεδομένο σημείο ή τμήμα μιας λωρίδας ή οδού κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου χρονικού διαστήματος. Μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με διάφορες χρονικές περιόδους , ανά ημέρα, ανά ώρα ή ανά τμήμα της ώρας.

Ρυθμός ροής (rate of flow). Ο ισοδύναμος ωριαίος ρυθμός ροής με τον οποίο περνούν τα οχήματα από ένα δεδομένο σημείο ή τμήμα μιας λωρίδας ή οδού κατά τη διάρκεια ενός κλάσματος της ώρας, συνήθως τα 15 πρώτα λεπτά.

Στις αναλύσεις της κυκλοφοριακής ικανότητας λαμβάνεται συνήθως υπόψη ο ρυθμός ροής v (βασισμένος στο 15λεπτο μεγαλύτερης κίνησης) κατά την ώρα αιχμής και όχι ο κυκλοφοριακός φόρτος Q κατά την ίδια ώρα. Ο πρώτος προκύπτει από τη διαίρεση του δεύτερου με τον ΣΩΑ, και εκφράζει τις δυσμενέστερες συνθήκες, από

απόψεως μεγέθους κυκλοφοριακής ροής, που μπορούν να απαντηθούν μέσα στο διάστημα της εξεταζόμενης ώρας αιχμής, εξαιτίας της ανομοιομορφίας στη ροή. Αντίστοιχα για τον καθορισμό της στάθμης εξυπηρέτησης εξετάζεται συνήθως ο μέγιστος ρυθμός ροής εξυπηρέτησης και όχι ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος εξυπηρέτησης.

Ο συντελεστής ώρας αιχμής μπορεί να καθοριστεί με :

- Επί τόπου μετρήσεις, όπου εξετάζονται οι συνθήκες λειτουργίας μιας υφιστάμενης διασταύρωσης.
- Χαρακτηριστικές μετρήσεις σε ορισμένες τυπικές θέσεις μιας πόλης που καλύπτουν όλες τις συνθήκες που είναι πιθανό να παρουσιαστούν στην πόλη.
- Εκτιμήσεις. Όπου δεν είναι δυνατό να γίνουν αναλυτικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται κατ' εκτίμηση, σύμφωνα με τα αποτελέσματα υφιστάμενων μετρήσεων σε άλλες παρόμοιες πόλεις και θέσεις.

3.2.8 Στάθμες εξυπηρέτησης

Οι παρακάτω ορισμοί ισχύουν για όλα τα στοιχεία ενός οδικού δικτύου υπό συνθήκες συνεχούς ροής:

3.2.8.1 Στάθμη εξυπηρέτησης A

Συνθήκες ελεύθερης ροής με χαμηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους και υψηλές ταχύτητες. Η πυκνότητα κυκλοφορίας είναι μικρή και οι ταχύτητες καθορίζονται μόνο από τις επιθυμίες των οδηγών, τα όρια ταχυτήτων που δείχνουν οι πινακίδες σήμανσης και τις επικρατούσες οδικές συνθήκες.

3.2.8.2 Στάθμη εξυπηρέτησης B

Σταθερή ροή με ταχύτητες που αρχίζουν να περιορίζονται κάπως από τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Οι οδηγοί έχουν ακόμα τη δυνατότητα, μέσα σε λογικά περιθώρια, να διαλέξουν την ταχύτητά τους και τη λωρίδα κυκλοφορίας.

3.2.8.3 Στάθμη εξυπηρέτησης C

Η στάθμη Γ βρίσκεται ακόμα στη ζώνη της σταθερής ροής αλλά η ταχύτητα και οι ελιγμοί ελέγχονται περισσότερο από τους υψηλότερους κυκλοφοριακούς φόρτους. Η ελευθερία επιλογής ταχύτητας, αλλαγής λωρίδας κυκλοφορίας και προσπεράσματος περιορίζεται για τους περισσότερους από τους οδηγούς. Η ταχύτητα λειτουργίας όμως βρίσκεται σε ικανοποιητικό επίπεδο.

3.2.8.4 Στάθμη εξυπηρέτησης D

Η στάθμη Δ πλησιάζει στην ασταθή ροή, αλλά διατηρούνται ανεκτές ταχύτητες. Μεταβολές στον κυκλοφοριακό φόρτο και προσωρινοί περιορισμοί της ροής μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές πτώσεις στην ταχύτητα. Οι οδηγοί έχουν

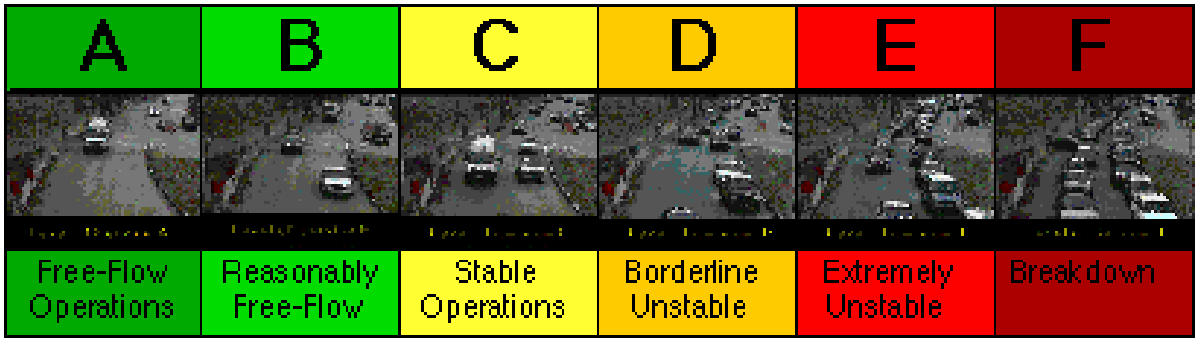
μειωμένη ελευθερία ελιγμών και η άνεση οδήγησης είναι μικρή. Οι συνθήκες αυτές είναι ανεκτές για περιορισμένα χρονικά διαστήματα.

3.2.8.5 Στάθμη εξυπηρέτησης E

Ταχύτητες λειτουργίας μικρότερες και από τη στάθμη D, με κυκλοφοριακούς φόρτους κοντά στην κυκλοφοριακή ικανότητα. Η ροή είναι ασταθής με αναγκαστικές διακοπές πορείας για μικρά χρονικά διαστήματα.

3.2.8.6 Στάθμη εξυπηρέτησης F

Αναγκαστική ροή με μικρή ταχύτητα, όπου οι κυκλοφοριακοί φόρτοι βρίσκονται κάτω από την κυκλοφοριακή ικανότητα. Οι συνθήκες αυτές προκύπτουν συνήθως από ουρές οχημάτων που δημιουργούνται από κάποιο περιορισμό της κυκλοφορίας και εκτείνονται μέχρι το εξεταζόμενο οδικό τμήμα που χρησιμεύει σαν περιοχή αποθήκευσης κατά διαστήματα ή σε όλη την περίοδο της κυκλοφοριακής αιχμής. Οι ταχύτητες μειώνονται σημαντικά και μπορεί να συμβούν διακοπές πορείας για μικρά ή και μεγάλα χρονικά διαστήματα από τη συμφόρηση. Σε ακραίες περιπτώσεις η ταχύτητα, και επομένως και ο κυκλοφοριακός φόρτος, μπορούν να μηδενιστούν.



Εικόνα 6: Στάθμες Εξυπηρέτησης

Συγκεκριμένα για τους σηματοδοτούμενους κόμβους η κατάταξη των διαφόρων λωρίδων ή ομάδων λωρίδων που εξυπηρετούν μία κίνηση μπορεί γίνει με βάση τη καταγεγραμμένη μέση καθυστέρηση ανά όχημα που οφείλεται στην λειτουργία της σήμανσης (control delay per vehicle) και συνεπώς περιλαμβάνει και τον χαμένο χρόνο λόγω μείωσης ταχύτητας πέρα από τον χρόνο στάσης. Η κατάταξη αυτή παρουσιάζεται στον Πίνακα 2, όπου η στάθμη εξυπηρέτησης (Level of Service - LOS) σχετίζεται την καθυστέρηση.

Πίνακας 2: Κατάταξη σηματοδοτούμενων κόμβων σε στάθμες εξυπηρέτησης με βάση τη μέση καθυστέρηση

LOS	ΜΕΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ (s/veh)
A	≤10
B	>10-20
C	>20-35

D	>35-55
E	>55-80
F	>80

3.3 Κυκλοφοριακή ικανότητα για ιδανικές συνθήκες

Οι μέγιστες κυκλοφοριακές ροές για κάθε στάθμη εξυπηρέτησης μπορεί να επιτευχθούν κάτω από ορισμένες συνθήκες. Συνήθως, στην ανάλυση των κυκλοφοριακών ικανοτήτων, λαμβάνονται σαν βάση οι παρακάτω «ιδανικές» συνθήκες για την περίπτωση της μη διακοπτόμενης ροής.

- Συνεχής ροή, ελεύθερη από πλευρικές επιδράσεις οχημάτων και πεζών.
- Μόνο επιβατικά αυτοκίνητα
- Λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3,60 μέτρων τουλάχιστον, χωρίς κατακόρυφα εμπόδια σε απόσταση 1,80 μέτρα από κάθε πλευρά
- Ταχύτητα μελέτης 112 χλμ ανά ώρα, χωρίς κατά μήκος κλίση
- Για οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας, ισοκατανομή της κυκλοφορίας και στις δύο κατευθύνσεις, χωρίς περιοριστικά μήκη ορατότητας για προσπέρασμα.

Είναι φανερό ότι όλες οι παραπάνω ιδανικές συνθήκες μόνο σε ελάχιστες περιπτώσεις μπορεί να συνυπάρχουν. Ιδιαίτερα η ύπαρξη μόνο επιβατικών αυτοκινήτων αποτελεί μια θεωρητική συνθήκη που μπορεί να υπάρχει μόνο σε οδικά τμήματα και σε χρόνο όπου απαγορεύεται η διέλευση φορτηγών αυτοκινήτων.

Ο καθορισμός της κυκλοφοριακής ικανότητας κάτω από ιδανικές συνθήκες είναι χρήσιμος γιατί δίνει μια εικόνα των μέγιστων φόρτων που μπορεί να εξυπηρετηθούν από μια οδό και αποτελεί τη βάση από όπου μπορεί να ξεκινήσει ο υπολογισμός της πραγματικής κυκλοφοριακής ικανότητας ενός οδικού στοιχείου, με χρησιμοποίηση στη συνέχεια κατάλληλων συντελεστών μείωσης, ανάλογα με το πόσο οι επικρατούσες οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες και οι συνθήκες ελέγχου διαφέρουν από τις ιδανικές.

3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ικανότητα

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ικανότητα και μειώνουν τους φόρτους εξυπηρέτησης κάτω από τις μέγιστες τιμές των ιδανικών συνθηκών φαίνονται στον Πίνακα 3. Οι παράγοντες αυτοί κατατάσσονται σε αυτούς που αναφέρονται στις οδικές συνθήκες, σε εκείνους που αναφέρονται στις κυκλοφοριακές συνθήκες και σε εκείνους που αναφέρονται στις συνθήκες λειτουργίας. Η έκταση επίδρασης κάθε παράγοντα εξαρτάται όχι μόνο από το μέγεθός του, αλλά και από τον τύπο του εξεταζόμενου οδικού δικτύου (πχ ελεύθερη λεωφόρος, αστική ή υπεραστική οδός με ή χωρίς νησίδα, σηματοδοτούμενη διασταύρωση κτλ) και από το συνδυασμό του με άλλους παράγοντες. Έτσι, η επίδραση της κίνησης μιας φάλαγγας βαρέων οχημάτων είναι μεγαλύτερη σε μια οδό δύο λωρίδων από ότι σε μια οδό τεσσάρων λωρίδων κυκλοφορίας όπου η προσπέραση είναι ευχερέστερη. Επίσης, ο συνδυασμός της επίδρασης κίνησης μιας

φάλαγγας βαρέων οχημάτων με την κατά μήκος κλίση μιας οδού και με τα μικρά μήκη ορατότητας για προσπέρασμα δίνει δυσμενέστερα αποτελέσματα.

Πίνακας 3: Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη κυκλοφοριακή ικανότητα

Οδικές Συνθήκες

Πλάτος λωρίδας κυκλοφορίας ή γενικότερα οδοστρώματος
Απόσταση κατακόρυφων εμποδίων
Ερείσματα
Βοηθητικές λωρίδες
- Στάθμευσης
- Αλλαγής ταχύτητας (επιτάχυνση, επιβράδυνση)
- Στροφής και αποθηκευσης
- Ανωφέρειας (βρίσκει εφαρμογή μόνο στα φορτηγά)

Κατάσταση επιφάνειας κύλισης
Χάραξη οδού
Κατά μήκος κλίση
Ορατότητα

Κυκλοφοριακές Συνθήκες

Ποσοστό φορτηγών αυτοκινήτων
Ποσοστό διερχόμενων λεωφορείων
Ποσοστό λεωφορείων που σταματούν για επιβίβαση ή αποβίβαση επιβατών
Κατανομή κυκλοφορίας ανά λωρίδα
Ποσοστό οχημάτων που στρέφουν αριστερά ή δεξιά
Διακυμάνσεις της κυκλοφορίας, ιδιαίτερα η ωριαία διακύμανση που εκφράζεται με τον ΣΩΑ
Στάθμευση παρά το κράσπεδο, στάσεις λεωφορείων στην οδό
Ροές πεζών
Είδος οδηγών (τακτικοί και μη)

Συνθήκες Λειτουργίας

Λειτουργία της οδού ως μονοδρόμου ή ως οδού δύο κατευθύνσεων
Ύπαρξη φωτεινής σηματοδότησης
Οδική σήμανση

3.5 Υπολογισμός κυκλοφοριακής ικανότητας

Ο αναλυτικός υπολογισμός τα κυκλοφοριακής ικανότητας και της μέγιστης ροής εξυπηρέτησης για μια δεδομένη στάθμη ή αντίθετα, ο καθορισμός της στάθμης εξυπηρέτησης στη οποία λειτουργεί ένα οδικό στοιχείο κάτω από ένα δεδομένο κυκλοφοριακό φόρτο, γίνεται με τη βοήθεια τύπων, διαγραμμάτων και πινάκων, ανάλογα με το οδικό στοιχείο που εξετάζεται.

3.5.1 Ισόπεδοι σηματοδοτούμενοι κόμβοι

Οι ισόπεδοι κόμβοι, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές, αποτελούν τον κύριο καθοριστικό παράγοντα των συνθηκών ροής και της κυκλοφοριακής ικανότητας μιας οδού. Οι ισόπεδοι κόμβοι σε ένα τμήμα οδού ελέγχουν, κατά κύριο λόγο, τη δυνατότητα μιας οδικής αρτηρίας να εξυπηρετήσει τις ροές οχημάτων και πεζών.

Όταν εξετάζεται η κυκλοφοριακή ικανότητα ενός κόμβου, υπολογίζεται η κυκλοφοριακή ικανότητα κάθε επί μέρους πρόσβασης στον κόμβο ή και τμήματος της πρόσβασης.

Οι κόμβοι με φωτεινή σηματοδότηση παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον γιατί σ' αυτούς εμφανίζονται τα κυριότερα προβλήματα κυκλοφοριακής ικανότητας. Μη σηματοδοτούμενοι κόμβοι είναι εκείνοι ακριβώς που δεν παρουσιάζουν μεγάλους κυκλοφοριακούς φόρτους. Όταν οι φόρτοι αυτοί αυξηθούν, εγκαθίσταται συνήθως φωτεινή σηματοδότηση.

Κατά τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας και της στάθμης εξυπηρέτησης ενός σηματοδοτούμενου κόμβου γίνεται χρήση των ίδιων όρων και συμβόλων που χρησιμοποιούνται στη σηματοδότηση. Επιπλέον χρησιμοποιούνται οι παρακάτω όροι:

Επιτρεπόμενη Κίνηση Στροφής (permitted turning movement) είναι εκείνη που γίνεται ταυτόχρονα με μια εμπλεκόμενη κίνηση πεζών ή οχημάτων. Π.χ. μια κίνηση αριστερής στροφής οχημάτων που γίνεται ταυτόχρονα με την αντίθετη κατευθείαν κίνηση ή μια κίνηση δεξιάς στροφής που γίνεται ταυτόχρονα με την κίνηση πεζών στη διάβαση πεζών απ' όπου περνούν τα οχήματα. Κατ' αναλογία χρησιμοποιείται και ο όρος «επιτρεπόμενη φάση».

Προστατευμένη Κίνηση Στροφής (protected turning movement) είναι εκείνη που γίνεται χωρίς εμπλοκή με άλλες κινήσεις, όπως αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Κατ' αναλογία χρησιμοποιείται και ο όρος «Προστατευμένη φάση».

Κυκλοφοριακή Ικανότητα Πρόσβασης (Intersection approach capacity) ορίζεται σαν ο μέγιστος ρυθμός ροής για την υπόψη πρόσβαση που μπορεί να πραγματοποιηθεί υπό τις επικρατούσες οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες σηματοδότησης. Ο ρυθμός ροής εξετάζεται για περίοδο 15 πρώτων λεπτών (χρήση ΣΩΑ) και η κυκλοφοριακή ικανότητα μετριέται σε οχήματα ανά ώρα.

Ροή κορεσμού (Saturation flow) ορίζεται σαν ο μέγιστος ρυθμός ροής που μπορεί να περάσει από μία δοσμένη πρόσβαση κόμβου ή ομάδων λωρίδων, υπό τις επικρατούσες οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες, με την παραδοχή 100% χρησιμοποιούμενου χρόνου πράσινης ένδειξης. Μετριέται σε οχήματα ανά ώρα χρησιμοποιούμενου πράσινου.

Οι γνωστότερες μέθοδοι για τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας ισόπεδων σηματοδοτούμενων κόμβων είναι:

(1) Η μέθοδος των Η.Π.Α., όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 9 του «Highway Capacity Manual. Special Report 209»

(2) Η βρετανική μέθοδος, όπως περιγράφεται στο βιβλίο «Traffic Signals» των Webster και Cobbe.

Η βρετανική μέθοδος, αν και απλούστερη, θεωρείται ότι δίνει λιγότερο ακριβή αποτελέσματα, από την νεότερη και σαφώς πολυπλοκότερη αμερικανική

μέθοδο. Ιδίως για τα ελληνικά δεδομένα, η χρήση της μεθόδου των Η.Π.Α. θεωρείται η ενδεδειγμένη, κυρίως εάν προσαρμοστούν καταλλήλως οι διάφοροι συντελεστές.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θα πραγματοποιηθεί μία αδρή περιγραφή της μεθόδου.

3.5.1.1 Μέθοδος υπολογισμού κυκλοφοριακής ικανότητας ισόπεδων σηματοδοτούμενων κόμβων των Η.Π.Α

Το μέτρο το οποίο χρησιμοποιεί η μέθοδος είναι η μέση καθυστέρηση στάσης ανά όχημα. Συνήθης μονάδα μέτρησης ορίζεται το s/veh. Ο δείκτης αυτός έχει σαφώς χαρακτηριστικά δείκτη απόδοσης – key performance indicator (KPI) και είναι δυνατό να αναφέρεται σε μία λωρίδα μιας πρόσβασης ενός κόμβου ή στο σύνολο μιας πρόσβασης ενός κόμβου ή στο σύνολο του κόμβου.

Ο δείκτης αυτός εξαρτάται, όπως είναι λογικό, από τον λόγο της εξυπηρετούμενης κυκλοφορίας προς την αντίστοιχη ικανότητα. Καθώς όμως αφορά τη συμπεριφορά σηματοδοτούμενου κόμβου επηρεάζεται και από στοιχεία, όπως η διάρκεια της περιόδου της σηματοδότησης, οι επιμέρους χρονικές διάρκειες της πράσινης ένδειξης ανά κίνηση και η χρονική ομαδοποίηση των κινήσεων.

Η κυκλοφοριακή ικανότητα ή αλλιώς ροή κορεσμού, μιας πρόσβασης ή μιας ομάδας λωρίδων ή μιας μεμονωμένης λωρίδας, c_i, είναι ένα μέρος της θεωρητικής κυκλοφοριακής ικανότητας που αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερης ροής , μειωμένη με διάφορους μειωτικούς συντελεστές που περιγράφουν της υφιστάμενες οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες. Συγκεκριμένα,

$$c_i = s_i \times \left({}^{g}/_{C}\right) \tag{14}$$

όπου:

s_i Η ροή κορεσμού για την πρόσβαση σε οχήματα ανά ώρα πράσινης ένδειξης

g/C Ο λόγος της χρησιμοποιούμενης πράσινης ένδειξης g προς τη διάρκεια της περιόδου C της φωτεινής σηματοδότησης

Για μια δεδομένη πρόσβαση ή ομάδα λωρίδων, ο λόγος του φόρτου προς την αντίστοιχη κυκλοφοριακή ικανότητα (v/c) θα είναι:

$$\left({}^{v}/_{c}\right)_i = {}^{v_i}\Big/_{\left[s_i \times \left({}^{g}/_{C}\right)\right]} = {}^{\left({}^{v}/_{s}\right)_i}\Big/_{\left({}^{g}/_{C}\right)} \tag{15}$$

ενώ ο αντίστοιχος λόγος για το σύνολο του κόμβου $(v/c)_c$ αφορά τον κρίσιμο συνδυασμό προσβάσεων ή ομάδων λωρίδων ως εξής:

$$\left({}^{v}/_{c}\right)_c = \Sigma\left({}^{v}/_{s}\right)_{ci} \times [C \times (C - L)] \tag{16}$$

όπου:

$\Sigma(v/s)_{ci}$ Το άθροισμα των λόγων φόρτου προς ροή κορεσμού για όλους τους κρίσιμους συνδυασμούς προσβάσεων ή ομάδων λωρίδων

L Ο απολυμένος χρόνος λόγω σηματοδότησης, ο οποίος περιλαμβάνει το

χαμένο χρόνο για την εκκίνηση των οχημάτων στην αρχή κάθε φάσης και το μη χρησιμοποιούμενο τμήμα του ενδιάμεσου χρόνου μεταξύ δύο πράσινων ενδείξεων (κίτρινο και καθολικό κόκκινο)

Σύμφωνα με τη μέθοδο των Η.Π.Α., η ροή κορεσμού s για μία πρόσβαση ή ομάδα λωρίδων σε οχήματα ανά ώρα πρασίνου, σχετίζεται με την ροή υπό ιδανικές συνθήκες, s_o, ως εξής:

$$s = s_0 \times N \times f_w \times f_{HV} \times f_g \times f_p \times f_{bb} \times f_a \times f_{RT} \times f_{LT} \qquad (17)$$

όπου:

N Ο αριθμός των λωρίδων στην εξεταζόμενη πρόσβαση ή ομάδα

f Γενικά συντελεστές προσαρμογής για τους παρακάτω λόγους:

f_W για πλάτος λωρίδας

f_{HV} για βαρέα οχήματα (φορτηγά – λεωφορεία)

f_g για κατά μήκος κλίση

f_p για στάθμευση στην πρόσβαση

f_{bb} για στάσεις λεωφορείων επί της πρόσβασης

f_a για τον τύπο της περιοχής (κεντρική ή μη)

f_{RT} για δεξιές στροφές

f_{LT} για αριστερές στροφές

Για το σύνολο των παραπάνω παραμέτρων, η μέθοδος των Η.Π.Α. προτείνει τιμές εφαρμογής που παρέχονται από πίνακες. Συγκεκριμένα, για την ιδανική ροή κορεσμού η μέθοδος προτείνει τιμή ίση προς 1.800veh/h. Παρόλα αυτά, εμπειρικά δεδομένα έχουν δείξει ότι, για τα ελληνικά δεδομένα, η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη, ακόμη και πλέον των 2.000veh/h.

Η ανά όχημα μέση καθυστέρηση στάσης, d, για κάθε ομάδα λωρίδων σε s/veh, δηλαδή ο συνολικός χρόνος που τα οχήματα σταμάτησαν στην εξεταζόμενη ομάδα λωρίδων παρέμειναν ακίνητα, προς το σύνολο των οχημάτων που πέρασαν από την ομάδα λωρίδων στον εξεταζόμενο χρόνο, σύμφωνα με την υπόψη μέθοδο, δίνεται από τον τύπο:

$$d = 0.38C \times \frac{\left[1-\left(g/C\right)\right]^2}{\left[1-\left(g/C\right)\times(X)\right]} + 173X^2\left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \left(16X/C\right)}\right] \qquad (18)$$

όπου:

C Η περίοδος σηματοδότησης

g/C Ο λόγος του χρησιμοποιούμενου πράσινου προς την περίοδο σηματοδότησης για την εξεταζόμενη ομάδα λωρίδων

X Ο λόγος, v/c, του κυκλοφοριακού φόρτου προς την κυκλοφοριακή ικανότητα

Ο παραπάνω τύπος εκτιμά τις καθυστερήσεις για τυχαία άφιξη των οχημάτων. Ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στην βασική καθυστέρηση δηλαδή στην καθυστέρηση που οφείλεται σε ομοιόμορφη άφιξη οχημάτων μέσα στην εξεταζόμενη περίοδο. Αντίθετα ο δεύτερος όρος αποτελεί την αύξηση της καθυστέρησης λόγω μη ομοιομορφίας στην άφιξη των οχημάτων στην πρόσβαση.

Σύμφωνα με τη μέθοδο, είναι δυνατή η καλύτερη εκτίμηση της ζητούμενης καθυστέρησης μέσω της χρήσης ενός συντελεστή που πολλαπλασιάζεται με το αποτέλεσμα του ως άνω υπολογισμού, προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο τρόπος άφιξης των οχημάτων. Συγκεκριμένα, η μέθοδος διακρίνει πέντε διαφορετικούς τρόπους άφιξης και σε καθένα από αυτούς προσδίδει μία τιμή για τον συντελεστή.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι θέλοντας κανείς να υπολογίσει τη μέση καθυστέρηση μίας πρόσβασης μπορεί να υπολογίσει το σταθμισμένο μέσο όρο των επιμέρους λωρίδων ή ομάδων λωρίδων που εξυπηρετούν κάθε κίνηση. Αντιστοίχως, είναι εφικτός ο υπολογισμός της μέσης καθυστέρησης για το σύνολο του κόμβου.

4. Ανάλυση και Αποτελέσματα

4.1 Παρουσίαση λογισμικού ανάλυσης

4.1.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο θα επιχειρηθεί μία αδρή περιγραφή του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες της παρούσας εργασίας.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι η σουίτα εφαρμογών Syncho Plus, από την οποία αξιοποιήθηκαν οι εφαρμογές synchro 11 και simtraffic 11. Η σουίτα εφαρμογών Synchro Plus εφαρμόζει τη μέθοδο Intersection Capacity Utilization (ICU) για τον καθορισμό της χωρητικότητας ενός κόμβου. Επιπλέον, εφαρμόζει και μεθόδους από το εγχειρίδιο Highway Capacity Manual – HCM2000 που αφορούν σε αστικά οδικά δίκτυα με σηματοδοτούμενους ή μη κόμβους.

Το synchro 11 είναι μία εφαρμογή που επιτρέπει την προσομοίωση του συνόλου των κυκλοφοριακών παραμέτρων τμημάτων οδικού δικτύου, τόσο απλών όσο και πιο πολύπλοκων. Μέσα από τις υπορουτίνες του καθορίζονται ο χρήστης έχει την πλήρη ελευθερία να προσομοιώσει κόμβους και τμήματα οδών, προσδίδοντάς τους στοιχεία κυκλοφοριακού φόρτου, διαστάσεων και κλίσεων, επιτρεπόμενων κινήσεων, σηματοδότησης φωτεινής και μη, σύνθεσης κυκλοφορίας, καθώς και πλήθος άλλων στοιχείων.

Το synchro 11 μπορεί να εκτελέσει μακροσκοπικές αναλύσεις και να δώσει αποτελέσματα αναφορικά με τους λόγους κυκλοφορίας προς ικανότητα (v/c), καθώς και στάθμης εξυπηρέτησης κάθε κλάδου ή πρόσβασης.

Το simtraffic 11 είναι μια εφαρμογή, που αξιοποιώντας το τμήμα οδικού δικτύου που αναπτύσσεται στο synchro 11, εκτελεί προσομοιώσεις και δίνει πληθώρα αποτελεσμάτων. Ενδεικτικά, αναφέρονται η μέσες χρονικές καθυστερήσεις που καταγράφονται, ο αριθμός των οχημάτων που εξυπηρετήθηκαν κ.α.

Το simtraffic 11 επιτρέπει στον χρήστη να έχει πλήρη εποπτεία και έλεγχο των παραμέτρων της ανάλυσης, όπως είναι ο χρόνος της προσομοίωσης. Τέλος, είναι δυνατή η εκτέλεση πολλαπλών αναλύσεων, ώστε να εξάγεται η μέση τιμή κάθε ζητούμενου αποτελέσματος προς όφελος της ακρίβειας.

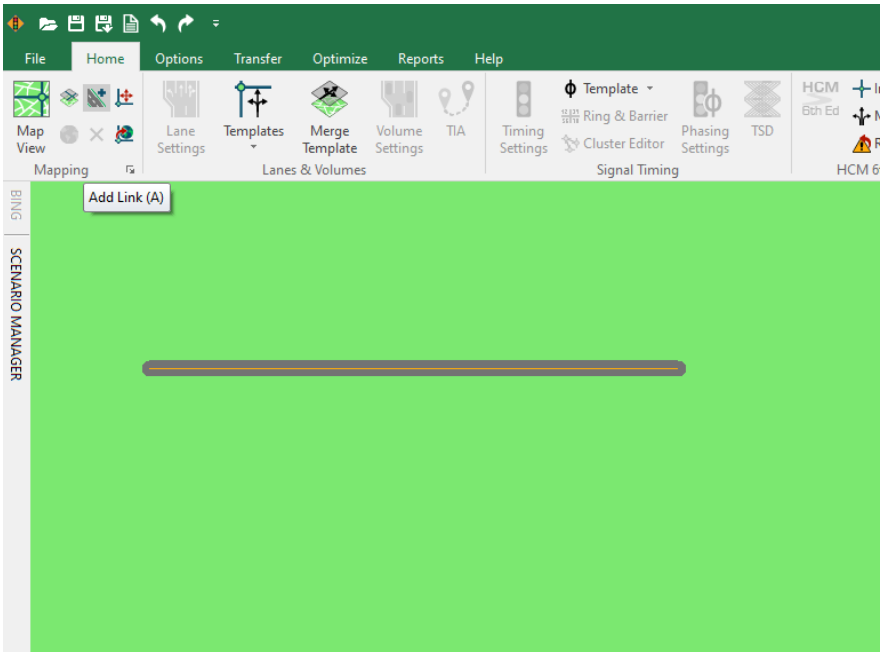
4.1.2 Synchro 11

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και για την εξοικείωση του αναγνώστη με το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε θα ακολουθήσει ένα απλό παράδειγμα προσομοίωσης ενός απλού κόμβου στον οποίο καταλήγουν τρεις προσβάσεις.

Το συγκεκριμένο παράδειγμα θα είναι ιδιαιτέρως απλοϊκό, ως προς τη σχεδίαση και ανάλυσή του και τα αποτελέσματά του δεν σχετίζονται με τον ερευνητικό σκοπό της παρούσας εργασίας.

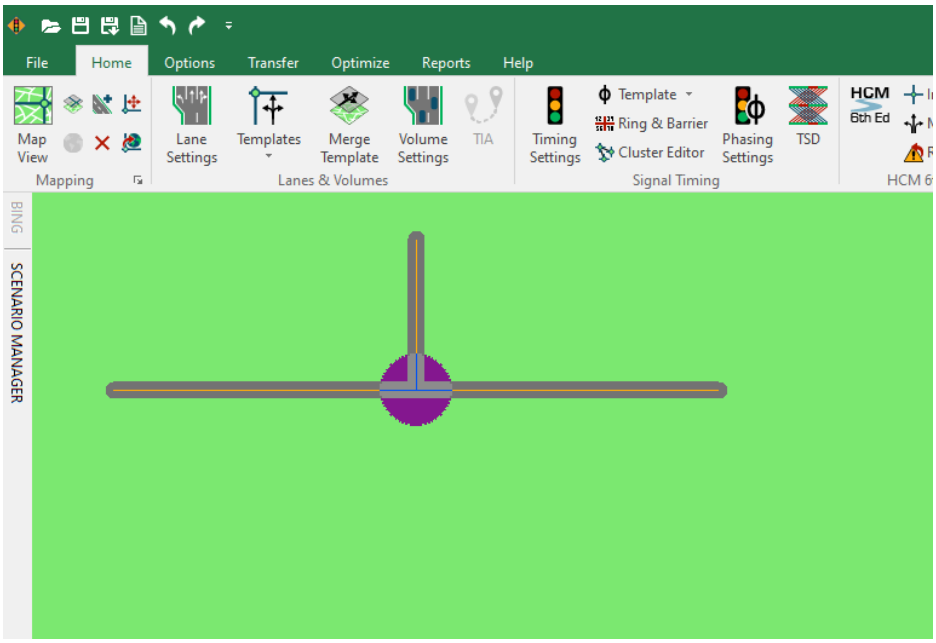
4.1.2.1 Εισαγωγή γραμμικής γεωμετρίας

Το αρχικό βήμα στο περιβάλλον του synchro 11 αφορά στην αποτύπωση των οδικών αρτηριών που αποτελούν το οδικό δίκτυο στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση (Εικόνα 7). Οι οδοί αυτές σχεδιάζονται ελεύθερα – με χρήση της αντίστοιχης εντολής της εφαρμογής – ως γραμμικά στοιχεία. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχουν αποδοθεί ακόμα σε αυτές διαστάσεις που αφορούν στην έννοια της διατομής. Επίσης σε αυτή τη φάση δεν έχουν γίνει αναθέσεις στα στοιχεία που αφορούν σε φόρτους ή λοιπά κυκλοφοριακά στοιχεία. Μέσω του ίδιου βήματος, το ίδιο το synchro 11 δημιουργεί αυτόματα τους κόμβους στα σημεία συμβολής των γραμμικών στοιχείων που προσομοιώνουν τις οδούς.



Εικόνα 7: Δημιουργία μίας οδού στο περιβάλλον του synchro 11

Οι ακραίες θέσεις της κάθε οδού γίνονται αντιληπτές ως κόμβοι από το syncro 11. Με τροποποίηση των συντεταγμένων τους είναι δυνατός ο καθορισμός της θέση και του μήκους του κάθε οδικού γραμμικού στοιχείου από τον μελετητή θέση (Εικόνα 8).



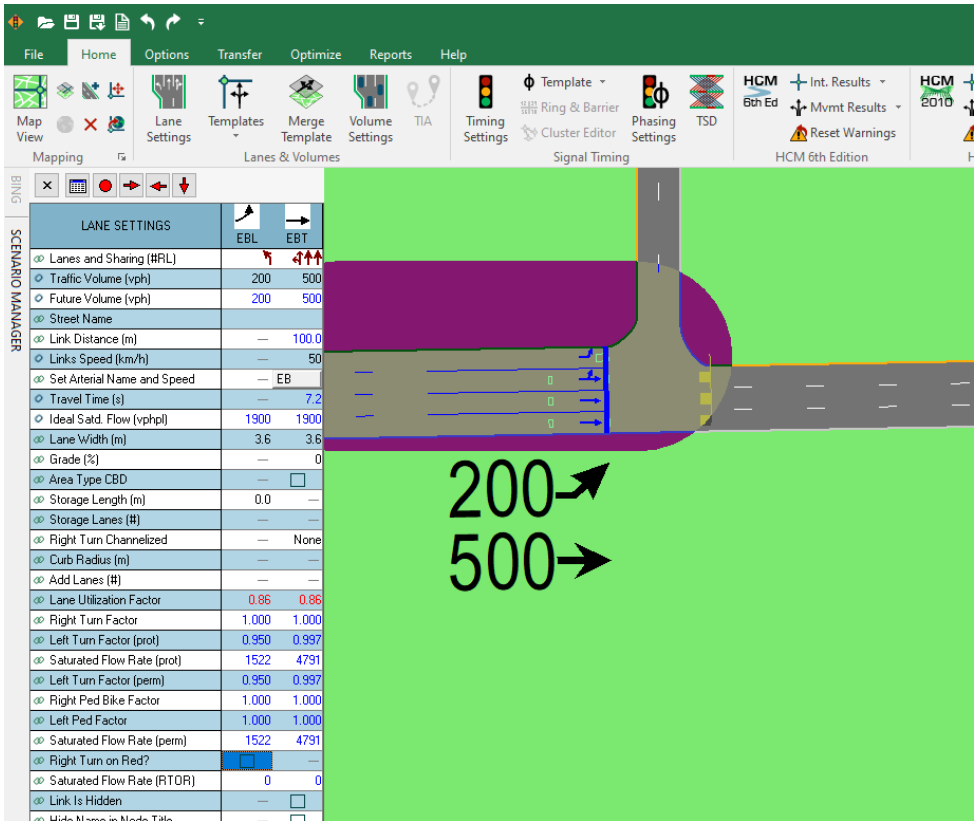
Εικόνα 8: Δημιουργία κάθετης οδού και αυτόματης δημιουργία οδικού κόμβου στο synchro 11

4.1.2.2 Ανάθεση στοιχείων φόρτων

Εν συνεχεία, ο μελετητής προβαίνει στην ανάθεση των κυκλοφοριακών φόρτων. Τα στοιχεία αυτά ανατίθενται στις προσβάσεις του κάθε κόμβου που περιλαμβάνει το προσομοίωμα που αναπτύσσεται.

Μέσω αυτής τις διαδικασίας καθορίζονται και γεωμετρικά στοιχεία που αφορούν στην έννοια της διατομής κάθε πρόσβασης, όπως ο αριθμός και το πλάτος των λωρίδων ή ακόμη και οι επιτρεπόμενες κινήσεις για τα οχήματα που κινούνται σε εκάστοτε λωρίδα.

Στην Εικόνα 9 εμφανίζεται η ανάθεση των υπόψη στοιχείων στην δυτική πρόσβαση του κόμβου.



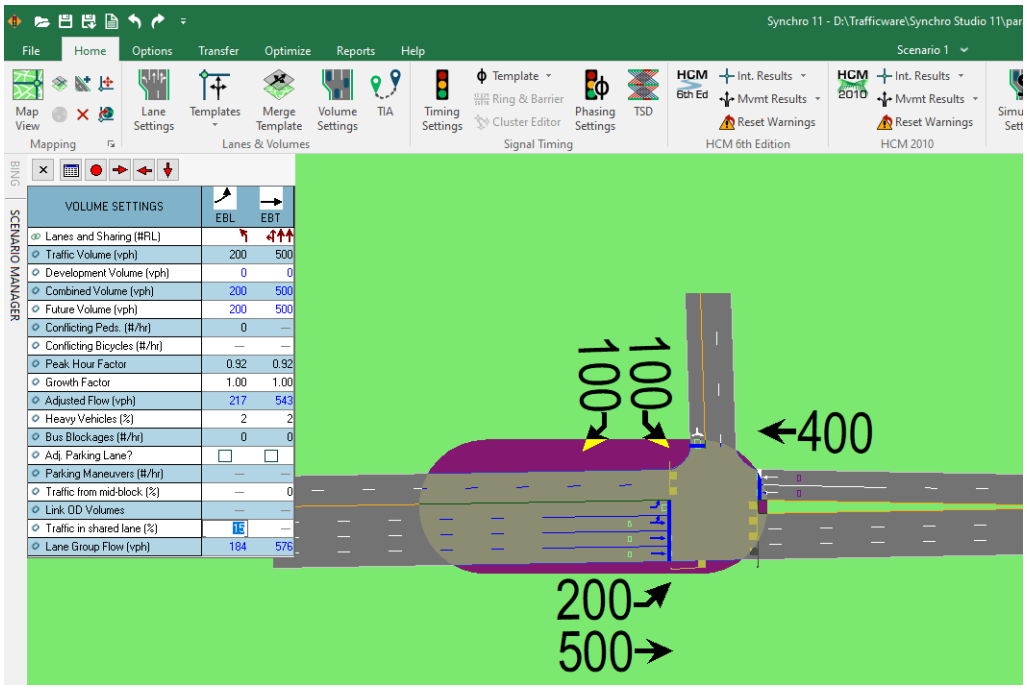
Εικόνα 9: Εισαγωγή κυκλοφοριακών στοιχείων δυτικής πρόσβασης στην καρτέλα ιδιοτήτων λωρίδων

Όπως προκύπτει από την εικόνα, η δυτική πρόσβαση αποτελείται από τέσσερις λωρίδες. Οι δύο λωρίδες εξυπηρετούν αποκλειστικά την κατευθείαν κίνηση, η μία την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση κατευθείαν κίνηση και αριστερή στροφή, ενώ η τελευταία αποκλειστικά την αριστερή στροφή.

Μέσω της καρτέλας ιδιοτήτων των λωρίδων (lane settings) ανατίθεται και ο κυκλοφοριακός φόρτος. Ο φόρτος που ανατέθηκε αφορά την κίνηση και όχι την κάθε λωρίδα ξεχωριστά. Έτσι, ο φόρτος που ανατέθηκε είναι 500veh/h για την κατευθείαν κίνηση και 200veh/h για την αριστερή στροφή. Ο καταμερισμός του φόρτου μεταξύ των λωρίδων που εξυπηρετούν την κάθε κίνηση πραγματοποιείται από το πρόγραμμα κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Φυσικά, ο μελετητής έχει την πρόσβαση να προχωρήσει στον υπόψη καταμερισμό και να θέσει τις δικές του τιμές, ώστε να προσαρμόσει το πείραμα στα πραγματικά δεδομένα.

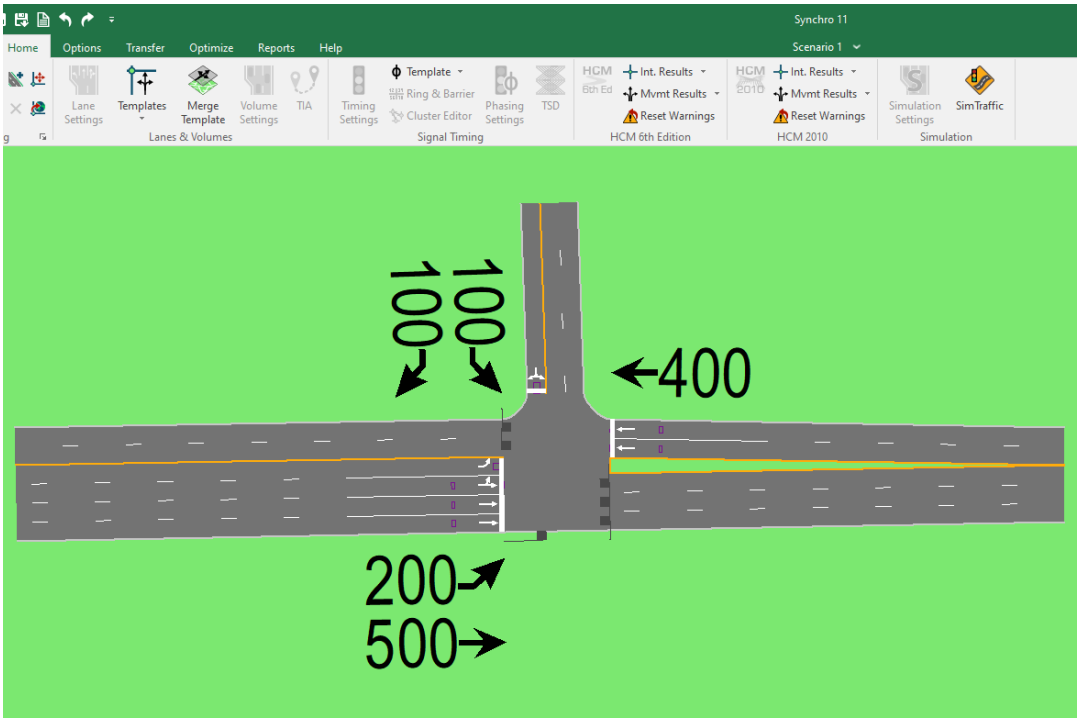
Από την ίδια καρτέλα εισάγονται και λοιπά στοιχεία που αφορούν στο προσομοίωμα. Χαρακτηριστικά αναφέρονται το πλάτος της κάθε λωρίδας, η ροή κορεσμού ανά ώρα πράσινης ένδειξης και ο συντελεστής χρήσης της λωρίδας, f_u.

Επιπλέον, μέσω της καρτέλας ιδιοτήτων φόρτων, ο χρήστης είναι σε θέση να καθορίσει και επιπλέον παραμέτρους που αφορούν στους φόρτους. Κύρια παράμετρος που καθορίζεται σε αυτήν την καρτέλα είναι το ποσοστό των βαρέων οχημάτων σε σχέση με τον συνολικό φόρτο. Σε αυτό το παράδειγμα το υπόψη ποσοστό έχει οριστεί σε 2% (Εικόνα 10).



Εικόνα 10: Εισαγωγή κυκλοφοριακών στοιχείων δυτικής πρόσβασης στην καρτέλα ιδιοτήτων φόρτων

Ομοίως, ανατίθενται τα αντίστοιχα στοιχεία στις υπόλοιπες προσβάσεις. Για τις ανάγκες του παραδείγματος έχει αναπτυχθεί γεωμετρικά και κυκλοφοριακά ο κόμβος που παρουσιάζεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Κυκλοφοριακοί φόρτοι κόμβου

Τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας που αφορούν στη δυτική πρόσβαση αναλύθηκαν παραπάνω. Πέρα από αυτό ισχύουν τα κάτωθι για τις άλλες δύο προσβάσεις:

1. Ανατολική πρόσβαση

Η ανατολική πρόσβαση αποτελείται από δύο λωρίδες, οι οποίες εξυπηρετούν αποκλειστικά την κατευθείαν κίνηση, ενώ καμία άλλη κίνηση δεν είναι επιτρεπτή. Ο συνολικός φόρτος της κατευθείαν κίνησης – και συνεπώς και του συνόλου της ανατολικής πρόσβασης – ορίστηκε στα 400veh/h.

2. Βόρεια πρόσβαση

Η βόρεια πρόσβαση αποτελείται από μία λωρίδα, η οποία εξυπηρετεί ταυτόχρονα την κίνηση δεξιά και την κίνηση αριστερά. Ο κυκλοφοριακός φόρτος ορίστηκε σε 100veh/h για την δεξιά κίνηση και 100veh/h για την αριστερή.

4.1.2.3 Ανάθεση στοιχείων σήμανσης

Η σουίτα υπορουτινών του synchro 11 επιτρέπει στον χρήστη να προσομοιώσει το σύνολο των πραγματικών συνθηκών σήμανσης και προτεραιοτήτων. Έτσι, είναι δυνατό ένας κόμβος να μην έχει καθόλου σήμανση, να σημαίνεται από κατακόρυφη σήμανση, δηλαδή η κυκλοφορία να ρυθμίζεται από σήματα STOP και παραχώρησης προτεραιότητας ή, τέλος, από φωτεινούς σηματοδότες.

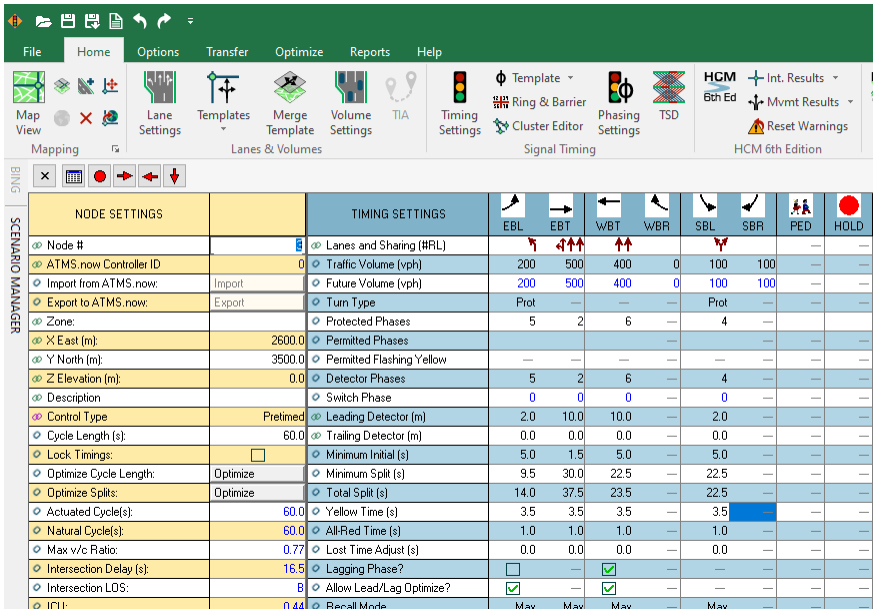
Όσον αφορά στους σηματοδότες είναι επιτρεπτό ο χρήστης να σχεδιάσει την αλληλουχία και λειτουργία των φάσεων κατά τον τρόπο που αυτός επιθυμεί (Εικόνα 12). Αυτό επιτυγχάνεται με τον καθορισμό των παρακάτω παραμέτρων:

1. Ομαδοποίηση των κινήσεων που επιτρέπονται ταυτόχρονα.

2. Είδος επιτρεπόμενης κίνησης (προστατευμένη, διακριτή κλπ).

3. Ανάθεση φάσης σε κάθε επιμέρους ομάδα.

4. Χρονική διάρκεια κίτρινης και κόκκινης φάσης (all red), η οποία μπορεί να είναι είτε η ίδια σε κάθε φάση είτε διαφορετική.



Εικόνα 12: Εισαγωγή στοιχείων φωτεινών σηματοδοτών

Με την ολοκλήρωση των ανωτέρω απομένει ο καθορισμός της περιόδου και της χρονικής διάρκειας της κάθε φάσης.

Αυτό επιτυγχάνεται:

- είτε μη αυτόματα, με εισαγωγή των τιμών των υπόψη παραμέτρων από τον χρήστη, βάσει των επιλογών του
- είτε αυτόματα, μέσω διαδικασίας βελτιστοποίησης που προσφέρει το synchro 11.

Για να γίνει αυτό ο χρήστης απαιτείται να εισάγει αρχικά μια σειρά από άλλες παραμέτρους, οι οποίες κατά κύριο λόγο αφορούν το ελάχιστο της χρονικής διάρκειας που δύναται να έχει κάθε φάση. Αυτό γίνεται, καθώς σε διάφορους κανονισμούς υπάρχει αυτή η απαίτηση. Μια χαρακτηριστική περίπτωση κατά την οποία η συγκεκριμένη απαίτηση βρίσκει εφαρμογή αφορά στην περίπτωση σηματοδότησης κόμβου λόγω ατυχημάτων (παρ. 3.2.5.6), που σε κάποια από τις προσβάσεις παρατηρείται ιδιαιτέρως μικρός κυκλοφοριακός φόρτος. Σε αυτή την περίπτωση η «αυστηρά» μαθηματική ανάλυση θα μπορούσε να οδηγήσει σε ιδιαίτερα μικρή χρονική διάρκεια των κινήσεων της συγκεκριμένης πρόσβασης, κάτι το οποίο αν και εφαρμόσιμο ίσως να μην είναι αποδεκτό. Σε μια ακραία περίπτωση, μπορεί να προκύπτει χρονική διάρκεια πράσινης ένδειξης μικρότερη από τον χρόνο αντίδρασης του πρώτου αυτοκινήτου που έρευνες έχουν δείξει ότι είναι περίπου 2,5s.

Καθώς το synchro 11 βελτιστοποιεί την περίοδο σηματοδότησης και τη χρονική διάρκεια της κάθε φάσης με διαφορετική εντολή, ο χρήστης μπορεί να

προβεί σε βελτιστοποίηση της χρονικής διάρκειας των φάσεων, καθορίζοντας ο ίδιος τη συνολική διάρκεια της περιόδου σηματοδότησης.

Αυτή η δυνατότητα είναι σημαντικής σημασίας, καθώς πολλές φορές η περίοδος σηματοδότησης είναι κοινή σε μία πόλη ή οδική αρτηρία για λόγους συντονισμού των σηματοδοτών και δεν επηρεάζεται από τις τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες του κόμβου που εξετάζεται ή σχεδιάζεται.

Ανεξάρτητα από τον τρόπο που έχει επιλέξει ο χρήστης – μελετητής να εισάγει τη χρονική διάρκεια της κάθε φάσης και της περιόδου, το synchro 11 δίνει εποπτικά την ομαδοποίηση των κινήσεων, την αλληλουχία και χρονική διάρκεια των φάσεων. Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα να αποφευχθούν προφανή λάθη μοντελοποίησης, καθώς ο χρήστης είναι σε θέση να το εξετάσει οπτικά.

Στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται ενδεικτικά η αλληλουχία και η χρονική διάρκεια των φάσεων σηματοδότησης του κόμβου που εξετάζεται.

Εικόνα 13: Οπτική παρουσίαση φάσεων σηματοδότησης στο περιβάλλον synchro 11

Για τον κόμβο που παρουσιάζεται το παρόν παράδειγμα έχουν γίνει οι εξής παραδοχές – αναθέσεις:

1. Η περίοδος της σηματοδότησης επιλέχθηκε να είναι 60s. Δεν πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση, καθώς η ίδια επιλογή έχει πραγματοποιηθεί και στο προσομοίωμα που αφορά στο ερευνητικό τμήμα της παρούσας εργασίας.

2. Η περίοδος διακρίθηκε σε δύο φάσεις, από τις οποίες η πρώτη διακρίθηκε περαιτέρω σε δύο υποφάσεις. Η πρώτη φάση αφορά στην εξυπηρέτηση των κυκλοφοριακών φόρτων της ανατολικής και της δυτικής πρόσβασης. Έτσι, η κατευθείαν κίνηση της δυτικής πρόσβασης επιτρέπεται στο σύνολο της πρώτης φάσης. Ταυτόχρονα, αλλά μόνο για το διάστημα της πρώτης υποφάσης επιτρέπεται η εξυπηρέτηση των οχημάτων που στρέφουν αριστερά από την δυτική πρόσβαση. Κατά την διάρκεια της δεύτερης υποφάσης εξυπηρετείται η κατευθείαν κίνηση οχημάτων που προέρχονται από την ανατολική πρόσβαση. Τέλος, κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης εξυπηρετείται η κίνηση που προέρχεται από τη βόρεια πρόσβαση.

3. Για το σύνολο των προσβάσεων επιλέχθηκε χρονική διάρκεια κίτρινης φάσης ίση προς 3,5s και διάρκειας που το σύνολο των εναλλασσόμενων φάσεων παραμένει η κόκκινη ένδειξη (all red time) ίση προς 1s.

4. Η επιμέρους χρονική διάρκεια κάθε φάσης βελτιστοποιήθηκε από το synchro 11, με αποτέλεσμα τους χρόνους που εμφανίζονται στην παραπάνω εικόνα.

4.1.2.4 Προκαταρκτικά αποτελέσματα

Έχοντας ολοκληρώσει τα στάδια της ανάθεσης στοιχείων γεωμετρίας, κυκλοφορίας και σήμανσης, το περιβάλλον του synchro 11 μπορεί να παράσχει

κάποια προκαταρτικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι εκτιμώμενα και οι τελικές τους τιμές προσδιορίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια μετά την εκτέλεση προσομοιώσεων στο περιβάλλον του simtraffic 11.

Ενδεικτικά κάποια από τα αποτελέσματα που ενδεχομένως να ενδιαφέρουν τον μελετητή είναι:

- Η μέση χρονική καθυστέρηση ανά όχημα σε δευτερόλεπτα, για κάθε ομάδα λωρίδων που εξυπηρετούν την ίδια κίνηση και για το σύνολο του κόμβου (που αποτελεί σταθμισμένο μέσο όρο των προηγούμενων).
- Τον λόγο v/c, δηλαδή το λόγο φόρτου προς την ικανότητα για κάθε ομάδα λωρίδων.
- Το ποσοστό της συνολικής ικανότητας του κόμβου που χρησιμοποιείται και το επίπεδο εξυπηρέτησης σύμφωνα με τη μέθοδο Intersection Capacity Utilization – ICU.
- Το επίπεδο εξυπηρέτησης που προσφέρει κάθε ομάδα λωρίδων και το σύνολο του κόμβου.

Τα αποτελέσματα αυτά είναι διαθέσιμα στην ίδια καρτέλα στην οποία ο μελετητής αναθέτει το σύνολο των στοιχείων της φωτεινής σηματοδότησης (Εικόνα 14).

Lock Timings:	☐	Minimum Initial (s)	5.0	1.5	5.0	—	5.0	—	—	—
Optimize Cycle Length:	Optimize	Minimum Split (s)	9.5	30.0	22.5	—	22.5	—	—	—
Optimize Splits:	Optimize	Total Split (s)	14.0	37.5	23.5	—	22.5	—	—	—
Actuated Cycle(s):	60.0	Yellow Time (s)	3.5	3.5	3.5	—	3.5	—	—	—
Natural Cycle(s):	60.0	All-Red Time (s)	1.0	1.0	1.0	—	1.0	—	—	—
Max v/c Ratio:	0.77	Lost Time Adjust (s)	0.0	0.0	0.0	—	0.0	—	—	—
Intersection Delay (s):	16.5	Lagging Phase?	☐	—	☑	—	—	—	—	—
Intersection LOS:	B	Allow Lead/Lag Optimize?	☑	—	☑	—	—	—	—	—
ICU:	0.44	Recall Mode	Max	Max	Max	—	Max	—	—	—
ICU LOS:	A	Speed limit (km/h)	—	50	50	—	50	—	—	—
Offset (s):	46.0	Actuated Effct. Green (s)	9.5	33.0	19.0	—	18.0	—	—	—
Referenced to:	Begin of Green	Actuated g/C Ratio	0.16	0.55	0.32	—	0.30	—	—	—
Reference Phase:	2 - EBT	Volume to Capacity Ratio	0.77	0.32	0.39	—	0.38	—	—	—
Coordination Mode:	Fixed	Control Delay (s)	48.1	7.5	17.2	—	12.4	—	—	—
Master Intersection:	☐	Queue Delay (s)	0.0	0.0	0.0	—	0.0	—	—	—
Yield Point:	Single	Total Delay (s)	48.1	7.5	17.2	—	12.4	—	—	—
Mandatory Stop On Yellow:	☐	Level of Service	D	A	B	—	B	—	—	—
		Approach Delay (s)	—	17.3	17.2	—	12.4	—	—	—
		Approach LOS	—	B	B	—	B	—	—	—
		Queue Length 50th (m)	24.0	11.8	20.3	—	11.5	—	—	—
		Queue Length 95th (m)	#58.1	17.2	31.4	—	27.1	—	—	—
		Stops (vph)	143	245	293	—	95	—	—	—
		Fuel Used (l/hr)	11	14	16	—	5	—	—	—

Εικόνα 14: Προκαταρκτικά αποτελέσματα ανάλυσης στο περιβάλλον του synchro 11

Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, είναι επιτρεπτό από το synchro 11 να προβληθούν υπό μορφή αναφοράς σε μορφοποίηση αρχείου που βολεύει τον χρήστη, π.χ. σε μορφή .pdf. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιείται η δυνατότητα του synchro 11, Reports. Παράδειγμα αναφοράς που παράχθηκε με τον τρόπο αυτόν εμφανίζεται στην Εικόνα 15.

Lanes, Volumes, Timings
3: 01/20/2021

Lane Group	EBL	EBT	EBR	WBL	WBT	WBR	NBL	NBT	NBR	SBL	SBT	SBR
Adj. Flow (vph)	109	380	54	0	380	163	54	109	54	54	109	54
Lane Group Flow (vph)	109	434	0	0	380	163	0	217	0	0	217	0
Act Effct Green (s)	18.0	52.5			30.0	30.0		28.5			28.5	
Actuated g/C Ratio	0.20	0.58			0.33	0.33		0.32			0.32	
v/c Ratio	0.31	0.41			0.61	0.31		0.43			0.43	
Control Delay	33.5	11.7			30.2	24.3		27.6			27.6	
Queue Delay	0.0	0.0			0.0	0.0		0.0			0.0	
Total Delay	33.5	11.7			30.2	24.3		27.6			27.6	
LOS	C	B			C	C		C			C	
Approach Delay		16.1			28.5			27.6			27.6	
Approach LOS		B			C			C			C	

Intersection Summary	
Cycle Length: 90	
Actuated Cycle Length: 90	
Offset: 0 (0%), Referenced to phase 2:NBTL, Start of Green	
Control Type: Pretimed	
Maximum v/c Ratio: 0.61	
Intersection Signal Delay: 23.8	Intersection LOS: C
Intersection Capacity Utilization 50.0%	ICU Level of Service A
Analysis Period (min) 15	

Εικόνα 15: Παράδειγμα αναφοράς του synchro 11

4.1.3 Simtraffic 11

Με την ολοκλήρωση των απαιτούμενων βημάτων στο περιβάλλον του synchro 11, ο χρήστης ενεργοποιεί το περιβάλλον του simtraffic 11 στο οποίο θα πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις.

Το μεγάλο πλεονέκτημα που προσφέρει το περιβάλλον του simtraffic 11 είναι ότι ο χρήστης είναι πλήρως ελεύθερος να καθορίσει τις διάφορες παραμέτρους με τις οποίες θα πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις.

Οι παράμετροι αυτές δύναται να κατηγοριοποιηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Παράμετροι σχετιζόμενες με τα οχήματα
- Παράμετροι σχετιζόμενες με τους οδηγούς
- Παράμετροι σχετιζόμενες με την προσομοίωση

4.1.3.1 Παράμετροι σχετιζόμενες με τα οχήματα

Σε αυτή τη ομάδα παραμέτρων καθορίζονται στοιχεία όπως είναι οι γεωμετρικές διαστάσεις, ο μέσος αριθμός επιβαινόντων και το είδος γραφικής απεικόνισης των επιμέρους ομάδων οχημάτων.

Για τον καθορισμό αυτών των παραμέτρων πρέπει ο χρήστης αρχικά να κατηγοριοποιήσει τα οχήματα που θα συμμετάσχουν στις προσομοιώσεις. Το περιβάλλον του simtraffic 11 δημιουργεί δύο μεγάλες κατηγορίες οχημάτων, τα κοινά οχήματα (επιβατικά) και το βαρέα οχήματα.

Το άθροισμα των κυκλοφοριακών φόρτων των δύο κυρίων κατηγοριών είναι ο φόρτος που έχει οριστεί στο περιβάλλον του synchro 11. Για τον καθορισμό του επιμέρους φόρτου των βαρέων οχημάτων υπολογίζεται ως ποσοστό του συνολικού φόρτου, όπως αυτό έχει θεωρηθεί στο synchro 11 και έχει παρουσιαστεί παραπάνω

στην παρ. 5.2.2. Προφανώς, ο κυκλοφοριακός φόρτος των επιβατικών οχημάτων θα είναι ο συνολικός φόρτος αφαιρουμένου του φόρτου των βαρέων οχημάτων.

Ο χρήστης καλείται να διακρίνει περαιτέρω τα οχήματα των δύο αυτών κατηγοριών.

Συνήθης διάκριση για τα επιβατικά οχήματα αφορούν στις διαστάσεις τους και μπορούν να διακριθούν σε μεγάλα και μικρά επιβατικά οχήματα. Κάθε μία από τις δύο αυτές υποκατηγορίες λαμβάνει ένα αύξοντα αριθμό, σε καθένα από τους οποίους ανατίθεται στοιχεία που αφορούν:

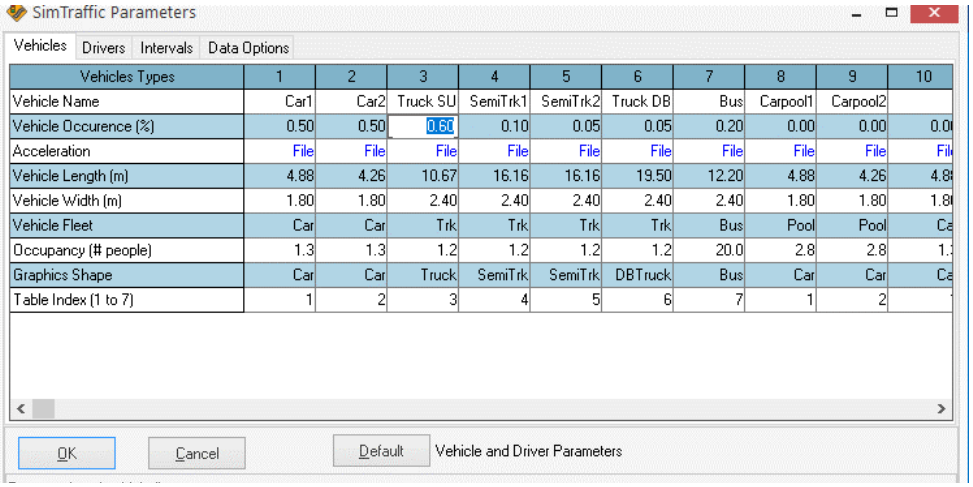
- Το ποσοστό με το οποίο συμμετέχει η συγκεκριμένη υποκατηγορία επί του συνόλου του φόρτου που αντιστοιχεί στα επιβατικά οχήματα (αφαιρουμένου δηλαδή του φόρτου που αφορά στα βαρέα οχήματα)
- Το μήκος και πλάτος της εκάστοτε υποκατηγορίας οχήματος
- Το μέσο αριθμό επιβαινόντων επί του οχήματος, ανά υποκατηγορία
- Το είδος οχήματος με το οποίο παριστάνεται στα γραφικά του simtraffic 11.

Με τον ίδιο τρόπο διακρίνονται περαιτέρω και τα βαρέα οχήματα σε υποκατηγορίες. Οι συνήθεις υποκατηγορίες των βαρέων οχημάτων αφορούν σε:

- Μικρά φορτηγά
- Μεγάλα φορτηγά
- Τράκτορες με συρόμενη πλατφόρμα
- Λεωφορεία

Αντιστοίχως με τα επιβατικά οχήματα, ανατίθενται και στις επιμέρους υποκατηγορίες των βαρέων οχημάτων οι παράμετροι που σχετίζονται με τα οχήματα.

Στην Εικόνα 16 εμφανίζεται η καρτέλα εισαγωγής των παραμέτρων αυτής της υποπαραγράφου.



Vehicles Types	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vehicle Name	Car1	Car2	Truck SU	SemiTrk1	SemiTrk2	Truck DB	Bus	Carpool1	Carpool2	
Vehicle Occurence (%)	0.50	0.50	0.60	0.10	0.05	0.05	0.20	0.00	0.00	0.0
Acceleration	File	File	File	File	File	File	File	File	File	Fil
Vehicle Length (m)	4.88	4.26	10.67	16.16	16.16	19.50	12.20	4.88	4.26	4.8
Vehicle Width (m)	1.80	1.80	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	1.80	1.80	1.8
Vehicle Fleet	Car	Car	Trk	Trk	Trk	Trk	Bus	Pool	Pool	Ca
Occupancy (# people)	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	20.0	2.8	2.8	1.
Graphics Shape	Car	Car	Truck	SemiTrk	SemiTrk	DBTruck	Bus	Car	Car	Ca
Table Index (1 to 7)	1	2	3	4	5	6	7	1	2	

Εικόνα 16: Εισαγωγή παραμέτρων σχετιζόμενων με τα οχήματα

Όπως φαίνεται και από την εικόνα, ο χρήστης έχει καθορίσει ότι ο κυκλοφοριακός φόρτος των επιβατικών οχημάτων αποτελείται από δύο υποκατηγορίες. Από τη μία τα μεγάλα επιβατικά έχουν μήκος 4,88m ενώ τα μικρά

4,26m. Και οι δύο υποκατηγορίες έχουν πλάτος 1,80m, επί αυτών επιβαίνουν κατά μέσο όρο 1,3 άτομα ενώ στη γραφική απεικόνιση εμφανίζονται ως «car».

Ο φόρτος της κάθε υποκατηγορίας ανέρχεται στο 50% του συνόλου του κυκλοφοριακού φόρτου που αντιστοιχεί στα επιβατικά.

Αντίστοιχα, τα βαρέα οχήματα διακρίνονται στις υποκατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα οχήματα όλων των υποκατηγοριών έχουν πλάτος 2,40m, ενώ το μήκος τους κυμαίνεται από 10,67m (για τα μικρά φορτηγά), έως 19,50m (για τους τράκτορες με συρόμενη πλατφόρμα).

Από το τμήμα του κυκλοφοριακού φόρτου που αντιστοιχεί στα βαρέα οχήματα το 60% αφορά στα μικρά φορτηγά, το 15% στα μεγάλά, το 5% στους τράκτορες με συρόμενη πλατφόρμα και, τέλος, το 20% στα λεωφορεία.

Επιπλέον, όλα τα οχήματα έχουν μέσο αριθμό επιβαινόντων 1,2 άτομα, εκτός των λεωφορείων που έχουν 20 άτομα.

Με βάση τα παραπάνω το simtraffic 11 μπορεί να υπολογίσει τους επιμέρους κυκλοφοριακούς φόρτους ανά υποκατηγορία οχήματος για κάθε κίνηση πρόσβασης στον κόμβο.

Για τις ανάγκες του συγκεκριμένου παραδείγματος παρουσιάζονται οι υπολογισμοί των επιμέρους φόρτων για την κατευθείαν κίνηση της δυτικής πρόσβασης.

Υπενθυμίζεται ότι ο συνολικός φόρτος που εξυπηρετείται στη συγκριμένη κίνηση, βάσει του παραδείγματος, είναι 500veh/h. Συνεπώς, και δεδομένου το ποσοστού των βαρέων οχημάτων στο 2%, ο φόρτος που θα αντιστοιχεί στα βαρέα οχήματα θα είναι:

$$\textit{Φόρτος βαρέων οχημάτων} = \textit{Συνολικός φόρτος} \times 0{,}02 = 500\,{}^{veh}/_{h} \times 0{,}02 = 10\,{}^{veh}/_{h}$$

και συνεπώς ο φόρτος των επιβατικών οχημάτων θα είναι ο εναπομείνας:

$$\textit{Φόρτος επιβατικών οχημάτων} = \textit{Συνολικός φόρτος} - \textit{Φόρτος βαρέων} = 500\,{}^{veh}/_{h} - 10\,{}^{veh}/_{h} = 490\,{}^{veh}/_{h}$$

Ο συγκεκριμένος φόρτος θα διακρίνεται περαιτέρω στα μικρά και μεγάλα επιβατικά οχήματα σύμφωνα με τα επιμέρους ποσοστά συμμετοχής.

Το ίδιο θα γίνεται και για τους επιμέρους κυκλοφοριακούς φόρτους των βαρέων οχημάτων.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι τελικοί φόρτοι που υπολογίζει το simtraffic 11 για την κατευθείαν κίνηση της δυτικής πρόσβασης στο συγκεκριμένο παράδειγμα.

Πίνακας 4: Κατανομή κυκλοφοριακού φόρτου της κατευθείαν κίνησης της δυτικής πρόσβασης

Επιβατικά οχήματα	Μικρά	245veh/h	490veh/h	500veh/h
	Μεγάλα	245veh/h		
Βαρέα οχήματα	Μικρά φορτηγά	6veh/h	10veh/h	
	Μεγάλα φορτηγά	1,5veh/h		
	Τράκτορες με πλατφόρμα	0,5veh/h		
	Λεωφορεία	2veh/h		

4.1.3.2 Παράμετροι σχετιζόμενες με τους οδηγούς

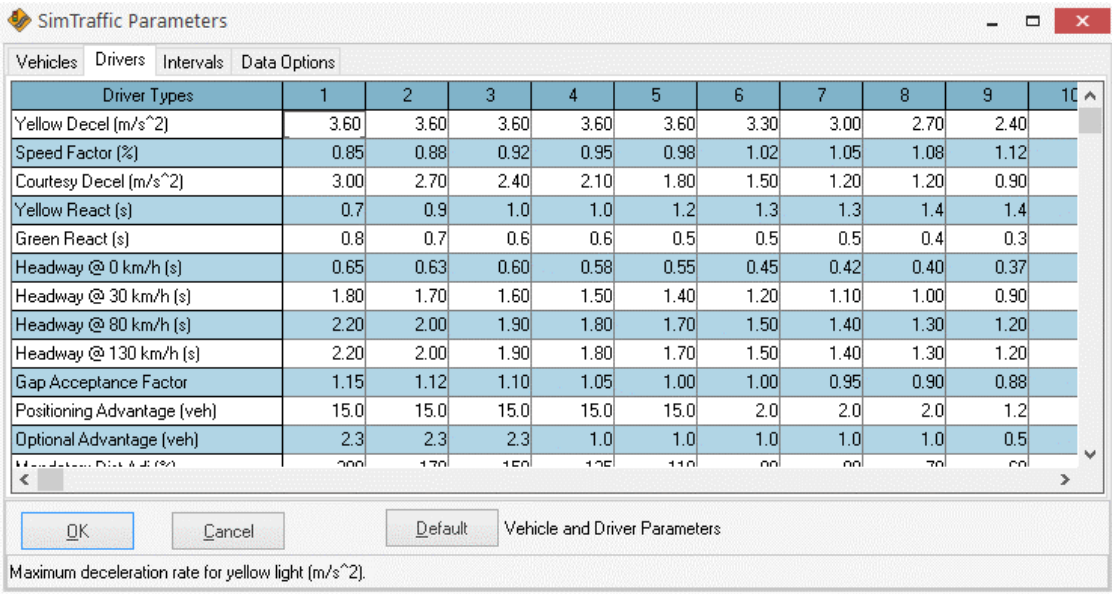
Εν συνεχεία, ο χρήστης καλείται να καθορίσει τα χαρακτηριστικά των οδηγών που επηρεάζουν την κυκλοφορία. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο simtraffic 11 κάθε υποκατηγορία οχημάτων, όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω, έχει οδηγούς με κοινά χαρακτηριστικά. Δηλαδή, οι παράμετροι που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα αφορούν στο σύνολο των οχημάτων της κάθε υποκατηγορίας.

Οι παράμετροι αυτές αφορούν κυρίως:

- Την επιβράδυνση του κάθε οχήματος, όταν απαιτείται
- Την χρονική αντίδραση του κάθε οδηγού στην κίτρινη και την πράσινη ένδειξη σηματοδότη
- Την επιλεγείσα χρονοαπόσταση από το προπορευόμενο όχημα

Επιπλέον, υπάρχει πληθώρα και άλλων παραμέτρων, οι οποίες δεν θα αναφερθούν στο συγκεκριμένο παράδειγμα.

Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται η καρτέλα εισαγωγής των υπόψη παραμέτρων.



Driver Types	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Yellow Decel (m/s^2)	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.30	3.00	2.70	2.40	
Speed Factor (%)	0.85	0.88	0.92	0.95	0.98	1.02	1.05	1.08	1.12	
Courtesy Decel (m/s^2)	3.00	2.70	2.40	2.10	1.80	1.50	1.20	1.20	0.90	
Yellow React (s)	0.7	0.9	1.0	1.0	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	
Green React (s)	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	
Headway @ 0 km/h (s)	0.65	0.63	0.60	0.58	0.55	0.45	0.42	0.40	0.37	
Headway @ 30 km/h (s)	1.80	1.70	1.60	1.50	1.40	1.20	1.10	1.00	0.90	
Headway @ 80 km/h (s)	2.20	2.00	1.90	1.80	1.70	1.50	1.40	1.30	1.20	
Headway @ 130 km/h (s)	2.20	2.00	1.90	1.80	1.70	1.50	1.40	1.30	1.20	
Gap Acceptance Factor	1.15	1.12	1.10	1.05	1.00	1.00	0.95	0.90	0.88	
Positioning Advantage (veh)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	2.0	2.0	2.0	1.2	
Optional Advantage (veh)	2.3	2.3	2.3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	

Εικόνα 17: Εισαγωγή παραμέτρων σχετιζόμενων με τους οδηγούς

4.1.3.3 Παράμετροι σχετιζόμενες με την προσομοίωση

Προ της εκτέλεσης των προσομοιώσεων πρέπει να γίνει ο καθορισμός των τελικών παραμέτρων.

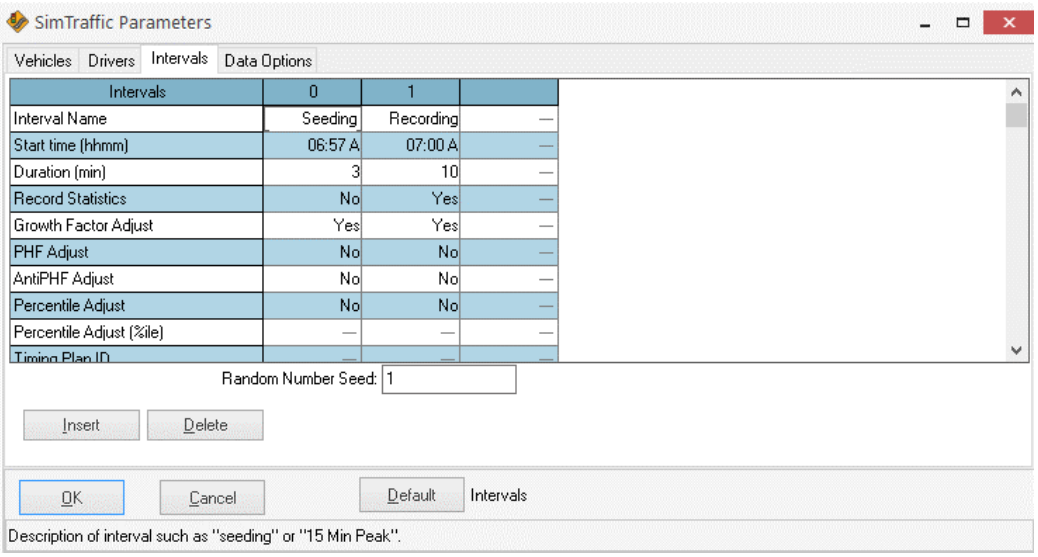
Αυτές οι παράμετροι σχετίζονται με την διάρκεια της προσομοίωσης, τη διάρκεια του χρόνου «πλήρωσης» του οδικού δικτύου, καθώς και με το ενδεχόμενο ο μελετητής να επιθυμεί να λάβει υπόψη του παραμέτρους, όπως ο συντελεστής ωριαίας αιχμής (ΣΩΑ).

Αρχικά, θα πρέπει να γίνει αντιληπτός ο λόγος για τον οποίο απαιτείται ο χρόνος «πλήρωσης» του δικτύου. Στην αρχή κάθε προσομοίωσης το οδικό δίκτυο που εξετάζεται είναι πλήρως κενό από κυκλοφορούντα οχήματα. Αυτό σημαίνει πως αν κατά την έναρξη της προσομοίωσης το οδικό δίκτυο παρέμενε κενό θα επηρεαζόταν τα τελικά αποτελέσματα. Έτσι, το simtraffic παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να «πληρώσει» το εξεταζόμενο δίκτυο με προσομοίωση της κυκλοφορίας με τα ίδια χαρακτηριστικά, προτού όμως εκκινήσει να συλλέγει δεδομένα. Με αυτό τον τρόπο τα δεδομένα που συλλέγονται είναι ρεαλιστικά.

Η χρονική διάρκεια «πλήρωσης» του οδικού δικτύου θα πρέπει να είναι συνάρτηση της πολυπλοκότητάς του, καθώς και παραμέτρων όπως η περίοδος σηματοδότησης. Έτσι σε πολύπλοκα συστήματα ή σε κόμβους με μεγάλες περιόδους σηματοδότησης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από απλά συστήματα ή φωτεινή σηματοδότηση με μικρή περίοδο.

Η προεπιλεγμένες τιμές που χρησιμοποιεί το simtraffic 11 είναι 3min για την «πλήρωση» και 10min για την προσομοίωση. Οι τιμές αυτές, ενδεχομένως, να είναι επαρκείς για ένα απλό παράδειγμα όπως το παρόν, αλλά φαντάζουν μάλλον μικρές για πιο εκτεταμένες εφαρμογές.

Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται η αντίστοιχη καρτέλα εισαγωγής των παραμέτρων.



Εικόνα 18: Εισαγωγή παραμέτρων σχετιζόμενων με την προσομοίωση

4.1.3.4 Εκτέλεση προσομοιώσεων

Με το τέλος καθορισμού του συνόλου των παραμέτρων, ο χρήστης είναι σε θέση να προβεί σε εκτέλεση των προσομοιώσεων που επιθυμεί.

Από το σύνολο της βιβλιογραφίας που έχει μελετηθεί προέκυψε ότι βέλτιστος τρόπος προσομοίωσης είναι η πολλαπλή εκτέλεση πανομοιότυπων σεναρίων και λήψη ως αποτέλεσμα της μέσης τιμής της κάθε εκτέλεσης. Ο αριθμός των επαναλήψεων συνιστά μελετητική επιλογή, αλλά η διασπορά των ανά εκτέλεση αποτελεσμάτων είναι ένας καλός οδηγός για τη λήψη της τελικής απόφασης.

Με την επιλογή του αριθμού των επαναλήψεων, το λογισμικό εκκινεί τις προσομοιώσεις, καταγράφοντας τα αντίστοιχα δεδομένα ανάλυσης. Ο χρήστης είναι σε θέση να καταγράφει ακόμη και οπτικά την εκτέλεση των προσομοιώσεων με σκοπό την οπτική αξιοποίησή τους ως animation.

4.1.3.5 Παραγωγή αναφορών

Με την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων, ο μελετητής εξάγει τα ποσοτικά αποτελέσματα που επιθυμεί με χρήση της υπορουτίνας των αναφορών. Κατά την εκτύπωσή τους, δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα να επιλέξει ποια αποτελέσματα τον ενδιαφέρουν. Αυτά τα αποτελέσματα αναφέρονται σε ένα πολύ μεγάλο εύρος και αφορούν σε:

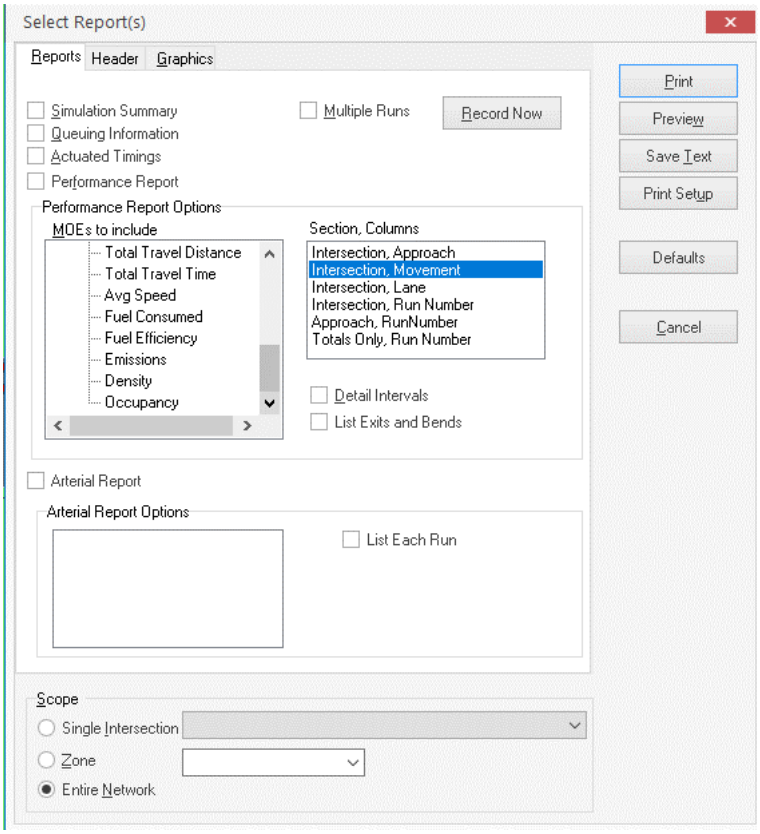
- Χρονικές καθυστερήσεις, συνολικά ή ανά όχημα
- Αριθμό στάσεων, συνολικά ή ανά όχημα
- Αριθμό οχημάτων που εισήλθαν
- Αριθμό οχημάτων που εξήλθαν
- Συνολικά διανυόμενη απόσταση
- Συνολικός διανυόμενος χρόνος
- Μέση ταχύτητα
- Κατανάλωση καυσίμου
- Εκπομπές αερίων ρύπων
- Στοιχεία πυκνότητας κυκλοφορίας
- Στοιχεία εξυπηρέτησης μετακινουμένων

Τα παραπάνω στοιχεία μπορεί να ζητηθεί να παραχθούν:

- Ανά κίνηση
- Ανά λωρίδα ή
- Ανά πρόσβαση

και μπορεί να αφορούν το σύνολο του εξεταζόμενου δικτύου ή ακόμη και κάποιο τμήμα του (π.χ. κόμβος) διακριτά.

Στην εικόνα παρουσιάζεται η καρτέλα στην οποία ο χρήστης καθορίζει το είδος των αποτελεσμάτων που επιθυμεί να εξάγει.



Εικόνα 19: Καρτέλα προετοιμασίας αναφοράς του simtraffic 11

Μετά από αυτά παράγονται οι αναφορές που επιθυμεί ο χρήστης. Παράδειγμα τέτοιας αναφοράς παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

SimTraffic Performance Report
Baseline 02/07/2021

3: Performance by movement

Movement	EBL	EBT	WBT	SBL	SBR	All
Denied Del/Veh (s)	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.2
Total Del/Veh (s)	22.1	7.0	15.0	15.2	8.2	12.5

Total Network Performance

Denied Del/Veh (s)	0.2
Total Del/Veh (s)	13.8

Εικόνα 20: Παράδειγμα αναφοράς simtraffic 11

Στην ανωτέρω αναφορά ζητήθηκε από το simtraffic 11 να υπολογίσει (κατά μέσο όρο από δέκα προσομοιώσεις) τη μέση καθυστέρηση ανά όχημα και ανά κίνηση. Έτσι, υπολογίστηκε ότι για το παράδειγμα που παρουσιάζεται – ενδεικτικά – η μέση χρονική καθυστέρηση των οχημάτων που επιθυμούν να στρίψουν αριστερά από την δυτική πρόσβαση (EBL) είναι 22,1s, ενώ για το σύνολο του κόμβου (σταθμισμένος μέσος όρος) ανέρχεται σε 12,5s.

4.2 Ανάλυση παραμέτρων προσομοιώσεων

4.2.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τον σχεδιασμό και εκτέλεση των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν για την παρούσα εργασία.

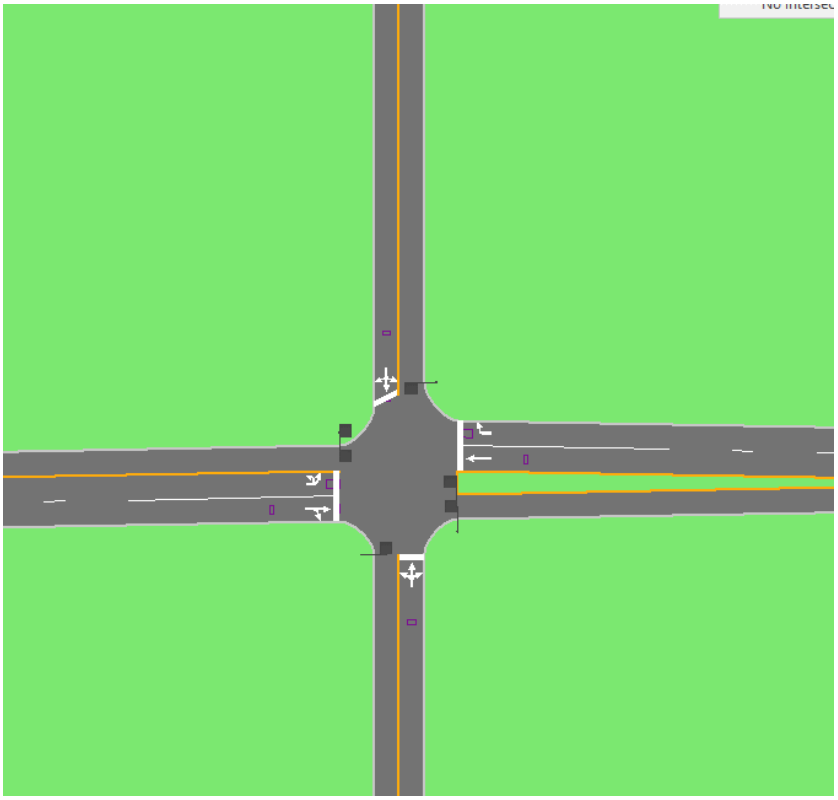
Το σύνολο των σχεδιαστικών και κυκλοφοριακών επιλογών, καθώς και η μορφή και λειτουργία του ισόπεδου κόμβου ήταν κατάλληλες για την κατά το δυνατό βέλτιστη απόκριση της κυκλοφοριακής συμπεριφοράς των διαφόρων κινήσεων και προσβάσεων σε σχέση με τις μεταβλητές παραμέτρους. Αρχικά, θα παρουσιαστεί η μορφή και ο τρόπος λειτουργίας του ισόπεδου κόμβου, ενώ στη συνέχεια θα ακολουθήσει η περιγραφή των κυκλοφοριακών στοιχείων και του τρόπου με τον οποίο σημαίνεται ο κόμβος. Το κεφάλαιο θα ολοκληρωθεί με την αναλυτική παράθεση των διαφόρων σεναρίων που εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων.

4.2.2 Γεωμετρία κόμβου

Ο κόμβος ο οποίος επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση των αντίστοιχων προσομοιώσεων είναι ένας ισόπεδος κόμβος στον οποίο συντρέχουν τέσσερις προσβάσεις.

Γενικά, είναι δυνατό να λεχθεί ότι πρόκειται για μία διασταύρωση δύο οδών, με την πρώτη να έχει σημαντικά μεγαλύτερους φόρτους από την δεύτερη και ταυτόχρονα να διαθέτει περισσότερες λωρίδες κυκλοφορίας. Για τις ανάγκες παρουσίασης του πειράματος, αλλά και γιατί αντίστοιχη ονοματολογία δίνεται από το περιβάλλον του Synchro Plus, οι διάφορες προσβάσεις καλούνται αναλόγως του σημείου του ορίζοντα από το οποίο προέρχεται ο κυκλοφοριακός φόρτος που εισέρχεται στον κόμβο. Με αυτήν την παραδοχή οι τέσσερις προσβάσεις που δημιουργούνται από τη διασταύρωση των δύο οδών είναι η ανατολική και η δυτική, που αντιστοιχούν στην οδό με το μεγαλύτερο φόρτο και η βόρεια και νότια που αντιστοιχούν στη δευτερεύουσα οδό.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ενδεικτικά ο κόμβος, όπως σχεδιάστηκε στο περιβάλλον της εφαρμογής του synchro 11.



Εικόνα 21: Γεωμετρία κόμβου

Όπως προκύπτει και από την εικόνα, οι διάφορες προσβάσεις στον κόμβο προσφέρουν διαφορετικές κινήσεις, ενώ ταυτόχρονα έχουν διαφορετική γεωμετρία.

Αρχικά, η ανατολική πρόσβαση διαθέτει δύο λωρίδες κυκλοφορίας. Η μία χρησιμοποιείται ταυτόχρονα για την κατευθείαν κίνηση και τη στροφή δεξιά, ενώ η δεύτερη για την αριστερή στροφή. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, η λωρίδα που εξυπηρετεί την κίνηση των οχημάτων που στρέφουν αριστερά, ταυτόχρονα εξυπηρετεί και τα οχήματα που επιθυμούν να αναστρέψουν. Ο φόρτος αυτής της λωρίδας, τόσο στο σύνολό του, όσο και ως ποσοστό οχημάτων που αναστρέφουν προς το σύνολο θα αποτελέσουν μεταβλητές παράμετροι των σχεδιαζόμενων πειραμάτων.

Ομοίως και η δυτική πρόσβαση αποτελείται από δύο λωρίδες. Σε αντίθεση με την ανατολική, και οι δύο λωρίδες χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση της κατευθείαν κίνησης, ενώ η μία από αυτές χρησιμοποιείται για την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση των οχημάτων που στρέφουν δεξιά.

Αντίθετα, τόσο η βόρεια όσο και η νότια πρόσβαση αποτελούνται από μία λωρίδα κυκλοφορίας, η οποία χρησιμοποιείται από τα οχήματα που επιθυμούν να εκτελέσουν οποιαδήποτε δυνατή κίνηση. Οι κινήσεις αυτές είναι η κατευθείαν κίνηση, η στροφή δεξιά και η στροφή αριστερά.

Για το σύνολο των προσβάσεων, κινήσεων και λωρίδων έχει γίνει μία σειρά από σχεδιαστικές παραδοχές. Η προσπάθεια από τον μελετητή ήταν οι παραδοχές αυτές να είναι κατά το δυνατό ρεαλιστικές, ώστε η σχεδιαστική απεικόνιση του κόμβου να προσομοιάζει υπαρκτούς κόμβους.

Έτσι, το πλάτος του συνόλου των λωρίδων επιλέχθηκε να είναι 3,60m, διάσταση που συχνά απαντάται σε καλώς σχεδιασμένα αστικά οδικά δίκτυα.

4.2.3 Κυκλοφοριακοί φόρτοι

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, στην παρούσα εργασία θα εξεταστεί η επιρροή κάποιων μεταβλητών παραμέτρων στην κυκλοφοριακή ικανότητα και απόκριση του ισόπεδου κόμβου που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, οι μεταβλητές αυτές θα αφορούν σε κυκλοφοριακά και σχεδιαστικά στοιχεία της λωρίδας η οποία χρησιμοποιείται για την εξυπηρέτηση των οχημάτων που στρέφουν αριστερά ή αναστρέφουν και εισέρχονται στον κόμβο από την ανατολική πρόσβαση.

Προκειμένου να γίνει αυτό, έχει μελετητικά αποφασιστεί οι υπόλοιπες παράμετροι να παραμένουν σταθερές, ώστε να απομονωθεί η επιρροή της μεταβολής των παραμέτρων που εξετάζονται.

Αρχικά, καθορίστηκαν οι κυκλοφοριακοί φόρτοι που θα εξυπηρετεί ο ισόπεδος κόμβος. Κατά αναλογία με τα προηγούμενα, το σύνολο των φόρτων των διαφόρων προσβάσεων παρέμεινε σταθερό στο σύνολο των διαφορετικών σεναρίων. Έτσι στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ποσοτικά οι φόρτοι σε διάσταση οχημάτων ανά ώρα.

Πίνακας 5: Κυκλοφοριακοί φόρτοι κινήσεων ισόπεδου κόμβου προσομοιώσεων

ΠΡΟΣΒΑΣΗ	**ΚΙΝΗΣΗ**	**ΦΟΡΤΟΣ (veh/h)**
ανατολική	κατευθείαν	350
-//-	στροφή δεξιά	50
-//-	στροφή αριστερά	variable
-//-	αναστροφή	variable
δυτική	κατευθείαν	350
-//-	στροφή δεξιά	150
βόρεια	κατευθείαν	100
-//-	στροφή δεξιά	50
-//-	στροφή αριστερά	50
νότια	κατευθείαν	100
-//-	στροφή δεξιά	50
-//-	στροφή αριστερά	50

Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες κινήσεις ο φόρτος των κινήσεων της στροφής αριστερά και της αναστροφής από την ανατολική πρόσβαση αποτέλεσαν δύο από τις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραμετρική διερεύνηση επιρροής τους στην κυκλοφοριακή ικανότητα του ισόπεδου κόμβου.

Τα διάφορα σενάρια καταστρώθηκαν θεωρώντας ως μεταβλητές τιμές το σύνολο του κυκλοφοριακού φόρτου που εξυπηρετείται από την αποκλειστική λωρίδα στροφής αριστερά και αναστροφής, δηλαδή το άθροισμα των αναγραφόμενων ως «variable» στον ανωτέρω πίνακα και του ποσοστού των οχημάτων που αναστρέφουν ως προς το υπόψη σύνολο. Οι τιμές που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν ήταν εξής:

➢ Για το σύνολο του κυκλοφοριακού φόρτου της λωρίδας αποκλειστικής στροφής αριστέρα και αναστροφής, 100veh/h, 200veh/h, 300veh/h και 400veh/h

➢ Για το ποσοστό των οχημάτων που αναστρέφουν προς τον παραπάνω κυκλοφοριακό φόρτο, 0%, 10%, 20%, 30% και 40%

Με βάση τα παραπάνω προέκυψε μία σειρά από πιθανούς συνδυασμούς, καθένας από τους οποίους αντιστοιχούσε σε κάποιες τιμές φόρτου αριστερής στροφής και αναστροφής. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Αναπτυσσόμενα σενάρια με μεταβλητές τον συνολικό φόρτο αριστερής στροφής και το ποσοστό οχημάτων που αναστρέφουν

α/α	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΦΟΡΤΟΣ (veh/h)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΣΤΡΕΦΟΥΝ (%)	ΦΟΡΤΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ	
			ΣΤΡΕΦΟΥΝ ΑΡΙΣΤΕΡΑ (veh/h)	ΑΝΑΣΤΡΕΦΟΥΝ (veh/h)
1a	100	0	100	0
1b		10	90	10
1c		20	80	20
1d		30	70	30
1e		40	60	40
2a	200	0	200	0
2b		10	180	20
2c		20	160	40
2d		30	140	60
2e		40	120	80
3a	300	0	300	0
3b		10	270	30
3c		20	240	60
3d		30	210	90
3e		40	180	120
4a	400	0	400	0
4b		10	360	40
4c		20	320	80
4d		30	280	120
4e		40	240	160

Καθένας από αυτούς τους συνδυασμούς, που πλέον για τις ανάγκες της εργασίας θα καλούνται σενάρια, λαμβάνουν έναν κωδικό αριθμό. Ο αριθμός αυτός παρέχει κωδικοποιημένα τα στοιχεία του σεναρίου. Έτσι, το πρώτο ψηφίο, το οποίο είναι αριθμητικό, πολλαπλασιαζόμενο με το 100, δίνει τον συνολικό κυκλοφοριακό φόρτο της λωρίδας που εξυπηρετεί την αριστερή στροφή και την αναστροφή από τη δυτική πρόσβαση. Το δεύτερο ψηφίο, πεζό λατινικό γράμμα, παρέχει πληροφορίες για το ποσοστό των οχημάτων που αναστρέφουν προς το σύνολο του φόρτου που επιβαρύνει τη λωρίδα. Συγκεκριμένα, ο ψηφίο a αντιστοιχεί σε 0% οχημάτων που αναστρέφουν, το b σε 10%, το c σε 20%, το d σε 30% και το e σε 40%.

Τα σενάρια που εμφανίζονται στον παραπάνω πίνακα είναι τα βασικά τα οποία θα διευρυνθούν περαιτέρω μετά την εισαγωγή νέων μεταβλητών παραμέτρων. Όπως φαίνεται και στον πίνακα ο αριθμός των σεναρίων που έχουν έως τώρα αναπτυχθεί ανέρχεται σε εικοσι.

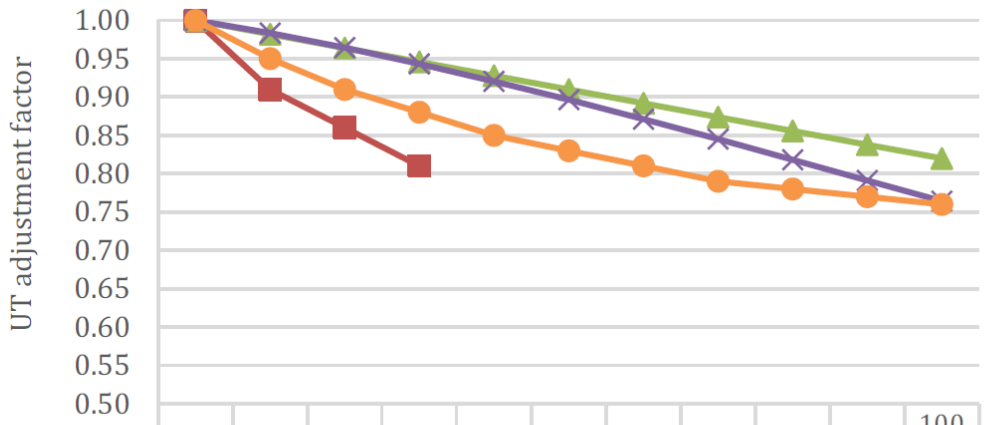
Όσον αφορά στο ποσοστό των βαρέων οχημάτων αυτός διατηρήθηκε στο 2%, δεδομένου ότι πρόκειται για αστικό κόμβο, η συμπεριφορά του οποίου εξετάζεται σε περίοδο αιχμής. Κατά την περίοδο αυτή είναι πιθανό να επιβάλλονται από τις τοπικές αρχές περιορισμοί στην κίνηση βαρέων οχημάτων για την αποσυμφόρηση του δικτύου.

Σημαντικός παράγοντας για το σύνολο των αναλύσεων αποτέλεσε η επιλογή των συντελεστών χρήσης των λωρίδων, $f_{u.}$ Καθώς ζητούμενο της εργασίας είναι η εξέταση της επιρροής της αριστερής στροφής ταυτόχρονα με την εκτέλεση αναστροφών αναζητήθηκε στην διεθνή αλληλογραφία η κατάλληλη επιλογή για τις υπόψη τιμές.

Προκειμένου να απομονωθεί η επιρροή αυτή, επιλέχθηκε η τιμή του συντελεστή αυτού για το σύνολο των λωρίδων (πλην της αριστερής στροφής) να είναι ίσο με 1,00. Αντίθετα, όπως διαπιστώθηκε η τιμή του συντελεστή για την λωρίδα στροφής και αναστροφής θα πρέπει να λαμβάνεται κάτω από 1,00. Η τελική τιμή είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων, αλλά ως κύρια παράμετρος το σύνολο των ερευνητών προκρίνουν το ποσοστό των οχημάτων που αναστρέφουν προς το σύνολο της κυκλοφορίας.

Το γεγονός ότι διάφοροι μελετητές προτείνουν διαφορετικές τιμές οφείλεται στο γεγονός ότι τα διάφορα πειραματικά δεδομένα αφορούν διαφορετικούς κόμβους, σε διαφορετικές χώρες του κόσμου. Συνεπώς, παράμετροι όπως η γεωμετρία του κόμβου, η σύνθεση της κυκλοφορίας και η οδηγική συμπεριφορά επηρεάζουν τα αποτελέσματα.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται συγκεντρωτικά οι διάφορες τιμές που προτείνονται σε κάποιες από τις έρευνες.



	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100 %
Tsao & Chu (1996)	1.00	0.91	0.86	0.81							
Carter et al (2005)	1.00	0.98	0.96	0.95	0.93	0.91	0.89	0.87	0.86	0.84	0.82
Wang et al (2008)	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.87	0.84	0.82	0.79	0.76
This Study	1.00	0.95	0.91	0.88	0.85	0.83	0.81	0.79	0.78	0.77	0.76

Διάγραμμα 2: Συγκριτική παρουσίαση προτεινόμενων τιμών του συντελεστή f_{UT} σε σχέση με το ποσοστό των αναστρεφόμενων οχημάτων (Πηγή: Hamad & Abu-Hamda, 2017)

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας έγινε χρήση τιμών που προσομοιάζουν τις μέσες τιμές από τις διάφορες έρευνες που εξετάστηκαν. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Τιμές συντελεστή f_{UT}

Ποσοστό οχημάτων που αναστρέφουν	0%	10%	20%	30%	40%
Συντελεστής f_{UT}	1,00	0,95	0,91	0,88	0,85

Αναφορικά τη σύνθεση της κυκλοφορίας επιλέχθηκε η διάκριση που είχε παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι, τα επιβατικά οχήματα διακρίθηκαν σε δύο υποκατηγορίες με βάση το μέγεθός τους και τα βαρέα οχήματα σε μικρά και μεγάλα φορτηγά, σε τράκτορες με πλατφόρμα και σε λεωφορεία. Τα επιμέρους ποσοστά ανά υποκατηγορία παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Μίγμα σύνθεσης κυκλοφοριακού φόρτου ανά υποκατηγορία οχημάτων

ΕΙΔΟΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ	ΣΥΝΟΛΟ
Επιβατικά οχήματα	Μικρά	80%	100%
	Μεγάλα	20%	
Βαρέα οχήματα	Μικρά φορτηγά	60%	100%
	Μεγάλα φορτηγά	15%	
	Τράκτορες με πλατφόρμα	5%	
	Λεωφορεία	20%	

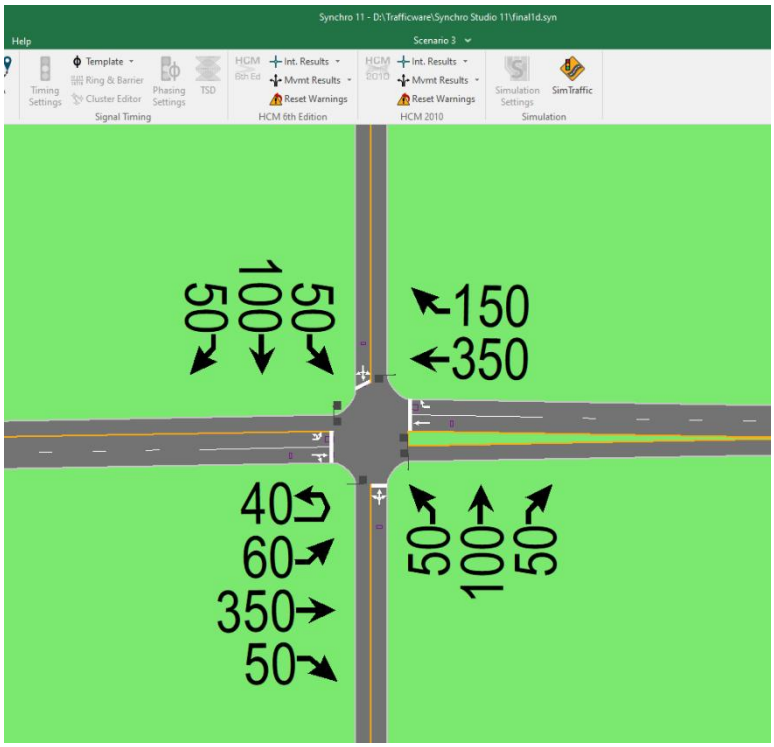
Από τον πίνακα είναι δυνατό να προκύψουν οι επιμέρους κυκλοφοριακοί φόρτοι ανά υποκατηγορία σε απόλυτα – και όχι σχετικά – μεγέθη. Για ανάγκες ενδεικτικής παρουσίασης οι επιμέρους φόρτοι της δυτικής πρόσβασης εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9: Κατανομή κυκλοφοριακού φόρτου στην ανατολική πρόσβαση

ΕΙΔΟΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΚΑΤΕΥΘΕΙΑΝ ΚΙΝΗΣΗ (veh/h)		ΣΤΡΟΦΗ ΔΕΞΙΑ (veh/h)	
Επιβατικά οχήματα	Μικρά	274,4	343	117,6	147
	Μεγάλα	68,6		29,4	
Βαρέα οχήματα	Μικρά φορτηγά	4,2	7	1,8	3
	Μεγάλα φορτηγά	1,05		0,45	
	Τράκτορες με πλατφόρμα	0,35		0,15	
	Λεωφορεία	1,4		0,6	

Αντιστοίχως, είναι εύκολο να υπολογιστεί η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου για οποιαδήποτε από τις προσβάσεις ή τις κινήσεις.

Όπως γίνεται κατανοητό οι τελικοί φόρτοι που επιβαρύνουν κάθε κίνηση είναι διαφορετικοί αναλόγως του σεναρίου που έχει επιλεγεί. Αρχική διάκριση των σεναρίων έχει παρουσιαστεί στον Πίνακα 4. Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίον παριστάνονται οι ανά κίνηση κυκλοφοριακοί φόρτοι στο περιβάλλον του synchro 11.



Εικόνα 22: Οπτική απεικόνιση επιμέρους κυκλοφοριακών φόρτων σε ένα εκ των σεναρίων που εξετάστηκαν

Όπως εύκολα μπορεί κανείς να αντιληφθεί από την Εικόνα 25, το σενάριο που επιλέχθηκε να παρουσιαστεί αφορά σε συνολικό φόρτο οχημάτων που στρέφουν αριστερά ή αναστρέφουν 100veh/h και το ποσοστό των οχημάτων που αναστρέφουν είναι καθορισμένο στο 40%. Πρόκειται δηλαδή για το σενάριο που παρουσιάζεται στην Πέμπτη γραμμή του Πίνακα 4.

4.2.4 Παράμετροι σηματοδότησης

Με την ολοκλήρωση των στοιχείων που αφορούν στην ανάθεση στις επιμέρους κινήσεις των αντίστοιχων φόρτων, απαιτείται η επιλογή των κατάλληλων παραδοχών για τον τρόπο λειτουργίας του κόμβου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο τρόπος με τον οποίο σημαίνεται ο προς εξέταση κόμβος είναι η φωτεινή σηματοδότηση.

Κατά τον σχεδιασμό της αλληλουχίας τον φάσεων λήφθηκε υπόψη το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα και με αυτόν τον γνώμονα επελέγησαν οι αντίστοιχες παράμετροι.

Υπενθυμίζεται ότι στον κόμβο καταλήγουν τέσσερις προσβάσεις και στην ουσία πρόκειται για μία απλή διασταύρωση δύο οδών από τις οποίες η μία έχει μεγαλύτερους φόρτους και γεωμετρικά στοιχεία από τη δεύτερη. Καθώς το σχεδιαζόμενο πείραμα έχει ως στόχο να διερευνήσει την επιρροή διαφόρων παραμέτρων που σχετίζονται με την λωρίδα αριστερής στροφής στην κυκλοφοριακή ικανότητα του κόμβου, επιλέχθηκε η περίοδος σηματοδότησης να αποτελείται από δύο φάσεις.

Στην πρώτη φάση εξυπηρετείται η κίνηση των οχημάτων που εισέρχονται στον κόμβο από τη βόρεια και τη νότια πρόσβαση. Η εξυπηρέτηση των συγκεκριμένων φόρτων πραγματοποιείται ταυτοχρόνως, με τα στρέφοντα αριστερά οχήματα να παραχωρούν προτεραιότητα στα απέναντι και κατευθείαν ή δεξιά στρέφοντα οχήματα.

Η δεύτερη φάση διακρίνεται περαιτέρω σε δύο υποφάσεις. Κατά τη διάρκεια και των δύο υποφάσεων εξυπηρετείται η κατευθείαν και η δεξιά κίνηση της δυτικής πρόσβασης. Αντίθετα, η αριστερή κίνηση της δυτικής πρόσβασης εξυπηρετείται κατά την διάρκεια της πρώτης υποφάσης. Τέλος, η δεύτερη υποφάση χρησιμοποιείται για την κατευθείαν κίνηση και δεξιά στροφή της ανατολικής πρόσβασης.

Στο κόμβο που έχει σχεδιαστεί και αναλυθεί έχει αγνοηθεί ο κυκλοφοριακός φόρτος πεζών. Αυτό έχει γίνει σκοπίμως, προκειμένου να απομονωθεί η επιρροή των προς διερεύνηση παραμέτρων στην κυκλοφοριακή ικανότητα του φόρτου.

Όσον αφορά στους νεκρούς χρόνους της σηματοδότησης, διατηρήθηκαν οι παραδοχές που έγιναν στο παράδειγμα του προηγούμενο παράδειγμα. Έτσι η διάρκεια της κίτρινης ένδειξης ορίστηκε στα 3,5s για το σύνολο των κινήσεων, ενώ κατά την εναλλαγή των φάσεων ορίστηκε χρόνος καθολικής κόκκινης ένδειξης (all red time) στο 1s.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, στην Αθήνα χρησιμοποιούνται περίοδοι σηματοδότησης 60s και 90s. Στην Αθήνα η διάκριση δεν είναι ανά κόμβο, αλλά ο κάθε κόμβος μεταβάλλει την περίοδό του, όταν είναι εκτός ή εντός αιχμής. Συγκεκριμένα, στις ώρες αιχμής οι κόμβοι μεταβάλλουν την περίοδό τους και χρησιμοποιούν τα 90s.

Με βάση αυτό, επιλέχθηκε για τις προσομοιώσεις που σχεδιάζονται και υλοποιούνται στην παρούσα εργασία να χρησιμοποιηθεί περίοδος σηματοδότησης ίση

προς 90s. Επισημαίνεται ότι αυτή η επιλογή αφορά το σύνολο των σεναρίων που καταστρώθηκαν και παρουσιάστηκαν στον πίνακα 4.

Η επόμενη μεταβλητή παράμετρος η οποία θεωρήθηκε ότι έχει αξία να μελετηθεί αφορά στην χρονική διάρκεια των φάσεων. Έτσι και δεδομένου ότι η εργασία αφορά την εξέταση της λωρίδας που εξυπηρετεί την αριστερή κίνηση, επιλέχθηκε η μεταβλητή αυτή παράμετρος να αφορά την χρονική διάρκεια της πρώτης υποφάσης της δεύτερης φάσης της σηματοδότησης, όπως αυτή περιεγράφηκε παραπάνω.

Για να γίνει αυτό έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

- Η χρονική διάρκεια της πρώτης φάσης θα είναι αμετάβλητη και δεν θα επηρεάζεται από τη μεταβολή της τιμής της μεταβλητής παραμέτρου.
- Η ανωτέρω χρονική διάρκεια ορίστηκε ίση προς 33s, χρόνος που υπολογίστηκε με βάση τη βελτιστοποίηση που παρέχεται από το synchro 11. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος πράσινης ένδειξης για τους σηματοδότες που ρυθμίζουν τη βόρεια και νότια πρόσβαση είναι 28,5s (με τον υπόλοιπο χρόνο να αντιστοιχεί στην κίτρινη και all red ένδειξη.
- Η μεταβλητή παράμετρος ελέγχου θα είναι η χρονική διάρκεια της πράσινης ένδειξης της πρώτης υποφάσης της δεύτερης φάσης προς την περίοδο σηματοδότησης. Πρακτικά πρόκειται για τον λόγο g/C που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη υποφάση.
- Αποτέλεσμα αυτού είναι να προκύπτει μεταβλητή – μεταξύ των σεναρίων – και η χρονική διάρκεια της δεύτερης υποφάσης της δεύτερης φάσης, η οποία είναι η συμπληρωματική της πρώτης με συνολικό άθροισμα:

$$C - 33s = 90s - 33s = 57s$$

Οι τιμές που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν για αυτή την μεταβλητή παράμετρο είναι: 0,20, 0,25 και 0,30.

Αυτό σημαίνει ότι η χρονική διάρκεια της πράσινης ένδειξης της πρώτης υποφάσης της δεύτερης φάσης – στην πρώτη τιμή της μεταβλητής -είναι:

$$0{,}20 \times 90s = 18s$$

και συνεπώς η συνολική διάρκεια της υποφάσης:

$$18s + 3{,}5s + 1s = 22{,}5s$$

ενώ η συνολική διάρκεια της δεύτερης υποφάσης:

$$57s - 22{,}5s = 34{,}5s$$

Αντιστοίχως, υπολογίζεται η χρονική διάρκεια της κάθε περίπτωσης και οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

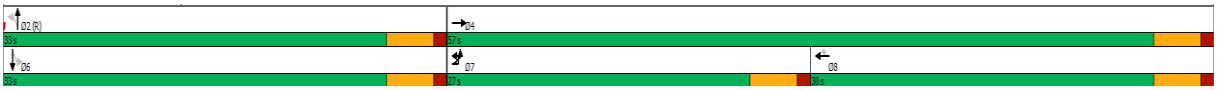
Πίνακας 10: Χρονική διάρκεια 1ης και 2ης υποφάσης συναρτήσει του λόγου g/C της 1ης υποφάσης

α/α	g/C 1ης υποφάσης	Διάρκεια πράσινης ένδειξης 1ης υποφάσης (s)	Συνολική διάρκεια 1ης υποφάσης (s)	Διάρκεια πράσινης ένδειξης 2ης υποφάσης (s)	Συνολική διάρκεια 2ης υποφάσης (s)

1	0,20	18	22,5	30	34,5
2	0,25	22,5	27	25,5	30
3	0,30	27	31,5	21	25,5

Τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα, καθώς και η επιλογή της χρονικής διάρκειας της πρώτης φάσης να είναι σταθερή και ίση με 33s, εμφανίζεται στις Εικόνες 23 έως 25.

Εικόνα 23: Οπτική παρουσίαση φάσεων σηματοδότησης σεναρίων στα οποία g/C=0,20



Εικόνα 24: Οπτική παρουσίαση φάσεων σηματοδότησης σεναρίων στα οποία g/C=0,25

Εικόνα 25: Οπτική παρουσίαση φάσεων σηματοδότησης σεναρίων στα οποία g/C=0,30

Από τη συγκριτική ανάγνωση των παραπάνω εικόνων είναι εμφανής ο τρόπος με τον οποίο έχει συντελέσει η τρίτη μεταβλητή παράμετρος στην αλληλουχία των διαφόρων φάσεων και υποφάσεων.

Αποτέλεσμα της νέας μεταβλητής παραμέτρου είναι το κάθε ένα από τα είκοσι σενάρια που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 6.3 (Πίνακας 4) να αντιστοιχούν σε τρία νέα, ένα για κάθε τιμή του λόγου g/C ως ανωτέρω.

Ο συνολικός αριθμός των σεναρίων που αναπτύχθηκαν ανέρχεται σε εξήντα καθώς χρησιμοποιήθηκαν τρεις μεταβλητές παράμετροι από τις οποίες η πρώτη λαμβάνει τέσσερις διακριτές τιμές, η δεύτερη πέντε και η τρίτη τρεις.

Συνεπώς οι πιθανοί συνδυασμοί ανέρχονται σε:

$$5 \times 4 \times 3 = 60\ \textit{συνδυασμοί}$$

Καθένας από αυτούς τους συνδυασμούς έλαβε έναν κωδικό ώστε να είναι αναγνωρίσιμος. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο τα αρχικά είκοσι σενάρια έλαβαν έναν δίψηφο κωδικό. Με την εισαγωγή της νέας μεταβλητής παραμέτρου, ο κωδικός αυτός εμπλουτίζεται με ένα τρίτο ψηφίο – αριθμητικό – που παίρνει την τιμή 1, όταν ο λόγος g/C είναι 0,20, 2 για τιμή του g/C 0,25 και 3 για 0,30. Αυτή η τιμή φαίνεται και στην πρώτη στήλη του Πίνακα 8.

Έτσι, από την κωδικοποίηση του κάθε σεναρίου είναι δυνατό να αναγνωστούν οι κυκλοφοριακές συνθήκες στις οποίες αντιστοιχεί. Ως παράδειγμα θα δοθεί το σενάριο 2e3, το οποίο αντιστοιχεί σε:

- Συνολικό φόρτο της λωρίδας που εξυπηρετεί την αριστερή στροφή και αναστροφή από τη δυτική πρόσβαση:

$$\mathbf{2} \times 100 veh/h = 200 veh/h$$

➢ Ποσοστό των οχημάτων που αναστρέφουν προς το σύνολο του φόρτου της προηγούμενης παραμέτρου:

$$\boldsymbol{e} \rightarrow 40\% \Rightarrow 40\% \times 200veh/h\ = 80veh/h$$

➢ Λόγος g/C της πράσινης ένδειξης της πρώτης υποφάσης της δεύτερης φάσης:

$$\mathbf{3} \rightarrow 0{,}30$$

4.2.5 Στοιχεία οχημάτων, οδηγών και προσομοίωσης

Για την ολοκλήρωση του προσομοιώματος απαιτήθηκε η επιλογή και των λοιπών στοιχείων που το περιγράφουν. Τα οχήματα που επιλέχθηκε να αποτελούν τον στόλο που θα «φορτίσει» τον προς εξέταση κόμβο είναι τα ίδια με τα οχήματα που περιεγράφηκαν στην παράγραφο 5.3.1. Συγκεκριμένα, υπήρξε διάκριση μεταξύ των κοινών (επιβατικών) οχημάτων και των βαρέων οχημάτων, ως εξής:

➢ Επιβατικά οχήματα:
1. Μεγάλα επιβατικά οχήματα, μήκους 4,88m
2. Μικρά επιβατικά οχήματα, μήκους 4,26m

➢ Βαρέα οχήματα:
1. Μικρά φορτηγά, μήκους 10,67m
2. Μεγάλα φορτηγά, μήκους 16,16m
3. Τράκτορες με συρόμενη πλατφόρμα, μήκους 19,50m
4. Λεωφορεία, μήκους 12,20m

Τα επιμέρους ποσοστά συμμετοχής του κάθε τύπου παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Μίγμα σύνθεσης κυκλοφοριακού φόρτου ανά υποκατηγορία οχημάτων

ΕΙΔΟΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ	ΣΥΝΟΛΟ
Επιβατικά οχήματα	Μικρά	80%	100%
	Μεγάλα	20%	
Βαρέα οχήματα	Μικρά φορτηγά	60%	100%
	Μεγάλα φορτηγά	15%	
	Τράκτορες με πλατφόρμα	5%	
	Λεωφορεία	20%	

Τέλος, όσον αφορά στα στοιχεία που αφορούν στους οδηγούς χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 5.3.2.

Στη συνέχεια, προκειμένου να γίνει επαρκής «πλήρωση» και να συλλεγούν ορθά δεδομένα από την αρχή της προσομοίωσης επιλέχθηκε να διευρυνθεί ο χρόνος που αντιστοιχεί στην προεπιλογή του simtraffic 11. Ο προεπιλεγμένος χρόνος είναι 3min και επιλέχθηκε να μεγαλώσει σε 10min.

Αντιστοίχως με τη χρονική διάρκεια «πλήρωσης» επιλέχθηκε μεγαλύτερη διάρκεια προσομοίωσης. Η νέα διάρκεια ορίστηκε σε 60min, αντί των 10min της προεπιλογής.

Ακόμα, για λόγους απλότητας, επιλέχθηκε η ομοιόμορφη κατανομή των κυκλοφοριακών φόρτων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, δηλαδή επιλέχθηκε ο ΣΩΑ να έχει την τιμή 1. Επιπλέον, αυτή η επιλογή έγινε καθώς η όποια αιχμή δεν αφορά στα επιζητούμενα αποτελέσματα.

Τέλος, ο αριθμός των επαναλήψεων συνιστά μελετητική επιλογή και στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε να εκτελεστούν δέκα προσομοιώσεις ανά σενάριο για την συλλογή των μέσων όρων των αποτελεσμάτων.

4.3 Αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα το περιβάλλον του Synchro Plus, τόσο η εφαρμογή synchro 11, όσο και η simtraffic 11, που χρησιμοποιήθηκαν, παράγουν πληθώρα αποτελεσμάτων που είναι δυνατό να αποτυπωθούν σε reports, δηλαδή αναφορές.

Ο εκάστοτε μελετητής πρέπει επιλέξει ποια από τα αποτελέσματα, όχι μόνο τον ενδιαφέρουν, αλλά και – δυνητικά – να περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με το φαινόμενο που έχει επιλέξει να μελετήσει. Προκειμένου να το πετύχει αυτό, θα πρέπει να αντιληφθεί την έννοια του KPI (Key Performance Indicator), ή αλλιώς Δείκτη Απόδοσης.

Ο Δείκτης Απόδοσης, που για τις ανάγκες της εργασίας θα καλείται KPI, είναι ένα ποσοτικοποιημένο στοιχείο το οποίο βοηθά τον αναγνώστη να αντιληφθεί την επιρροή ή τη συμπεριφορά μιας κατάστασης, ή ακόμη και την αποδοτικότητα μιας δραστηριότητας.

Πρακτικά, KPI μπορεί, υπό προϋποθέσεις, να είναι οποιαδήποτε ποσοτικοποιημένο μέγεθος, αλλά η αξία και η χρησιμότητά του εξαρτάται αποκλειστικά από τον σκοπό του μελετητή και την αξιοπιστία των δεδομένων του.

Υπενθυμίζεται ότι στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια να εξεταστεί η επιρροή διαφόρων παραμέτρων που σχετίζονται με μία λωρίδα αποκλειστικής στροφής αριστερά και αναστροφής με την κυκλοφοριακή συμπεριφορά – απόκριση του κόμβου.

4.3.1 Δείκτες απόδοσης (KPI's)

Τα KPI's που επιλέχθηκαν αφορούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Στην μέση χρονική καθυστέρηση
- Στον λόγο v/c, όπως αυτός ορίστηκε στην παράγραφο 4.5.

Από εκεί και πέρα για κάθε μία από τις δύο αυτές κατηγορίες υπήρξε μια περαιτέρω εξειδίκευση, αναφορικά με το τμήμα του δικτύου στο οποίο αφορούσαν.

Έτσι, οι τιμές της μέσης χρονικής καθυστέρησης που συλλέχθηκαν αφορούσαν:

- Τις δύο λωρίδες της δυτικής πρόβασης διακριτά, δηλαδή μία τιμή για κάθε λωρίδα ξεχωριστά
- Το σύνολο της δυτικής πρόσβασης, που αποτελεί τον σταθμισμένο μέσο όρο των δύο παραπάνω τιμών, με στάθμιση ως προς τα οχήματα της κάθε λωρίδας
- Το σύνολο του κόμβου, που αποτελεί τον σταθμισμένο μέσο όρο του συνόλου των διαφόρων προσβάσεων στον κόμβο

Αντιστοίχως, οι τιμές του λόγου v/c που συλλέχθηκαν αφορούσαν:

- Τις δύο λωρίδες της δυτικής πρόβασης διακριτά, δηλαδή μία τιμή για κάθε λωρίδα ξεχωριστά
- Το σύνολο της ανατολικής πρόσβασης

Με βάση αυτούς τους δείκτες επιχειρήθηκε να εξεταστεί η επιρροή της κάθε μεταβλητής παραμέτρου – όπως αυτές αναλύθηκαν ανωτέρω – στη συμπεριφορά του κόμβου.

4.3.2 Ποσοτική και διαγραμματική απεικόνιση αποτελεσμάτων

Το σύνολο των αριθμητικών δεδομένων που παρήχθησαν και αφορούν στα KPI's που απαριθμήθηκαν ανωτέρω παρουσιάζονται εκτενώς υπό μορφή πινάκων και διαγραμμάτων.

Από την αρχική ανάγνωση των ποσοτικών αποτελεσμάτων που παρήχθησαν γίνεται αντιληπτό ότι μέρος των δεικτών δεν προσφέρουν ιδιαίτερα αποτελέσματα. Το γεγονός ότι ελήφθησαν σταθερές τιμές για ομάδες σεναρίων δεν δίνει χώρο για περαιτέρω επεξεργασία και αναζήτηση. Παρόλα αυτά ακόμα και αυτή η στασιμότητα των τιμών, αν είναι μελετητικά δικαιολογημένη, μπορεί να αποτελέσει έναν επιπλέον δείκτη σωστής μοντελοποίησης.

Το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν τρεις διακριτές μεταβλητές παράμετροι, αν και δίνει πληθώρα αποτελεσμάτων, δημιουργεί πρόβλημα στην διαγραμματική οπτικοποίησή τους. Γι' αυτόν τον λόγο τα διαγράμματα που ακολουθήσουν έχουν σχεδιαστεί με το εξής κριτήριο. Κάθε φορά επιλέγεται ως σταθερές δύο από τις τρεις μεταβλητές με την μεταβολή του δείκτη απόδοσης να παρουσιάζεται έναντι της μεταβολής της τρίτης μεταβλητής παραμέτρου.

Αυτή η τεχνική οδήγησε σε μεγάλο αριθμό διαγραμμάτων από τα οποία θα παρουσιαστούν μόνο τα σημαντικότερα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των συμπερασμάτων.

Στους Πίνακες 12 και 13 παρουσιάζονται πινακοποιημένα τα αποτελέσματα που παρήχθησαν από τα διάφορα σενάρια. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 12 παρουσιάζεται η καταγεγραμμένη μέση καθυστέρηση ανά όχημα για κάθε σενάριο και αφορά τη λωρίδα αριστερής στροφής της δυτικής πρόσβασης, τη λωρίδα απ' ευθείας κίνησης της δυτικής πρόσβασης, το σύνολο της δυτικής πρόσβασης, αλλά και του συνόλου του κόμβου. Επίσης, στον Πίνακα 13 παρουσιάζεται ο λόγος v/c -για κάθε σενάριο και

αφορά τη λωρίδα αριστερής στροφής της δυτικής πρόσβασης, τη λωρίδα απ' ευθείας κίνησης της δυτικής πρόσβασης και την ανατολική πρόσβαση.

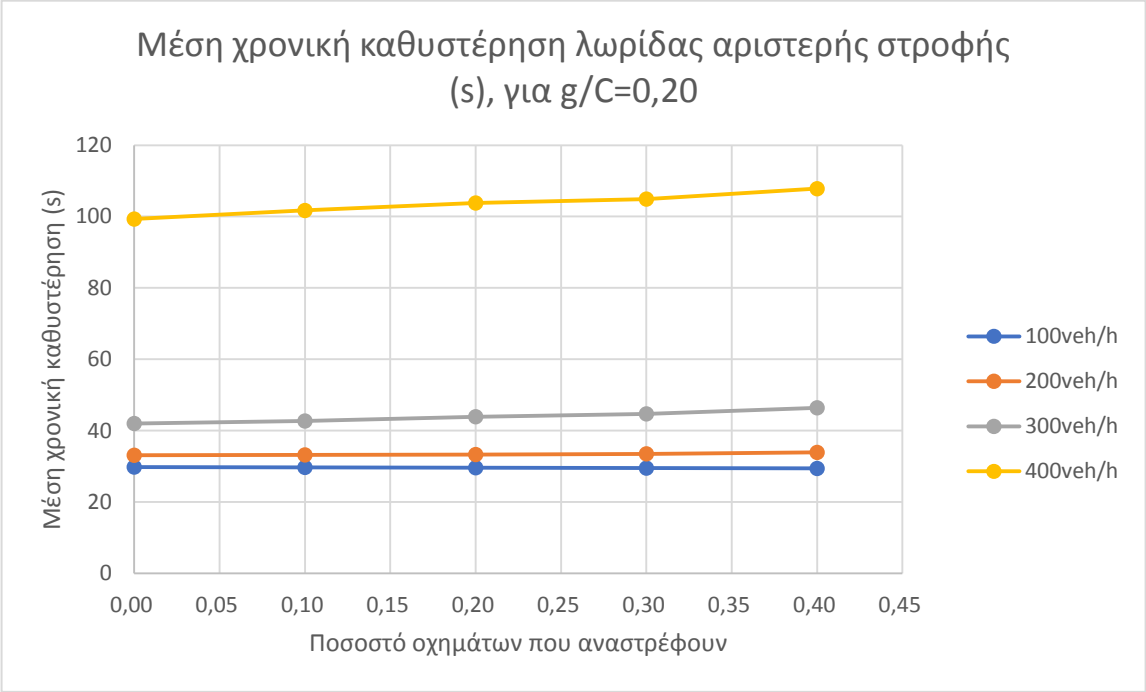
Πίνακας 12: Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοιώσεων – Μέσες χρονικές καθυστερήσεις

		ΜΕΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΑΝΑ ΟΧΗΜΑ (s)											
		ΛΩΡΙΔΑ ΑΡΙΣΤΕΡΗΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ			**ΛΩΡΙΔΑ ΚΑΤΕΥΘΕΙΑΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ**			**ΣΥΝΟΛΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ**			**ΣΥΝΟΛΟ ΚΟΜΒΟΥ**		
Κυκλοφοριακός φόρτος		g/C			g/C			g/C			g/C		
Συνολικός φόρτος (οχ/h)	Ποσοστό αναστροφής	0,20	0,25	0,30	0,20	0,25	0,30	0,20	0,25	0,30	0,20	0,25	0,30
100	0%	29,80	25,60	22,00	10,60	10,60	10,60	14,50	13,70	12,90	21,40	22,80	25,90
	10%	29,70	25,60	22,00	10,60	10,60	10,60	14,50	13,70	12,90	21,30	22,80	25,90
	20%	29,60	25,60	22,10	10,60	10,60	10,60	14,50	13,70	13,00	21,30	22,80	25,90
	30%	29,50	25,60	22,00	10,60	10,60	10,60	14,50	13,60	12,90	21,30	22,80	25,80
	40%	29,40	25,70	22,00	10,60	10,60	10,60	14,50	13,70	12,90	21,30	22,80	25,80
200	0%	33,10	27,80	23,50	10,50	10,50	10,50	17,80	16,10	14,70	22,20	23,00	25,40
	10%	33,20	27,80	23,70	10,50	10,50	10,50	17,80	16,10	14,80	22,20	23,00	25,40
	20%	33,30	27,80	23,80	10,50	10,50	10,50	17,90	16,10	14,80	22,20	23,00	25,40
	30%	33,50	27,90	24,00	10,50	10,50	10,50	17,90	16,10	14,80	22,30	23,00	25,40
	40%	33,90	28,00	24,20	10,50	10,50	10,50	18,10	16,10	14,90	22,30	23,10	25,50
300	0%	42,00	32,00	26,60	10,40	10,40	10,40	23,80	19,60	17,30	24,60	24,40	26,70
	10%	42,70	32,40	26,90	10,40	10,40	10,40	24,10	19,70	17,40	24,80	24,50	26,70
	20%	43,90	32,60	27,00	10,40	10,40	10,40	24,60	19,80	17,40	25,00	24,50	26,70
	30%	44,70	33,10	27,00	10,40	10,40	10,40	25,00	20,00	17,40	25,10	24,60	26,70
	40%	46,40	33,20	27,20	10,40	10,40	10,40	25,70	20,00	17,50	25,40	24,60	26,80
400	0%	99,30	45,50	30,30	12,90	10,70	10,50	55,80	29,70	20,30	39,20	28,00	27,50
	10%	101,70	46,60	30,80	12,90	10,60	10,50	56,90	28,40	20,50	39,60	28,30	27,60
	20%	103,80	48,00	31,30	12,90	10,60	10,50	58,10	29,10	20,70	40,10	28,60	27,80
	30%	104,90	49,90	32,20	13,20	10,70	10,50	58,80	30,10	21,20	40,40	29,10	27,90
	40%	107,80	52,50	32,70	12,80	10,90	10,60	60,00	31,50	21,50	40,90	29,80	28,10

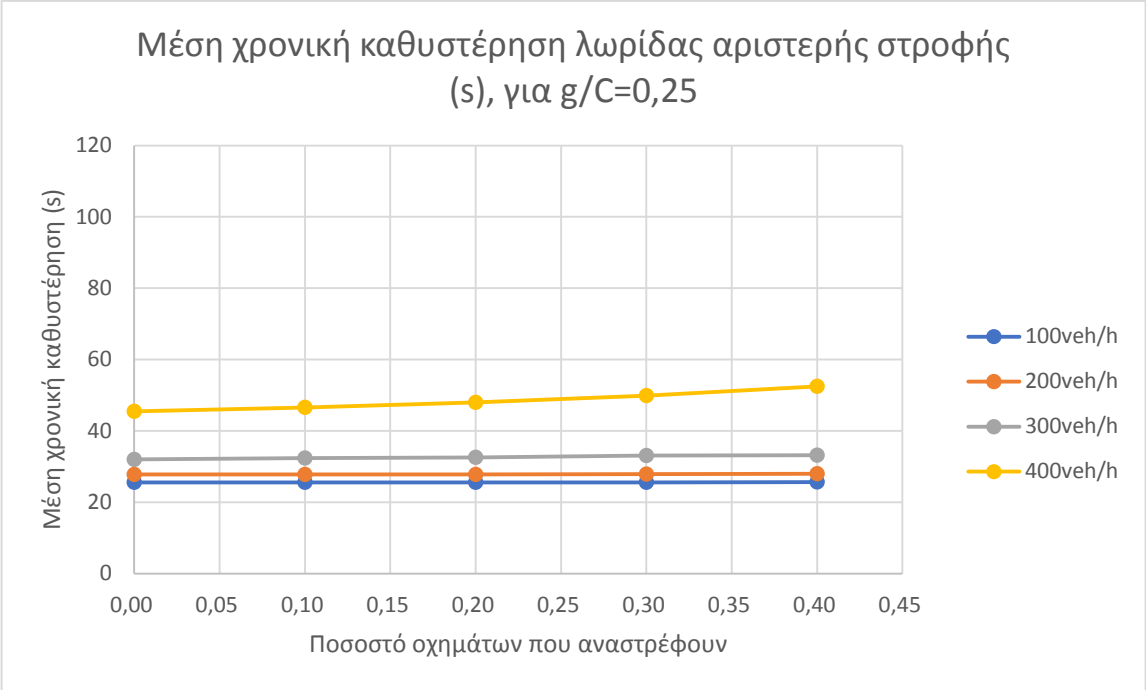
Πίνακας 13: Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοιώσεων – Λόγοι v/c

		ΛΟΓΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΠΡΟΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ (v/c)								
		ΛΩΡΙΔΑ ΑΡΙΣΤΕΡΗΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ			**ΛΩΡΙΔΑ ΚΑΤΕΥΘΕΙΑΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ**			**ΣΥΝΟΛΟ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗ**		
Κυκλοφοριακός φόρτος		g/C			g/C			g/C		
Συνολικός φόρτος (οχ/h)	Ποσοστο αναστροφής	0,20	0,25	0,30	0,20	0,25	0,30	0,20	0,25	0,30
100	0%	0,31	0,25	0,21	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,81
	10%	0,32	0,26	0,22	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
	20%	0,34	0,27	0,23	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
	30%	0,35	0,28	0,23	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
	40%	0,36	0,29	0,24	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
200	0%	0,61	0,49	0,41	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,81
	10%	0,65	0,52	0,43	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
	20%	0,67	0,54	0,45	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
	30%	0,70	0,56	0,46	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
	40%	0,72	0,58	0,48	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
300	0%	0,92	0,74	0,61	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,81
	10%	0,97	0,78	0,65	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
	20%	1,01	0,81	0,67	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
	30%	1,05	0,84	0,70	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
	40%	1,09	0,87	0,72	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
400	0%	1,23	0,98	0,82	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,81
	10%	1,29	1,03	0,86	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
	20%	1,35	1,08	0,90	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
	30%	1,40	1,12	0,93	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88
	40%	1,45	1,16	0,96	0,41	0,41	0,41	0,61	0,72	0,88

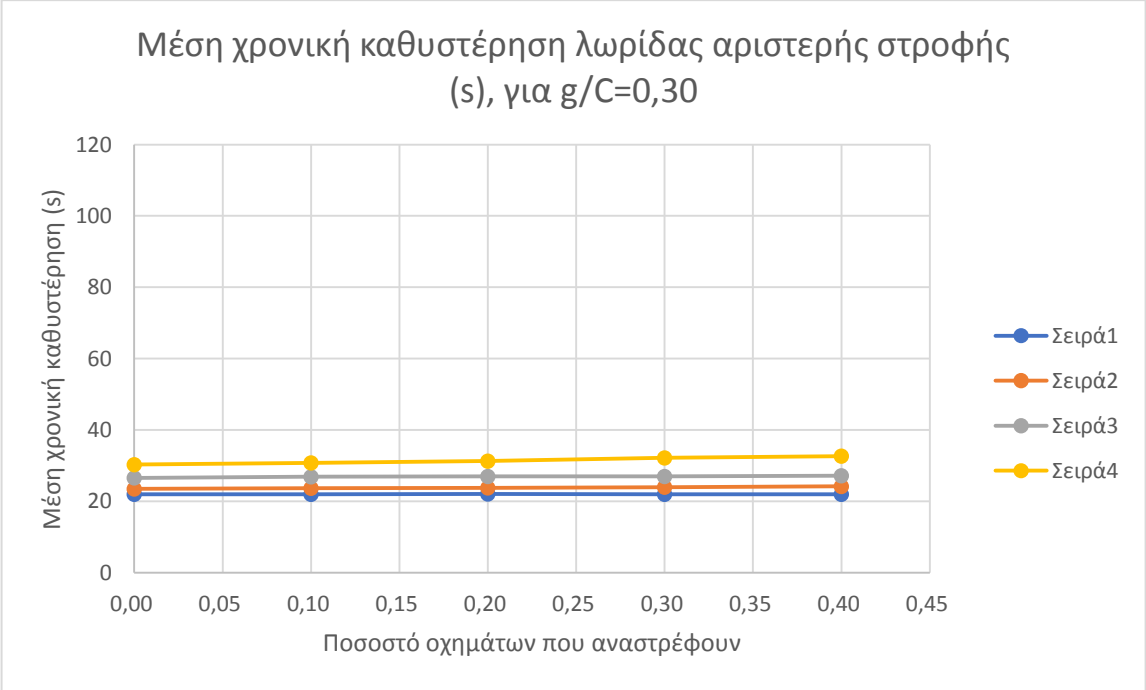
Τα πρώτα τρία διαγράμματα (Διάγραμμα 3, 4 και 5) αφορούν στην εξέταση της μεταβολής της μέσης καθυστέρησης που καταγράφεται στην λωρίδα αριστερής στροφής της δυτικής πρόσβασης σε σχέση με το ποσοστό των οχημάτων που αναστρέφουν στρέφουν. Κάθε ένα από τα τρία διαγράμματα αφορούν σε διαφορετικό λόγο g/C και περιλαμβάνουν πληροφορίες για διάφορα επίπεδα κυκλοφοριακού φόρτου της λωρίδας αριστερής στροφής της δυτικής πρόσβασης.



Διάγραμμα 3: Μέση χρονική καθυστέρηση σε (s) για g/C=0,20

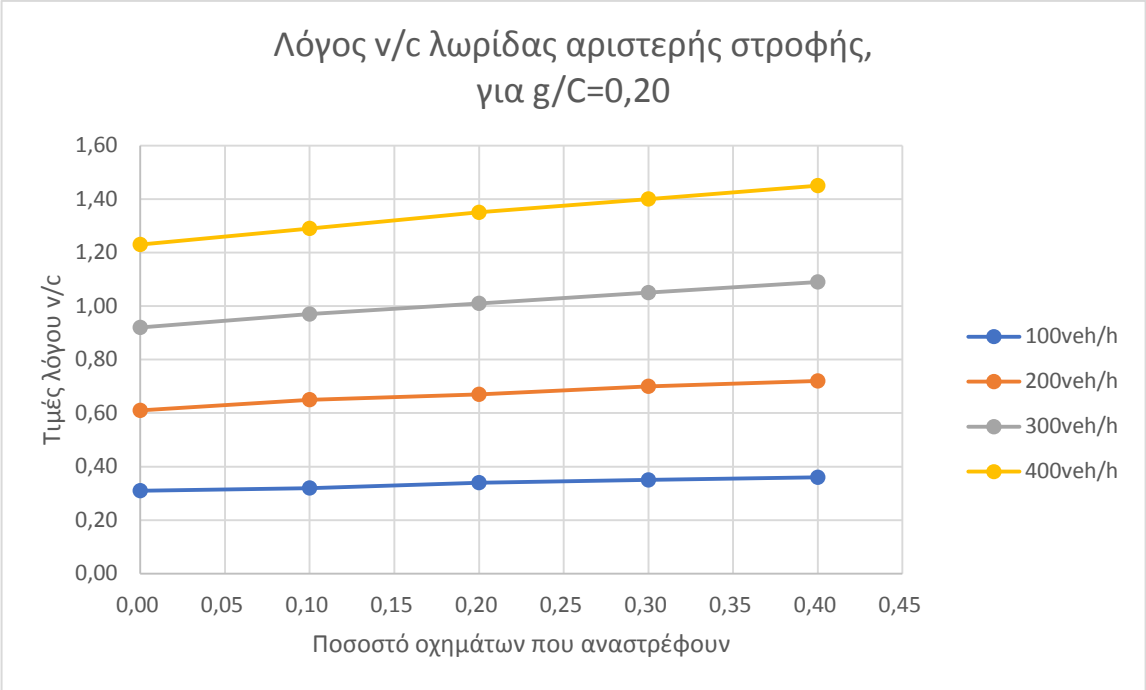


Διάγραμμα 4: Μέση χρονική καθυστέρηση σε (s) για g/C=0,25

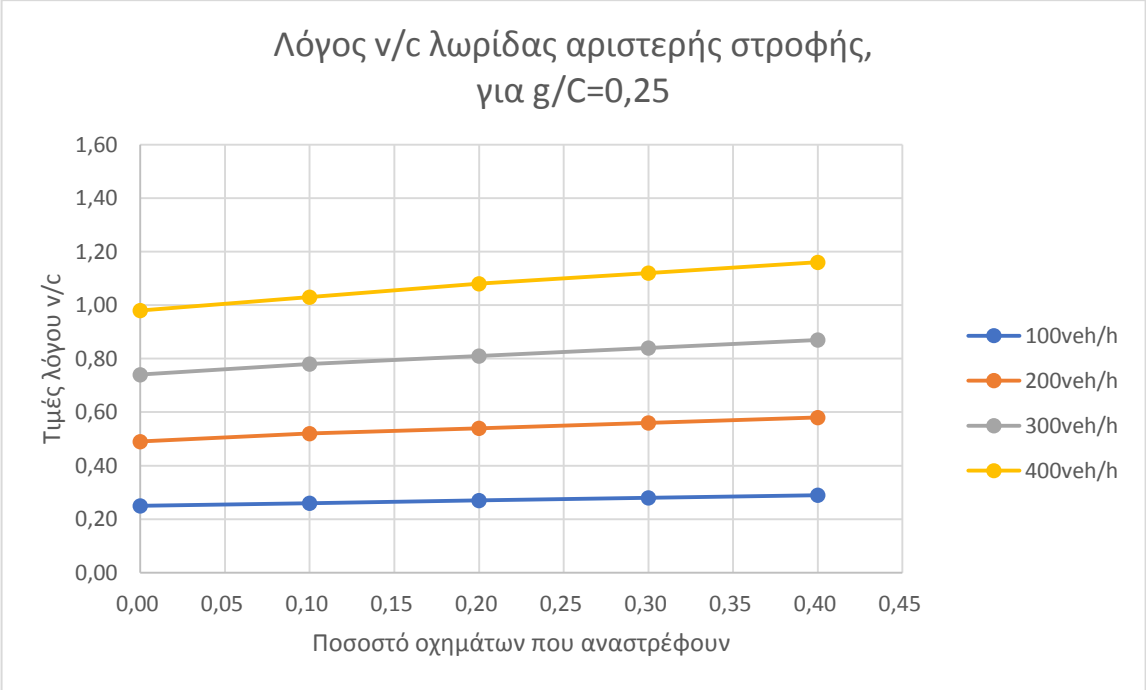


Διάγραμμα 5: Μέση χρονική καθυστέρηση σε (s) για g/C=0,30

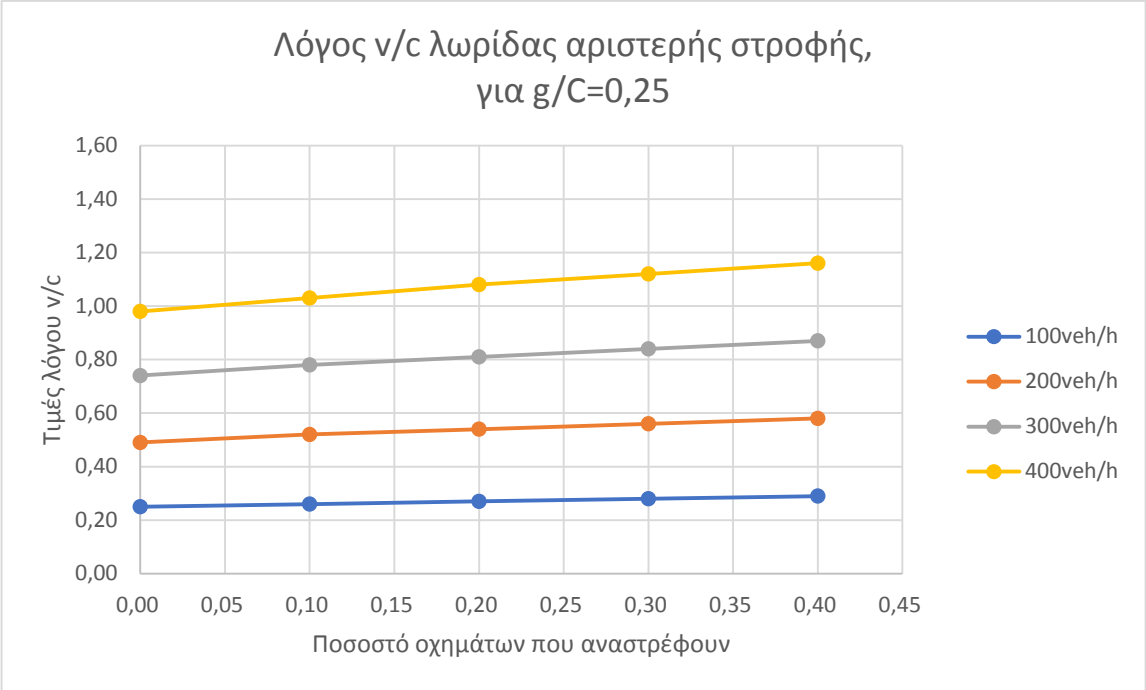
Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια άλλη τριάδα διαγραμμάτων (Διαγράμματα 6 έως 8), υπό τις ίδιες παραδοχές με την προηγούμενη με τη διαφορά να αφορά στον δείκτη που παρουσιάζεται που εν προκειμένω είναι ο λόγος v/c της ίδιας λωρίδας.



Διάγραμμα 6: Λόγος v/c για g/C=0,20

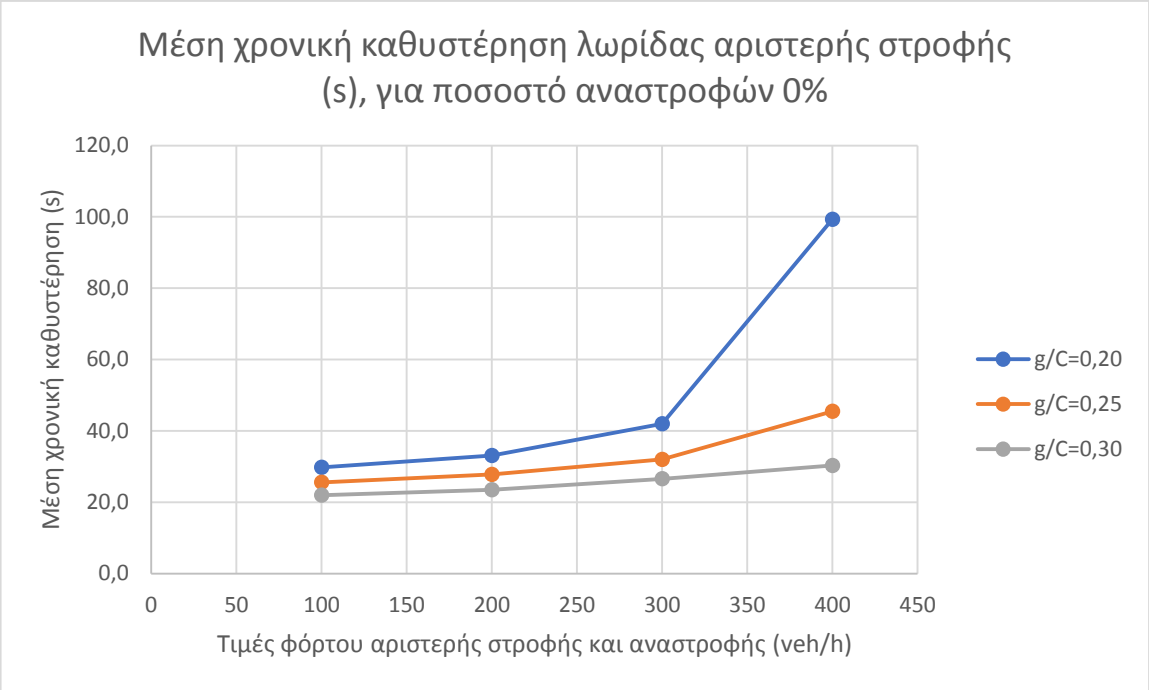


Διάγραμμα 7: Λόγος v/c για g/C=0,25

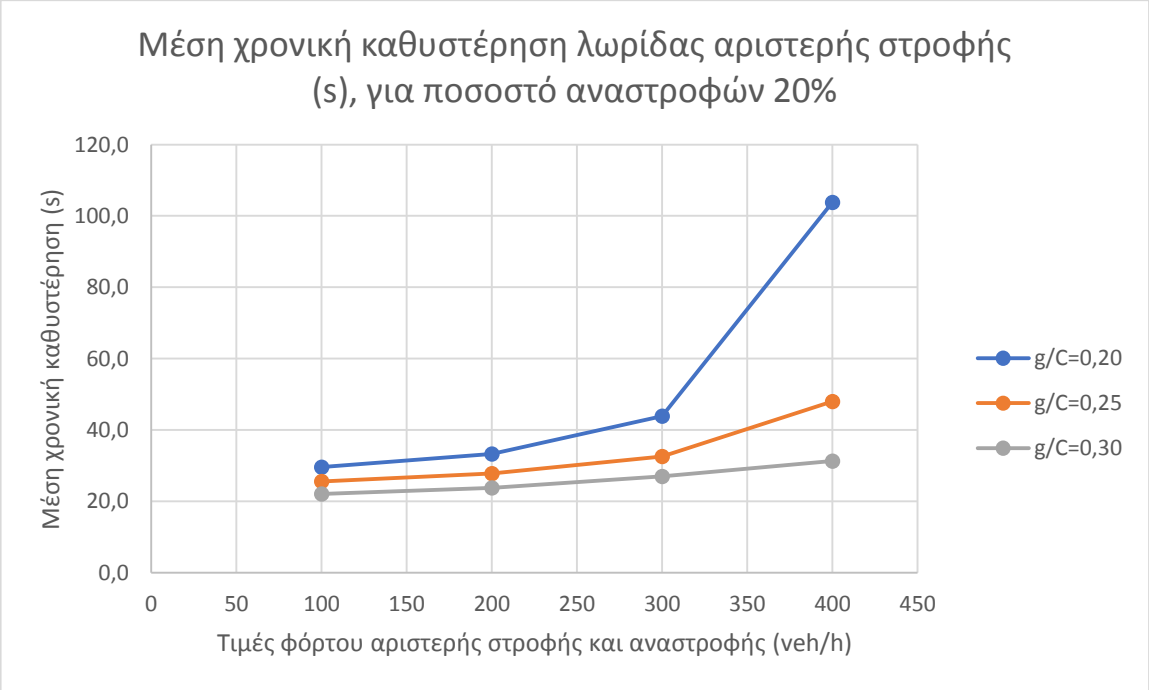


Διάγραμμα 8: Λόγος v/c για g/C=0,30

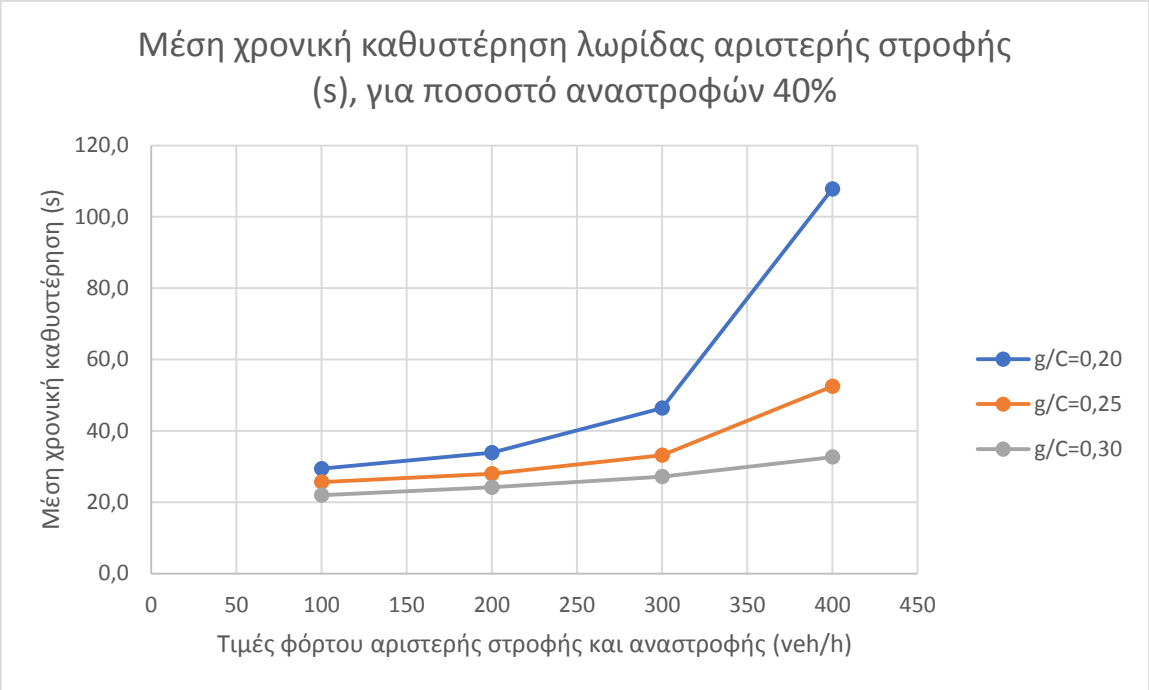
Στην επόμενη σειρά διαγραμμάτων (Διαγράμματα 9 έως 11) παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης χρονικής καθυστέρησης στην λωρίδα που εξυπηρετεί την αριστερή στροφή σε σχέση με τον συνολικό φόρτο. Η παρουσίαση γίνεται παραμετρικά για διάφορα επίπεδα τόσο του λόγου g/C, όσο και του ποσοστού των οχημάτων που αναστρέφουν.



Διάγραμμα 9: Μέση χρονική καθυστέρηση σε (s) για ποσοστό αναστροφών 0%

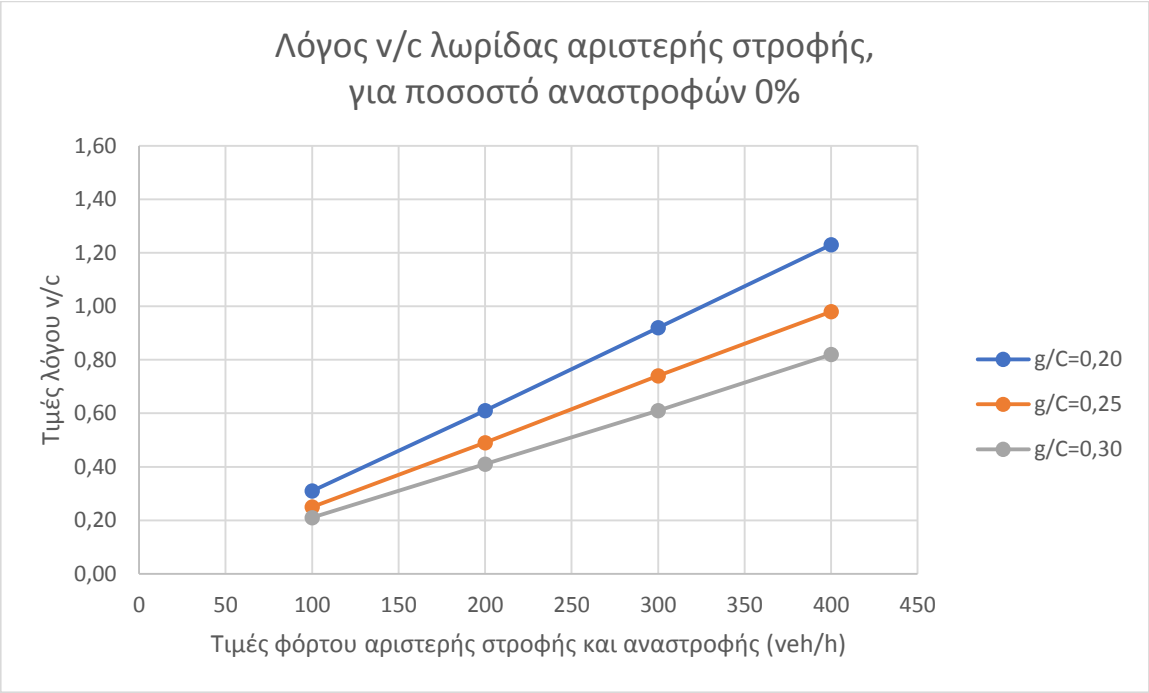


Διάγραμμα 10: Μέση χρονική καθυστέρηση σε (s) για ποσοστό αναστροφών 20%

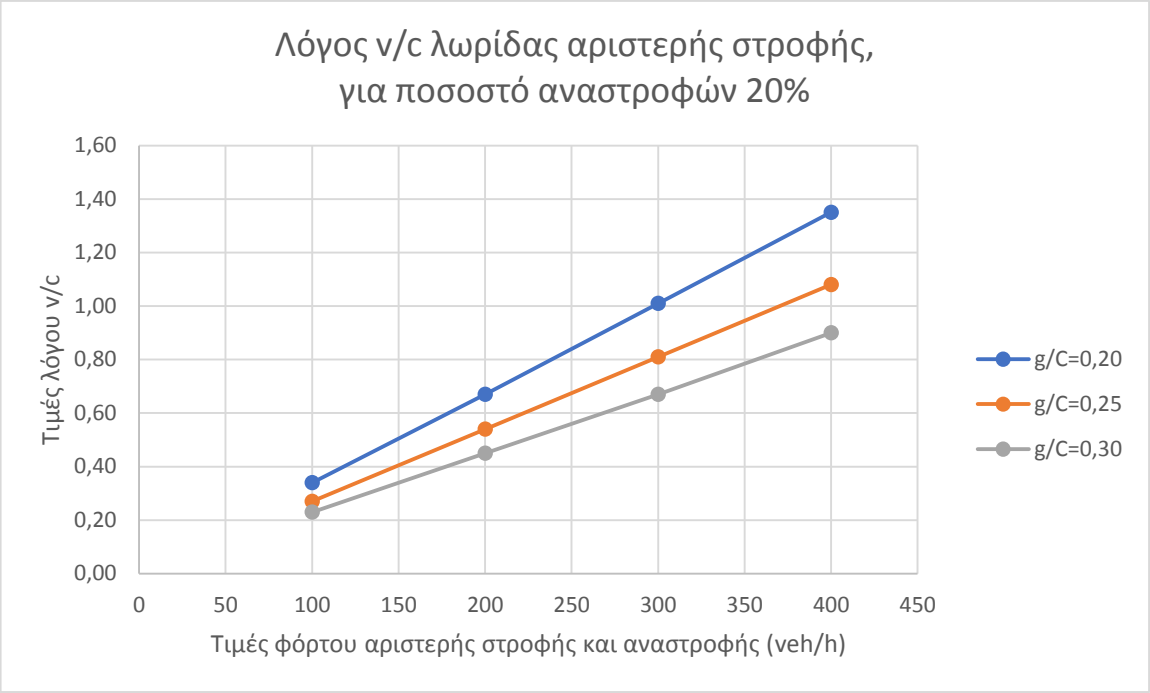


Διάγραμμα 11: Μέση χρονική καθυστέρηση σε (s) για ποσοστό αναστροφών 40%

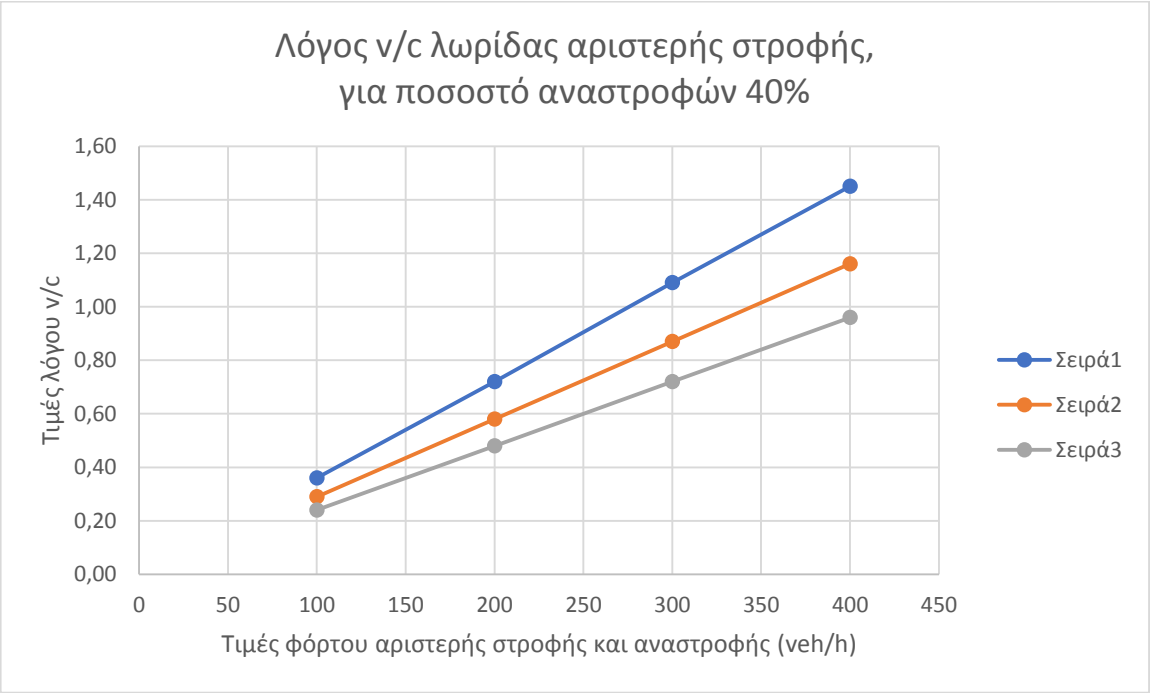
Αντιστοίχως για τις ίδιες παραδοχές, στα Διαγράμματα 12 έως 14 φαίνονται οι αντίστοιχες τιμές του λόγου v/c της ίδιας λωρίδας.



Διάγραμμα 12: Λόγος v/c για ποσοστό αναστροφών 0%



Διάγραμμα 13: Λόγος v/c για ποσοστό αναστροφών 20%

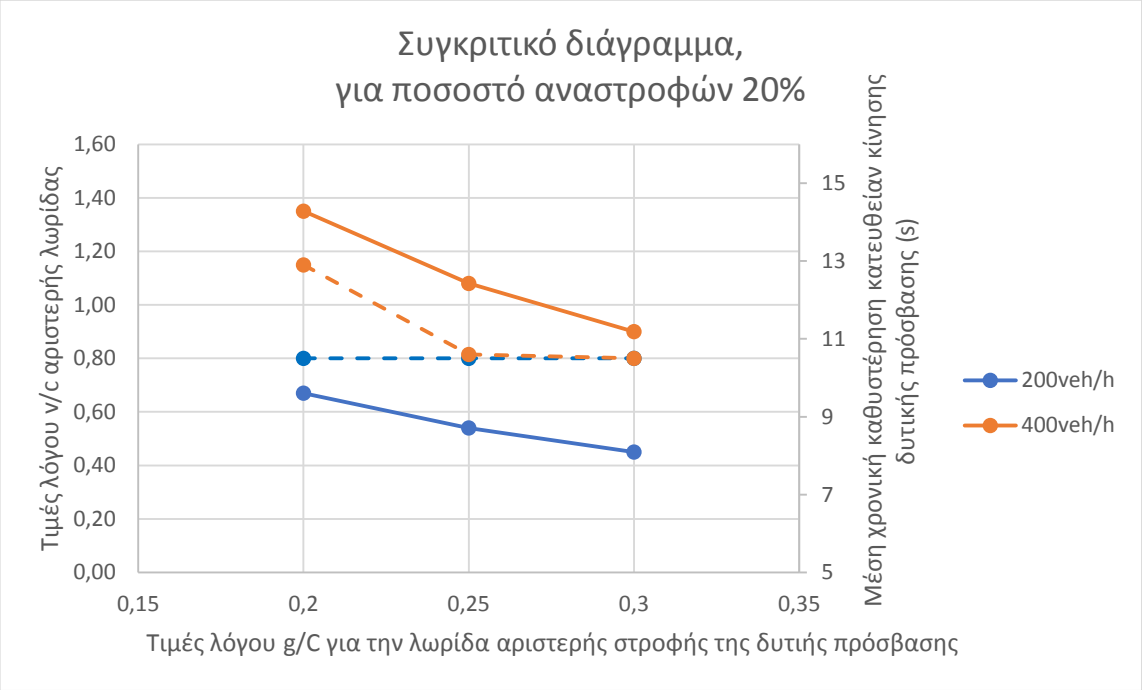


Διάγραμμα 14: Λόγος v/c για ποσοστό αναστροφών 40%

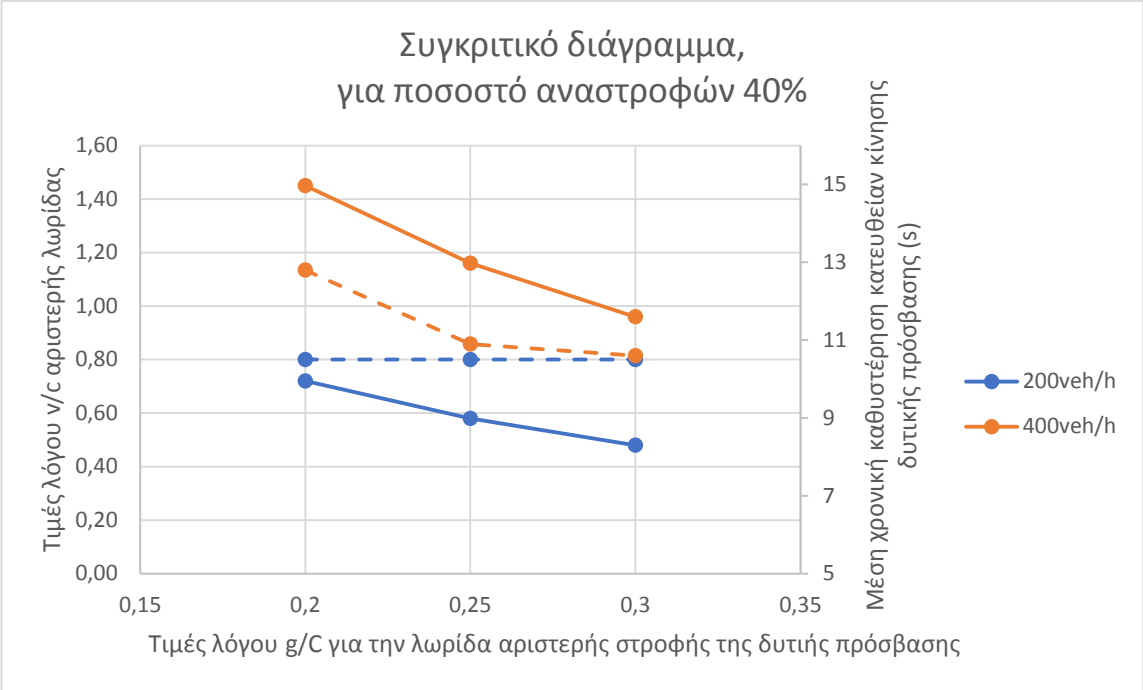
Στα επόμενα διαγράμματα γίνεται προσπάθεια να συσχετιστεί η επιρροή της κυκλοφοριακής κατάστασης που επικρατεί στην λωρίδα που στρέφει αριστερά από τη

δυτική πρόσβαση με την κυκλοφοριακή κατάσταση της λωρίδας της ίδιας πρόσβασης που εξυπηρετεί την κατευθείαν κίνηση.

Προκειμένου να γίνουν αναγνώσιμα τα ποσοτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 10 και 11 θα χρησιμοποιηθούν διαγράμματα δύο κατακόρυφων αξόνων. Στον κύριο (αριστερά) εκφράζεται η κυκλοφοριακή κατάσταση στην λωρίδα που εξυπηρετεί την αριστερή στροφή μέσω του δείκτη απόδοσης v/c. Ταυτόχρονα στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα (δεξιά) παρουσιάζεται η καταγεγραμμένη χρονική καθυστέρηση στην λωρίδα που εξυπηρετεί την κατευθείαν κίνηση. Ως μεταβλητή ελέγχου (οριζόντιος άξονας) επιλέγεται ο λόγος g/C. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τα επίπεδα φόρτου 200veh/h και 400veh/h και για τα επίπεδα αναστροφών 20% και 40%, ως τα πλέον αντιπροσωπευτικά.



Διάγραμμα 15: Λόγος v/c λωρίδας που στρέφει αριστερά και μέση χρονική καθυστέρηση κατευθείαν κίνησης δυτικής πρόσβασης για ποσοστό αναστροφών 20%



Διάγραμμα 16: Λόγος v/c λωρίδας που στρέφει αριστερά και μέση χρονική καθυστέρηση κατευθείαν κίνησης δυτικής πρόσβασης για ποσοστό αναστροφών 40%

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Βασικά συμπεράσματα

Η αριθμητική προσέγγιση της πληθώρας των παραγόμενων αποτελεσμάτων που εκτενώς παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο συνιστά την διαδικασία από την οποία δύναται να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Το γεγονός ότι για την κατάστρωση των σεναρίων που εξετάστηκαν χρησιμοποιήθηκαν τρεις μεταβλητές παράμετροι προσέδωσε στην παρούσα εργασία ένα μοντέλο με πολλούς βαθμούς ελευθερίας. Σε αυτό συνέβαλε η ταυτόχρονη χρήση, ως δεικτών απόδοσης (KPI's) δύο διαφορετικών μεγεθών για πλέον μιας λωρίδας, κίνησης ή πρόσβασης.

Με βάση τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι η πολυπλοκότητα του μοντέλου προσομοίωσης, που εκφράζεται με την μεταβολή πολλών τιμών, ως τιμές εισόδου αλλά και την ανάγνωση πλέον μίας τιμής εξόδου, επέφερε δύο σημαντικές διαπιστώσεις:

- Από τη μία μεριά, η πολυπλοκότητα προκάλεσε σημαντική δυσκολία στην ανάγνωση των αποτελεσμάτων, κυρίως γιατί αυτά δεν είχαν γραμμική ανάπτυξη. Τα αποτελέσματα ήταν συνάρτηση τριών διαφορετικών μεταβλητών με απότοκο να είναι δυσδιάκριτη – κάποιες φορές – η επιρροή της κάθε μίας.
- Από την άλλη μεριά το μειονέκτημα που προσέθεσε η πολυπλοκότητα αποτέλεσε και πλεονέκτημα. Οι πολλοί βαθμοί ελευθερίας του προσομοιώματος έδωσαν τη δυνατότητα να αναζητηθούν πολυπλοκότερες σχέσεις μεταξύ των φυσικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν την κυκλοφορία και τη συμπεριφορά ενός ισόπεδου κόμβου.

Εξετάζοντας κανείς τα αριθμητικά αποτελέσματα και συνυπολογίζοντας τα όσα ανωτέρω αναφέρθηκαν καταλήγει σε μία σειρά συμπερασμάτων. Τα συμπεράσματα αυτά, αν και κάποια προφανή, βρίσκουν γενικότερη εφαρμογή στο σύνολο των ισόπεδων κόμβων που έχουν κοινά γνωρίσματα με τον κόμβο που εξετάστηκε.

Ένα αρχικό συμπέρασμα αφορά στην πολυπλοκότητα και τον τρόπο που αυτή επενεργεί. Από ότι αναφέρθηκε παραπάνω η πολυπλοκότητα του προσομοιώματος επιδρά ταυτόχρονα αρνητικά και θετικά στην αξία μίας ερευνητικής διαδικασίας. Είναι, λοιπόν, στην ευχέρεια του εκάστοτε μελετητή να βρει το σημείο ισορροπίας που μπορεί να βελτιστοποιήσει τα αποτελέσματα της έρευνας που διεξάγει.

Παρατηρώντας κανείς τα αριθμητικά αποτελέσματα, είτε στην διαγραμματική είτε στην πινακοποιημένη μορφή τους, εύκολα συμπεραίνει πως οι διάφοροι δείκτες που δείχνουν την επίπεδο εξυπηρέτησης που προσφέρει ένας κόμβος, δεν εξαρτώνται από τις διάφορες μεταβλητές, όσο ο φόρτος παραμένει χαμηλά. Αυτό, όσο προφανές και αν φαίνεται, είναι σημαντικό, καθώς οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει κάποιος φόρτος, διαφορετικός ανάλογα με τις συνθήκες, πέραν από τον οποίο η σωστή επιλογή στοιχείων, όπως η αλληλουχία των φάσεων ή οι επιμέρους λόγοι g/C είναι σημαντική για τον περιορισμό των προβλημάτων στην κυκλοφορία. Συγκεκριμένα, όπως καταγράφηκε από τα αποτελέσματα, το ποσοστό των οχημάτων που επιθυμούν να αναστρέψουν δεν επηρεάζει σημαντικά (έως και καθόλου) την κυκλοφοριακή απόκριση της λωρίδας, όσο ο φόρτος παραμένει χαμηλά ή/και ο λόγος g/C κινείται σε υψηλές τιμές. Στην περίπτωση, όμως, που συνυπάρχουν υψηλοί φόρτοι με μικρές τιμές g/C, τότε φαίνεται πως το ποσοστό των οχημάτων που επιθυμεί να αναστρέψει επηρεάζει δυσμενώς της κυκλοφοριακή κατάσταση της λωρίδας.

Τέλος, σημαντικό είναι το συμπέρασμα που εξάγεται παρατηρώντας κανείς τη συμπεριφορά της λωρίδας που εξυπηρετεί την κατευθείαν κίνηση της δυτικής πρόσβασης. Υπενθυμίζεται ότι για τη συγκεκριμένη λωρίδα στα διάφορα σενάρια δεν έχει μεταβληθεί κανένα από τα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά της. Εξ αυτού του λόγου, θα ήταν λογικό στο σύνολο των σεναρίων να καταγράφεται η ίδια κυκλοφοριακή συμπεριφορά. Παρά ταύτα, στο σύνολο των σεναρίων που αφορούσαν χαμηλό λόγο g/C και υψηλό φόρτο στη λωρίδα που εξυπηρετεί την αριστερή στροφή, καταγράφηκε μια μικρή αλλά σταθερή αύξηση στην μέση χρονική καθυστέρηση των οχημάτων που κινούνται κατευθείαν. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί μέσω των αυξημένων αναγκών πλέξης που δημιουργούνται προ του κόμβου. Επιπλέον, αριθμητικά μπορεί να συνδεθεί με τις αυξημένες τιμές του λόγου v/c – σημαντικά άνω της μονάδας – που καταγράφονται ταυτόχρονα στην λωρίδα που εξυπηρετεί την αριστερή στροφή και την αναστροφή.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Παρά τα σημαντικά αποτελέσματα και συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία, είναι σαφές ότι το θέμα της επιρροής την αναστροφής σε σηματοδοτούμενα δίκτυα χρίζει σημαντικής διερεύνησης. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τιμές για τον μειωτικό συντελεστή της επιρροής των κινήσεων αναστροφής βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας που εξετάστηκε.

Κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε ότι διάφορες έρευνες κατέληξαν στην πρόταση διαφορετικών τιμών για το συγκεκριμένο συντελεστή. Οι προτεινόμενες τιμές αν και είχαν κοινά γνωρίσματα, όπως το γεγονός ότι σχετίζονται αρνητικά με το ποσοστό των οχημάτων που αναστρέφουν, ήταν διαφορετικές μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι βασίζονταν σε οδικά δίκτυα με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, διαφορετική σύνθεση κυκλοφορίας, ακόμη και διαφορετικής συμπεριφοράς οδηγούς.

Έχοντας αυτά υπόψη εκτιμάται ότι θα πρέπει να πραγματοποιηθεί περαιτέρω έρευνα στο πεδίο αυτό που θα βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα που θα συλλεχθούν από το ελληνικό οδικό δίκτυο. Αυτό θα είναι προϋπόθεση, ώστε οι τελικές τιμές του μειωτικού συντελεστή να αποτυπώνουν την τοπική ελληνική πραγματικότητα και να δίνουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα κατά την σχεδίαση ή εξέταση κάποιου κόμβου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abuhijleh, A., Dias, C., Alhajyaseen, W., & Muley, D. (2020). Effect of U-turns and heavy vehicles on the saturation flow rates of left-turn lanes at signalized intersections. *Sustainability*, *12*(11), 4485.

Bared, J. G., & Kaisar, E. I. (2002). Median U-turn design as an alternative treatment for left turns at signalized intersections.

Carter, D., Hummer, J. E., Foyle, R. S., & Phillips, S. (2005). Operational and safety effects of U-turns at signalized intersections. *Transportation Research Record*, *1912*(1), 11-18.

Hamad, K., & Abu-Hamda, H. (2017). Determining u-turn adjustment factor for signalized intersections in Doha, Qatar. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 120, p. 07008). EDP Sciences.

Mikhailov, A., & Shesterov, E. (2020). Estimation of traffic flow parameters of U-turns. *Transportation Research Procedia*, *50*, 458-465.

Li, W., & Tarko, A. P. (2007). *Effective and robust coordination of traffic signals on arterial streets* (No. FHWA/IN/JTRP-2006/26).

Liu, P., Lu, J. J., Fan, J., Pernia, J. C., & Sokolow, G. (2005). Effects of U-turns on capacities of signalized intersections. *Transportation research record*, *1920*(1), 74-80.

Liu, P., Lu, J. J., Zhou, H., & Sokolow, G. (2007). Operational effects of U-turns as alternatives to direct left-turns. *Journal of transportation engineering*, *133*(5), 327-334.

Stamatiadis, N., Kala, T. B., & Agent, K. R. (2004). *U-Turns at signalized intersections* (No. KTC-04-12/SPR258-03-3F). University of Kentucky Transportation Center.

Trasportation Research Board. (2000). *Highway Capacity Manual: HCM2000.* Washington

US Department of Transportation. Office of Operation (2021). *Traffic signal Timing Manual.* Retrieved 17 of January 2021 from https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08024/chapter6.htm

Wang, X. (2008). Effects of U-turns on capacity at signalized intersections and simulation of U-turning movement by synchro.

Zheng, C., Liu, P., Lu, J. J., & Chen, H. (2009, June). Evaluating the effect effects of U-turns on level of service of signalized intersections using synchro and SimTraffic. In *2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium* (pp. 971-976). IEEE.

Φραντζεσκάκης, Ι., & Γιαννόπουλος, Γ. (2004). *Σχεδιασμός των Μεταφορών και Κυκλοφοριακή Τεχνική*. Αθήνα: Παρατηρητής