



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Διπλωματική εργασία

**«Διερεύνηση της λειτουργίας ισόπεδων κυκλικών κόμβων
προτεραιότητας με την χρήση μικροσκοπικής προσομοίωσης»**

Βλάχος Βασίλειος

Επίβλεψη: Σπυροπούλου Ιωάννα, Επίκουρη καθηγήτρια ΕΜΠ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ



Αθήνα, Οκτώβριος 2019



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING ENGINEERING
DEP. OF INFRASTRUCTURE AND RURAL DEVELOPMENT

Diploma thesis

**«Investigation of the operational performance of priority level
roundabouts using microscopic simulation »**

Vlachos Vasileios

Supervisor: Spyropoulou Ioanna, Assistant Professor NTUA

LABORATORY OF TRANSPORTATION ENGINEERING



Athens, October 2019

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της λειτουργίας ισόπεδων κυκλικών κόμβων προτεραιότητας με τη χρήση μικροσκοπικής προσομοίωσης. Σκοπός της είναι η σύγκριση ενός κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων μ' έναν κυκλικό κόμβο turbo και η διερεύνηση της λειτουργίας τους για διαφορετικά σενάρια. Για την επίτευξη αυτού προσομοιώθηκε η λειτουργία τους με την χρήση του λογισμικού PTV Vissim. Εξετάστηκαν πολλά διαφορετικά σενάρια και σαν παράμετροι αυτών χρησιμοποιήθηκαν, το ελάχιστο χρονικό διάκενο, ο κυκλοφοριακός φόρτος και το ποσοστό των οχημάτων που στρίβουν στην πρώτη έξοδο. Χρησιμοποιήθηκαν πολλές τιμές των παραμέτρων και βρέθηκαν τα σενάρια που ευνοούν τον κάθε κόμβο. Παρατηρήθηκε ότι ο κυκλοφοριακός φόρτος επηρεάζει παρόμοια τους δύο κόμβους ενώ οι άλλοι δύο παράμετροι προκαλούν διαφορετικά αποτελέσματα για τον κάθε κόμβο. Τέλος αναδεικνύεται ο λειτουργικότερος κόμβος για κάθε κατάσταση κυκλοφορίας και επισημαίνονται οι περιπτώσεις που ευνοούν την αντικατάσταση ενός κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων από έναν κυκλικό κόμβο turbo κι αυτές που δεν την ευνοούν.

Λέξεις κλειδιά: μικροσκοπική προσομοίωση, κυκλικός κόμβος turbo, Vissim, μέση καθυστέρηση, ελάχιστο χρονικό διάκενο

Abstract

This thesis investigates the operation of priority level roundabouts using microscopic simulation. The aim of the investigation is to compare the operation of a two lanes roundabout and a turbo roundabout, under different scenarios, by simulating them through PTV Vissim program. Several different scenarios were investigated with the explored parameters being: the minimum time gap, traffic flow and the percentage of vehicles that leave the roundabout at its first exit. Based on the aforementioned parameters several scenarios were designed. The investigation determined the optimal scenario for each roundabout type. According to results, while the variation of traffic flow affects both of roundabouts in the same manner, the influence of the other two parameters differs between the different roundabouts. Last, the research results indicated the most functional roundabout each explored scenario and noted the cases where a two lanes roundabout has to be replaced by a turbo roundabout.

Key words: microscopic simulation, turbo roundabout, Vissim, average delay, minimum time gap

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	3
2.1 Βασικά κυκλοφοριακά μεγέθη.....	3
2.2 Κόμβοι	9
2.2.1 Γενικά στοιχεία κόμβων	9
2.2.2 Κυκλικοί κόμβοι.....	14
2.2.2.1 Κυκλικοί κόμβοι με 2 λωρίδες κυκλοφορίας	19
2.2.2.2 Κυκλικοί κόμβοι turbo.....	20
2.2.3 Διεθνή παραδείγματα εφαρμογής κυκλικών κόμβων turbo	22
2.2.4 Κυκλικοί κόμβοι στον Ελλαδικό χώρο.....	24
2.3 Κυκλοφοριακή προσομοίωση	25
2.3.1 Μαθηματικά πρότυπα προσομοίωσης.....	25
2.3.1.1 Μικροσκοπικά πρότυπα.....	25
2.3.1.2 Μεσοσκοπικά πρότυπα.....	30
2.3.1.3 Μακροσκοπικά πρότυπα.....	30
2.3.2 Υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης.....	30
2.3.3 Το λογισμικό PTV Vissim	32
2.4 Λειτουργία κυκλικών κόμβων	41
Κεφάλαιο 3 – Μεθοδολογία.....	46
3.1 Στοιχεία του προγράμματος Vissim	46
3.2 Σχεδιασμός των κόμβων διερεύνησης.....	54
3.3: Επιλογή μεταβλητών προσομοίωσης και καθορισμός σεναρίων διερεύνησης.....	58
3.3.1: Επιλογή κυκλοφοριακού φόρτου.....	58
3.3.2: Επιλογή ελάχιστου χρονικού διακένου.....	60
3.3.2: Επιλογή ποσοστού δεξιάς στροφής.....	60
3.4: Επιλογή του κατάλληλου αριθμού προσομοιώσεων	61
3.5: Παραδοχές και σταθεροί παράμετροι προσομοίωσης	67
3.6: Καθορισμός τελικών σεναρίων μελέτης.....	69
Κεφάλαιο 4: Ανάλυση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων	71
4.1 Γενικά στοιχεία.....	71
4.2 Επιρροή της κατανομής των μετακινήσεων.....	71
4.3: Επιρροή του φόρτου κυκλοφορίας.....	78
4.4: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου	84

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	90
5.1 Σύνοψη συμπερασμάτων	90
5.2 Προτάσεις για διερεύνηση	92

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1 : Χώρες και αριθμός των κυκλικών κόμβων turbo.....	23
Πίνακας 3.1 – Επιλογή κυκλοφοριακού φόρτου διερεύνησης – Μέση καθυστέρηση	59
Πίνακας 3.2– Επιλογή διακένου διερεύνησης – Μέση καθυστέρηση	60
Πίνακας 3.3 – Επιλογή ποσοστού δεξιάς στροφής – Μέση καθυστέρηση.....	61
Πίνακας 3.4 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 1.....	62
Πίνακας 3.5 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 2.....	63
Πίνακας 3.7 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 3	63
Πίνακας 3.8 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 4	64
Πίνακας 3.9 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 5.....	65
Πίνακας 3.10 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 6.....	65
Πίνακας 3.11 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 7.....	66
Πίνακας 3.12 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 8.....	67
Πίνακας 3.13 – Μεταβλητές προσομοίωσης	69
Πίνακας 4.1: Ποσοστά στροφής σε κάθε έξοδο του κυκλικού κόμβου.....	71
Πίνακας 4.2 : Πίνακας μέσης καθυστέρησης.....	75
Πίνακας 4.3 : Πίνακας μεταβολών με βάση το ποσοστό στροφής στην πρώτη έξοδο	75
Πίνακας 4.4: Μήκη ουρών – Κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων.....	76
Πίνακας 4.5 : Μήκη ουρών – κυκλικός κόμβος turbo.....	77
Πίνακας 4.6: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων	87
Πίνακας 4.8: Μήκος ουρών – κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων	88
Πίνακας 4.9: Μήκος ουρών – κυκλικός κόμβος turbo	88

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1 - Φυσική και λειτουργική περιοχή κόμβου- Πηγή: Αντωνίου κ.α.,2012.....	12
Εικόνα 2.2 - Τύποι ελιγμών- Πηγή: Φραντζεσκάκης κ.α, 2009	13
Εικόνα 2.3 - Σημεία εμπλοκής οχημάτων και οχημάτων-πεζών σε ισόπεδο κόμβο διασταύρωσης και κυκλικό κόμβο αντίστοιχα Πηγή: ΥΠΥΜΕΔΙ,2011	14
Εικόνα 2.4 - Τρίγωνα ορατότητας (προσέγγισης και αναχώρησης)- Πηγή: Σημειώσεις Β. Ψαριανού ΣΑΤΜ-ΕΜΠ.....	15
Εικόνα 2.5: Κυκλικός κόμβος με τέσσερα σκέλη- Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Οδοποιίας ΙΙΙ ΣΑΤΜ-ΕΜΠ	17
Εικόνα 2.6: Κυκλικός κόμβος με τρία σκέλη (T)- Πηγή: Rahmi Akcelik, 2009.....	17
Εικόνα 2.7 : Αστικός κυκλικός κόμβος 2 λωρίδων – Annapolis, Maryland, United States – Πηγή: National Cooperative Highway Research Program, 2010	22
Εικόνα 2.8: Τυπικά χαρακτηριστικά σπειροειδούς κυκλικού κόμβου - Πηγή: ΥΠΥΜΕΔΙ, 2011	23
Εικόνα 2.9 : Turbo-roundabout – Πηγή : Giuffre et al ., 2009.....	24
Εικόνα 2.10: Κυκλικός κόμβος, Πλατεία Μεταξουργείου – Πηγή: www.instantstreetview.com	26
Εικόνα 2.11 - Το όχημα που οδηγεί και το όχημα που ακολουθεί, καθώς και ο χρονικός τους διαχωρισμός- Πηγή: Ahmed, 1999.....	26
Εικόνα 2.12 - Η δομή του μοντέλου αλλαγή λωρίδας- Πηγή: Ahmed, 1999	31
Εικόνα 2.13 : Γραφική αναπαράσταση των οριακών τιμών, ταχυτήτων και αποστάσεων – Πηγή: Weidemann, 1974.....	37
Εικόνα 3.1 : Σχεδιασμός διαδρομής.....	49
Εικόνα 3.2 : Περιοχές ελάττωσης ταχύτητας - Πηγή:PTV Vissim 11	50
Εικόνα 3.3 : Σημεία καθορισμού ταχύτητας - Πηγή:PTV Vissim 11	51
Εικόνα 3.4 : Σημεία εμπλοκής - Πηγή:PTV Vissim 11	52
Εικόνα 3.5 : Κανόνες προτεραιότητας - Πηγή: PTV Vissim 11	53
Εικόνα 3.6 : Ελάχιστο κρίσιμο διάκενο - Πηγή:PTV Vissim 11	54
Εικόνα 3.7 : Κυκλικός κόμβος 2 λωρίδων.....	57
Εικόνα 3.8 : Κυκλικός κόμβος turbo	58
Εικόνα 3.9 : Κυκλικός κόμβος 2 λωρίδων	59

Εικόνα 3.10 : Κυκλικός κόμβος turbo	59
Εικόνα 3.21 : Car following model 1 – Πηγή: PTV Vissim 11	70
Εικόνα 3.22 : Car following model 2 – Πηγή: PTV Vissim 11	71
Εικόνα 3.23 : Lane change – Πηγή: PTV Vissim 11	71
Εικόνα 4.1: Σχέση φόρτου και ποσοστού στροφής στην πρώτη έξοδο – Κυκλικός κόμβος 2 λωρίδων.....	73
Εικόνα 4.2: Σχέση κυκλοφοριακού φόρτου και ποσοστού στροφής στην πρώτη έξοδο – κυκλικός κόμβος turbo	74
Εικόνα 4.3: Σχέση ελάχιστου χρονικού διακένου και ποσοστού στροφής στην πρώτη έξοδο – Κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων	75
Εικόνα 4.4: Σχέση ελάχιστου χρονικού διακένου και ποσοστού στροφής στην πρώτη έξοδο – κυκλικός κόμβος turbo	76
Εικόνα 4.5: Διάγραμμα μέσης ταχύτητας με ποσοστό στροφής στην πρώτη έξοδο	80
Εικόνα 4.6: Διάγραμμα φόρτου μέσης καθυστέρησης – Κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων	81
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα κυκλοφοριακού φόρτου μέσης καθυστέρησης – κυκλικός κόμβος turbo	81
Εικόνα 4.8: Επιρροή κυκλοφοριακού φόρτου και ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – Κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων	82
Εικόνα 4.9: Επιρροή κυκλοφοριακού φόρτου και ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – κυκλικός κόμβος turbo	82
Εικόνα 4.10: Διάγραμμα σύγκρισης των κόμβων	83
Εικόνα 4.11: Σύγκριση των κόμβων μέσω μπαρών	84
Εικόνα 4.12: Σύγκριση των δύο κόμβων – Διάκενο ίσο 3 δλ	84
Εικόνα 4.13: Σύγκριση των δύο κόμβων – Διάκενο ίσο με 5 δλ	85
Εικόνα 4.14: Σύγκριση των δύο κόμβων- Ποσοστό δεξιάς στροφής ίσο με 20%	86
Εικόνα 4.14: Σύγκριση των δύο κόμβων- Ποσοστό δεξιάς στροφής ίσο με 60%	86
Εικόνα 4.15: Διάγραμμα ταχύτητας – κυκλοφοριακού φόρτου	87
Εικόνα 4.16: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – Κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων	88
Εικόνα 4.17: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – κυκλικός κόμβος turbo	89
Εικόνα 4.18: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων	90

Εικόνα 4.19: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση - κυκλικός κόμβος turbo	90
Εικόνα 4.20: Διάγραμμα ταχύτητας - ελάχιστου χρονικού διακένου.....	92

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο στα σημερινά οδικά δίκτυα είναι οι κυκλοφοριακοί κόμβοι. Οι τύποι κόμβων ποικίλλουν αναλόγως με το αν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο (ισόπεδοι ή ανισόπεδοι), με τον αριθμό των σκελών τους (τετρασκελής ή τρισκελής) ή μπορούν να διαχωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με το αν η κυκλοφορία τους ρυθμίζεται από φωτεινή σηματοδότηση ή βάσει κανόνων προτεραιότητας. Ένας άλλος τύπος κόμβων είναι οι κυκλικοί οι οποίοι εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Οι κυκλικοί κόμβοι χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο διεθνώς με στόχο την ταχύτερη και ασφαλέστερη εξυπηρέτηση της κυκλοφοριακής ζήτησης.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η ανάλυση και η σύγκριση ενός τυπικού κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και ενός κυκλικού κόμβου turbo, χρησιμοποιώντας τεχνικές μικροσκοπικής προσομοίωσης μέσω του λογισμικού προσομοίωσης PTV Vissim. Εξετάστηκαν διάφορα σενάρια μέσω των οποίων διερευνήθηκε το επίπεδο λειτουργίας των δύο κόμβων. Οι παράμετροι επιρροής που διερευνήθηκαν ήταν ο κυκλοφοριακός φόρτος εισόδου, το ελάχιστο χρονικό διάκενο και το ποσοστό των οχημάτων που στρίβουν στην πρώτη έξοδο.

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρακάτω:

Στο δεύτερο κεφάλαιο, πραγματοποιείται η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε ώστε να αντληθεί το κατάλληλο επιστημονικό υπόβαθρο που ήταν απαραίτητο για την εκπόνηση της εργασίας. Αρχικά αναφέρονται βασικές έννοιες της κυκλοφοριακής τεχνικής. Στη συνέχεια αναφέρονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των κυκλικών κόμβων γενικά αλλά και των συγκεκριμένων τύπων κόμβων που εξετάζονται. Επιπλέον αναλύονται τα μαθηματικά πρότυπα προσομοίωσης και τα αντίστοιχα λογισμικά προσομοίωσης με ιδιαίτερη βαρύτητα να δίνεται στο λογισμικό Vissim. Τέλος έγινε αναφορά σε έρευνες που σχετίζονται με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Αρχικά περιγράφονται οι λειτουργίες του μικροσκοπικού λογισμικού προσομοίωσης Vissim και οι δυνατότητες του με έμφαση σε αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Στη συνέχεια αναφέρεται αναλυτικά η διαδικασία επιλογής των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στα σενάρια της προσομοίωσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα αυτά περιγράφουν τη λειτουργία του κόμβου και είναι η μέση καθυστέρηση, η μέση ταχύτητα και το μήκος των ουρών στις εισόδους των κόμβων. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων έγινε μέσω διαγραμμάτων και πινάκων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η σύνοψη των συμπερασμάτων για τη λειτουργία των δύο κόμβων με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4. Τέλος γίνεται η σύγκριση των δύο κυκλικών κόμβων και αναλύονται οι περιπτώσεις που υπερτερεί ο κάθε κόμβος με βάση των σενάρια των προσομοιώσεων.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Βασικά κυκλοφοριακά μεγέθη

Η κυκλοφοριακή τεχνική (traffic engineering) ασχολείται με τον σχεδιασμό (planning), τη μελέτη (design), τη λειτουργία (operation) και τη διαχείριση (management) των οδικών μεταφορών. Στόχος είναι η ασφαλέστερη, ταχεία και οικονομική μετακίνηση προσώπων και αγαθών με τις ελάχιστες δυνατές επιπτώσεις στο φυσικό και κοινωνικό περιβάλλον. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η έννοια της κυκλοφοριακής ροής. Η κυκλοφοριακή ροή (traffic flow) αφορά στην κίνηση οχημάτων ή πεζών σε μια οδό και προσδιορίζεται από διάφορα μεγέθη κυκλοφοριακής ροής (traffic flow variables) τα οποία είναι δυνατόν να μετρηθούν. Τα βασικά κυκλοφοριακά μεγέθη είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος (traffic flow), η ταχύτητα (speed) των οχημάτων και η πυκνότητα (density).

Κυκλοφοριακός φόρτος (traffic flow) :

Ορίζεται ως ο αριθμός των οχημάτων που διέρχονται από τη διατομή μιας οδού στη μονάδα του χρόνου. Εκφράζεται σαν οχήματα ανά μονάδα χρόνου π.χ. οχήματα ανά ώρα, ημέρα κλπ.

$q = \frac{n(x)}{T}$, όπου ως $n(x)$ ορίζεται ο αριθμός των οχημάτων που διέρχονται από μια διατομή στη θέση x σε χρονικό διάστημα T .

Ο κυκλοφοριακός φόρτος έχει 3 κύκλους διακύμανσης: κατά την διάρκεια ενός έτους ή ενός μήνα, μιας ημέρας, μιας ώρας.

- Η μηνιαία ή εποχιακή διακύμανση της ζήτησης εκφράζει τα κοινωνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής.
- Η ημερήσια διακύμανση του φόρτου, στη διάρκεια μιας εβδομάδας εξαρτάται από τον τύπο της οδού. Οδοί που συνδέονται με τις μετακινήσεις από και προς τους χώρους εργασίας παρουσιάζουν υψηλούς φόρτους τις καθημερινές κυρίως. Οδοί που συνδέονται με τόπους αναψυχής, παρουσιάζουν υψηλούς φόρτους το Σαββατοκύριακο.
- Η ωριαία διακύμανση συνδέεται άμεσα με τον σκοπό της μετακίνησης και το ωράριο εργασίας.

Ο κυκλοφοριακός φόρτος λαμβάνει τις υψηλότερες τιμές του συνήθως τις πρωινές και απογευματινές χρονικές περιόδους, επειδή τότε οι χρήστες πηγαίνουν προς και επιστρέφουν από την εργασία τους. Η ώρα που ο κυκλοφοριακός φόρτος σημειώνει την υψηλότερη τιμή του λέγεται ώρα αιχμής. Στον σχεδιασμό και στη λειτουργία των συγκοινωνιακών υποδομών, συνήθως λαμβάνεται υπόψη ο φόρτος αιχμής καθώς σχεδιάζουμε πάντα υπέρ της ασφάλειας.

Ρυθμός ροής (flow rate)

Είναι ο αριθμός των οχημάτων που διέρχονται από μια διατομή οδού κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου μικρότερης της ώρας, ανηγμένος στην ώρα. Εκφράζεται πάντα ως οχήματα ανά ώρα. Χρησιμοποιείται περίοδος μέτρησης 15 λεπτών.

Σύνθεση κυκλοφορίας (traffic composition)

Με τον όρο αυτό περιγράφεται η ποσοστιαία κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου ανά τύπο οχήματος. Ανάλογα με τον σκοπό για τον οποίο θα χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία σύνθεσης κυκλοφορίας και το αν οι μετρήσεις πραγματοποιηθούν σε αστικές ή υπεραστικές οδούς, διακρίνονται διάφορες κατηγορίες οχημάτων. Για αστικές οδούς χρησιμοποιούνται συνήθως οι παρακάτω κατηγορίες:

- Επιβατικά οχήματα (Ι.Χ., Ταξί)
- Λεωφορεία, πούλμαν, φορτηγά
- Μεγάλα φορτηγά αυτοκίνητα
- Μοτοσικλέτες, μοτοποδήλατα
- Ποδήλατα

Η σύνθεση της κυκλοφορίας είναι σημαντική για την ανάλυση στα παρακάτω:

- Υπολογισμός ικανότητας οδών
- Διαχείριση κυκλοφοριακής ροής
- Ανάλυση οδικών ατυχημάτων
- Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Σχεδιασμός και διαχείριση οδοστρωμάτων

Η σύνθεση της κυκλοφορίας μεταβάλλεται και επηρεάζεται από παράγοντες όπως οι χρήσεις γης των περιοχών που εξυπηρετεί το οδικό δίκτυο, οι επιμέρους δραστηριότητες σε κάθε περιοχή και το χρονικό διάστημα μελέτης (π.χ. πρωινές ή βραδινές ώρες).

Μονάδες επιβατικών οχημάτων – MEA (Passenger car units –PCU)

Κάθε κατηγορία οχήματος επηρεάζει διαφορετικά την κυκλοφοριακή ροή. Γι αυτό χρησιμοποιούνται σαν κοινή μονάδα μέτρησης των οχημάτων οι Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων. Η επίδραση κάθε κατηγορίας οχήματος στην κυκλοφοριακή ροή εξαρτάται από το μέγεθος και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των οχημάτων. Επιπλέον η επίδραση αυτή διαφοροποιείται με βάση τα γεωμετρικά και κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά των οδών.

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της κυκλοφορίας είναι η ταχύτητα με την οποία κινούνται τα οχήματα. Στην κυκλοφοριακή ροή χρησιμοποιούνται διάφορα είδη ταχυτήτων ανάλογα με την εκάστοτε χρήση της.

Ταχύτητα σημείου (spot speed)

Είναι η ταχύτητα που έχει ένα όχημα όταν διέρχεται από συγκεκριμένη διατομή.

Ταχύτητα διαδρομής (travel speed)

Είναι η μέση ταχύτητα με την οποία κινήθηκε ένα όχημα από το σημείο προέλευσης στο σημείο προορισμού, υπολογιζομένων και των καθυστερήσεων λόγω στάσεων. Για τον υπολογισμό της διαιρείται η συνολική απόσταση που διανύθηκε με τον συνολικό χρόνο που απαιτήθηκε για την διαδρομή.

Ταχύτητα λειτουργίας (operating speed)

Είναι η μέγιστη ταχύτητα διαδρομής με την οποία μπορεί να κινηθεί ένα όχημα σε δεδομένο τμήμα του οδικού δικτύου με δεδομένες τις καλές καιρικές συνθήκες, την υπάρχουσα κάθε φορά κυκλοφορία και χωρίς να ξεπεράσει τη μέγιστη ταχύτητα ασφαλείας.

Μέση ταχύτητα (average highway speed)

Είναι ο σταθμισμένος μέσος όρος των ταχυτήτων μελέτης των επιμέρους τμημάτων μιας οδού.

Ταχύτητα ελεύθερης ροής (free flow speed)

Είναι η ταχύτητα λειτουργίας όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι πολύ χαμηλός (συνθήκες ελεύθερης ροής).

Χρονικός και χωρικός διαχωρισμός (space and time headway)

Ο διαχωρισμός σε μια λωρίδα κυκλοφορίας είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων ως προς ένα σταθερό σημείο αναφοράς τους, για παράδειγμα ο μπροστινός προφυλακτήρας ή οι μπροστινοί τροχοί. Η απόσταση αυτή σε μήκος είναι ο χωρικός

διαχωρισμός και σε χρόνο ο χρονικός διαχωρισμός. Στη συνέχεια θα οριστούν κάποιες βασικές έννοιες της κυκλοφοριακής ικανότητας.

Ροή κορεσμού (saturation flow)

Είναι ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος που είναι δυνατό να διέλθει από μία διατομή ή ομάδα λωρίδων που εξυπηρετούν από κοινού μια κατεύθυνση, υπό τις επικρατούσες οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες.

Κυκλοφοριακή ικανότητα (traffic capacity)

Η κυκλοφοριακή ικανότητα εκφράζει το μέγιστο ωριαίο ρυθμό ροής οχημάτων ή προσώπων, δηλαδή τα οχήματα ή πρόσωπα που είναι δυνατό να περάσουν από ένα δεδομένο σημείο ή ένα ομοιόμορφο τμήμα λωρίδας κυκλοφορίας ή οδού, κατά μία κατεύθυνση ή και κατά τις δύο κατευθύνσεις, κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου, υπό τις οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες καθώς και τις συνθήκες ελέγχου της κυκλοφορίας που επικρατούν.

Βαθμός κορεσμού (degree of saturation)

Ορίζεται ως το πηλίκο του κυκλοφοριακού φόρτου που θέλει να εξυπηρετηθεί από μία διατομή (ζήτηση), προς την κυκλοφοριακή ικανότητα της διατομής.

Στάθμη εξυπηρέτησης (level of service)

Αποτελεί ένα ποιοτικό μέγεθος που εκφράζει τις συνθήκες στις οποίες λειτουργεί ένα ρεύμα κυκλοφορίας, όπως τις αντιλαμβάνονται οι οδηγοί ή οι επιβάτες (Φραντζεσκάκης, Πιτσιάβα, & Γκόλιας, 2009). Έχει καθιερωθεί από το 1965 (Η.Π.Α.) μια κλίμακα από το A ως το F καλύπτοντας όλες τις πιθανές συνθήκες λειτουργίας από την καλύτερη: A, ελεύθερη ροή (free flow), μέχρι την χειρότερη: F, κορεσμός και κατάρρευση κυκλοφορίας (saturation). Οι παράμετροι βάσει των οποίων προκύπτει η τιμή της στάθμης εξυπηρέτησης είναι η ταχύτητα και ο χρόνος διαδρομής, η ελευθερία ελιγμών, οι διακοπές της κυκλοφοριακής ροής, η ασφάλεια και η άνεση. Η στάθμη εξυπηρέτησης όπως και η κυκλοφοριακή ικανότητα επηρεάζεται από τις οδηγικές συνθήκες, τις κυκλοφοριακές συνθήκες, τις συνθήκες ελέγχου και τις νέες τεχνολογίες.

Οι οδηγικές συνθήκες περιλαμβάνουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού, τα οποία είναι σταθερά εκτός από τις περιπτώσεις της κατασκευής νέου οδικού έργου ή βελτίωσης του υφιστάμενου. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι το πλάτος των λωρίδων, ο τύπος της οδού, τα πλάτη των ερεισμάτων και η απόσταση που βρίσκονται τα παράπλευρα της οδού εμπόδια, η

ταχύτητα μελέτης, η οριζόντια και η κατακόρυφη χάραξη και η ύπαρξη αποκλειστικών λωρίδων στροφής σε διασταυρώσεις.

Οι κυκλοφοριακές συνθήκες εξαρτώνται από την φύση της κυκλοφορίας σε ένα υπό μελέτη οδικό δίκτυο και μεταβάλλονται χρονικά. Πιο συγκεκριμένα ένα οδικό τμήμα μπορεί να παρουσιάζει διαφορετικές κυκλοφοριακές συνθήκες σε διαφορετικές ώρες της ημέρας. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν η σύνθεση κυκλοφορίας αλλά και η κατανομή της κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση και λωρίδα.

Οι συνθήκες ελέγχου αναφέρονται στη ρύθμιση της κυκλοφορίας με τη σήμανση και τους κανόνες κυκλοφορίας που ισχύουν. Κάποιοι σημαντικοί τρόποι ελέγχου που επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ικανότητα είναι ο καθορισμός ειδικών λωρίδων για λεωφορεία καθώς και οι μονοδρομήσεις, οι οποίες περιορίζουν τον αριθμό των σημείων συνάντησης των κυκλοφοριακών ρευμάτων.

Τέλος η στάθμη εξυπηρέτησης επηρεάζεται επίσης από την εισαγωγή νέων τεχνολογιών όπως για παράδειγμα τα συστήματα ελέγχου πορείας (Adaptive Cruise Control (ACC)) που διαθέτουν τα οχήματα και με τη βοήθεια αισθητήρων επιταχύνουν ή επιβραδύνουν για να διατηρήσουν ένα επιθυμητό χρονικό διαχωρισμό, μια επιθυμητή ταχύτητα ή να αποφύγουν την σύγκρουση.

Ουρά (Queue)

Αποτελεί ένα ποσοτικό μέγεθος, σημαντικό για το σχεδιασμό και τη λειτουργία συγκοινωνιακών δικτύων, που χρησιμοποιείται για την αποτύπωση των συνθηκών κυκλοφορίας που επικρατούν (Φραντζεσκάκης, Πιτσιάβα, & Γκόλιας, 2009). Δημιουργείται όταν ο ρυθμός άφιξης των οχημάτων είναι μεγαλύτερος του ρυθμού εξυπηρέτησης σε κάποιο σημείο ενός συγκοινωνιακού δικτύου. Μπορεί να εκφραστεί είτε ως αριθμός οχημάτων που βρίσκονται στην ουρά είτε ως μήκος της ουράς αναμονής (θεωρώντας ένα μέσο μήκος οχημάτων). Φαινόμενα ουράς είναι δυνατό να συναντηθούν σε σταθμούς διοδίων, σε σηματοδοτούμενους κόμβους λόγω της φωτεινής σηματοδότησης αλλά και σε μη σηματοδοτούμενους κόμβους λόγω της σήμανσης STOP βάσει της οποίας πρέπει να παραχωρηθεί προτεραιότητα, σε εισόδους – εξόδους χώρων στάθμευσης κ.ά.

Η θεωρία ουρών (queueing theory) βασίζεται στη θεωρία πιθανοτήτων και μελετά τα οχήματα που αναμένουν σε μια θέση σε ένα σύστημα μεταφορών. Σκοπός της είναι να εξετάσει τις κυκλοφοριακές επιπτώσεις σε ένα συγκοινωνιακό δίκτυο, να εξετάσει τους χρόνους αναμονής και να ελαχιστοποιήσει τις αναμενόμενες καθυστερήσεις.

Μέση καθυστέρηση (mean delay)

Ορίζεται ως η διαφορά του πραγματικού χρόνου που θα κάνει ένα όχημα να διανύσει μια απόσταση με τον χρόνο που θα έκανε αν κινούνταν απρόσκοπτα.

Κυκλοφοριακή ικανότητα κόμβων

Ο υπολογισμός της κυκλοφοριακής ικανότητας και της στάθμης εξυπηρέτησης ενός κόμβου γίνεται με διάφορες μεθοδολογίες με την βοήθεια τύπων, διαγραμμάτων και πινάκων. Επίσης η διαδικασία του υπολογισμού διαφέρει ανάλογα με τον κόμβο που εξετάζεται και είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί από δύο κατηγορίες, τα εμπειρικά που βασίζονται σε μετρήσεις πεδίου και τα αναλυτικά που βασίζονται στη θεωρία αποδοχής διακένου.

Στα εμπειρικά μοντέλα πραγματοποιούνται μετρήσεις μεγεθών, γεωμετρικών στοιχείων όπως η μέση καθυστέρηση, το μήκος ουράς και η κυκλοφορική ικανότητα. Για την έγκυρη και αποτελεσματική λειτουργία των μοντέλων, απαιτείται μεγάλος αριθμός κόμβων σε συνθήκες κορεσμού.

Τα αναλυτικά μοντέλα, αντίθετα, είναι δυνατό να αναπτυχθούν χωρίς την ύπαρξη συνθηκών κορεσμού και στηρίζονται στο γεγονός ότι ο οδηγός που προσεγγίζει την είσοδο του κόμβου πρέπει να επιλέξει ένα αποδεκτό κενό (διάκενο) στην κυκλοφοριακή ροή ώστε να εισέλθει στον κόμβο.

Χρονικός χωρισμός ακολουθίας (follow up time)

Είναι ο χρόνος μεταξύ της εκκίνησης δύο διαδοχικών οχημάτων σε συνθήκες ουράς στη δευτερεύουσα οδό, που χρησιμοποιούν το ίδιο διάκενο για να εισέλθουν στην κεντρική αρτηρία.

Κρίσιμο διάκενο (critical gap)

Ορίζεται ο ελάχιστος χρονικός διαχωρισμός μεταξύ δύο οχημάτων στο ρεύμα της κύριας αρτηρίας που επιτρέπει την είσοδο σε όχημα από την δευτερεύουσα οδό. Ένας άλλος ορισμός κατά HCM, είναι ότι το κρίσιμο διάκενο t_c είναι διάμεσος (median) των χρονικών διακένων μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων στον πρωτεύοντα άξονα που γίνονται αποδεκτά από τους οδηγούς που εκτελούν τον υπό εξέταση ελιγμό (HCM 2000).

Το κρίσιμο διάκενο εξαρτάται από τον τύπο ελιγμού, το σύστημα προτεραιότητας, τη μέση ταχύτητα, τον αριθμό λωρίδων, τη γεωμετρία του κόμβου, τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

2.2 Κόμβοι

2.2.1 Γενικά στοιχεία κόμβων

Οι κόμβοι χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση των οδών και την εξυπηρέτηση διαφορετικών κινήσεων που τέμνονται σε ένα σημείο. Διακρίνονται σε ισόπεδους και ανισόπεδους κόμβους. Οι δεύτεροι λόγω της σύνδεσης οδών που βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα, περιλαμβάνουν έργα υψομετρικού διαχωρισμού και κλάδους εισόδου και εξόδου (ράμπες). Η επιλογή, η σχεδίαση και η χωροθέτηση των κόμβων πρέπει να εξυπηρετούν τους στόχους σχεδιασμού που έχουν τεθεί. Αυτοί είναι:

- Ελαχιστοποίηση των σημείων εμπλοκής
- Επίτευξη ελεγχόμενων ταχυτήτων
- Συντονισμός σχεδιασμού και ελέγχου κυκλοφορίας
- Αποφυγή πολλαπλών και σύνθετων ελιγμών συμβολής και μερισμού
- Καθορισμός προτεραιοτήτων με βάση τις εισερχόμενες ροές (προτεραιότητα στις υψηλές ροές)
- Ομαλή ένταξή τους στο δίκτυο με βάση τους στόχους της τοπικής κοινωνίας

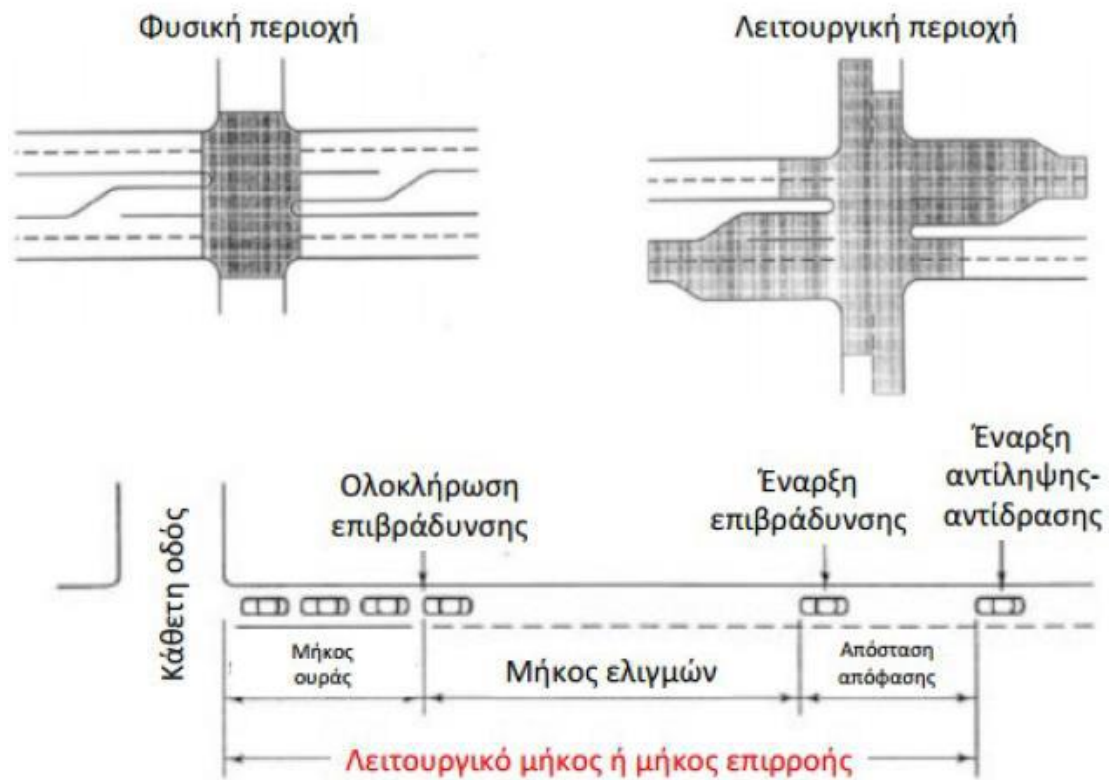
Επίσης πολλές ακόμη παράμετροι όπως η τοπογραφία της περιοχής, οι εμπλεκόμενοι φόρτοι, οι κατηγορίες των τεμνόμενων οδών και η εξυπηρέτηση όλων των χρηστών επηρεάζουν τη χωροθέτηση του κόμβου.

Η αξιολόγηση της λειτουργικότητας των κόμβων πραγματοποιείται με βάση:

- Το επίπεδο της οδικής ασφάλειας για τους χρήστες
- Την προσαρμογή της ροής κυκλοφορίας του κόμβου με την κυκλοφορία της οδού
- Τη σχέση της κυκλοφοριακής ικανότητας του κόμβου με τον εξυπηρετούμενο κυκλοφοριακό φόρτο
- Την προσαρμογή στον περιβάλλοντα χώρο
- Το κόστος κατασκευής

Κάθε κόμβος έχει δύο περιοχές που αφορούν στη λειτουργία τους και στην απόδοσή τους, τη φυσική και τη λειτουργική περιοχή. Η φυσική περιλαμβάνει την περιοχή του κόμβου όπου βρίσκονται τα σημεία εμπλοκής των διασταυρούμενων οδών. Η λειτουργική βρίσκεται ανάντι και κατόντι της φυσικής περιοχής και περιλαμβάνει όλες εκείνες τις περιοχές που συνδέονται με την απόσταση που διανύει ένα όχημα κατά την αντίληψη-αντίδραση του οδηγού, την

επιβράδυνση και αλλαγή λωρίδας του οχήματος, καθώς και το μήκος που απαιτείται για την αποθήκευση οχημάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα όρια τους.



Εικόνα 2.1 - Φυσική και λειτουργική περιοχή κόμβου- Πηγή: (Αντωνίου & Παπαδημητρίου, 2012)

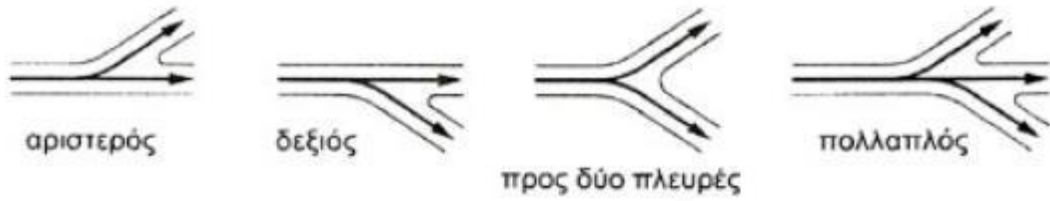
Ελιγμοί

Οι βασικοί ελιγμοί που πραγματοποιούνται στους κόμβους είναι:

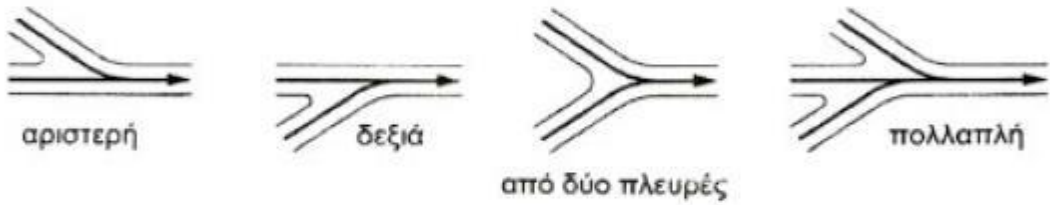
- Συμβολή (merging)
- Μερισμός (diverging)
- Διασταύρωση (crossing)

Όταν ένας ελιγμός συμβολής δύο ρευμάτων ακολουθείται σε μικρή απόσταση από έναν ελιγμό μερισμού, τότε ονομάζεται πλέξη (weaving).

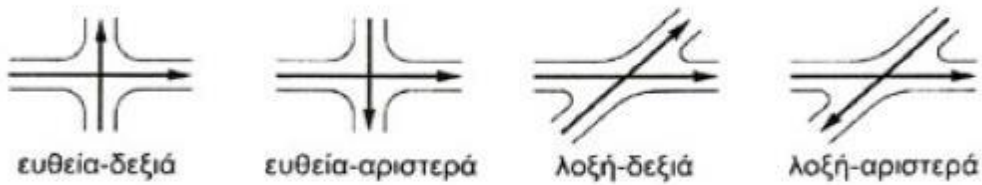
α) Διαχωρισμός



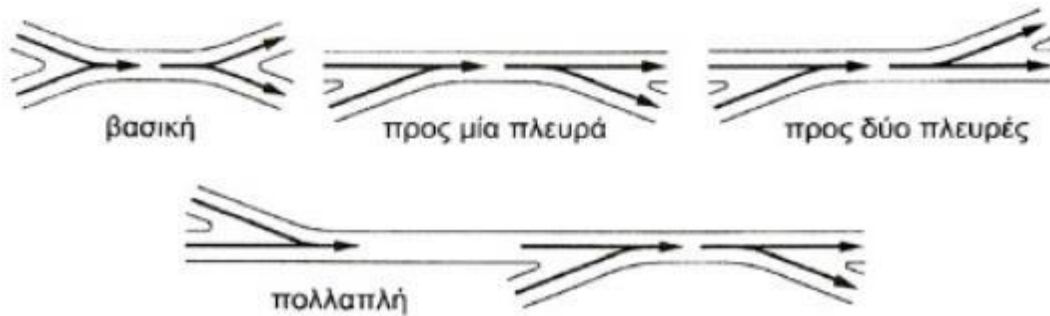
β) Συμβολή



γ) Διασταύρωση



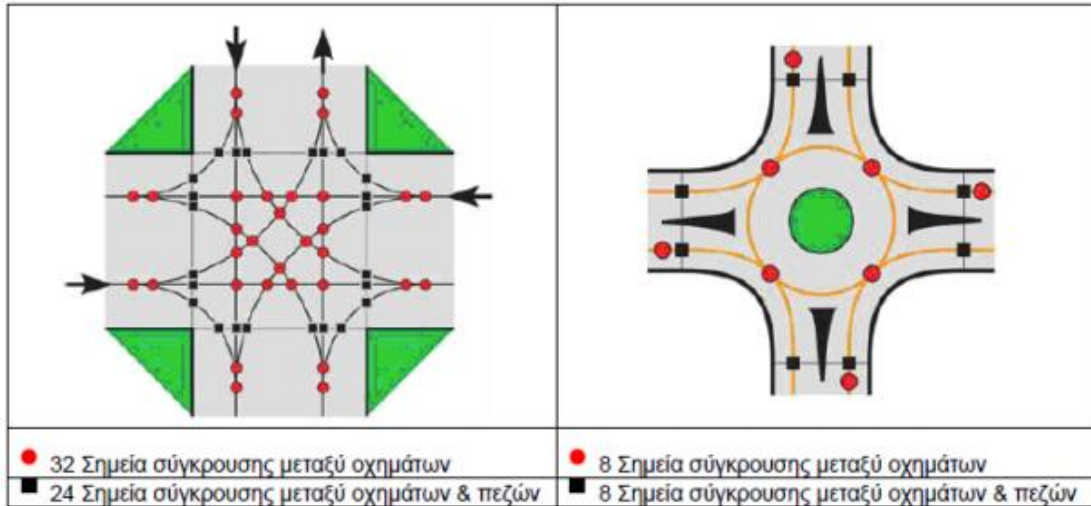
δ) Πλέξη



Εικόνα 0.1.2 - Τύποι ελιγμών- Πηγή: (Φραντζεσκάκης, Πιτσιάβα, & Γκόλιας, 2009)

Σημεία εμπλοκής (conflict points)

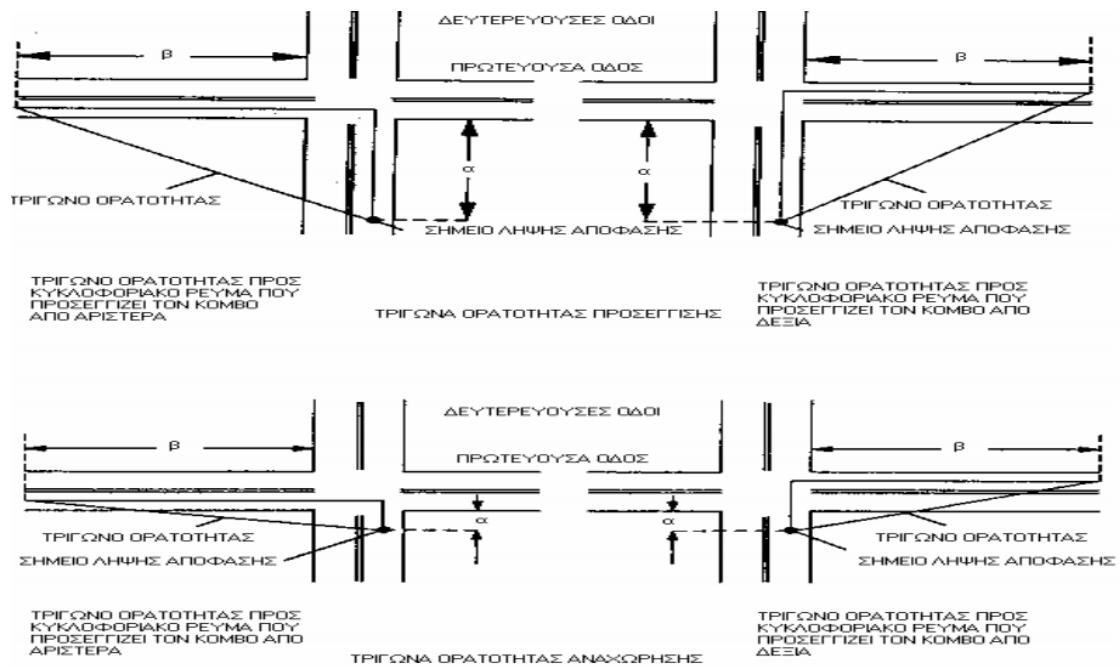
Ένα στοιχείο που επηρεάζει σημαντικά τους ελιγμούς που πραγματοποιούνται είναι τα σημεία εμπλοκής. Όσο αυξάνονται τα σκέλη σε ένα κόμβο αυξάνονται και τα σημεία εμπλοκής.



Εικόνα 2.3 - Σημεία εμπλοκής οχημάτων και οχημάτων-πεζών σε ισόπεδο κόμβο διασταύρωσης και κυκλικό κόμβο αντίστοιχα (4 κλάδοι προσέγγισης) - Πηγή: ΥΠΥΜΕΔΙ – 2011

Ορατότητα

Η ορατότητα αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την ασφαλή και ομαλή λειτουργία των κόμβων. Κάθε τεταρτημόριο μιας διασταύρωσης πρέπει να περιλαμβάνει μια τριγωνική περιοχή χωρίς εμπόδια στο οπτικό πεδίο ενός οδηγού που προσεγγίζει τον κόμβο. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται τρίγωνα ορατότητας και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: i) τα τρίγωνα ορατότητας απευθείας διάσχισης ή τρίγωνα ορατότητας προσέγγισης και ii) τα τρίγωνα ορατότητας στάσης πριν τη διάσχιση ή τρίγωνα ορατότητας αναχώρησης. Το μήκος κάθε πλευράς του τριγώνου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να επιτρέπει στον οδηγό να αντιληφθεί την πιθανότητα σύγκρουσης και να έχει την δυνατότητα επιβράδυνσης ή και ακινητοποίησης του οχήματος για να τα αποφύγει.



Εικόνα 2.4 - Τρίγωνα ορατότητας (προσέγγισης και αναχώρησης)- Πηγή: Σημειώσεις Β. Ψαριανού ΣΑΤΜ-ΕΜΠ

Στα τρίγωνα ορατότητας προσέγγισης, όπως φαίνεται και στο Εικόνα 2.4, η απόσταση α από την πρωτεύουσα οδό ορίζει το σημείο λήψης απόφασης για τους οδηγούς που κινούνται επί της δευτερεύουσας οδού. Το μήκος της απόστασης αυτής θα πρέπει να είναι τόσο ώστε ο οδηγός να έχει την δυνατότητα καθαρού πεδίου για να αντιληφθεί την ενδεχόμενη έλευση οχήματος. Αντίστοιχα, η απόσταση β ορίζει την απόσταση του οχήματος, που κινείται επί της κύριας οδού, από το σημείο εμπλοκής της διασταύρωσης. Στην περίπτωση βέβαια που οι προσβάσεις ελέγχονται με πρόγραμμα φωτεινής σηματοδότησης ή σήμανση STOP, οι ορατότητες αυτές δεν χρειάζονται.

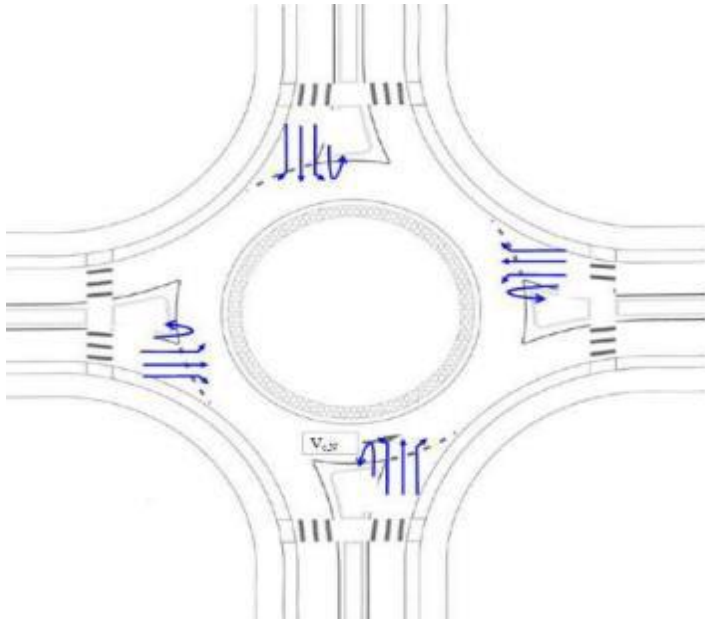
Τα τρίγωνα αναχώρησης αναφέρονται σε ακινητοποιημένα οχήματα της δευτερεύουσας οδού λόγω σήμανσης STOP και τους παρέχουν μεγαλύτερη ορατότητα για να μπορούν να εκτιμήσουν αν είναι δυνατό να εισέλθουν στον κόμβο. Λαμβάνοντας υπόψη δηλαδή την ταχύτητα κίνησης του οχήματος επί της πρωτεύουσας οδού, να βρουν επαρκές διάκενο για την πραγματοποίηση της κίνησης ή του ελιγμού τους. Αντιστοίχως, στα οχήματα της κύριας οδού παρέχεται (αν και με λιγότερη ορατότητα) η δυνατότητα αναγνώρισης οχημάτων που αναμένουν στον δευτερεύοντα άξονα, έτσι ώστε να εκτιμήσουν τη πρόθεσή τους για ελιγμό και να αποφύγουν πιθανή εμπλοκή ώστε να επιβραδύνουν το όχημα τους.

2.2.2 Κυκλικό κόμβοι

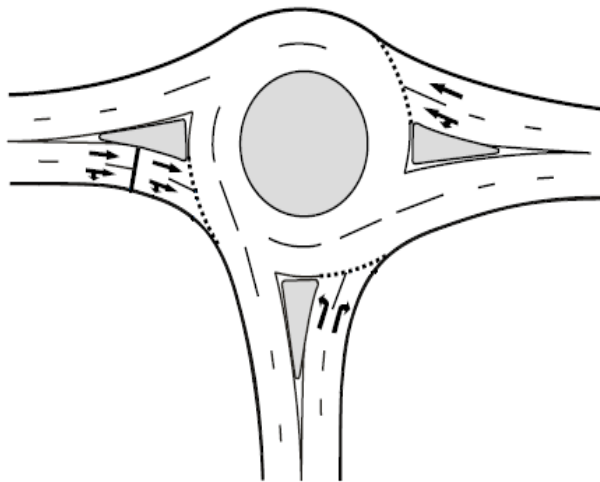
Τόσο σε αστικά όσο και σε οδικά δίκτυα εκτός αστικών κέντρων σχεδιάζονται ισόπεδοι κυκλικό κόμβοι (roundabouts) που λειτουργούν με τον κανόνα της παραχώρησης προτεραιότητας. Έχουν 3 ή και περισσότερους κλάδους και βασικός τους στόχος είναι η κίνηση των οχημάτων με χαμηλότερες ταχύτητες.

Αρχικά στους πρώτους κυκλικούς κόμβους που κατασκευάστηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο, προτεραιότητα είχαν τα οχήματα που εισέρχονταν στον κόμβο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα σε περιπτώσεις που υπήρχαν αυξημένοι φόρτοι να δημιουργούνται μεγάλες ουρές μέσα στον κόμβο με συνέπεια να μπλοκάρονται οι είσοδοί του. Έτσι με βάση τα νέα δεδομένα παραχωρείται προτεραιότητα στα οχήματα που κινούνται μέσα στον κόμβο και αυτό ισχύει στις περισσότερες χώρες. Αντίθετα στην Ελλάδα ο Κώδικας Οδικής Κυκλοφορίας (ΚΟΚ) ορίζει ότι προτεραιότητα έχουν τα οχήματα που εισέρχονται στον κόμβο, εκτός από περιπτώσεις που τοποθετείται στις προσβάσεις σήμανση STOP.

Στους κυκλικούς κόμβους υπάρχουν δύο μέθοδοι ανάλυσης. Τα εμπειρικά πρότυπα, που βασίζονται στην ανάπτυξη σχέσεων βάσει μετρήσεων πεδίου και τα αναλυτικά, που βασίζονται στην θεωρία αποδοχής του κρίσιμου χρονικού διαστήματος. Το πρότυπο που θα επιλεγεί εξαρτάται από τις συνθήκες. Τα εμπειρικά πρότυπα προσφέρουν κυρίως καλύτερη απόδοση, αλλά απαιτούν μεγάλο αριθμό δεδομένων, ενώ τα αναλυτικά είναι δυνατό να εφαρμοσθούν και χωρίς δεδομένα, δηλαδή πριν σχεδιαστεί ο κόμβος.



Εικόνα 2.5: Κυκλικός κόμβος με τέσσερα σκέλη- Πηγή: (Σπυροπούλου & Αντωνίου)



Εικόνα 2.6: Κυκλικός κόμβος με τρία σκέλη (T)- Πηγή: (Ακσελικ, 2009)

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κατασκευής και χρήσης των κυκλικών κόμβων

Η κατασκευή και η λειτουργία των κυκλικών κόμβων έχει τόσο θετικά όσο και αρνητικά αποτελέσματα για το φυσικό και το ανθρωπογενές περιβάλλον. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικότερα, (ΥΠΥΜΕΔΙ-2011)

Πεζοί και ευαίσθητοι χρήστες:

Πλεονεκτήματα:

Διέλευση από την διάβαση πεζών με έλεγχο μίας κάθε φορά κατεύθυνσης επερχόμενης κυκλοφορίας, μέσω της χρήσης των διαχωριστικών νησίδων.

Δυνατότητα διέλευσης του κόμβου από τους ποδηλάτες είτε με χρήση του ποδηλάτου είτε πεζοί.

Μειονεκτήματα:

Δυσκολίες εύρεσης και χρήσης της διάβασης πεζών. Η ύπαρξη διαβάσεων πεζών χωρίς ταυτόχρονη σηματοδότηση δημιουργεί προβλήματα για τους πεζούς κατά τη διαδικασία επιλογής της κατάλληλης χρονικής στιγμής που θα τις διασχίσουν. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται ιδιαίτερα για τα άτομα με προβλήματα όρασης, τα οποία σε άλλου είδους διασταυρώσεις διευκολύνονται από κατάλληλα ακουστικά μηνύματα.

Ασφάλεια:

Πλεονεκτήματα:

Μεγαλύτερη ασφάλεια για όλους τους χρήστες λόγω χαμηλότερων ταχυτήτων, με συνεπακόλουθη μείωση της σοβαρότητας των συγκρούσεων, ασφαλέστερη διείσδυση στην ήδη κινούμενη κυκλοφορία και επαρκή χρόνο για τη λήψη αποφάσεων.

Μείωση σημείων εμπλοκής και εξάλειψη συγκρούσεων λόγω αριστερών στροφών.

Μειονεκτήματα:

Αύξηση συγκρούσεων οχημάτων με σταθερά εμπόδια σε σχέση με άλλες διασταυρώσεις.

Αύξηση κινδύνου διέλευσης των ευαίσθητων χρηστών από κυκλικούς κόμβους πολλαπλών λωρίδων εισόδου.

Αύξηση ατυχημάτων λόγω άγνοιας των κανόνων οδικής κυκλοφορίας. Σε πολλές περιπτώσεις και ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχει επιπλέον κατακόρυφη σήμανση, επικρατεί σύγχυση μεταξύ των οδηγών ως προς το θέμα της παραχώρησης προτεραιότητας, με αποτέλεσμα να προκαλούνται συγκρούσεις και ατυχήματα, εμπλεκομένων και των πεζών.

Λειτουργία:

Πλεονεκτήματα:

Μεγαλύτερη κυκλοφοριακή ικανότητα και βελτίωση του επιπέδου εξυπηρέτησης.

Μικρότερες καθυστερήσεις και απουσία ουρών, ειδικά σε περιόδους μη αιχμής.

Δυνατότητα αναστροφής και κατ' επέκταση αποφυγή επικίνδυνων αριστερών στροφών.

Μειονεκτήματα:

Καθυστερήσεις σε κύριες αρτηρίες. Λόγω του ότι σε έναν κυκλικό κόμβο η διαχείριση της κυκλοφορίας είναι ίση για κύριες και δευτερεύουσες αρτηρίες και παραχωρείται προτεραιότητα σε οχήματα που κινούνται στις εσωτερικές λωρίδες του κόμβου και όχι επί της κύριας αρτηρίας, είναι πιθανό να δημιουργούνται καθυστερήσεις και ουρές σε οδούς που υπό διαφορετικές συνθήκες θα είχαν προτεραιότητα κυκλοφορίας.

Αδυναμία παραχώρησης προτεραιότητας σε ειδικούς χρήστες, όπως τραίνα, οχήματα έκτακτης ανάγκης, μέσα μαζικής μεταφοράς, πεζοί κλπ., εκτός εάν υπάρχει συμπληρωματικό σύστημα ελέγχου της κυκλοφορίας.

Καθυστερήσεις λόγω γεωμετρίας. Οι διαχωριστικές νησίδες περιορίζουν ως ένα βαθμό την άνετη κυκλοφορία επί της οδού κατά τη διάρκεια κατασκευής τους ή σε περιπτώσεις ατυχημάτων, όπου χρειάζεται να προσεγγίσουν το σημείο οχήματα έκτακτης ανάγκης.

Προβλήματα διατάραξης της ομαλής κυκλοφορίας των οχημάτων σε περίπτωση ύπαρξης συντονισμένου δικτύου σηματοδότησης.

Περιβάλλον:

Πλεονεκτήματα:

Μείωση του θορύβου, της κατανάλωσης καυσίμων και των επιπτώσεων στην ποιότητα του αέρα.

Λιγότερες στάσεις κατά τη διάρκεια περιόδων εκτός ωρών αιχμής.

Μειονεκτήματα:

Καταστροφή φυσικών και πολιτιστικών πόρων λόγω αναγκαστικών απαλλοτριώσεων.

Διαχείριση της κυκλοφορίας:

Πλεονεκτήματα:

Μειωμένες ταχύτητες κυκλοφορίας.

Ευκολότερη μετάβαση ανάμεσα σε περιοχές με διαφορετικές συνθήκες κυκλοφορίας και οδήγησης.

Μειονεκτήματα:

Υψηλότερο κόστος σε σχέση με άλλα μέτρα διαχείρισης της κυκλοφορίας

Απαιτήσεις χώρου:

Πλεονεκτήματα:

Μικρότερες απαιτήσεις χώρου όσον αφορά στις λωρίδες κυκλοφορίας, λόγω μειωμένων ουρών.

Περισσότερος διαθέσιμος χώρος για θέσεις στάθμευσης, μεγαλύτερα πεζοδρόμια, χώρους πρασίνου, μεγαλύτερες εξωτερικές λωρίδες και ποδηλατοδρόμους.

Μειονεκτήματα:

Μεγάλες απαιτήσεις χώρου κατά περίπτωση. Η κατασκευή κυκλικών κόμβων προϋποθέτει εργασίες σε μεγάλη επιφάνεια του χώρου, επομένως και αυξημένο κόστος, κυρίως όταν η κυκλοφορία που συνήθως διέρχεται από το συγκεκριμένο σημείο διατηρείται και για το λόγο αυτό εκτρέπεται σε άλλες γειτονικές οδούς.

Συντήρηση:

Πλεονεκτήματα:

Χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης, λόγω απουσίας εξοπλισμού σηματοδότησης.

Μειονεκτήματα:

Κόστος συντήρησης της κατακόρυφης σήμανσης.

Αισθητική:

Πλεονεκτήματα:

Αισθητική αναβάθμιση μέσω των διαφόρων διαμορφώσεων του χώρου.

Διαχωρισμός χρήσεων γης σε εμπορικές και κατοικημένες περιοχές.

Μειονεκτήματα:

Κίνδυνος μειωμένης ορατότητας σε περίπτωση τοποθέτησης ογκωδών αντικειμένων στην κεντρική νησίδα.

2.2.2.1 Κυκλικοί κόμβοι με 2 λωρίδες κυκλοφορίας

Κυκλικοί κόμβοι δύο λωρίδων θεωρούνται όλοι οι κυκλικοί κόμβοι που έχουν τουλάχιστον έναν κλάδο εισόδου με δύο λωρίδες. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται διευρυμένο κυκλικό κατάστρωμα, ώστε να κινούνται περισσότερα από ένα οχήματα το ένα δίπλα στο άλλο.

Για τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας ενός κυκλικού κόμβου έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες σε διάφορες χώρες, όπως οι ΗΠΑ (HCM, 2010), το Ηνωμένο Βασίλειο (Kimber, 1980), η Αυστραλία (Akcelik et al., 1999), η Γερμανία (Brilon, Wu, & Bondzio, Unsignalized Intersections in Germany, A State of the Art, Turbo Roundabout - an experience from Germany, 1997) κ.ά. Παρακάτω παρουσιάζεται η μεθοδολογία (HCM, 2010) (Η.Π.Α.). Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται αποτελεί συνδυασμό μεθοδολογίας γραμμικής παλινδρόμησης με συλλεγμένα στοιχεία και αναλυτικών μεθόδων που βασίζονται στη θεωρία αποδοχής διάκενων (gap acceptance theory).

Η κυκλοφοριακή ικανότητα για έναν κυκλικό κόμβο 2 λωρίδων είναι:

$$C_{i,R,pce} = 1.1130 * e^{(-1*10^{-3}) * v_{c,pce}}$$

$$C_{i,L,pce} = 1.1130 * e^{(-1*10^{-3}) * v_{c,pce}}$$

Όπου

$C_{i,R,pce}$: η κυκλοφοριακή ικανότητα της δεξιάς λωρίδας, προσαρμοσμένη για βαρέα οχήματα (ΜΕΑ/ώρα).

$C_{i,L,pce}$: η κυκλοφοριακή ικανότητα της αριστερής λωρίδας, προσαρμοσμένη για βαρέα οχήματα (ΜΕΑ/ώρα).

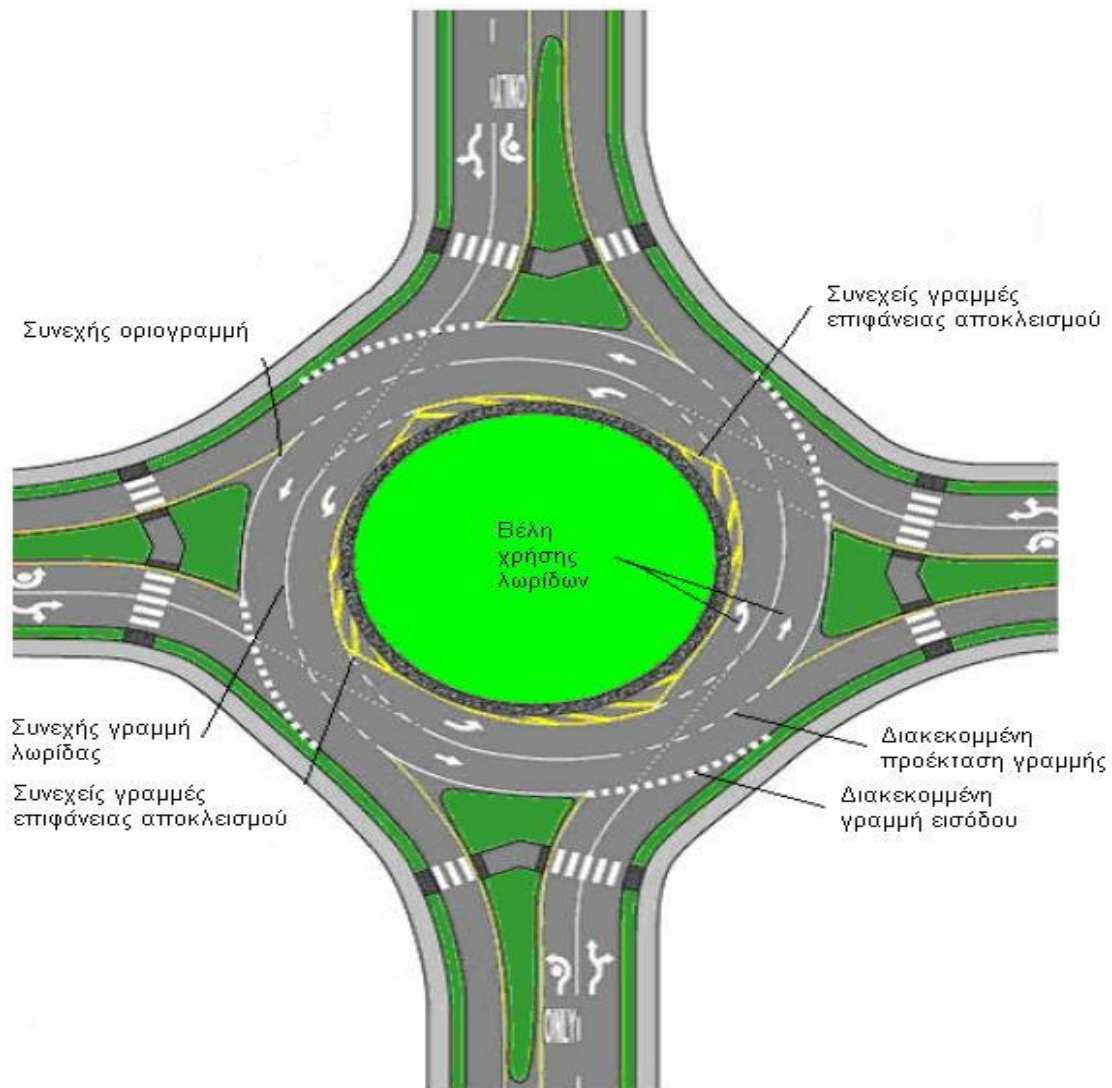
$V_{c,pce}$: ο εμπλεκόμενος κυκλοφοριακός φόρτος για την εξεταζόμενη πρόσβαση (ΜΕΑ/ώρα).



Εικόνα 2.7 : Αστικός κυκλικός κόμβος 2 λωρίδων – Annapolis, Maryland, United States – Πηγή (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

2.2.2.2 Κυκλικοί κόμβοι turbo

Πρόκειται για μια ειδική κατηγορία κυκλικών κόμβων όπου οι λωρίδες κυκλοφορίας τους οριοθετούνται με οριζόντια και κατακόρυφη σήμανση και υπερυψωμένα κράσπεδα, κατασκευασμένα τόσο στις εισόδους όσο και εντός του κυκλικού κόμβου, μεταξύ των λωρίδων κυκλοφορίας. Η γεωμετρία των σπειροειδών κυκλικών κόμβων επιτρέπει τον διαχωρισμό των λωρίδων κυκλοφορίας ώστε να αποφεύγονται οι αλλαγές λωρίδας. Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιούνται τα σημεία εμπλοκής (conflict points) τόσο πριν όσο και μέσα στον κόμβο. Οι οδηγοί επιλέγουν λωρίδα πριν εισέλθουν στον κόμβο ανάλογα με την έξοδο στην οποία επιθυμούν να κινηθούν. Ένα βασικό χαρακτηριστικό τους είναι, ότι οι λωρίδες κυκλοφορίας μπορεί να διαφέρουν στους κλάδους εισόδου - εξόδου καθώς και επί του κυκλικού κόμβου.



Εικόνα 2.8: Τυπικά χαρακτηριστικά σπειροειδούς κυκλικού κόμβου - Πηγή: (ΥΠΥΜΕΔΙ, 2011)

Προτεραιότητα στους σπειροειδείς κυκλικούς κόμβους δίνεται στα οχήματα που βρίσκονται μέσα στον κόμβο. Έτσι τα οχήματα στις εισόδους του κόμβου επιλέγουν τη δεξιά λωρίδα αν θέλουν να κινηθούν στην πρώτη έξοδο και την αριστερή όταν θέλουν να μπουν μέσα στον κυκλικό κόμβο και να κινηθούν προς κάποια απ' τις άλλες εξόδους. Στη συνέχεια αναμένουν να βρουν διάκενο ώστε να εισέλθουν στον κόμβο.



Εικόνα 2.9 : Turbo-roundabout – Πηγή : (Giuffre, Guerrieri, & Grana, 2009)

2.2.3 Διεθνή παραδείγματα εφαρμογής κυκλικών κόμβων turbo

Ιστορική αναδρομή

Η ιδέα του κυκλικού κόμβου turbo αναπτύχθηκε το 1996 στην Ολλανδία από έναν ερευνητή από το πανεπιστήμιο του Delft, τον Bertus Fortuijn, που είχε ως στόχο να λύσει τα προβλήματα που αντιμετώπιζαν οι συμβατικοί κυκλικοί κόμβοι. Σκοπός του ήταν να αναπτύξει έναν κυκλικό κόμβο με την ίδια ή μεγαλύτερη χωρητικότητα με έναν κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων, που θα είναι το ίδιο ασφαλής με έναν κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας. Ο 1ος κυκλικός κόμβος turbo κατασκευάστηκε το 2000 στην Ολλανδία, ενώ μέχρι το έτος 2007 λειτουργούσε σε άλλες 70 χώρες όπως η Πολωνία, η Γερμανία, η Τσεχία, η Ουγγαρία, το Βέλγιο αλλά και χώρες της πρώην Γιουγκοσλαβίας. Στην Ολλανδία λειτουργούν πλέον πολλοί κυκλικοί κόμβοι turbo σε σημείο μάλιστα που η Ολλανδική κυβέρνηση αποφάσισε να μην κατασκευάζονται πλέον συμβατικοί κυκλικοί κόμβοι αλλά μόνο κυκλικοί κόμβοι turbo.

Κυκλικοί κόμβοι turbo ανά τον κόσμο

Σύμφωνα με στοιχεία που συλλέχθηκαν απ' την ολλανδική ιστοσελίδα www.dirkdebaan.nl υπάρχουν 480 κυκλικοί κόμβοι turbo σε όλο τον κόσμο. Οι περισσότεροι βρίσκονται στην Ολλανδία, χώρα όπου αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε ο συγκεκριμένος κυκλικός κόμβος. Οι θέσεις τους δημοσιεύτηκαν για πρώτη φορά στο Google Maps στις 3 Φεβρουαρίου 2012. Ο παρακάτω πίνακας αναφέρεται στην τελευταία ενημέρωση που έγινε στις 30 Δεκεμβρίου 2018.

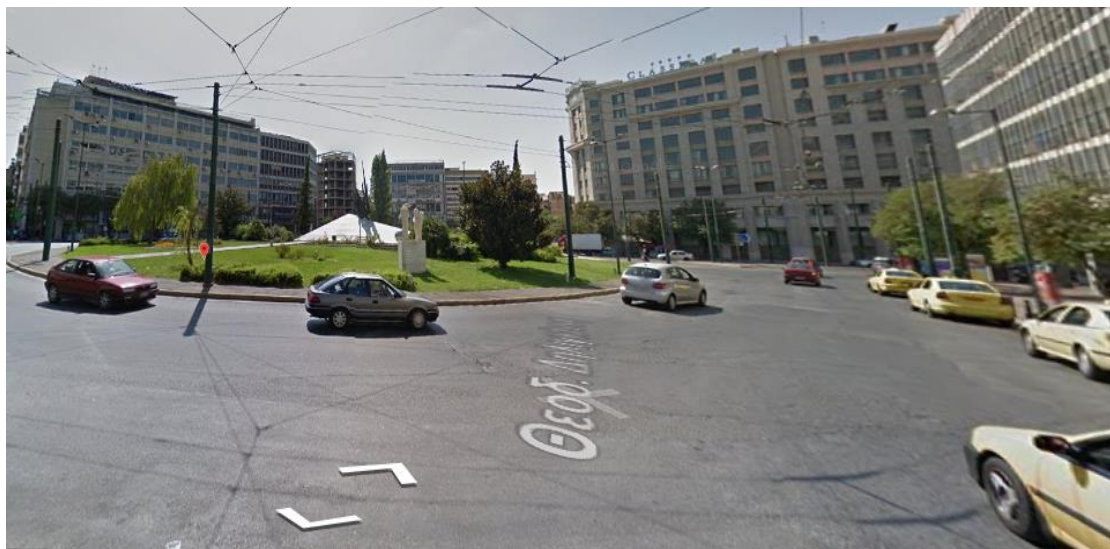
Πίνακας 2.1 : Χώρες και αριθμός των κυκλικών κόμβων turbo

Χώρες	Αριθμός κυκλικών κόμβων turbo
Αρούμπα	5
Βέλγιο	2
Γερμανία	12
Εσθονία	4
Ουγγαρία	7
Λιθουανία	2
Ολλανδία	355
Αυστρία	2
Πολωνία	45
Ρουμανία	3
Σλοβενία	12
Ισπανία	2
Η.Π.Α.	3
Νότιος Αφρική	1
Καναδάς	2
Δημοκρατία της Τσεχίας	12
Κροατία	4
Δημοκρατία της Βόρειας Μακεδονίας	1
Βοσνία κι Ερζεγοβίνη	1
Μεγάλη Βρετανία	1
Σλοβακία	3
Λουξεμβούργο	1

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πρότυπα που εφαρμόζονται διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Συγκεκριμένα στην Γερμανία, εν αντιθέσει των προδιαγραφών της Ολλανδίας, δεν προτιμούνται οι υπερυψωμένες διαχωριστικές νησίδες τύπου curb (από σκληρό καουτσούκ) των λωρίδων εντός του κόμβου αλλά η απλή διαγράμμιση, κυρίως για την διευκόλυνση των εκχιονιστικών μηχανημάτων (Brilon, Studies on Roundabouts in Germany: Lessons Learned, 2011)

2.2.4 Κυκλικό κόμβοι στον Ελλαδικό χώρο

Στην Ελλάδα υπάρχει μια αύξηση τα τελευταία 20 χρόνια στην εφαρμογή των κυκλικών κόμβων ως απάντηση στην κυκλοφοριακή συμφόρηση. Αυτοί συναντούνται κυρίως σε αστικούς χώρους, όπως στον Νομό Αττικής και στην Περιφέρεια Θεσσαλίας (Λάρισα, Βόλος) αλλά και σε κάποιες μεμονωμένες περιπτώσεις έχουν δημιουργηθεί και υπεραστικοί κυκλικό κόμβοι. Παρ' όλα αυτά η εφαρμογή τους είναι πολύ περιορισμένη σε σχέση με άλλες χώρες της Ευρώπης. Εκτιμάται ότι οι κυκλικό κόμβοι θα αποτελούσαν λύση στο κυκλοφοριακό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι μεγάλες πόλεις της Ελλάδας και θα βελτίωναν την αισθητική και την λειτουργικότητα του αστικού τοπίου.



Εικόνα 2.10: Κυκλικός κόμβος, Πλατεία Μεταξουργείου – Πηγή: www.instantstreetview.com

Όσον αφορά τους κυκλικούς κόμβους turbo δυστυχώς δεν έχει εφαρμοστεί κάποιος στον Ελλαδικό χώρο. Η κατασκευή τους έχει μείνει σε καθαρά θεωρητικό επίπεδο με σημαντικό

ρόλο να παίζει η οικονομική κρίση, η οποία δεν έχει επιτρέψει στην Ελλάδα να ανταγωνιστεί άλλες Ευρωπαϊκές χώρες. Αξίζει να αναφερθεί ο κυκλικός κόμβος στο Μέγαρο του Ο.Τ.Ε. στο Μαρούσι, όπου δεν διαχωρίζονται μεν οι λωρίδες φυσικά αλλά μέσω πινακίδων σε οδηγεί ώστε ανάλογα με την έξοδο που θες να πάρεις να επιλέξεις την κατάλληλη λωρίδα, ώστε να αποφεύγονται οι αχρειαστες αλλαγές λωρίδας. Με γνώμονα την εξέλιξη της τεχνολογίας και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής, η Ελλάδα θα πρέπει να αναπτυχθεί περαιτέρω σε αυτόν τον τομέα με στόχο την βελτίωση της οδικής ασφάλειας, την αύξηση της κυκλοφοριακής ικανότητας και την προστασία του περιβάλλοντος.

2.3 Κυκλοφοριακή προσομοίωση

Κυκλοφοριακή προσομοίωση είναι η μαθηματική μοντελοποίηση διαφόρων συστημάτων μεταφορών (διασταυρώσεις, κυκλικοί κόμβοι κλπ) με τη χρήση ειδικού λογισμικού, με σκοπό τον σχεδιασμό και την εξασφάλιση της λειτουργικότητας ενός έργου. Η χρήση της προσομοίωσης καθίσταται πολύ σημαντική για τον κυκλοφοριακό σχεδιασμό καθώς μπορεί να δώσει πιθανά αποτελέσματα κυκλοφορίας ενός έργου πριν την κατασκευή του.

Ιδιαίτερα στις μεταφορές η προσομοίωση παρέχει εργαλεία για την μελέτη πολύπλοκων μοντέλων για αναλυτική ή αριθμητική επεξεργασία, χρησιμοποιείται σε πειραματικές διερευνήσεις και γενικά στην προσπάθεια παραγωγής οπτικών αναπαραστάσεων μελλοντικών σεναρίων καθώς και στον υπολογισμό συγκεκριμένων κυκλοφοριακών μεγεθών. Επίσης η προσομοίωση μπορεί να εμπεριέχει χαρακτηριστικά δυναμικής συμπεριφοράς των οδικών δικτύων.

2.3.1 Μαθηματικά πρότυπα προσομοίωσης

Τα μαθηματικά πρότυπα χωρίζονται σε μικροσκοπικά, μεσοσκοπικά και μακροσκοπικά, με βάση το επίπεδο λεπτομέρειας το οποίο εξετάζουν.

2.3.1.1 Μικροσκοπικά πρότυπα

Τα μικροσκοπικά μαθηματικά πρότυπα προσομοίωσης της κυκλοφορίας προσομοιώνουν μεμονωμένα οχήματα εντός οδικού δικτύου και χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη πιθανών επιπτώσεων στα πρότυπα κυκλοφορίας, που προκύπτουν από ενδεχόμενες αλλαγές στη ροή της κυκλοφορίας ή στο φυσικό περιβάλλον. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα τους είναι η ικανότητά τους να προσομοιώνουν τις συνθήκες αναμονής (συνθήκες ουράς). Τα μοντέλα

μικροσκοπικής προσομοίωσης συνεχίζουν να παρέχουν αποτελέσματα σε υψηλό βαθμό κορεσμού, μέχρι του σημείου απόλυτης κατάρρευσης. Λόγω ακριβώς αυτής της δυνατότητας αυτό το είδος μοντέλων καθίσταται πολύ χρήσιμο για την ανάλυση κυκλοφοριακών δραστηριοτήτων σε αστικές περιοχές και σε κέντρα πόλης, τόσο σε σηματοδοτούμενους και μη κόμβους όσο και σε κυκλικούς κόμβους. Η μικροσκοπική προσομοίωση απεικονίζει ακόμη και σχετικά μικρές αλλαγές στο φυσικό περιβάλλον, όπως η στένωση λωρίδων ή η μεταφορά των σημείων που χωροθετείται η σήμανση STOP της διασταύρωσης.

Τα μικροσκοπικά μαθηματικά πρότυπα βασίζονται στην προσομοίωση κάθε οχήματος ξεχωριστά. Κάθε όχημα αντικαθίσταται από ένα διάνυσμα, οι συνιστώσες του οποίου είναι η θέση στο χώρο, η ταχύτητα και η επιτάχυνση και οι οποίες ανανεώνονται ανάλογα με την κατάσταση των γειτονικών οχημάτων. Τα μικροσκοπικά πρότυπα προσομοίωσης δύνανται να περιέχουν πρότυπα ακολουθούστος οχήματος (car following model), πρότυπα αλλαγής λωρίδας (lane changing model) και πρότυπα αποδοχής διάκενου (gap acceptance model).

Πρότυπο ακολουθούστος οχήματος (car following model)

Στο πρότυπο ακολουθούστος οχήματος θεωρείται βασική προϋπόθεση η συνέχεια της κυκλοφοριακής ροής σε χώρο και σε χρόνο. Τα μαθηματικά μοντέλα ακολουθούστος οχήματος μελετούν, μέσω αλγορίθμων, την οδική συμπεριφορά ενός οχήματος (ακόλουθο όχημα), όταν αυτό ακολουθεί ένα άλλο (προπορευόμενο όχημα). Όταν δεν υπάρχει προπορευόμενο όχημα, το ακόλουθο είναι ελεύθερο να αναπτύξει την επιθυμητή ταχύτητά του, ενώ αν η ενέργεια αυτή γινόταν με την παρουσία κάποιου προπορευόμενου, θα οδηγούσε σε σύγκρουση.

Η γενική σχέση που αναπτύχθηκε στα τέλη του 1950 και περιγράφει το πρότυπο ακολουθίας οχημάτων είναι η εξής:

$$[\text{επιτάχυνση}] = [\text{ευαισθησία}] * [\text{ερέθισμα}]$$

Οι Chandler et al. (1958) ανέπτυξαν το πρώτο μοντέλο ακολουθίας οχήματος, το οποίο είναι ένα απλό, γραμμικό μοντέλο:

$$a_n(t) = \alpha \times \Delta V_n^{front}(t - \tau_n)$$

Όπου:

$a_n(t)$ = επιτάχυνση οδηγού n τη χρονική στιγμή t

α = σταθερός όρος

$$\Delta V_n^{front} = [V_n^{front}(\tau - \tau_n) - V_n(\tau - \tau_n)]: \text{ερέθισμα}$$

$V_n(t-\tau_n)$ = ταχύτητα τη χρονική στιγμή $(\tau - \tau_n)$

$V_n^{front}(\tau - \tau_n)$ = ταχύτητα προπορευόμενου οχήματος τη στιγμή $(\tau - \tau_n)$

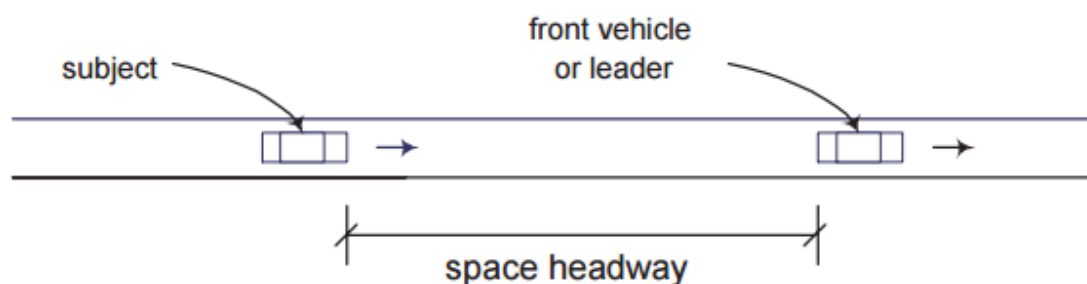
Ένας οδηγός ανταποκρίνεται στο ερέθισμα στο χρόνο $(\tau - \tau_n)$ εφαρμόζοντας την επιτάχυνση στο χρόνο t . Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ίδιοι όροι τόσο για την επιτάχυνση όσο και για την επιβράδυνση. Το μοντέλο εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανάλυσης συσχέτισης καθώς και μικροσκοπικά δεδομένα ακολουθούστος οχήματος. Τα δεδομένα αυτά συλλέχθηκαν από ένα δείγμα 8 οδηγών που οδηγούσαν δοκιμαστικά οχήματα σε οδικό τμήμα δύο λωρίδων σε πραγματική κυκλοφορία για 20 με 30 λεπτά.

Οι Gazis et al. (1959) αντιμετωπίζουν την παραπάνω προσέγγιση, με ενσωμάτωση του χωρικού διαχωρισμού (space headway) μεταξύ των δύο οχημάτων στον όρο ευαισθησίας. Το πρότυπο που σχεδίασαν είναι:

$$a_n = \frac{\alpha \times \Delta V_n^{front}(\tau - \tau_n)}{\Delta X_n(\tau - \tau_n)}$$

Όπου:

$\Delta X_n(\tau - \tau_n)$ = η πορεία διαστήματος τη χρονική στιγμή $(\tau - \tau_n)$



Εικόνα 2.11 - Το όχημα που οδηγεί και το όχημα που ακολουθεί, καθώς και ο χρονικός τους διαχωρισμός- Πηγή: Ahmed, 1999

Η εκτίμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μικροσκοπικά δεδομένα, που συλλέχθηκαν από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στις σήραγγες Holland και Lincoln της Νέας Υόρκης. Οι παράμετροι α και τ υπολογίστηκαν για κάθε οδηγό κάθε συνόλου δεδομένων με χρήση της ανάλυσης συσχέτισμού. Για κάθε σύνολο δεδομένων, οι κατά μέσο όρο τιμές των παραμέτρων από όλα τα δείγματα αναφέρθηκαν ως εκτιμήσεις.

Ο Eddie (1961) παρατήρησε δύο περιορισμούς στο μοντέλο της τελευταίας εξίσωσης. Ο πρώτος είναι ότι, από άποψη συμπεριφοράς, η θεωρία του ακολουθούντος οχήματος (follow-the-leader theory) δεν εφαρμόζεται σε χαμηλές πυκνότητες και ο δεύτερος ότι από τη μακροσκοπική σχέση ταχύτητας - πυκνότητας που προκύπτει από το παραπάνω μοντέλο, η ταχύτητα τείνει στο άπειρο όσο η πυκνότητα προσεγγίζει το μηδέν. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους περιορισμούς, ο Eddie άλλαξε τον όρο της ευαισθησίας όπως θα δούμε παρακάτω:

$$a_n(t) = a \times \frac{V_n(\tau - \tau_n)}{\Delta X_n(\tau - \tau_n)^2} \times \Delta V_n^{front}(\tau - \tau_n)$$

Η ευαισθησία τώρα είναι ανάλογη της ταχύτητας και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου του χρονικού διαχωρισμού (headway). Αυτό το μοντέλο απέδωσε καλύτερα από αυτό των Gazis et al. σε χαμηλές πυκνότητες. Ωστόσο ο όρος του ερεθίσματος αποτελεί συνάρτηση της ταχύτητας του προπορευόμενου οχήματος, κάτι που δεν είναι ρεαλιστικό σε χαμηλές πυκνότητες, ειδικά όταν οι χρονικοί διαχωρισμοί είναι υψηλοί.

Τέλος υπήρξαν και άλλοι (Newel, 1961 και Forbes, 1963) που εισήγαγαν τις δικές τους προσεγγίσεις και δημιούργησαν τα δικά τους μοντέλα, όπως έκανε και ο (Girps, 1981) που ανέπτυξε το πρώτο γενικό μοντέλο ακολουθούντος οχήματος που εφαρμόζεται και στο καθεστώς ακολουθούντος οχήματος, αλλά και σε αυτό της ελεύθερης ροής. Αυτό το μοντέλο υπολογίζει τη μέγιστη επιτάχυνση του οδηγού, έτσι ώστε η ταχύτητα να μην υπερβεί την επιθυμητή και ο χωρικός διαχωρισμός να μην είναι μικρότερος της ελάχιστης απόστασης ασφάλειας.

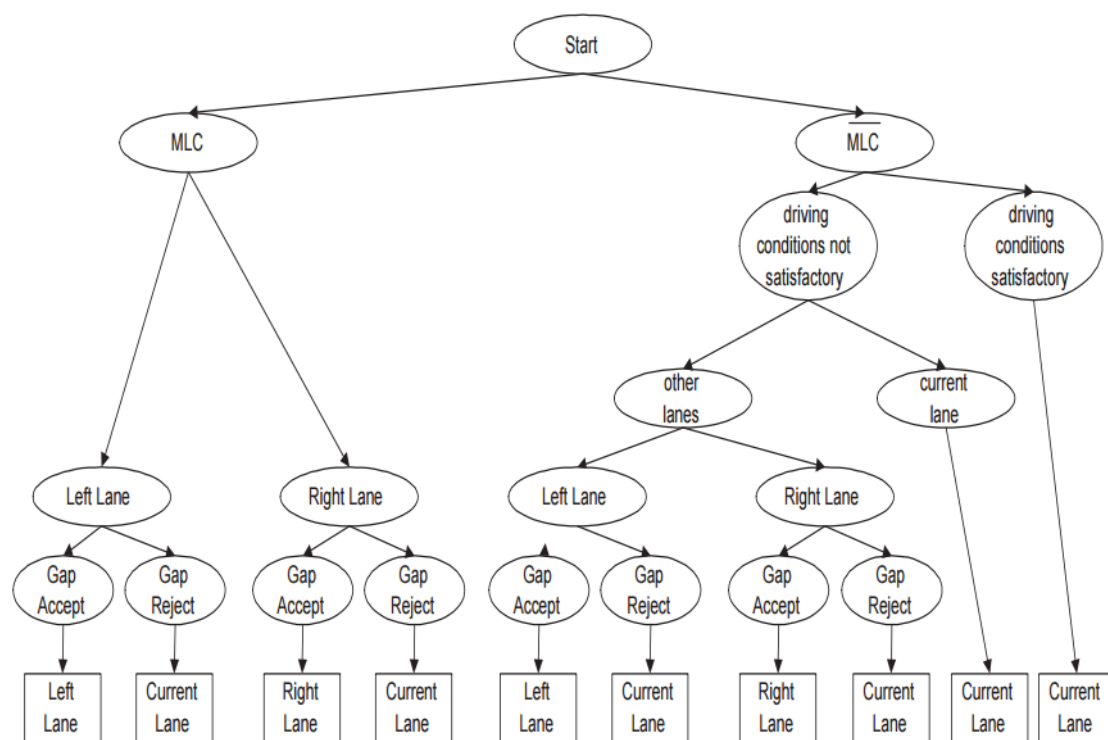
Πρότυπο αλλαγής λωρίδας (lane changing model)

Ένα πολύ βασικό πρότυπο για την προσομοίωση είναι το πρότυπο αλλαγής λωρίδας. Οι βασικοί τύποι ελιγμών είναι :

- Κατ' επιλογήν (discretionary lane change, DLC), όταν ο οδηγός εξετάζει τη δυνατότητα αλλαγής λωρίδας για να βελτιώσει τις συνθήκες κίνησής του.
- Υποχρεωτική (mandatory lane change, MLC), όταν ο οδηγός πρέπει να εκτελέσει αλλαγή λωρίδας για να αλλάξει κατεύθυνση. Για παράδειγμα, είναι δυνατό να θελήσει να βγει από κάποια έξοδο του αυτοκινητοδρόμου που κινείται ή να κάνει στρέφουσα κίνηση στο οδικό τμήμα όπου βρίσκεται ο προορισμός του.
- Συνδυασμός των δύο.

Το μαθηματικό αυτό πρότυπο περιλαμβάνει αλγορίθμους για την περίπτωση που ο οδηγός πρόκειται να αλλάξει λωρίδα, συμπεριλαμβανομένων των κατάλληλων διακένων που απαιτούνται για να πραγματοποιηθεί η αλλαγή. Γι' αυτόν τον λόγο αυτά το μοντέλα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα και αποτελούν πηγή σφαλμάτων κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης.

Τα στοιχεία για την απόφαση αλλαγής λωρίδας περιλαμβάνουν την επιλογή διαθέσιμης λωρίδας, την επιλογή διακένου και την αποδοχή ή όχι του διακένου που έχει επιλεγεί. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής που αναλύει τι συμβαίνει όταν ένας οδηγός θέλει να αλλάξει λωρίδα κυκλοφορίας.



Εικόνα 2.12 - Η δομή του μοντέλου αλλαγής λωρίδας- Πηγή: (Ahmed, 1999)

Πρότυπο επιλογής διακένου

Με τα πρότυπα αποδοχής διακένου γίνεται προσομοίωση των οχημάτων που πρόκειται να στρίψουν σε αντικρουόμενα ρεύματα κυκλοφορίας και ελέγχουν τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να γίνει αυτό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ένα όχημα που αναμένει σε μία διασταύρωση το κατάλληλο κενό στη ροή της κυκλοφορίας, ώστε να πραγματοποιήσει την κίνηση που επιθυμεί. Το μέγεθος του διακένου το οποίο αποδέχεται ο οδηγός επηρεάζει σημαντικά τη ρεαλιστικότητα της προσομοίωσης. Μεγάλα κενά μπορεί να επιφέρουν υπερβολικά μεγάλες ουρές, ενώ αντίθετα μικρά κενά μπορεί να προκαλέσουν μη ρεαλιστική

επιθετική συμπεριφορά των οδηγών και ταυτόχρονα υποτίμηση των καθυστερήσεων στις διασταυρώσεις.

Η αποδοχή διακένου εξαρτάται από το διαθέσιμο διάκενο και τη σχέση μεταξύ αυτού και του κρίσιμου. Όταν το διαθέσιμο διάκενο είναι μικρότερο του κρίσιμου τότε ο οδηγός παραμένει στην λωρίδα του. Αντίθετα όταν είναι μεγαλύτερο, τότε ο οδηγός αλλάζει λωρίδα.

2.3.1.2 Μεσοσκοπικά πρότυπα

Τα μεσοσκοπικά μαθηματικά πρότυπα προσομοίωσης είναι κατά κάποιο τρόπο ένας συνδυασμός μικροσκοπικών και μακροσκοπικών προτύπων. Δεν περιγράφουν τη συμπεριφορά μεμονωμένων οχημάτων όπως τα μικροσκοπικά, αλλά δεν είναι και μακροσκοπικά. Αφενός περιγράφουν την κίνηση των οχημάτων με απλό τρόπο αφετέρου χρησιμοποιούν διορθώσεις για τις απλουστεύσεις που χρειάζονται. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μεσοσκοπικού προτύπου αποτελεί το πρότυπο TRANSYT.

2.3.1.3 Μακροσκοπικά πρότυπα

Τα μακροσκοπικά μαθηματικά πρότυπα αντιμετωπίζουν την κυκλοφοριακή ροή ως ένα σύνολο και βασίζονται στην αρχή, ότι η συμπεριφορά της κίνησης εξαρτάται από τις συνθήκες του οδικού περιβάλλοντος και όχι από τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά των οδηγών ή την αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Θεμελιώδες μακροσκοπικό μαθηματικό πρότυπο είναι το κινηματικό πρότυπο των Lighthill & Whitham (1955), πάνω στο οποίο στηρίχθηκε ο σχεδιασμός μεταγενέστερων προτύπων.

2.3.2 Υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά προγράμματα προσομοίωσης διαφόρων οργανισμών και εταιρειών. Μέσω της ανάπτυξης της επιστήμης των υπολογιστών τα προγράμματα έχουν γίνει ταχύτερα και πιο ρεαλιστικά. Έχουν δημιουργηθεί μικροσκοπικά, μεσοσκοπικά και μακροσκοπικά προγράμματα. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά απ' αυτά.

Ptv Vissim:

Το πρόγραμμα PTV Vissim (Fellendorf, 1994), είναι ένα μικροσκοπικό πακέτο λογισμικού προσομοίωσης κυκλοφοριακής ροής πολλαπλών μέσων, που αναπτύχθηκε από την εταιρεία PTV (Planung Transport Verkehr AG) στην Καρλσρούη της Γερμανίας. Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση όλου του φάσματος των λειτουργικά κατηγοριοποιημένων οδών και των

λειτουργιών μέσω μαζικής μεταφοράς, καθώς επίσης και για προσομοίωση κυκλοφορίας γενικού σκοπού, όπως λεωφορείων, φορτηγών, πεζών και άλλων.

Aimsun:

Το Aimsun (Barceló et al., 1995), είναι ένα ολοκληρωμένο μικροσκοπικό κυρίως λογισμικό για την προτυποποίηση των μεταφορών, το οποίο αναπτύχθηκε και κυκλοφόρησε στην αγορά από την TSS – Transport Simulation Systems (Συστήματα Προσομοίωσης Μεταφορών). Η έδρα της εταιρείας είναι στην Βαρκελώνη και δημιουργήθηκε από τους Barceló και Ferrer. Το Aimsun χρησιμοποιείται από κυβερνητικούς οργανισμούς, δήμους, πανεπιστήμια και συμβούλους παγκοσμίως, για την κυκλοφοριακή τεχνική, την προσομοίωση της κυκλοφορίας, τις διερευνήσεις μεταφορών και τις διερευνήσεις εκκένωσης έκτακτης ανάγκης. Χρησιμοποιείται επίσης για τη βελτίωση της οδικής υποδομής και την αξιολόγηση σεναρίων με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων, τη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης και τον σχεδιασμό αστικών περιβαλλόντων για οχήματα και πεζούς.

TSIS-CORSIM:

Το TSIS-CORSIM (Nsour et al., 1994), είναι ένα μικροσκοπικό λογισμικό προσομοίωσης κυκλοφορίας για συστήματα φωτεινής σηματοδότησης, συστήματα αυτοκινητοδρόμων, συστήματα ελεύθερων λεωφόρων ή συστήματα συνδυασμού των παραπάνω. Το CORSIM (CORridor SIMulation) αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο πακέτο δύο μικροσκοπικών μοντέλων προσομοίωσης (NETSIM και FRESIM) που αντιπροσωπεύουν ολόκληρο το περιβάλλον κυκλοφορίας. Το NETSIM αντιπροσωπεύει την κυκλοφορία σε αστικές οδούς και το FRESIM την κυκλοφορία σε αυτοκινητόδρομους και ελεύθερες λεωφόρους. Το TSIS (Traffic Software Integrated System) είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης, που επιτρέπει στους χρήστες να διεξάγουν ανάλυση κυκλοφοριακής κίνησης. Το TSIS επιτρέπει στον χρήστη να επεξεργάζεται το σύνολο των συμπεριλαμβανομένων εργαλείων, να καθορίζει και να διαχειρίζεται τα δίκτυα ανάλυσης κυκλοφορίας, να εκτελεί μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας και να ερμηνεύει τα αποτελέσματά τους.

Paramics:

Το Paramics (Laird et al., 1999) είναι λογισμικό μικροσκοπικής κίνησης των οχημάτων που αναπτύχθηκε από την Quadstone Paramics. Το Paramics δημιουργήθηκε αρχικά στις αρχές της δεκαετίας του 1990 από το Υπουργείο Μεταφορών του Ηνωμένου Βασιλείου. Περιλαμβάνει ένα πολύπλοκο μοντέλο ακολουθούντος οχήματος και αλλαγής λωρίδας για

οδούς πλάτους μέχρι και 32 λωρίδων. Κάθε όχημα στην προσομοίωση αντιπροσωπεύει μια μονάδα όχημα-οδηγός με κοινά χαρακτηριστικά και σαν συνέπεια οι διαδρομές που επιλέγονται και η παρακολούθηση της ρύπανσης μπορούν να μοντελοποιηθούν με μεγάλη ακρίβεια. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να πραγματοποιεί ένα μεγάλο αριθμό μετρήσεων, όσο η προσομοίωση βρίσκεται σε εξέλιξη, για συνεχή ροή αποτελεσμάτων και καλύτερη ανάλυση.

Sumo:

Το Sumo είναι ένα ανοιχτό μικροσκοπικό λογισμικό προσομοίωσης κυκλοφορίας που αναπτύχθηκε από το Γερμανικό Κέντρο Αεροδιαστημικής. Περιλαμβάνει το πρότυπο ακολουθούστος οχήματος του Krauss, μια επέκταση του μοντέλου του Gipps και το πρότυπο αλλαγής λωρίδας του Krajzewicz. Έχει μια προσέγγιση διακριτή στον χώρο και στον χρόνο. Οι δυνατότητες προσομοίωσής του περιλαμβάνουν διάφορους τύπους οχημάτων και διασταυρώσεων με ή χωρίς σηματοδότηση, για δίκτυα που μπορούν να ξεπεράσουν τους 10.000 συνδέσμους. Δίνει την δυνατότητα για διδιάστατη γραφική απεικόνιση της κυκλοφορίας.

2.3.3 Το λογισμικό PTV Vissim

Το μοντέλο του Vissim αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Καρλσρούης στη Γερμανία την δεκαετία του 70. Η εμπορική διάθεση του Vissim ξεκίνησε το 1993 από την PTV AG η οποία μαζί με την Innovative Transportation Concepts στη Βόρεια Αμερική συνεχίζει να αναπτύσσει και να διανέμει το Vissim. Το Vissim είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης που έχει αναπτυχθεί με σκοπό να μπορεί να αναλύσει όλο το φάσμα των λειτουργικά κατηγοριοποιημένων οδών καθώς και των μέσων μαζικής μεταφοράς. Το Vissim μοντελοποιεί ολοκληρωμένα δίκτυα οδικών αξόνων. Επίσης μοντελοποιεί κυκλοφορία γενικού σκοπού, λεωφορεία, σιδηρόδρομους, φορτηγά, πεζούς και ποδηλάτες. Με λειτουργικούς όρους αυτό καθιστά το Vissim εξαιρετικά ευέλικτο. Έχει την ικανότητα να μοντελοποιεί πολύπλοκες στρατηγικές ελέγχου των συστημάτων μεταφοράς (π.χ. έλεγχος κλάδων εισόδου-εξόδου, συστήματα σηματοδότησης).

Η γεωμετρία του δικτύου στο Vissim κωδικοποιείται μέσω συνδέσμων (links) και συνδετήριων οδικών τμημάτων (connectors). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στον χρήστη να ελέγχει τόσο τις διαδρομές των οχημάτων όσο και την αλληλεπίδραση των οχημάτων στις διασταυρώσεις. Η δομή σύνδεσμος - κόμβος (link – node) που χρησιμοποιούν τα άλλα

προγράμματα προσομοίωσης, παρέχει μικρότερη ευελιξία στον χρήστη ως προς τον έλεγχο της κίνησης και των διασταυρώσεων.

Το Vissim αποτελείται από τον προσομοιωτή κυκλοφορίας και έναν αλγόριθμο υπολογισμού των ενδείξεων του φωτεινού σηματοδότη. Ο προσομοιωτής κυκλοφορίας είναι ένα μικροσκοπικής κλίμακας μοντέλο προσομοίωσης της κυκλοφοριακής ροής, που περιλαμβάνει τη λογική του ακολουθούντος οχήματος (car following) και της αλλαγής λωρίδας (lane changing). Το λογισμικό φωτεινής σηματοδότησης λαμβάνει πληροφορίες από την προσομοίωση των οχημάτων σε μια διακριτή βάση χρονικού βήματος (έως και 1/10 του δευτερολέπτου). Στη συνέχεια καθορίζει τις ενδείξεις του φωτεινού σηματοδότη για το επόμενο χρονικό βήμα και επιστρέφει αυτή την πληροφορία στον προσομοιωτή οχημάτων. Η προσομοίωση περιλαμβάνει μια ζωντανή οπτικοποίηση της κίνησης αλλά και τη δυνατότητα για δημιουργία αρχείου εξόδου με στατιστικά στοιχεία όπως κυκλοφοριακοί φόρτοι, καθυστερήσεις, μήκη ουρών κλπ.

Το Vissim προσομοιώνει την κυκλοφοριακή ροή με το να κινεί τη μονάδα “οδηγός – όχημα” μέσα σε ένα δίκτυο. Κάθε όχημα διακρίνεται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως:

- Τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος (μήκος, μέγιστη ταχύτητα, δυναμική επιτάχυνση, πραγματική θέση στο δίκτυο, πραγματική ταχύτητα και επιτάχυνση)
- Συμπεριφορά της μονάδας “οδηγός – όχημα” (ψυχοφυσική ευαισθησία του οδηγού, μνήμη του οδηγού, επιτάχυνση βασισμένη στην πραγματική και την επιθυμητή από τον οδηγό ταχύτητα).
- Ανεξαρτησία της μονάδας “οδηγός – όχημα” (σχέση προπορευόμενου και ακόλουθου οχήματος τόσο στην λωρίδα κίνησης όσο και στις πλαϊνές, αναφορά στον υφιστάμενο σύνδεσμο και στην επόμενη διασταύρωση, αναφορά στο επόμενο σήμα διαχείρισης κυκλοφορίας).

Αντίθετα από τα λιγότερο πολύπλοκα πρότυπα που χρησιμοποιούν σταθερές ταχύτητες και ντετερμινιστικά πρότυπα οχήματος ακολουθίας, το Vissim χρησιμοποιεί το ψυχοφυσικό πρότυπο του Wiedemann .

Πρότυπο του Weidemann

Το πρότυπο του Weidemann είναι ένα διακριτό, στοχαστικό μοντέλο που η μονάδα “οδηγός – όχημα” θεωρείται ως μια οντότητα. Αναπτύχθηκε από τον Weidemann το 1974 και έκτοτε αναπτύσσεται συνεχώς. Αποτελείται από ένα μοντέλο ακολουθούντος οχήματος κι ένα μοντέλο αλλαγής λωρίδας. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελείται από κατώτατα όρια που

οριοθετούν διαφορετικές περιπτώσεις αλληλεπίδρασης ενός οχήματος με το προπορευόμενό του. Η στοχαστική κατανομή της ταχύτητας και των χωρικών ορίων αναπαράγουν ατομικά χαρακτηριστικά οδηγικής συμπεριφοράς. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε με χρήση πολλών μετρήσεων πεδίου στο Technical University of Karlsruhe στη Γερμανία. Έπειτα, έγιναν κι άλλες περιοδικές μετρήσεις πεδίου, τα αποτελέσματα των οποίων βοήθησαν στην αναβάθμιση του μοντέλου κι έδωσαν τη δυνατότητα οι αλλαγές στην οδική συμπεριφορά και οι βελτιώσεις στα οχήματα να ενσωματωθούν σ' αυτό.

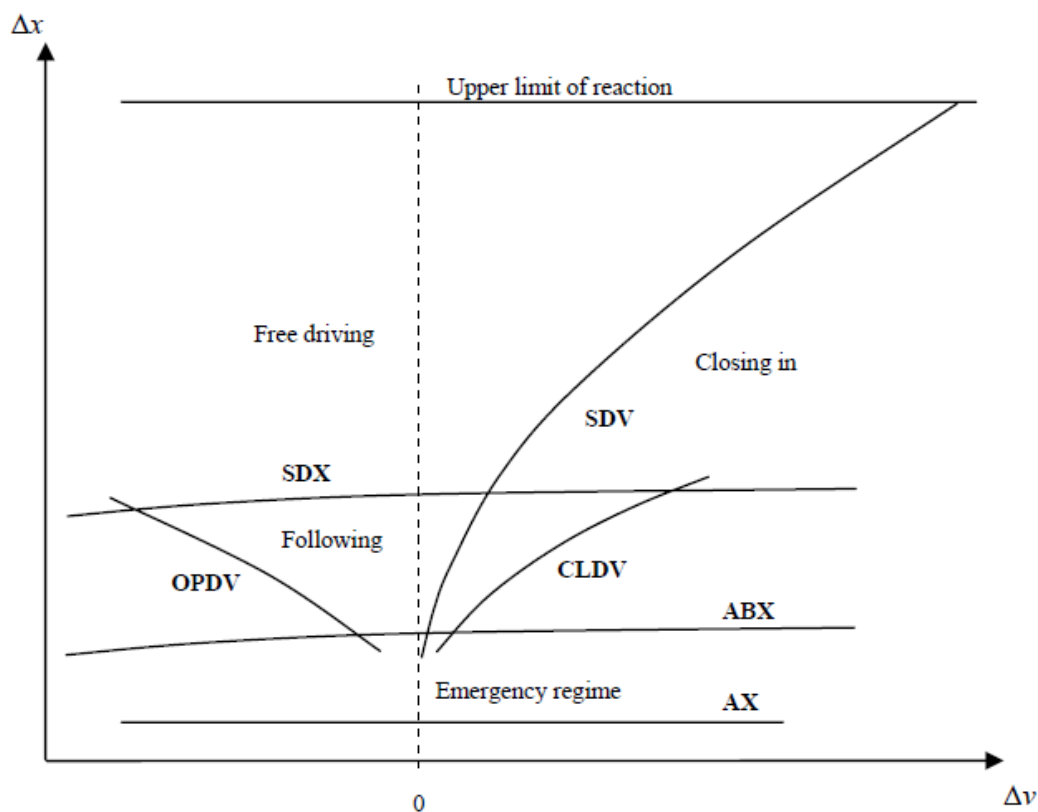
Μοντέλο ακολουθούντος οχήματος

Το μοντέλο του Weidemann αντιλαμβάνεται το κάθε όχημα σε μία από τις παρακάτω καταστάσεις κίνησης.

1. Ακολουθία: Ο οδηγός ακολουθεί το προπορευόμενο όχημα χωρίς να επιταχύνει ή να επιβραδύνει. Διατηρεί την απόσταση ασφαλείας και τα δύο οχήματα έχουν παρόμοιες ταχύτητες.
2. Ελεύθερη οδήγηση: Δεν υπάρχει επιρροή προπορευόμενων οχημάτων. Το όχημα κινείται ελεύθερα και δύναται να φτάσει τη μέγιστη ταχύτητα του. Ο οδηγός αναζητά να φτάσει και να διατηρήσει μια συγκεκριμένη ταχύτητα, την ατομική επιθυμητή ταχύτητα. Στην πραγματικότητα αυτή η ταχύτητα δεν διατηρείται σταθερή αλλά κυμαίνεται κοντά στην επιθυμητή ταχύτητα λόγω ατελούς ελέγχου της επιτάχυνσης του αυτοκινήτου από τον οδηγό.
3. Προσέγγιση: Είναι η διαδικασία προσαρμογής της ταχύτητας του οδηγού, στην χαμηλότερη ταχύτητα του προπορευόμενου οχήματος. Ο οδηγός επιβραδύνει το όχημα ώστε η διαφορά ταχύτητας των δύο οχημάτων να είναι μηδέν τη στιγμή που το όχημα που ακολουθεί φτάσει στην επιθυμητή απόσταση ασφαλείας από το προπορευόμενο.
4. Πέδηση: Πρόκειται για την εφαρμογή απότομης επιβράδυνσης όταν τα δύο οχήματα απέχουν μικρότερη απόσταση απ' την απόσταση ασφαλείας. Αυτό συμβαίνει όταν το προπορευόμενο όχημα αλλάξει απότομα ταχύτητα ή όταν τρίτο όχημα εισέλθει στη λωρίδα ανάμεσα τους.

Σε καθεμία από τις καταστάσεις αυτές η επιτάχυνση περιγράφεται ως συνάρτηση της ταχύτητας, της διαφοράς ταχύτητας, της απόστασης και των ατομικών χαρακτηριστικών του οδηγού και του οχήματος. Ο οδηγός εναλλάσσεται από την μία κατάσταση στην άλλη όταν φτάσει σε ένα κατώτατο όριο που μπορεί να εκφραστεί σαν συνδυασμός διαφοράς ταχύτητας - απόστασης. Ο οδηγός ενός ταχύτερα κινούμενου οχήματος ξεκινά να

επιβραδύνει όταν υποπέσει στην αντίληψη του ένα προπορευόμενο όχημα κινούμενο με πιο χαμηλή ταχύτητα. Εφόσον δεν μπορεί να καθορίσει ακριβώς την ταχύτητα του οχήματος, η ταχύτητά του θα γίνει χαμηλότερη από του προπορευόμενου έως ότου επιταχύνει ελαφρώς ξανά αφού φτάσει σε ένα άλλο όριο (κατώφλι) και αλλάξει εκ νέου την οδηγική συμπεριφορά του. Τα όρια αυτά παρουσιάζονται στο παρακάτω Εικόνα για μια μονάδα οχήματος-οδηγού και ένα πραγματικό επίπεδο ταχύτητας. Ο οριζόντιος άξονας παρουσιάζει τη διαφορά ταχύτητας, ενώ στον κάθετο άξονα παρουσιάζεται η απόσταση με το προπορευόμενο όχημα.



Εικόνα 2.13 : Γραφική αναπαράσταση των οριακών τιμών, ταχυτήτων και αποστάσεων – Πηγή: Weidemann, 1974

Για την απόσταση μεταξύ δύο ακίνητων οχημάτων AX ισχύει η σχέση :

$$AX = L_{n-1} + AX_{add} + RND1 * AX_{mult}$$

Όπου:

L_{n-1} είναι το μήκος του προπορευόμενου οχήματος

AX_{add} και AX_{mult} είναι παράμετροι βαθμονόμησης του μοντέλου

$RND1$ είναι εξαρτημένη μεταβλητή και εκφράζει το αίσθημα ασφάλειας του οδηγού. Λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1 με 0.5 ως μέση τιμή και έχει καθοριζόμενη απόκλιση της τάξης του 0.15.

Ως ABX ορίζεται η επιθυμητή ελάχιστη απόσταση ακολουθίας σε μικρές διαφορές ταχυτήτων. Μετρήσεις έδειξαν ότι οι αποστάσεις στην πραγματική κυκλοφορία δεν είναι ανάλογες με την ταχύτητα (Todosiev 1963, Hoefs 1972). Υπάρχει η τάση οι αποστάσεις ασφαλείας να υποεκτιμούνται από τους οδηγούς, κάνοντάς τους να οδηγούν πιο επικίνδυνα και επιθετικά στις μεγάλες ταχύτητες. Αυτό αναπαρίσταται με μια παραβολική σχέση μεταξύ του BX και της πραγματικής ταχύτητας. Η σχέση με την οποία υπολογίζεται είναι:

$$ABX=AX+BX$$

$$\text{Με } BX=(BX_{\text{add}}+BX_{\text{mult}}*RND1)*\sqrt{n}$$

Όπου:

Bxadd και Bxmult είναι παράγοντες βαθμονόμησης

n είναι η ταχύτητα όπου καθορίζεται ως v_{n-1} όταν v_n είναι μεγαλύτερο του v_{n-1} ενώ αντίθετα όταν v_n είναι μικρότερο ή ίσο του v_{n-1} τότε η ταχύτητα παίρνει την τιμή v_n .

Η μέγιστη απόσταση ακολουθίας SDX λαμβάνει τιμές 1.5 με 2.5 φορές μεγαλύτερες από την ελάχιστη απόσταση ακολουθίας ABX. Ορίζεται ως:

$$SDX=AX+ BX*EX \text{ με } EX=EX_{\text{add}}+EX_{\text{mult}}*(NRND-RND2n)$$

Όπου:

EXadd και EXmult είναι παράγοντες της βαθμονόμησης.

NRND είναι ένας φυσικά διανεμημένος αριθμός.

RND2n είναι μεταβλητή που εξετάται από τον οδηγό.

Ένα άλλο κατώφλι που χρησιμοποιεί το μοντέλο του Wiedemann είναι το σημείο προσέγγισης SDV. Χρησιμοποιείται για να υποδείξει το σημείο στο οποίο ο οδηγός του ακολουθούντος οχήματος αντιλαμβάνεται ότι προσεγγίζει ένα όχημα που κινείται με χαμηλότερη από αυτόν ταχύτητα.

$$SDV=(\frac{\Delta X-L_{n-1}-AX}{CX})^2$$

Όπου:

CX είναι παράμετρος της βαθμονόμησης.

Στη συνέχεια υπάρχει η αυξανόμενη διαφορά ταχύτητας OPDV, που περιγράφει το σημείο κατά το οποίο ο οδηγός του ακολουθούντος οχήματος αντιλαμβάνεται ότι κινείται με ταχύτητα χαμηλότερη από αυτή του προπορευόμενου οχήματος. Ορίζεται ως :

$$OPDV = CLDV * (-OPDVadd - OPDVmult * NRND)$$

Όπου:

OPDVadd και OPDVmult είναι παράμετροι της βαθμονόμησης.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα κατώφλια (κατώτατα όρια) που ορίστηκαν παραπάνω για κάθε μία από τις τέσσερις καταστάσεις οδήγησης:

Ακολουθία:

Μ' αυτήν την κατάσταση οδήγησης σχετίζονται τα κατώφλια SDV, SDX, OPDV, ABX. Η επιτάχυνση του οχήματος θεωρείται πάντα διάφορη του μηδενός επειδή υπάρχει ανακρίβεια στο χειρισμό της σε αυτή την κατάσταση. Όταν ένα όχημα βρίσκεται στην κατάσταση ακολουθίας, τότε περνώντας το όριο SDV ή ABX έχει bnull επιβράδυνση ενώ όταν περάσει τα κατώφλια OPDV ή SDX τότε έχει επιτάχυνση bnull.

Η επιτάχυνση ή επιβράδυνση bnull ορίζεται ως:

$$bnull = BNULLmult * (RND4n + NRND)$$

Όπου:

BNULLmult είναι παράμετρος της βαθμονόμησης

NRND είναι ένας φυσικά δομημένος τυχαίος αριθμός

RND4n είναι παράμετρος που εξαρτάται από τον οδηγό

Ελεύθερη οδήγηση:

Σ' αυτό το στάδιο το όχημα βρίσκεται πάνω απ' όλα τα κατώφλια και κινείται με τη μέγιστη δυνατή επιτάχυνση ώστε να φτάσει την επιθυμητή ταχύτητα. Όταν το όχημα φτάσει στην επιθυμητή ταχύτητα και λόγω ελλιπούς ελέγχου του γκαζιού το όχημα αποκτά ρυθμό επιτάχυνσης -bnull ή bnull. Η μέγιστη επιτάχυνση bmax για επιβατηγά οχήματα ορίζεται ως:

$$b_{max} = BMAXmult * (v_{max} - v * FactorV) \text{ με } FactorV = \frac{v_{max}}{v_{des} + FACTORVmult * (v_{max} - v_{des})}$$

Όπου:

V_{\max} είναι η μέγιστη επιτάχυνση του οχήματος

Προσέγγιση:

Όταν περνά το κατώφλι του σημείου προσέγγισης SDV ο οδηγός αντιλαμβάνεται ότι πλησιάζει προς ένα όχημα που κινείται με χαμηλότερη ταχύτητα από αυτόν. Συνεπώς επιβραδύνει ώστε να αποφύγει την σύγκρουση. Η επιβράδυνση αυτή ορίζεται ως:

$$b_n = \frac{1}{2} * \left(\frac{\Delta n^2}{ABX - (\Delta x - L(n - 1))} \right) + b_{n-1}$$

Όπου:

$b_{(n-1)}$ είναι η επιβράδυνση του προπορευόμενου οχήματος.

Πέδηση:

Όταν η απόσταση μεταξύ ακολουθούντος και προπορευόμενου οχήματος γίνει μικρότερη από ABX, λόγω απότομης επιβράδυνσης του προπορευόμενου οχήματος, τότε το όχημα που ακολουθεί προσαρμόζει αν είναι αναγκαίο την ταχύτητα του επιβραδύνοντας όσο χρειάζεται, προκειμένου να αποφύγει τη σύγκρουση. Αυτή η επιβράδυνση ορίζεται ως:

$$b_n = \frac{1}{2} * \left(\frac{\Delta n^2}{AX - (\Delta x - L(n - 1))} \right) + b(n - 1) + b_{min} * \left(\frac{ABX - (\Delta x - L(n - 1))}{BX} \right)$$

Όπου:

b_{min} είναι η ελάχιστη επιβράδυνση του οχήματος και ορίζεται ως:

$$b_{min} = -BMINadd - BMINmult * RND3n + BMINmult * vn$$

Πρότυπο αλλαγής λωρίδας

Το πρότυπο αλλαγής λωρίδας που χρησιμοποιείται στο Vissim είναι αυτό του Mission (Wiedemann & Reiter, 1972) και βασίζεται στις έρευνες και στις μετρήσεις των Willman (1978) και Sparman (1978). Ο Willman ανέπτυξε ένα θεωρητικό πρότυπο που παρουσιάζει τις ανθρώπινες διαδικασίες απόφασης κατά την αλλαγή λωρίδας. Από τη στιγμή που και οι δύο κινήσεις οχημάτων βασίζονται σε ανθρώπινες αποφάσεις που επηρεάζονται από την ανθρώπινη αντίληψη για τα περιβάλλοντα οχήματα και τα δύο πρότυπα έχουν την ίδια βάση: την αντιπροσώπευση της ανθρώπινης αντίληψης για τη σχετική κίνηση των οχημάτων. Το μοντέλο αλλαγής λωρίδας είναι στενά συνδεδεμένο και καθορίζεται βάσει του μοντέλου ακολουθούντος οχήματος. Μέσω μετρήσεων τόσο μικροσκοπικών όσο και μακροσκοπικών που έγιναν απ' τον Sparman, ερευνήθηκε η ανθρώπινη συμπεριφορά κατά την αλλαγή

λωρίδας σε οδούς μιας κατεύθυνσης. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν ώστε να βελτιωθεί το θεωρητικό μοντέλο, να βαθμονομηθεί και να επαληθευτεί.

Κάθε οδηγός που θέλει να αλλάξει λωρίδα απαντά στις τρεις ακόλουθες ερωτήσεις:

1. Υπάρχει η επιθυμία για αλλαγή λωρίδας;
2. Είναι επιθυμητή η κατάσταση στις γειτονικές λωρίδες;
3. Είναι εφικτή η μετακίνηση σε γειτονική λωρίδα;

Καταλαβαίνουμε ότι η απόφαση για αλλαγή λωρίδας από έναν οδηγό εξαρτάται από τις προσωπικές του επιθυμίες για την οδήγηση, για παράδειγμα από την αντίληψη μιας συγκεκριμένης ταχύτητας μετακίνησης, η οποία εκφράζεται ως η επιθυμητή ταχύτητα του οδηγού και από τις πραγματικές κυκλοφοριακές συνθήκες σε διάφορες λωρίδες. Αναλυτικότερα ας δούμε σε τι αφορά κάθε μια ερώτηση απ' τις παραπάνω.

1. Η πρώτη ερώτηση αφορά στην επιθυμία για μετακίνηση από μια αργή λωρίδα σε μία ταχύτερη ή το αντίστροφο. Η επιθυμία για αλλαγή σε ταχύτερη λωρίδα είναι απόρροια οχλήσεων στην λωρίδα κίνησης που προκαλούνται από ένα πιο αργό όχημα που προπορεύεται επηρεάζοντας την κίνηση του εξεταζόμενου οχήματος. Ο βαθμός της όχλησης είναι συνάρτηση της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής ταχύτητας του προπορευόμενου τμήματος και της επιθυμητής ταχύτητας του εξεταζόμενου οχήματος. Η επιθυμία για αλλαγή σε μια πιο αργή λωρίδα είναι απόρροια του γενικού κανόνα κίνησης στα δεξιά ή της πραγματικής ανάγκης να κινηθεί το όχημα στην άκρη ώστε να επιτρέψει την διέλευση ενός ταχύτερα κινούμενου οχήματος.
2. Η αλλαγή λωρίδας σε μια ταχύτερη λωρίδα είναι επιθυμητή εάν το όχημα δεν εμποδίζεται από το προπορευόμενο του όχημα στη λωρίδα αυτή. Η αλλαγή σε ταχύτερη λωρίδα εκτιμάται ως επιθυμητή παρότι ένα όχημα στη νέα λωρίδα διακόπτει την κίνηση του, αν το επίπεδο διακοπής στην παρούσα λωρίδα υπερβαίνει κάποια συγκεκριμένα όρια και αν η ταχύτητα του νέου προπορευόμενου οχήματος είναι θεωρητικά υψηλότερη από την ταχύτητα του παρόντος προπορευόμενου οχήματος. Η αλλαγή σε πιο αργή λωρίδα είναι αποδεκτή στην περίπτωση που το όχημα είναι ικανό να κινηθεί στη λωρίδα αυτή χωρίς να διακόπτεται μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό όριο.

3. Η τρίτη ερώτηση αφορά στο κατά πόσο είναι εφικτή η αλλαγή λωρίδας. Αυτό συμβαίνει όταν δεν προκύπτουν επικίνδυνες καταστάσεις από την πραγματοποίηση του ελιγμού. Η ασφάλεια κάθε ελιγμού υπολογίζεται, εκτιμώντας αποστάσεις και διαφορές ταχύτητας, από τα προπορευόμενα και ακολουθούντα οχήματα στις αντίστοιχες λωρίδες.

Στο μοντέλο ακολουθούντος οχήματος, η επιρροή ενός προπορευόμενου οχήματος που κινείται πιο αργά, καθορίζεται από την απόσταση SDX ενώ το όριο για διαφορές ταχυτήτων είναι το SDV. Αυτού του είδους η επιρροή ονομάζεται άμεση επιρροή. Ένας οδηγός παρατηρεί συνεχώς τα περιβάλλοντα οχήματα, τις αποστάσεις και τις διαφορές ταχυτήτων. Καταγράφει τις αλλαγές και είναι ικανός να εκτιμήσει πώς οι αλλαγές αυτές εξελίσσονται. Με αυτόν τον τρόπο σκέφτεται πιθανές καταστάσεις για τις μελλοντικές αποφάσεις του για αλλαγή λωρίδας. Στο μοντέλο αυτό αντιπροσωπεύεται ως έμμεση επιρροή. Η έμμεση επιρροή αντιπροσωπεύει εκείνες τις καταστάσεις κατά τις οποίες ο οδηγός δεν επηρεάζεται άμεσα απ' το προπορευόμενο όχημα, αλλά εκτιμά ότι είναι αρκετά πιθανό να επηρεαστεί μελλοντικά από αυτό.

Τα κατώφλια που καθορίζουν την περιοχή της έμμεσης επιρροής SDXP, SDVP είναι πολλαπλάσια αυτών της άμεσης επιρροής και ορίζονται ως :

$$SDXP=AX+FX*BX$$

$$SDVP=FV*SDV$$

Όπου FX,FV είναι πολλαπλασιαστικοί παράγοντες που ποικίλουν ανάλογα με το ποιο από τα προπορευόμενα οχήματα παρατηρεί ο οδηγός.

Το μοντέλο αλλαγής λωρίδας στο Vissim

Το μοντέλο αλλαγής λωρίδας που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα Vissim αναπτύχθηκε από τους Willman και Sparmann (1978). Σε αυτό η συμπεριφορά για αλλαγή λωρίδας χωρίζεται σε δύο τύπους:

- Αλλαγή λωρίδας προς ταχύτερη λωρίδα
- Αλλαγή λωρίδας προς πιο αργή λωρίδα

Στο πρόγραμμα Vissim είναι δυνατοί δύο τύποι αλλαγής λωρίδας: ελεύθερες αλλαγές λωρίδας και υποχρεωτικές αλλαγές λωρίδας. Όταν ένα όχημα αναζητεί περισσότερο χώρο και υψηλότερη ταχύτητα, τότε πραγματοποιεί ελεύθερη αλλαγή λωρίδας. Η άλλη περίπτωση είναι η υποχρεωτική αλλαγή λωρίδας, όταν ένα όχημα πραγματοποιεί αλλαγή λωρίδας ώστε να μετακινηθεί σε κάποιον γειτονικό σύνδεσμο που επιθυμεί. Ανεξαρτήτως τύπου αλλαγής

λωρίδας, το πρώτο βήμα που πραγματοποιούν τα οχήματα στο λογισμικό Vissim είναι η αναζήτηση του κατάλληλου χρονικού διαχωρισμού για την πραγματοποίηση ελιγμού.

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Vissim (Κουκουτίμπας, 2011)

Πλεονεκτήματα

- Ενσωματώνει αυτοκινητοδρόμους και αστικές οδούς χωρίς προβλήματα.
- Επιτρέπει προκαθορισμένη και επενεργούμενη από την κυκλοφορία σηματοδότηση καθώς και έλεγχο κλάδων εισόδου (ramp metering).
- Ενσωματώνει λωρίδες υψηλής πλήρωσης (HOV) και στοιχεία μαζικών μεταφορών.
- Ενσωματώνει σιδηροδρομικά συστήματα και συστήματα μαζικής μεταφοράς στην κύρια ροή της κυκλοφορίας.
- Οι παράμετροι συμπεριφοράς του οδηγού ρυθμίζονται για να παρέχουν ευελιξία στη βαθμονόμηση και την επικύρωση.
- Διαθέτει γραφικά τριών διαστάσεων 3D με την προβολή από οποιαδήποτε θέση και γωνία.
- Διαθέτει δυνατότητα εισαγωγής στοιχείων περιβάλλοντος όπως κτίρια, δέντρα, ανθρώπους, για υψηλής ποιότητας γραφικά.
- Δεν υπάρχουν περιορισμοί στον αριθμό των κόμβων, των συνδέσμων και των οχημάτων που πρόκειται να προσομοιωθούν.
- Προσομοιώνει δυναμικό καταμερισμό της κυκλοφορίας – δυνατότητα χρήσης πινάκων Π-Π.
- Παρέχει τη δυνατότητα χρήσης GIS και/ή ορθοφωτοχαρτών.
- Παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης επίλυσης σηματοδοτημένου κόμβου.

Μειονεκτήματα

- Δύσκολη εκμάθηση λόγω πολλών και πολύπλοκων χαρακτηριστικών του λογισμικού.
- Δεν προσομοιώνει κυκλικούς κόμβους άμεσα.
- Έχει υψηλό κόστος αγοράς λογισμικού.
- Η προσομοίωση και η ανάλυση βασίζεται σε θεωρίες αποδοχής διακένου και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν από το HCM.

2.4 Λειτουργία κυκλικών κόμβων

Ο (Fisk, 1991) διερεύνησε δύο τύπους κυκλικών κόμβων: έναν μίας λωρίδας κυκλοφορίας στους κλάδους προσέγγισης και έναν δύο λωρίδων. Ο στόχος ήταν να υπολογιστούν τα

αποτελέσματα της απόδοσής τους με βάση τα πρότυπα προέλευσης-προορισμού, τις ροές εισόδου και τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των οδηγών. Όσον αφορά την πρώτη περίπτωση, χρησιμοποίησε τη σχέση του Tanner (1962) για να εκτιμήσει την κυκλοφοριακή ικανότητα σε κάθε κλάδο, όταν όλοι ήταν κορεσμένοι. Σε συνδυασμό με τη σχέση αυτή χρησιμοποιήθηκαν και άλλες επαναληπτικές σχέσεις, ώστε να λυθεί το σύστημα εξισώσεων που είχε δημιουργηθεί (επρόκειτο για σχέσεις που αφορούσαν κάθε φορά διαφορετικό κλάδο), όπως αυτές των Gauss-Seidel (Ortega και Rheinboldt, 1970). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι όταν όλες οι προσβάσεις του κόμβου είναι κορεσμένες, η κυκλοφοριακή ικανότητα των εισόδων καθορίζεται από την ροή κυκλοφορίας, ενώ όταν δεν είναι κορεσμένες μια αύξηση στη ροή κυκλοφορίας σε μία πρόσβαση είναι δυνατό να επηρεάσει την εκτίμηση του επιπέδου εξυπηρέτησης σε άλλες προσβάσεις και κατ' επέκταση, την καθυστέρηση και το μήκος της ουράς. Για τη διερεύνηση του κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων κυκλοφορίας, χρησιμοποιήθηκε η ίδια μέθοδος με προηγουμένως. Εξήχθη το συμπέρασμα ότι αυξάνοντας τη ροή κυκλοφορίας σε μία πρόσβαση, η επίδραση στις καθυστερήσεις των άλλων προσβάσεων είναι μικρή.

Οι (Vasconelos & al., 2012) συνέκριναν έναν κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας, έναν δύο λωρίδων κι έναν κυκλικό κόμβο turbo ως προς την κυκλοφοριακή τους ικανότητα, την οδική ασφάλεια και την εκπομπή ρύπων. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από την Κοίμπρα της Πορτογαλίας σ' έναν υφιστάμενο κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας. Για τον σκοπό της διερεύνησης της κυκλοφοριακής ικανότητας χρησιμοποιήθηκε το μικροσκοπικό λογισμικό Aimsun, ενώ όσον αφορά την οδική ασφάλεια και τους ρύπους χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα SSAM (surrogate safety assessment model) και το VSP (vehicle-specific power) αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκε περίοδος 24 ωρών όπου καθορίστηκαν οι κυκλοφοριακοί φόρτοι και οι κινήσεις στον υφιστάμενο κυκλικό κόμβο και στη συνέχεια εισήχθησαν στο μοντέλο προσομοίωσης για τους άλλους δύο κόμβους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι και οι δύο κυκλικοί κόμβοι έχουν υψηλότερη κυκλοφοριακή ικανότητα απ' τον υφιστάμενο κόμβο. Μεταξύ τους έχουν παρόμοια αποτελέσματα με τον κυκλικό κόμβο turbo να υπερτερεί στις περιπτώσεις που έχουμε υψηλό ποσοστό δεξιάς στροφής. Όσον αφορά στην οδική ασφάλεια ο κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων είναι η χειρότερη επιλογή ανάμεσα στους τρεις. Ο κυκλικός κόμβος turbo παρουσίασε λιγότερες συγκρούσεις σε σχέση με τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας αλλά αυτές ήταν πιο σοβαρές. Τέλος όσον αφορά τους ρύπους που εκπέμπονται, στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων παράγεται λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με τον κυκλικό κόμβο turbo, αλλά περισσότεροι υδραγονάνθρακες και μονοξείδιο του άνθρακα.

Με βάση τα συνολικά αποτελέσματα ο κυκλικός κόμβος turbo κρίνεται ως ο πιο λειτουργικός κόμβος εκ των τριών.

Οι (Corriere & Guerrieri, 2012) εξέτασαν τη λειτουργία του κυκλικού κόμβου turbo σε αστικό περιβάλλον και υπολόγισαν μέσω αναλυτικών μοντέλων την κυκλοφοριακή ικανότητα στις εισόδους του κόμβου για κάθε λωρίδα ξεχωριστά. Η ανάλυση περιελάμβανε και την επίδραση των πεζών. Αρχικά προσδιορίστηκε η γεωμετρία του κυκλικού κόμβου turbo με το βασικό του χαρακτηριστικό να είναι ο διαχωρισμός των λωρίδων όπου η καθεμία κατευθύνει τον οδηγό στην επιθυμητή κατεύθυνση. Στην μελέτη καθορίστηκαν ως βασικά πλεονεκτήματα του κυκλικού κόμβου turbo τα εξής: ελάχιστα σημεία σύγκρουσης μεταξύ των τροχιών των οδηγών, μικρότερες ταχύτητες μέσα στον κυκλικό κόμβο και χαμηλή επικινδυνότητα και σημειώθηκαν τα εξής βασικά μειονεκτήματα: περισσότερα σημεία σύγκρουσης στις αριστερές στροφές, μεγαλύτερα κρίσιμα διάκενα στις αριστερές στροφές και γενικά χαμηλότερη κυκλοφοριακή ικανότητα απ' τους συμβατικούς κυκλικούς κόμβους δύο λωρίδων. Στη συνέχεια καθορίστηκε η κυκλοφοριακή ικανότητα για κάθε λωρίδα εισόδου. Για τη δεξιά λωρίδα η κυκλοφοριακή ικανότητα υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση Tanner όπως διαμορφώθηκε από τον Brilon (2010) και από το μοντέλο NCHRP Report 672 Model. Για την αριστερή υπολογίστηκε με βάση το Harders model και το μοντέλο NCHRP Report 672 Model. Η επίδραση των πεζών υπολογίστηκε από το Γερμανικό μοντέλο (Brilon et al. 1993). Σαν συμπέρασμα ο κυκλικός κόμβος turbo κρίνεται κατάλληλος για χωροθέτηση σε αστικό περιβάλλον καθώς μετριάζει την ταχύτητα των οχημάτων και προσφέρει ασφάλεια και επαρκή κυκλοφοριακή ικανότητα.

Οι (Gredoska, Bombol, & Nechoska, 2016) συνέκριναν την υφιστάμενη κατάσταση στην Οχρίδα της Βόρειας Μακεδονίας όπου υπάρχουν 3 κόμβοι (2 σηματοδοτημένοι κι ένας κόμβος προτεραιότητας) με την αντικατάστασή τους από κυκλικό κόμβο turbo. Χρησιμοποιήθηκαν δύο σενάρια ένα με την υφιστάμενη κατάσταση και ένα με αυξημένους φόρτους τόσο με την επίδραση των πεζών όσο και χωρίς αυτή. Αυτά τα σενάρια προσομοιώθηκαν με το λογισμικό προσομοίωσης Vissim και με το αναλυτικό μοντέλο των Brilon and Wu. Οι καθυστερήσεις προέκυψαν μικρότερες στον κυκλικό κόμβο turbo, ενώ αυξάνονται όταν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των πεζών. Γενικά παρ' όλες τις μικροδιαφορές στα αποτελέσματα που έχουν οι δύο μέθοδοι καταδεικνύεται ότι ο κυκλικός κόμβος turbo έχει καλύτερη συμπεριφορά απ' τους υφιστάμενους κόμβους όσον αφορά την κυκλοφοριακή ικανότητα.

Οι (Pitlova & Kocianova, 2017) ανέλυσαν έναν υφιστάμενο κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας σε σύγκριση με έναν κυκλικό κόμβο turbo με τη βοήθεια μικροσκοπικής προσομοίωσης αλλά και αναλυτικών μοντέλων. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στη Ζίλινα της Σλοβακίας. Η υφιστάμενη κατάσταση εξετάστηκε με χρήση βίντεο δύο ωρών όπου διαπιστώθηκε η ύπαρξη μεγάλων καθυστερήσεων και ουρών. Έπειτα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με χρήση του λογισμικού Vissim για τους δύο κόμβους. Επιπλέον υπολογίστηκε η κυκλοφοριακή ικανότητα των δύο κόμβων μέσα από δύο θεωρητικά μοντέλα που ακολουθούν τις τεχνικές προδιαγραφές που ισχύουν στη Σλοβακία. Το πρώτο είναι βασισμένο στην εξίσωση του Tanner και το δεύτερο σε μοντέλο του Plank. Σημειώνεται ότι για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε περίοδος μίας ώρας και περίοδος προθέρμανσης 600 δευτερολέπτων. Τα αποτελέσματα μεταξύ προσομοίωσης και αναλυτικών μοντέλων ήταν παρόμοια. Το συμπέρασμα της διερεύνησης είναι ότι κρίνεται θεμιτό ο κυκλικός κόμβος μίας λωρίδας να ανακατασκευαστεί σε κυκλικό κόμβο turbo για να βελτιωθεί η κυκλοφοριακή του ικανότητα και η οδική ασφάλεια.

Οι (Galleli, Iuele, & Vaiana, 2016) εξέτασαν έναν υφιστάμενο κυκλικό κόμβο στην Κωνσταντζα στη Νότιο Ιταλία. Αυτός ο κόμβος είναι δύο λωρίδων με διάμετρο 37.90 μ. και στις δύο κύριες εισόδους (Βόρεια και Νότια) έχει 2 λωρίδες ενώ στις υπόλοιπες δύο έχει μία λωρίδα και αντιμετωπίζει προβλήματα κυκλοφοριακής συμφόρησης. Εξετάζονται οι δυνατότητες και τα οφέλη που προσφέρει η μετατροπή του σε κυκλικό κόμβο turbo. Η απόδοση του υφιστάμενου κόμβου αναλύθηκε μέσω τριών καμερών που κατέγραφαν βίντεο τις ώρες αιχμής. Για τον κυκλικό κόμβο turbo χρησιμοποιήθηκε τόσο η θεωρητική μέθοδος Bonv για την εύρεση της κυκλοφοριακής ικανότητας όσο και μικροσκοπική προσομοίωση μέσω του λογισμικού Vissim. Το συμπέρασμα της ανάλυσης είναι ότι ο κυκλικός κόμβος turbo κρίνεται ασφαλέστερος καθώς καθοδηγεί τον οδηγό σε συγκεκριμένες λωρίδες.

Οι (Tollazzi, Turnšek, & Renčelj, 2012) ανέλυσαν τα αποτελέσματα από την κατασκευή και λειτουργία κυκλικού κόμβου turbo στη Σλοβενία. Ο πρώτος κυκλικός κόμβος turbo κατασκευάστηκε το 2008 και μέχρι το 2012 είχαν κατασκευαστεί επτά, ένας είναι υπό κατασκευή κι άλλοι πέντε ήταν στο στάδιο της μελέτης. Η ιδέα των κυκλικών κόμβων turbo διαδόθηκε πολύ γρήγορα στη Σλοβενία και είχε μεγάλη απήχηση. Αυτό συνέβη επειδή, πρώτον οι πρώτοι κυκλικοί κόμβοι δύο λωρίδων που κατασκευάστηκαν ήταν μικροί οπότε δεν έδιναν τον απαιτούμενο χώρο και χρόνο στους οδηγούς να αλλάξουν λωρίδα ώστε να επιλέξουν την έξοδο που επιθυμούσαν και δεύτερον, οι νέοι οδηγοί δεν προτιμούσαν τους κυκλικούς κόμβους καθώς δεν αισθάνονταν ασφαλείς κατά την αλλαγή λωρίδας. Οι συγγραφείς σημειώνουν ότι οι κυκλικοί κόμβοι turbo βρίσκονται στο Κόπερ και στο

Μάριμπορ αλλά αναμένεται να επεκταθούν και να καθιερωθούν στη Σλοβενία. Όπως και σε άλλα είδη κυκλικών κόμβων βέβαια υπάρχει το πρόβλημα στην κυκλοφορία των πεζών και των ποδηλατών. Οι προτεινόμενες λύσεις σ' αυτό είναι οι εξής: έλεγχος ταχύτητας στις εισόδους και εξόδους του κόμβου, κατασκευή χωριστής νησίδας για πεζούς και ποδηλάτες και κυκλοφορία πεζών και ποδηλατών σε διαφορετικό επίπεδο απ' τα οχήματα.

Οι (Engelsman & Uken, 2007) συνέκριναν τον κυκλικό κόμβο turbo με τους συμβατικούς κυκλικούς κόμβους με βάση τους δείκτες της κυκλοφοριακής ικανότητας και της οδικής ασφάλειας. Επισημάνθηκαν τα σημεία εμπλοκής του κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και η μείωση τους με τον κυκλικό κόμβο turbo όπως επίσης η αύξηση της κυκλοφοριακής ικανότητας με βάση το Ολλανδικό μοντέλο. Κατά συνέπεια προτείνεται ο κυκλικός κόμβος turbo ως λύση για την Νότιο Αφρική θεωρώντας ότι ανταποκρίνεται απόλυτα στην αύξηση της κυκλοφορίας των οχημάτων στις αστικές περιοχές της χώρας.

Ο (Murphy, 2015) ανέλυσε την κατασκευή του πρώτου κυκλικού κόμβου turbo στη Βόρεια Αμερική, στο Εθνικό αεροδρόμιο Βικτώριας στον Καναδά. Λόγω αύξησης του κυκλοφοριακού φόρτου στο συγκεκριμένο αεροδρόμιο αποφασίστηκε η χωροθέτηση ενός κόμβου στην έξοδο του αεροδρομίου που να έχει διάρκεια ζωής είκοσι χρόνια. Ο αρχικός σχεδιασμός περιλάμβανε έναν κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας. Με βάση την αναμενόμενη κυκλοφορία όμως ο συγκεκριμένος κόμβος θα λειτουργούσε επαρκώς μόνο για δεκαπέντε χρόνια καθώς μετά η κυκλοφορία θα αυξανόταν πολύ και θα έπρεπε να ανακατασκευαστεί εκ νέου σε κόμβο δύο λωρίδων. Έτσι αποφασίστηκε η κατασκευή ενός κυκλικού κόμβου turbo με βάση το Ολλανδικό μοντέλο. Εφαρμόστηκε μια παραλλαγή του κλασικού κυκλικού κόμβου turbo με τρεις κλάδους κι αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση των σημείων εμπλοκής και την επαρκή εξυπηρέτηση των εμπλεκόμενων οχημάτων.

Κεφάλαιο 3 – Μεθοδολογία

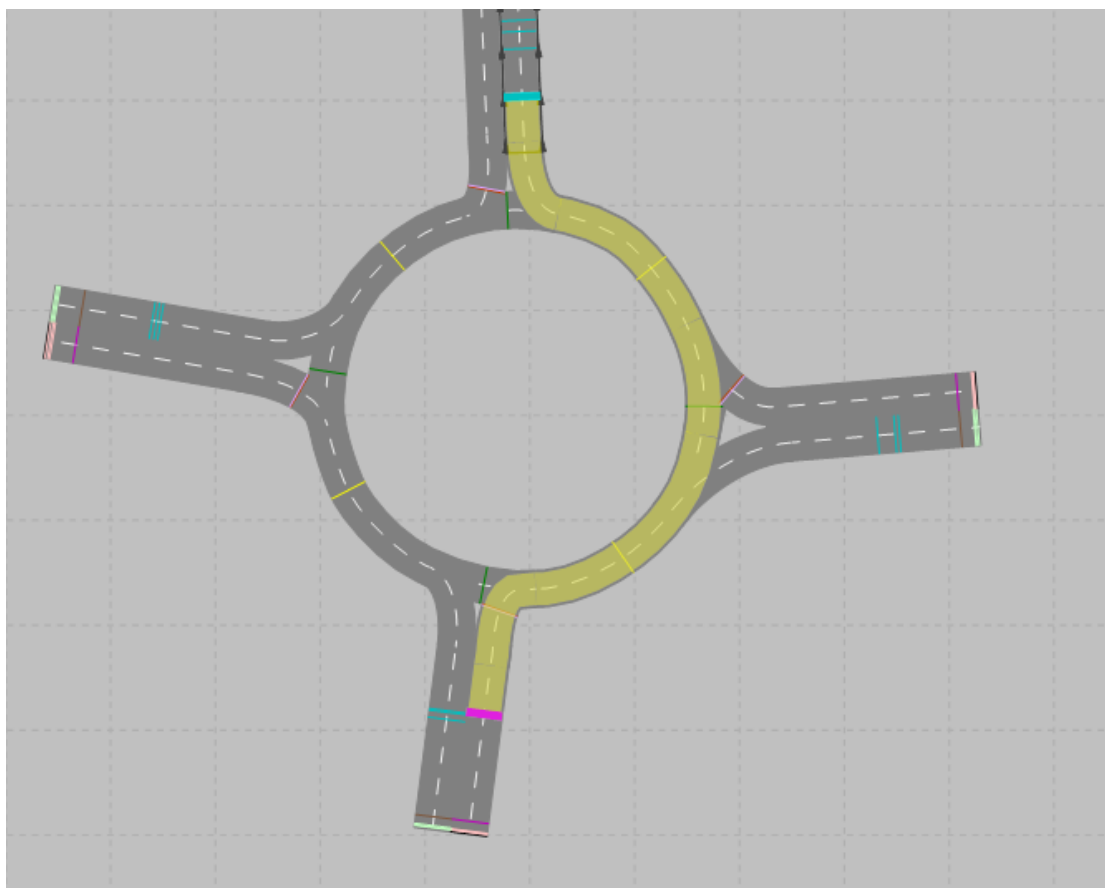
3.1 Στοιχεία του προγράμματος Vissim

Το πρόγραμμα προσομοίωσης Vissim αντιλαμβάνεται κάθε οδικό δίκτυο σαν μια σειρά από συνδέσμους (links) που ενώνονται μεταξύ τους με συνδετήρια οδικά τμήματα (connectors). Κάθε σύνδεσμος, όπως και κάθε συνδετήριο οδικό τμήμα, περιλαμβάνει μια μοναδική κωδικοποίηση, η οποία μπορεί να προσαρμοστεί από τον χρήστη. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη παραμετροποίησης της προσομοίωσης σε ότι αφορά τον αριθμό λωρίδων, το πλάτος λωρίδας, τη συμπεριφορά των οχημάτων, το διάκενο για την είσοδο από δευτερεύουσα οδό καθώς και ρυθμίσεις για το πότε και το πώς τα οχήματα θα αλλάζουν λωρίδα.

Καθορισμός διαδρομών

Μετά τη σχεδίαση του δικτύου και την κωδικοποίηση των κόμβων μέσα από την επιλογή Vehicle routes, καθορίζεται η διαδρομή που θα ακολουθήσει κάθε όχημα. Το πρόγραμμα διαθέτει διάφορους τύπους κατανομής των μετακινήσεων, οι οποίοι και είναι:

- Στατικές διαδρομές: Τα οχήματα κατευθύνονται από ένα καθορισμένο αρχικό σημείο σε ένα καθορισμένο σημείο προορισμού.
- Μερικώς στατικές διαδρομές: ένας τομέας από στατικές διαδρομές όπου τα οχήματα κατανέμονται τυχαία με βάση ποσοστά που συσχετίζονται με την εκάστοτε διαδρομή.
- Διαδρομές προς θέσεις στάθμευσης: δημιουργεί αυτόματα διαδρομές που οδηγούν σε θέσεις στάθμευσης και διαδρομές από τις θέσεις στάθμευσης στο οδικό δίκτυο.
- Διαδρομές μέσω λωρίδων με διαχείριση: δημιουργεί δύο παράλληλες διαδρομές από το σημείο απόφασης στο σημείο προορισμού, ενώ απαιτείται και ένα καθορισμένο από τον χρήστη μοντέλο διοδίων.



Εικόνα 3.1 : Σχεδιασμός διαδρομής

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ο τύπος των στατικών διαδρομών, καθώς δεδομένο εισόδου αποτελεί ο κυκλοφοριακός φόρτος της εκάστοτε κίνησης ο οποίος παραμένει σταθερός στο χρόνο.

Ταχύτητα

Στο Vissim οι ταχύτητες προκύπτουν από μια εμπειρική καμπύλη η οποία μπορεί να καθορισθεί από τον χρήστη. Κάθε όχημα στο δίκτυο κινείται με την επιθυμητή του ταχύτητα μέχρι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού ή το προπορευόμενο όχημα ή οι ζώνες ταχύτητας του προγράμματος να το αναγκάσουν να αλλάξει την ταχύτητά του. Η ταχύτητα στο πρόγραμμα μπορεί να επηρεαστεί με δύο λειτουργίες: τις περιοχές ελάττωσης ταχύτητας (προσωρινή αλλαγή) και τα σημεία καθορισμού ταχύτητας (μόνιμη αλλαγή της ταχύτητας).

Περιοχές ελάττωσης ταχύτητας (Reduced speed areas): Όταν ένα όχημα εισέρχεται σε μια ζώνη ελάττωσης ταχύτητας και η επιθυμητή του ταχύτητα είναι υψηλότερη από την ταχύτητα της περιοχής αρχίζει να επιβραδύνει έως ότου προσεγγίσει την ταχύτητα της περιοχής, ενώ ο ρυθμός επιβράδυνσης καθορίζεται από τον χρήστη. Η επιτρεπόμενη ταχύτητα στις περιοχές ελάττωσης ταχύτητας καθορίζεται για κάθε τύπο οχήματος ξεχωριστά.

Reduced Speed Area

No.: Name:

Link - lane:

Length: Time From:

At: until

Show label

Count: 1	VehClass	DesSpeedDistr	Decel
1	10: Car	5: 5 km/h	2.00

Εικόνα 3.2 : Περιοχές ελάττωσης ταχύτητας - Πηγή:PTV Vissim 11

Σημεία καθορισμού ταχύτητας (Desired speed decision): Σ'αυτά τα σημεία ο χρήστης καθορίζει την ταχύτητα που θα κινούνται τα οχήματα στα συγκεκριμένα σημεία. Μάλιστα υπάρχει η δυνατότητα αυτό να μην ισχύει για όλη την διάρκεια της κάθε προσομοίωσης αλλά και μόνο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Desired Speed Decision

No.: Name:

Link - lane:

At: Time: From:

Show label until

Count: 1	VehClass	DesSpeedDistr
1	10: Car	5: 5 km/h

Εικόνα 3.3 : Σημεία καθορισμού ταχύτητας - Πηγή:PTV Vissim

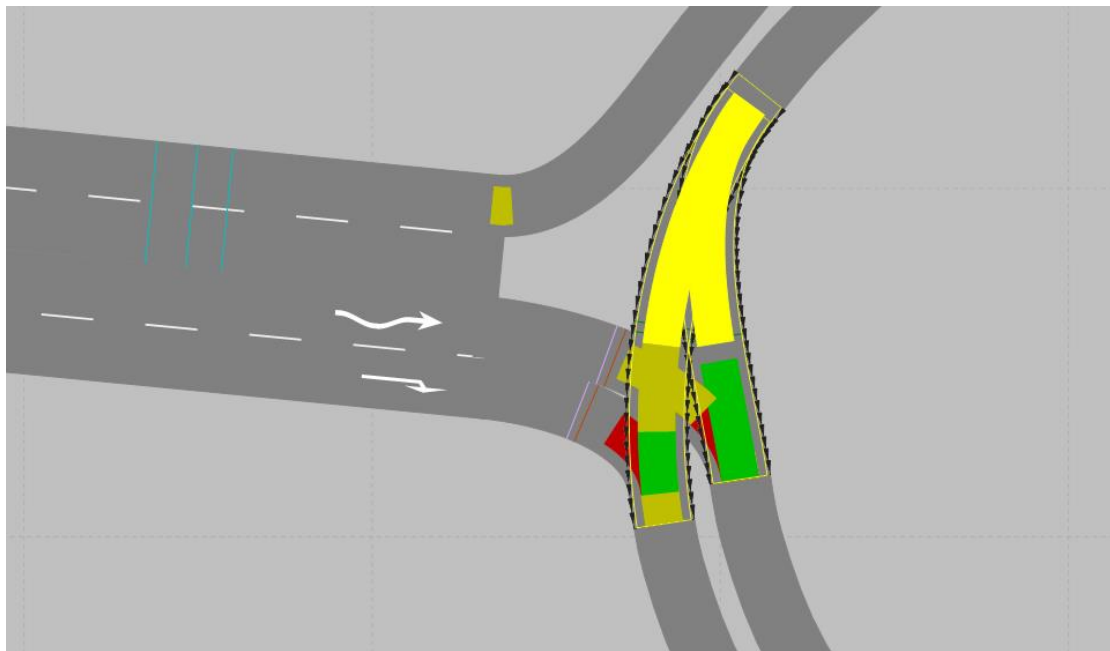
Το Vissim προσφέρει στον χρήστη συγκεκριμένες τιμές για τα όρια ταχύτητας από προεπιλογή, αλλά δίνει και τη δυνατότητα στον χρήστη μέσω της επιλογής κατανομή της ταχύτητας (speed distribution) να καθορίσει ο ίδιος μια διαφορετική τιμή και κατανομή ταχυτήτων με την οποία επιθυμεί να κινούνται τα οχήματα στο δίκτυο.

Κανόνες προτεραιότητας

Οι κανόνες προτεραιότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικοί στο Vissim και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε διασταυρώσεις οδών όπου δεν υπάρχει σηματοδότηση. Οι κανόνες προτεραιότητας μπορούν να οριστούν στο Vissim με δύο τρόπους: είτε με χρήση της επιλογής priority rules είτε με χρήση της επιλογής conflict areas.

Conflict areas (σημεία εμπλοκής)

Οι περιοχές εμπλοκής (conflict areas) είναι μια επιλογή για τον καθορισμό των κανόνων προτεραιότητας σε σημεία που ενώνονται δύο σύνδεσμοι. Για κάθε περιοχή εμπλοκής ο χρήστης μπορεί να καθορίσει ποιος από τους εμπλεκόμενους συνδέσμους είναι αυτός με την προτεραιότητα.



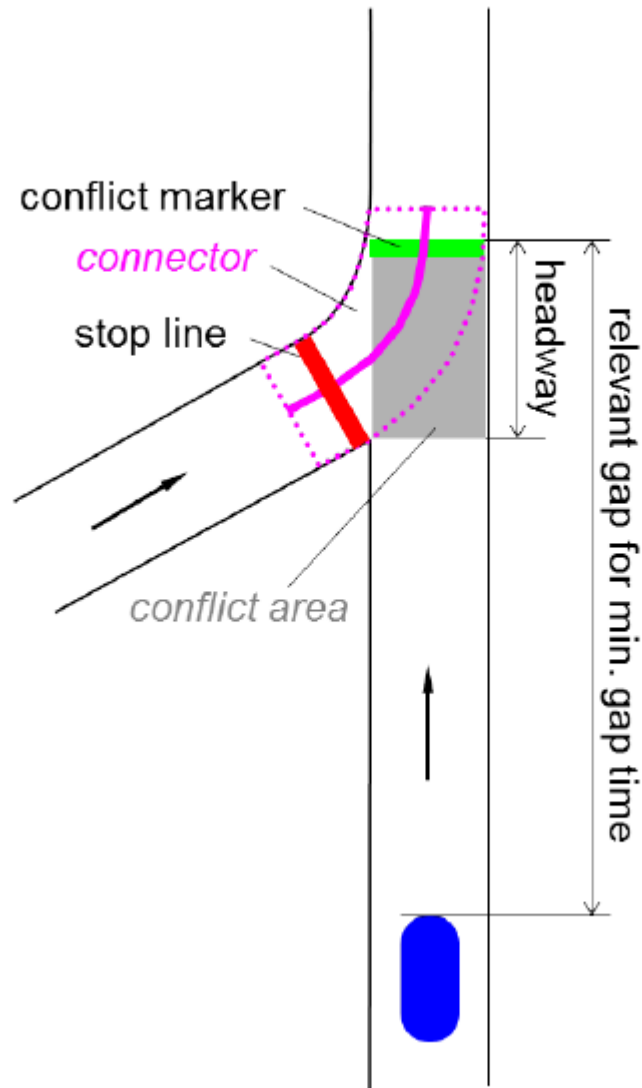
Εικόνα 3.4 : Σημεία εμπλοκής - Πηγή:PTV Vissim 11

Τα σημεία εμπλοκής στο Vissim έχουν τρία χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την αποδοχή διάκενου: το εμπρός διάκενο (front gap) και το πίσω διάκενο (rear gap). Το εμπρός διάκενο (front gap) είναι το ελάχιστο διάκενο μεταξύ του πίσω μέρους ενός οχήματος στον κύριο δρόμο και του μπροστινού μέρους ενός οχήματος στον δευτερεύοντα δρόμο και εκφράζεται

σε δευτερόλεπτα. Πρόκειται ουσιαστικά για τον χρόνο που μεσολαβεί από τη στιγμή που το όχημα με προτεραιότητα αναχωρήσει από την περιοχή πρόσβασης, μέχρι τη στιγμή που το όχημα στη δευτερεύουσα οδό εισέλθει στην περιοχή εμπλοκής. Αντίστοιχα το πίσω διάκενο (rear gap) είναι το ελάχιστο διάκενο σε δευτερόλεπτα μεταξύ του πίσω μέρους ενός οχήματος που μόλις διέσχισε τη δευτερεύουσα οδό και του μπροστινού μέρους του επόμενου οχήματος που ακολουθεί στην κύρια οδό και εκφράζεται επίσης σε δευτερόλεπτα.

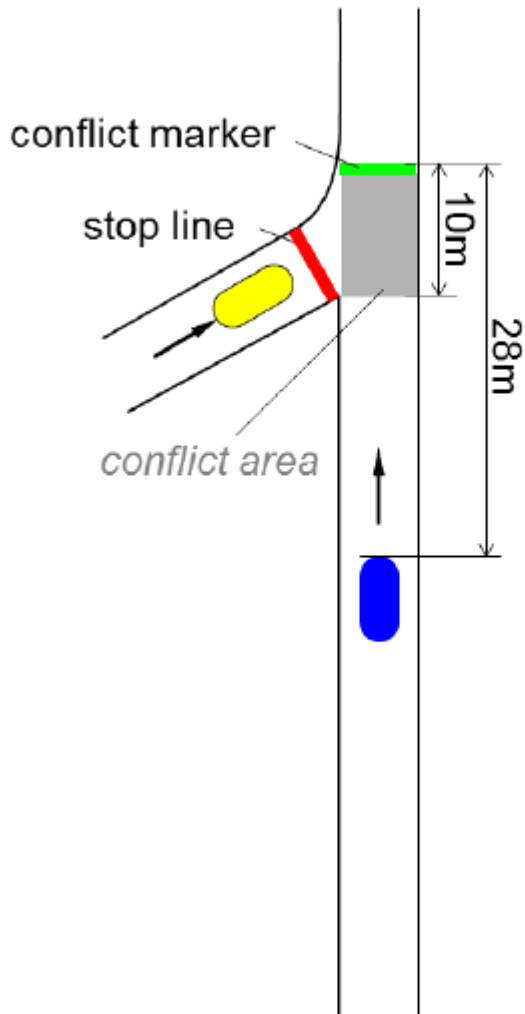
Priority rules (Κανόνες προτεραιότητας)

Ρυθμίζουν την προτεραιότητα σε διασταυρούμενες κινήσεις χωρίς σηματοδότηση. Αποτελούνται από μια γραμμή στάσης (Stop) και ένα ή περισσότερα σημεία εμπλοκής που σχετίζονται με το Stop. Ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες στα σημεία εμπλοκής, τα οχήματα που βρίσκονται στη γραμμή Stop επιτρέπεται ή όχι να περάσουν. Οι συνθήκες αυτές που πρέπει να ικανοποιηθούν αφορούν στο ελάχιστο κρίσιμο διάκενο (min. gap time) και στην ελάχιστη απόσταση σύγκρουσης (min. headway).



Εικόνα 3.5 : Κανόνες προτεραιότητας - Πηγή: PTV Vissim 11

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει αν θα χρησιμοποιήσει κάποιες από τις δύο μεμονωμένα ή και τις δύο μεθόδους σε συνδυασμό. Για κίνηση ελεύθερης ροής στην κύρια οδό το ελάχιστο κρίσιμο διάκενο είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την κίνηση των οχημάτων. Για χαμηλές ταχύτητες ή καταστάσεις ουράς η ελάχιστη απόσταση σύγκρουσης επηρεάζει περισσότερο τη λειτουργία του κόμβου (Galleli & Vaiano 2008, PTV 2009, Trueblood & Dale 2003). Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για την ακριβή χρήση του ελάχιστου κρίσιμου διακένου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω.



Εικόνα 3.6 : Ελάχιστο κρίσιμο διάκενο - Πηγή:PTV Vissim

Στο παραπάνω Εικόνα, για min. gap time =3.0 δλ και $v=14$ μ/δλ ισχυει: Το μπλε όχημα απέχει 28 μέτρα από την πράσινη γραμμή άρα απέχει χρόνο $\frac{x}{v} = \frac{28}{14} = 2$ δλ < 3 δλ. Άρα το κίτρινο όχημα πρέπει να περιμένει.

Εδώ να σημειωθεί ότι το Vissim έχει την δυνατότητα για εγκατάσταση προγράμματος φωτεινής σηματοδότησης αλλά στην συγκεκριμένη εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε.

Προσομοίωση

Η προσομοίωση εμπεριέχει ρυθμίσεις οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν από τον χρήστη. Αυτές είναι :

Περίοδος (Period): Το χρονικό διάστημα για το οποίο πραγματοποιείται η προσομοίωση. Αν χρησιμοποιηθεί περίοδος προθέρμανσης πρέπει να συμπεριληφθεί.

Ανάλυση Προσομοίωσης (Simulation Resolution): Καθορίζει το πόσες φορές θα υπολογιστεί η θέση ενός οχήματος σε κάθε προσομοιωμένο δευτερόλεπτο. Παίρνει τιμές από 1 έως 10 όπου με τη τιμή 1 τα οχήματα κινούνται μία φορά κάθε δευτερόλεπτο ενώ με την τιμή 10 η θέση κάθε οχήματος υπολογίζεται 10 φορές σε κάθε δευτερόλεπτο προσομοίωσης.

Τυχαίος Αριθμός (Random Seed): η παράμετρος αυτή αναφέρεται στη γεννήτρια τυχαίων αριθμών του προγράμματος. Προσομοιώσεις με απaráλλαχτα χαρακτηριστικά και random seed πρόκειται να δημιουργήσουν ίδια αποτελέσματα. Χρησιμοποιώντας διαφορετικό random seed προκαλείται και πιθανή αλλαγή στα αποτελέσματα. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να προσομοιωθεί η στοχαστικότητα της κίνησης των οχημάτων στο οδικό δίκτυο.

Ταχύτητα Προσομοίωσης (Simulation Speed): Ο αριθμός των δευτερόλεπτων προσομοίωσης μέσα σε ένα πραγματικό δευτερόλεπτο. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παραμένουν ανεπηρέαστα απ' την επιλογή αυτή.

Τέλος το Vissim δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη μέσω της επιλογής multiple runs να πραγματοποιεί πολλαπλές προσομοιώσεις με διαφορετικό random seed χωρίς να απαιτείται να το αλλάζει κάθε φορά ο χρήστης. Αρχικά πρέπει να καθοριστεί το αρχικό random seed, έπειτα η αύξησή του κάθε φορά και τέλος ο αριθμός των επαναλήψεων.

Τρόποι αξιολόγησης του δικτύου

Το Vissim περιλαμβάνει πολλούς τρόπους ώστε να αξιολογεί ένα δίκτυο μετά από κάθε προσομοίωση. Κάθε εργαλείο που χρησιμοποιείται πρέπει να οριστεί από πριν στο δίκτυο στο σημείο ή στην περιοχή στην οποία θα πραγματοποιούνται οι μετρήσεις.

Μία επιλογή για αξιολόγηση του δικτύου είναι η τοποθέτηση των εργαλείων μέτρησης σε μια ορισμένη περιοχή κόμβων (nodes). Με τον τρόπο αυτό δεν χρειάζεται να υπάρχουν διαφορετικά σημεία συλλογής δεδομένων για κάθε κίνηση. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι συνάρτηση της διαδρομής των οχημάτων και αφορούν στο μέσο μήκος ουράς (average queue length), στο μέγιστο μήκος ουράς (max queue length), στον χρόνο καθυστέρησης (delay time), στον αριθμό στάσεων ανά όχημα (stops) και στην καθυστέρηση σε στάση (stopped delay).

Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα σημεία συλλογής δεδομένων (data collection points) που χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένα σημεία μέσα στον κόμβο. Τα αποτελέσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι: ο αριθμός των οχημάτων που πέρασαν από κάθε σημείο (vehicles), η μέση επιτάχυνση των οχημάτων (accelaration), η μέση ταχύτητα των οχημάτων (speed), ο χρόνος που τα οχήματα πέρασαν σε κατάσταση συμφόρησης (queue delay).

Επίσης μπορεί να μετρηθεί το μέσο μήκος μιας ουράς (queue length), ο αριθμός των στάσεων σ' ένα σημείο και τέλος μπορεί να μετρηθεί ο χρόνος που χρειάζεται ένα όχημα για να μετακινηθεί από ένα προκαθορισμένο σημείο σε ένα άλλο καθώς και η μέση καθυστέρηση των οχημάτων που πραγματοποιούν αυτή την κίνηση. Σημειώνεται ότι το πρόγραμμα θεωρεί ότι ένα όχημα μπαίνει σε κατάσταση ουράς εάν η ταχύτητά του είναι χαμηλότερη από 5 χλμ/ώρα και έως ότου υπερβεί στη συνέχεια τα 10 χλμ/ώρα.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ο δεύτερος τρόπος αξιολόγησης του δικτύου, δηλαδή η εισαγωγή σημείων δεδομένων καθώς ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης.

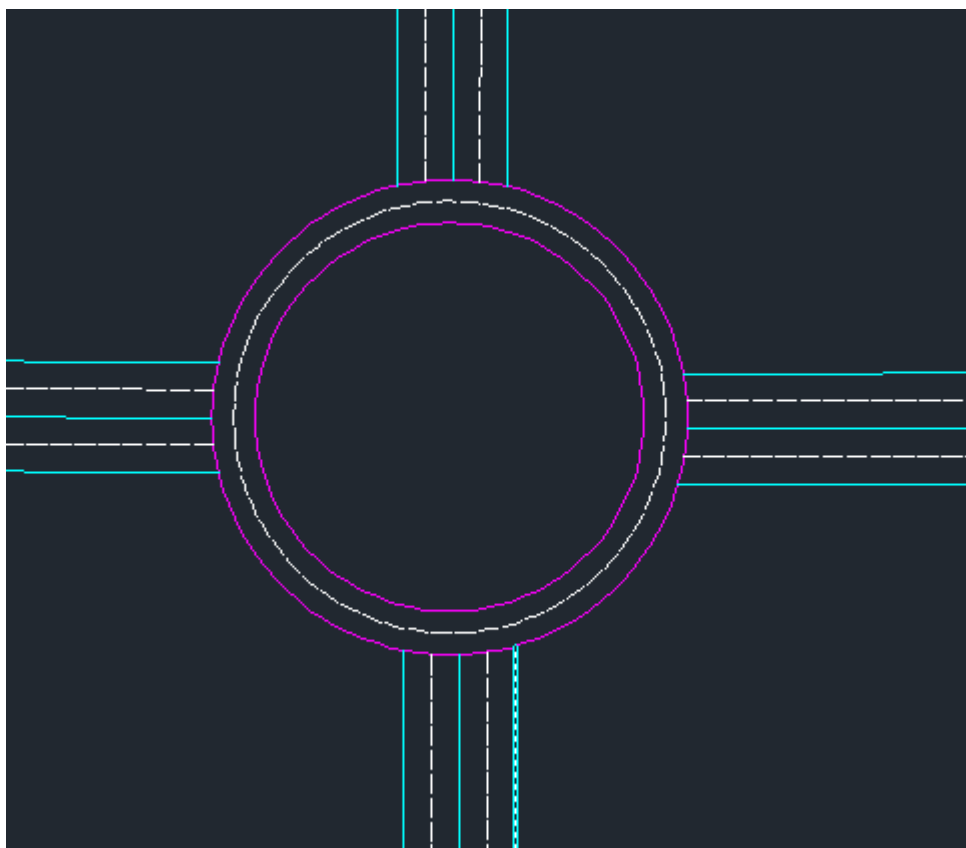
Για κάθε προσομοίωση υπάρχει η δυνατότητα από το πρόγραμμα, μέσω ενός ειδικού εργαλείου (network performance), να αξιολογηθεί όλο το δίκτυο με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τα σημεία συλλογής δεδομένων σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η αξιολόγηση περιλαμβάνει όλα τα οχήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση είτε αυτά εγκατέλειψαν το δίκτυο είτε παρέμειναν. Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορεί να καταγραφεί μια σειρά στοιχείων, όπως:

- Το σύνολο των οχημάτων που παρέμειναν στο δίκτυο, όσα εξήλθαν και όσα δεν πρόλαβαν να μπουν σε αυτό
- Η μέση ταχύτητα των οχημάτων
- Ο συνολικός χρόνος μετακίνησης και η συνολική απόσταση που διένυσαν τα οχήματα
- Η συνολική καθυστέρηση και ο αριθμός των στάσεων των οχημάτων

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορούν να καταχωρηθούν σε μια βάση δεδομένων και με το εργαλείο Analyzer Report να παρουσιαστούν συνολικά ή τμηματικά. Έτσι προκύπτει και η στάθμη εξυπηρέτησης του κόμβου.

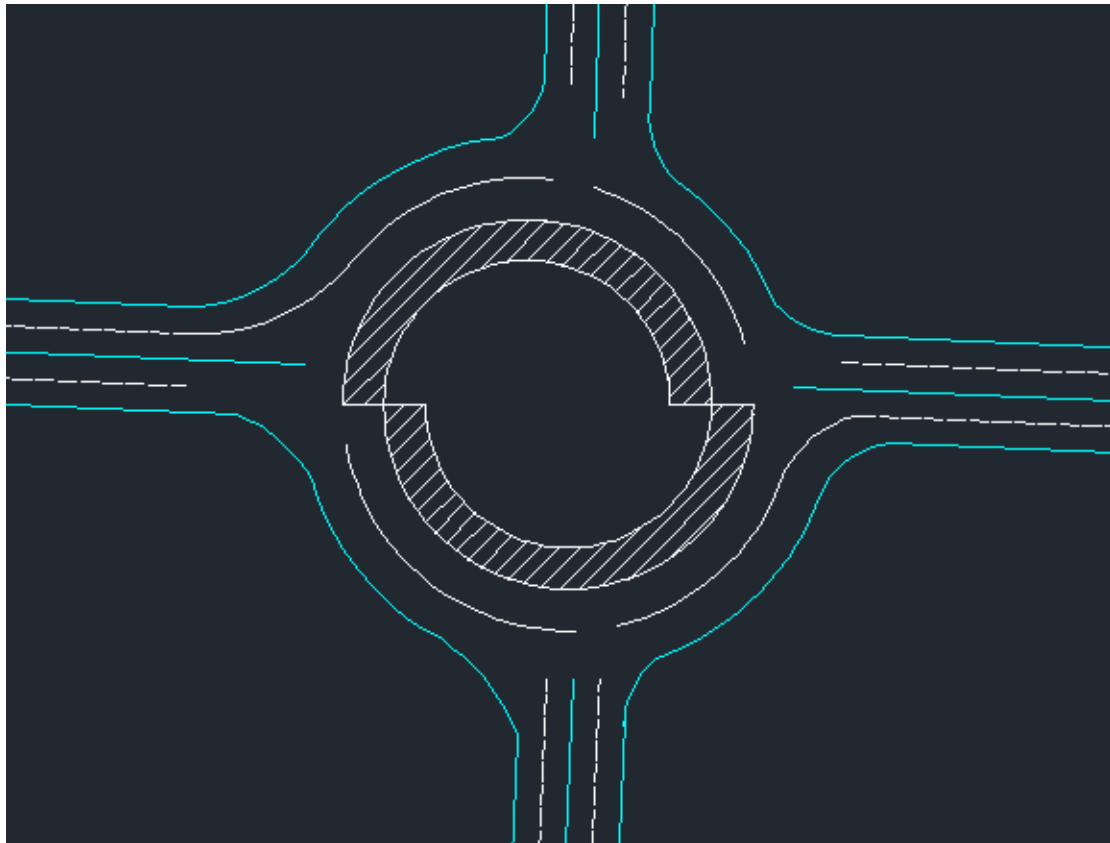
3.2 Σχεδιασμός των κόμβων διερεύνησης

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκαν δύο ισόπεδοι κυκλικοί κόμβοι: ένας κυκλικός κόμβος με δύο λωρίδες κυκλοφορίας κι ένας κυκλικός κόμβος turbo δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Και για τους δύο κόμβους χρησιμοποιήθηκαν εγγεγραμμένοι κύκλοι με διάμετρο 68 μέτρα καθώς επιλέχθηκαν να διερευνηθούν κυκλικοί κόμβοι με μεγάλο μέγεθος διαμέτρου πάνω από 65 μέτρα (Smely et al., 2015). Για να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια στο σχεδιασμό των κόμβων, οι κόμβοι σχεδιάστηκαν αρχικά σε σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD και χρησιμοποιήθηκε το σχέδιο σαν υπόβαθρο για τον σχεδιασμό των κόμβων στο Vissim.



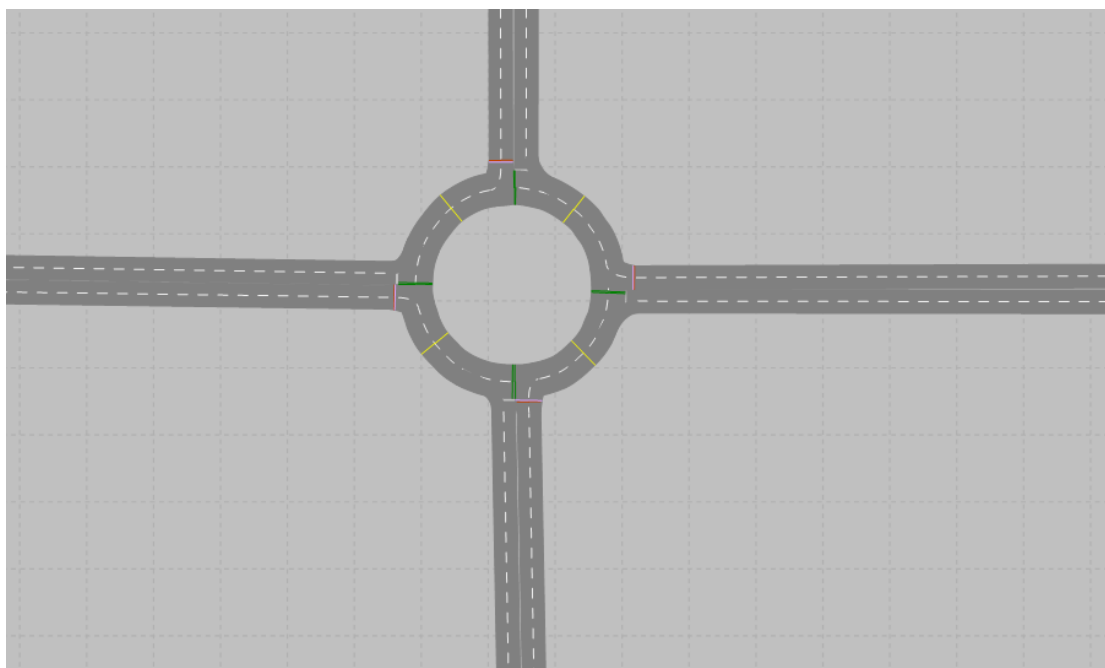
Εικόνα 3.7 : Κυκλικός κόμβος 2 λωρίδων

Ο κυκλικός κόμβος turbo σχεδιάστηκε με πρότυπο τον κλασικό κυκλικό κόμβο turbo που χρησιμοποιείται στην Ολλανδία, όπως αυτός φαίνεται στο Εικόνα 2.9 : κυκλικός κόμβος turbo (Πηγή : Giuffrè et al. 2009). Ο κάθε οδηγός επιλέγει συγκεκριμένη λωρίδα κυκλοφορίας πριν εισέλθει στον κόμβο, ανάλογα με την πορεία που θέλει να ακολουθήσει, ενώ οι αλλαγές λωρίδας μέσα στον κυκλικό κόμβο είναι δυνατές μόνο στα σημεία εισόδου των επιμέρους κλάδων. Το μειονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου κυκλικού κόμβου είναι ότι σε δύο από τις 4 κινήσεις δεν δίνεται η δυνατότητα στα οχήματα να κάνουν πλήρη περιστροφή μέσα στον κόμβο ώστε να κινηθούν προς την κατεύθυνση από την οποία ήρθαν. Στην παρούσα διερεύνηση δεν θα εξεταστούν οι συγκεκριμένες κινήσεις.

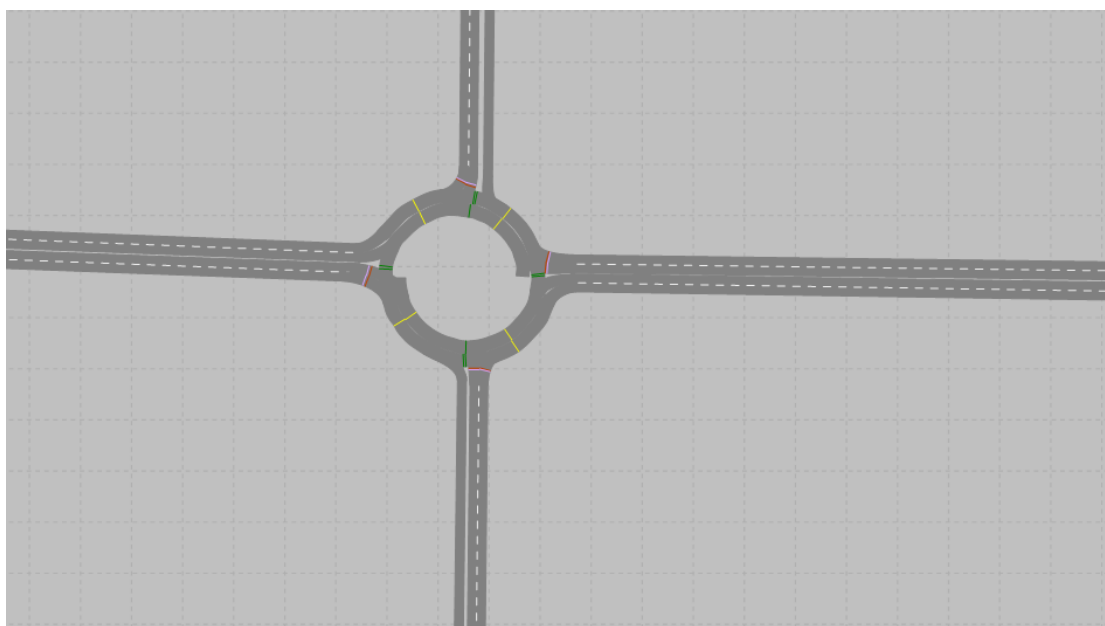


Εικόνα 3.8 : Κυκλικός κόμβος turbo

Και στους δύο κόμβους επιλέχθηκε σαν πλάτος λωρίδας 5 μέτρα ώστε να διευκολύνονται τα οχήματα να εισέλθουν και να εξέλθουν ενώ στους κλάδους εισόδου και εξόδου από και προς τους κόμβους επιλέχθηκε πλάτος 3.5 μέτρα (Corriere and Guerrieri, 2012). Στη συνέχεια με τα εργαλεία Links και Connectors σε συνδυασμό με τα σχέδια από το AutoCAD σχεδιάστηκαν οι δύο κόμβοι στο Vissim.



Εικόνα 3.9 : Κυκλικός κόμβος 2 λωρίδων



Εικόνα 3.10 : Κυκλικός κόμβος turbo

Όπως φαίνεται και παραπάνω οι κλάδοι εισόδου και εξόδου προς τους κόμβους σχεδιάστηκαν με μεγάλο μήκος (δύο χιλιόμετρα) ώστε στις δυσμενέστερες περιπτώσεις κυκλοφορίας να μπορούν να υπολογιστούν τα πλήρη μήκη των ουρών αναμονής. Για τον ορισμό των κανόνων προτεραιότητας επιλέχθηκε το εργαλείο Priority rules. Χρησιμοποιήθηκε το διεθνές πρότυπο σύμφωνα με το οποίο προτεραιότητα έχουν τα οχήματα που κινούνται μέσα στον κόμβο σε αντίθεση με την Ελλάδα όπου συμβαίνει το αντίθετο.

Επίσης χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Desired Speed Decision ώστε να ορίσουμε μέγιστη ταχύτητα 50 χλμ/ώρα θεωρώντας δηλαδή ότι και οι δύο κόμβοι βρίσκονται σε αστικές περιοχές.

Καθορισμός σημείων συλλογής δεδομένων

Για την συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν:

1. Queue counters πριν την είσοδο στον κυκλικό κόμβο ώστε να μετρηθεί το μήκος της ουράς για κάθε κλάδο.
2. Vehicle travel time από κάθε είσοδο προς κάθε έξοδο του κόμβου. Με αυτόν τον τρόπο θα μετρηθεί η μέση καθυστέρηση για κάθε διαδρομή και συνεπώς για όλο τον κόμβο αλλά και η μέση ταχύτητα.

3.3: Επιλογή μεταβλητών προσομοίωσης και καθορισμός σεναρίων διερεύνησης

Για τον καθορισμό των σεναρίων διερεύνησης επιλέχθηκαν οι παρακάτω μεταβλητές:

1. Κυκλοφοριακός φόρτος, ώστε να εξεταστεί πώς ανταποκρίνεται ο κάθε κόμβος σε όλες τις καταστάσεις κυκλοφορίας δηλαδή από καταστάσεις ελεύθερης ροής μέχρι καταστάσεις κορεσμού.
2. Ποσοστό των οχημάτων που εξέρχονται από τον κόμβο στην πρώτη έξοδο. Αυτή η μεταβλητή επιλέχθηκε καθώς ο κυκλικός κόμβος turbo λειτουργεί πολύ καλύτερα σε περιπτώσεις που τα ποσοστά δεξιάς στροφής είναι υψηλά όπως αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία.
3. Ελάχιστο χρονικό διάκενο (minimum gap time) που χρειάζονται οι οδηγοί για να εισέλθουν στον κυκλικό κόμβο για να εξεταστεί πως λειτουργεί ο κάθε κόμβος σε διαφορετικές οδηγικές συμπεριφορές.

3.3.1: Επιλογή κυκλοφοριακού φόρτου

Προκειμένου να γίνει η κατάλληλη επιλογή φόρτων για τις προσομοιώσεις, ελέγχθηκε πώς επηρεάζεται η λειτουργία του κόμβου για διαφορετικές τιμές των φόρτων εισόδου, όταν οι τιμές του διακένου και του ποσοστού δεξιάς στροφής παραμένουν σταθερές. Ως κριτήριο χρησιμοποιήθηκε η μέση καθυστέρηση του κόμβου. Επίσης επιλέχθηκαν οι τιμές min gap time=5 δλ και ποσοστά εξόδου: 20% στην πρώτη έξοδο, 40% στη δεύτερη και 40% στην τρίτη

θεωρώντας αυτό το σενάριο πολύ δυσμενές. Οι μεταβολές που είναι πάνω από 10 % θα μας οδηγήσουν να χρησιμοποιήσουμε μικρότερο βήμα στις προσομοιώσεις ενώ οι μικρές μεταβολές κάτω από 1 % θεωρούνται αμελητέες και θα μας οδηγήσουν να αυξήσουμε το βήμα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα:

Πίνακας 3.1 – Επιλογή κυκλοφοριακού φόρτου διερεύνησης – Μέση καθυστέρηση

κυκλοφοριακός φόρτος	κόμβος δύο λωρίδων (δλ)	κυκλικός κόμβος turbo (δλ)	μεταβολή κυκλικού κόμβου turbo (%)	μεταβολή κόμβου δύο λωρίδων (%)
800	759.6	885.7		
900	831.4	965.2	9.5	9.0
1000	909.7	1052.1	9.4	9.0
1100	997.1	1152.6	9.6	9.6
1200	1086.2	1263.2	8.9	9.6
1300	1153.6	1335.7	6.2	5.7
1400	1233.8	1432.2	7.0	7.2
1500	1251.1	1500.0	1.4	4.7
1600	1354.5	1538.2	8.3	2.5
1700	1365.4	1584.8	0.8	3.0
1800	1457.3	1637.9	6.7	3.3

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η μέση καθυστέρηση κάθε κόμβου για διαφορετικό κυκλοφοριακό φόρτο κάθε φορά καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή της μέσης καθυστέρησης για βήμα φόρτου ίσο με 100. Παρατηρούμε ότι η μέση καθυστέρηση αυξάνεται αρκετά με την μεταβολή του φόρτου αλλά δεν ξεπερνά το όριο του 10%. Οπότε το βήμα 100 για τον κυκλοφοριακό φόρτο κρίνεται ικανοποιητικό. Επιπλέον για τις τιμές 1700 και 1800 το δίκτυο κολλάει και δημιουργεί τεράστιες καθυστερήσεις. Συνεπώς οι τιμές βάσει των οποίων θα γίνουν οι προσομοιώσεις θα είναι οι 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν υψηλές τιμές κυκλοφοριακού φόρτου ώστε η διερεύνηση να πραγματοποιηθεί για κατωτάσεις αυξημένης κυκλοφορίας.

3.3.2: Επιλογή ελάχιστου χρονικού διακένου

Για να καθοριστεί το ελάχιστο χρονικό διάκενο με το οποίο οι οδηγοί από την δευτερεύουσα οδό και συγκεκριμένα από τους κλάδους εισόδου του κυκλικού κόμβου θα εισέρχονται στην κύρια και στην προκειμένη περίπτωση στον κυκλικό δακτύλιο, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διάφορες τιμές διακένου. Αντίστοιχα με πριν επιλέχθηκε το δυσμενέστερο σενάριο με κυκλοφοριακό φόρτο ίσο με 1600 οχήματα και ποσοστά εξόδου: 20% στην πρώτη έξοδο, 40% στη δεύτερη έξοδο και 40% στην τρίτη έξοδο. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία οι τιμές διακένου κυμαίνονται από 3 δλ μέχρι 5 δλ. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκαν τιμές από 3 δλ έως 5 δλ με βήμα 0.5 δλ. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Πίνακας 3.2– Επιλογή διακένου διερεύνησης – Μέση καθυστέρηση

ελάχιστο χρονικό διάκενο (δλ)	κόμβος δύο λωρίδων (δλ)	κυκλικός κόμβος turbo (δλ)	μεταβολή κόμβου δύο λωρίδων (%)	μεταβολή κυκλικού κόμβου turbo (%)
3.0	1356.4	1299.6		
3.5	1369.4	1383.2	1.0	6.4
4.0	1375.8	1426.2	0.5	3.1
4.5	1381.5	1513.8	0.4	6.1
5.0	1392.6	1538.2	0.8	1.6

Παρατηρούμε ότι για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων οι μεταβολές στη μέση καθυστέρηση είναι μικρές, γεγονός που μας οδηγεί στο να αυξήσουμε το βήμα, για τον κυκλικό κόμβο turbo οι μεταβολές είναι αρκετά μεγαλύτερες. Στη συνέχεια ελέγχουμε τη μεταβολή της μέσης καθυστέρησης για διάκενο από 3 σε 4 δλ κι από 4 σε 5 δλ. Οι τιμές για τις δύο αυτές μεταβολές προκύπτουν 7.4% και 9.6 % αντίστοιχα. Οπότε το βήμα αυξάνεται σε 1 s και οι τιμές που επιλέχθηκαν είναι 3 δλ, 4 δλ, 5 δλ. Επισημαίνεται λοιπόν ότι τα αποτελέσματά μας συμφωνούν σε γενικές γραμμές με προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε αντίστοιχες μελέτες.

3.3.2: Επιλογή ποσοστού δεξιάς στροφής

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις ώστε να βρεθεί η κατανομή των φόρτων στις επί μέρους κινήσεις στους δύο κόμβους. Από τη διεθνή βιβλιογραφία έχει επισημανθεί ότι ο κυκλικός κόμβος turbo έχει πλεονεκτήματα για τα οχήματα που θέλουν να εξέλθουν στην πρώτη έξοδο στον κυκλικό κόμβο. Έτσι κρίνεται σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν και αρκετά ακραίες τιμές ποσοστού δεξιάς στροφής που θα φτάνουν το 60%. Επίσης θεωρήθηκε ότι κανένα όχημα δεν θα βγαίνει στην τέταρτη έξοδο καθώς σε αυτήν την περίπτωση θα κινούταν προς την κατεύθυνση από την οποία έρχεται. Έτσι τα οχήματα που δεν εξέρχονται στην πρώτη έξοδο επιλέχθηκε να ισοκατανέμονται στις επόμενες δύο εξόδους. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Πίνακας 3.3 – Επιλογή ποσοστού δεξιάς στροφής – Μέση καθυστέρηση

ποσοστό δεξιάς στροφής	κόμβος δύο λωρίδων (δλ)	κυκλικός κόμβος turbo (δλ)	μεταβολή κόμβου δύο λωρίδων (%)	μεταβολή κυκλικού κόμβου turbo (%)
20%	1354.5	1459.6		
25%	1291.1	1396.4	-4.7	-4.3
30%	1232.9	1378.9	-4.5	-1.3
35%	1214.1	1285.5	-1.5	-6.8
40%	1180.9	1176.5	-2.7	-7.5
45%	1143.3	1076.0	-3.2	-7.5
50%	1098.9	970.9	-3.9	-7.8
55%	1053.7	919.5	-4.1	-5.3
60%	1025.2	890.8	-2.7	-3.1

Παρατηρούμε ότι οι μεταβολές είναι ικανοποιητικές στη μέση καθυστέρηση για βήμα 5% στο ποσοστό στροφής. Ελέγχοντας στη συνέχεια για βήμα 10% βλέπουμε ότι δεν ξεπερνιέται η μεταβολή του 10%. Επί πλέον φαίνεται ξεκάθαρα η πολύ μεγάλη βελτίωση της λειτουργίας του κυκλικού κόμβου turbo για μεγάλο ποσοστό δεξιάς στροφής. Ποσοστά πάνω από 60% κρίθηκαν μη ρεαλιστικά. Τελικά επιλέχθηκε σαν βήμα το 10% και οι τιμές που επιλέχθηκαν για προσομοίωση είναι 20%, 30%, 40%, 50%, 60%.

3.4: Επιλογή του κατάλληλου αριθμού προσομοιώσεων

Οι προσομοιώσεις επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν μέσω στοχαστικών μοντέλων ώστε τα αποτελέσματα να είναι περισσότερο ρεαλιστικά. Αυτή η τυχαιότητα της ανθρώπινης συμπεριφοράς καθορίζεται μέσα από την επιλογή random seed που είναι μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Με αυτόν τον τρόπο εισάγονται στην προσομοίωση διαφορετικά χαρακτηριστικά των οδηγών, όπως ο χρόνος άφιξης στον κόμβο, η τάση για αλλαγή λωρίδας, η επιθετικότητα κ.λ.π. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε σαν αρχική τιμή random seed το 42 με αύξηση 5 μονάδων σε κάθε επανάληψη. Για να έχουμε λοιπόν αξιόπιστα και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα πρέπει να πραγματοποιηθούν παραπάνω από μία επαναλήψεις. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές προσομοιώσεις, για να βρεθεί ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται ώστε ο αριθμός της μέσης καθυστέρησης να συγκλίνει, δηλαδή να μην παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή από τον ένα αριθμό επαναλήψεων στον άλλον. Πραγματοποιήθηκαν 10 επαναλήψεις για κάθε σενάριο. Τα σενάρια για τα οποία έγιναν οι δοκιμές είναι 8 και αφορούν τις ακραίες τιμές των μεταβλητών που επιλέχθηκαν παραπάνω, με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς τους. Θεωρήθηκε ότι η μέση καθυστέρηση συγκλίνει όταν μεταβάλλεται λιγότερο από 5%. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών.

Σενάριο 1:

Πίνακας 3.4 – Επιλογή αριθμου επαναλήψεων – Σενάριο 1

		αριθμός επανα- λήψεων	κόμβος δύο λωρίδων (δλ)	κυκλικός κόμβος turbo (δλ)	μεταβολή κόμβου δύο λωρίδων (%)	μεταβολή κυκλικού κόμβου turbo (%)
Κυκλοφοριακός φόρτος	1600	1	1422.8	1267.5		
Ποσοστό δεξιάς στροφής	20%	2	1425.4	1277.5	0.2	0.8
Ελάχιστο χρονικό διάκενο	3	3	1462.9	1287.1	2.6	0.7
		4	1455.9	1285.7	-0.5	-0.1
		5	1330.4	1281.6	-8.6	-0.3
		6	1365.2	1286.1	2.6	0.4
		7	1230.3	1294.1	-9.9	0.6
		8	1284.3	1290.5	4.4	-0.3

		9	1312.5	1290.1	2.2	0.0
		10	1254.5	1289.0	-4.4	-0.1

Σενάριο 2:

Πίνακας 3.5 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 2

		αριθμός επανα- λήψεων	κόμβος δύο λωρίδων (δλ)	κυκλικός κόμβος turbo (δλ)	μεταβολή κόμβου δύο λωρίδων (%)	μεταβολή κυκλικού κόμβου turbo (%)
		1	1022.9	572.9		
		2	1023.8	583.9	0.1	1.9
Κυκλοφοριακός φόρτος	1600	3	1014.5	603.2	-0.9	3.3
Ποσοστό δεξιάς στροφής	60%	4	1021.5	598.4	0.7	-0.8
Ελάχιστο χρονικό διάκενο	3	5	1022.6	592.4	0.1	-1.0
		6	1025.5	600.6	0.3	1.4
		7	1031.7	602.5	0.6	0.3
		8	1032.4	606.1	0.1	0.6
		9	1030.0	608.0	-0.2	0.3
		10	1028.8	609.9	-0.1	0.3

Σενάριο 3:

Πίνακας 3.6 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 3

		αριθμός επανα- λήψεων	κόμβος δύο λωρίδων (δλ)	κυκλικός κόμβος turbo (δλ)	μεταβολή κόμβου δύο λωρίδων (%)	μεταβολή κυκλικού κόμβου turbo (%)
		1	540.5	693.2		
		2	552.0	698.9	2.1	0.8

		3	544.1	703.9	-1.4	0.7
Κυκλοφοριακός φόρτος	800	4	545.4	703.4	0.2	-0.1
Ποσοστό δεξιάς στροφής	20%	5	543.4	696.4	-0.4	-1.0
Ελάχιστο χρονικό διάκενο	5	6	540.4	696.1	-0.5	-0.1
		7	553.8	701.7	2.5	0.8
		8	559.1	705.1	1.0	0.5
		9	558.9	703.2	0.0	-0.3
		10	558.1	705.9	-0.1	0.4

Σενάριο 4:

Πίνακας 3.7 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 4

		αριθμός επαναλήψεων	κόμβος δύο λωρίδων (δλ)	κυκλικός κόμβος turbo (δλ)	μεταβολή κόμβου δύο λωρίδων (%)	μεταβολή κυκλικού κόμβου turbo (%)
		1	1341.6	1513.4		
		2	1419.9	1523.0	5.8	0.6
		3	1460.7	1529.4	2.9	0.4
Κυκλοφοριακός φόρτος	1600	4	1470.8	1522.4	0.7	-0.5
Ποσοστό δεξιάς στροφής	20%	5	1471.8	1513.0	0.1	-0.6
Ελάχιστο χρονικό διάκενο	5	6	1476.5	1510.9	0.3	-0.1
		7	1483.4	1512.9	0.5	0.1
		8	1488.8	1514.6	0.4	0.1
		9	1494.3	1517.2	0.4	0.2
		10	1499.4	1519.7	0.3	0.2

Σενάριο 5:

Πίνακας 3.8 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 5

		αριθμός επανα- λήψεων	κόμβος δύο λωρίδων (δλ)	κυκλικός κόμβος turbo (δλ)	μεταβολή κόμβου δύο λωρίδων (%)	μεταβολή κυκλικού κόμβου turbo (%)
		1	143.3	56.1		
		2	163.2	66.8	13.9	19.1
		3	178.0	76.3	9.1	14.3
Κυκλοφοριακός φόρτος	800	4	179.8	69.7	1.0	-8.7
Ποσοστό δεξιάς στροφής	60%	5	175.9	65.0	-2.2	-6.7
Ελάχιστο χρονικό διάκενο	5	6	184.3	67.7	4.8	4.0
		7	181.6	73.2	-1.5	8.1
		8	186.7	74.5	2.8	1.9
		9	192.1	74.1	2.9	-0.6
		10	186.5	73.9	-2.9	-0.3

Σενάριο 6:

Πίνακας 3.9 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 6

		αριθμός επανα- λήψεων	κόμβος δύο λωρίδων (δλ)	κυκλικός κόμβος turbo (δλ)	μεταβολή κόμβου δύο λωρίδων (%)	μεταβολή κυκλικού κόμβου turbo (%)
		1	1019.3	1027.7		
		2	1027.3	1037.2	0.8	0.9
		3	1033.0	1052.7	0.6	1.5

Κυκλοφοριακός φόρτος	1600	4	1042.9	1055.1	1.0	0.2
Ποσοστό δεξιάς στροφής	60%	5	1041.5	1049.6	-0.1	-0.5
Ελάχιστο χρονικό διάκενο	5	6	1042.7	1058.7	0.1	0.9
		7	1049.6	1056.5	0.7	-0.2
		8	1052.2	1056.7	0.2	0.0
		9	1051.3	1058.9	-0.1	0.2
		10	1045.4	1059.6	-0.6	0.1

Σενάριο 7:

Πίνακας 3.10 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 7

		αριθμός επαναλήψεων	κόμβος δύο λωρίδων (δλ)	κυκλικός κόμβος turbo (δλ)	μεταβολή κόμβου δύο λωρίδων (%)	μεταβολή κυκλικού κόμβου turbo (%)
		1	374.4	233.8		
		2	369.8	253.9	-1.2	8.6
		3	434.7	276.0	17.6	8.7
Κυκλοφοριακός φόρτος	800	4	491.5	266.9	13.1	-3.3
Ποσοστό δεξιάς στροφής	20%	5	484.6	261.7	-1.4	-2.0
Ελάχιστο χρονικό διάκενο	3	6	452.6	266.1	-6.6	1.7
		7	470.3	266.8	3.9	0.2
		8	469.6	270.0	-0.2	1.2
		9	451.5	268.4	-3.8	-0.6
		10	449.1	269.9	-0.5	0.6

Σενάριο 8:

Πίνακας 3.11 – Επιλογή αριθμού επαναλήψεων – Σενάριο 8

		αριθμός επανα- λήψεων	κόμβος δύο λωρίδων (δλ)	κυκλικός κόμβος turbo (δλ)	μεταβολή κόμβου δύο λωρίδων (%)	μεταβολή κυκλικού κόμβου turbo (%)
		1	18.4	8.6		
		2	17.9	8.7	-2.7	0.6
		3	18.0	8.8	0.4	2.0
Κυκλοφοριακός φόρτος	800	4	17.8	8.6	-1.0	-2.2
Ποσοστό δεξιάς στροφής	60%	5	17.5	8.6	-1.6	-0.6
Ελάχιστο χρονικό διάκενο	3	6	18.1	8.7	3.6	1.8
		7	18.4	8.8	1.5	0.9
		8	19.1	8.9	3.6	0.8
		9	18.9	9.0	-0.8	0.9
		10	19.0	8.9	0.6	-0.2

Παίρνοντας την μέγιστη τιμή λοιπόν με βάση το σενάριο 1, η μεταβολή πέφτει οριστικά κάτω από το 5% στην επανάληψη 8. Για μεγαλύτερη ακρίβεια όμως θα πραγματοποιηθούν 10 επαναλήψεις για κάθε σενάριο.

3.5: Παραδοχές και σταθεροί παράμετροι προσομοίωσης

Περίοδος προσομοίωσης: Ορίστηκε η 1 ώρα.

Ανάλυση προσομοίωσης: Ορίστηκε στα 5 χρονικά βήματα, άρα η θέση των οχημάτων καταγράφεται 5 φορές ανά δευτερόλεπτο.

Χρονικό διάστημα προθέρμανσης: Ορίστηκε στα 900 δλ ώστε οι μετρήσεις καθυστερήσεων και ουρών να αρχίσουν όταν το δίκτυο θα έχει γεμίσει με οχήματα.

Όσον αφορά το πρότυπο ακολουθούτσος οχήματος και το πρότυπο αλλαγής λωρίδας που περιλαμβάνει τιμές μεγεθών που ορίζουν την συμπεριφορά των οχημάτων, ορίστηκαν οι default επιλογές που είχε απο πριν το Vissim.

Following	Car following model	Lane Change	Lateral	Signal Control	Meso
Look ahead distance					
Minimum:	0.00 m				
Maximum:	250.00 m				
Number of interaction objects:	4				
Number of interaction vehicles:	99				
Look back distance					
Minimum:	0.00 m				
Maximum:	150.00 m				
Temporary lack of attention					
Duration:	0 s				
Probability:	0.00 %				
<input type="checkbox"/>	Standstill distance for static obstacles:	0.50 m			
<input type="checkbox"/>	Enforce absolute braking distance	i			
<input checked="" type="checkbox"/>	Use implicit stochastics				

Εικόνα 3.21 : Car following model 1 – Πηγή: PTV Vissim 11

Following Car following model Lane Change Lateral Signal Control Meso

Wiedemann 74

Model parameters

Average standstill distance: 2.00 m

Additive part of safety distance: 2.00

Multiplic. part of safety distance: 3.00

Following behavior depending on the vehicle class of the leading vehicle:

Εικόνα 3.22 : Car following model 2 – Πηγή: PTV Vissim 11

Following Car following model Lane Change Lateral Signal Control Meso

General behavior: Free lane selection

Necessary lane change (route)

	Own	Trailing vehicle
Maximum deceleration:	-4.00 m/s ²	-3.00 m/s ²
- 1 m/s ² per distance:	100.00 m	100.00 m
Accepted deceleration:	-1.00 m/s ²	-1.00 m/s ²

Waiting time before diffusion: 60.00 s Overtake reduced speed areas

Min. net headway (front to rear): 0.50 m Advanced merging

To slower lane if collision time is above: 11.00 s Vehicle routing decisions look ahead

Safety distance reduction factor: 0.60

Maximum deceleration for cooperative braking: -3.00 m/s²

Cooperative lane change

Maximum speed difference: 10.80 km/h

Maximum collision time: 10.00 s

Rear correction of lateral position

Maximum speed: 3.00 km/h

Active during time period from 1.00 s until 10.00 s after lane change start

Εικόνα 3.23 : Lane change – Πηγή: PTV Vissim 11

3.6: Καθορισμός τελικών σεναρίων μελέτης

Τελικά διαμορφώθηκαν 135 σεναρία για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων και για τον κυκλικό κόμβο turbo. Αυτά περιλαμβάνουν όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των μεταβλητών που καθορίστηκαν παραπάνω. Πιο αναλυτικά:

Πίνακας 3.12– Μεταβλητές προσομοίωσης

Μεταβλητές	Τιμές μεταβλητών
Κυκλοφοριακός φόρτος	800,900,1000,1100,1200,1300,1400,1500,1600
Ποσοστό δεξιάς στροφής	20%, 30%, 40%,50%, 60%
Ελάχιστο χρονικό διάκενο	3 , 4 , 5

Τα στοιχεία που μετρήθηκαν από αυτές τις προσομοιώσεις είναι: η μέση καθυστέρηση κάθε κόμβου, το μέσο μήκος ουράς για κάθε κλάδο και η μέση ταχύτητα των οχημάτων.

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

4.1 Γενικά στοιχεία

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν τα αποτελέσματα για τις 135 προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Τα σενάρια θα αξιολογηθούν με βάση τους λειτουργικούς δείκτες: μέση χρονική καθυστέρηση κόμβου, μέση ταχύτητα και μήκος ουράς για κάθε πρόσβαση. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν μέσω πινάκων και διαγραμμάτων με βάση την επιρροή που έχουν στους κόμβους ο κυκλοφοριακός φόρτος, το ελάχιστο χρονικό διάκενο και η κατανομή των οχημάτων στις εξόδους των κυκλικών κόμβων. Πρόκειται δηλαδή να αναλυθεί πώς επηρεάζει κάθε μέγεθος τη λειτουργικότητα των δύο κόμβων που εξετάστηκαν, όταν οι άλλες δύο παράμετροι παραμένουν σταθερές.

Στη συνέχεια θα γίνει η σύγκριση των δύο κόμβων και το πώς αυτοί ανταποκρίνονται σε διαφορετικές καταστάσεις κυκλοφορίας των οχημάτων. Το κύριο ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί είναι αν, με δεδομένη την υπεροχή του κυκλικού κόμβου turbo σε θέματα οδηγικής ασφάλειας σε σχέση με έναν συμβατικό κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων, ισχύει το ίδιο και για τη λειτουργικότητά του.

4.2 Επιρροή της κατανομής των μετακινήσεων

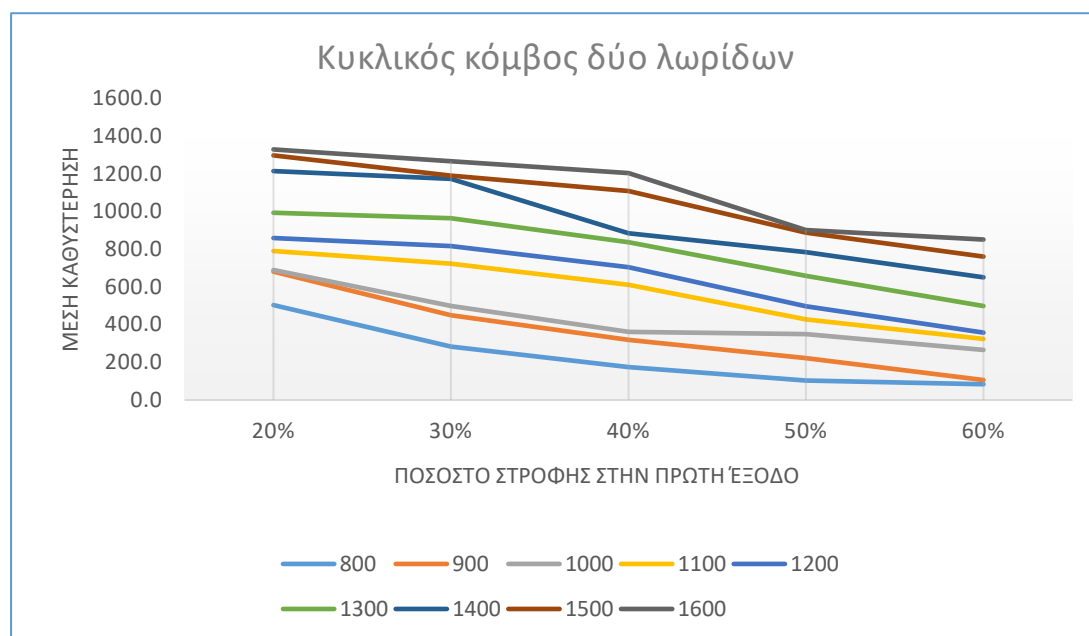
Στα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν εξετάστηκαν πέντε διαφορετικές περιπτώσεις για την κατανομή των οχημάτων στις εξόδους του κόμβου τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 4.1: Ποσοστά στροφής σε κάθε έξοδο του κυκλικού κόμβου.

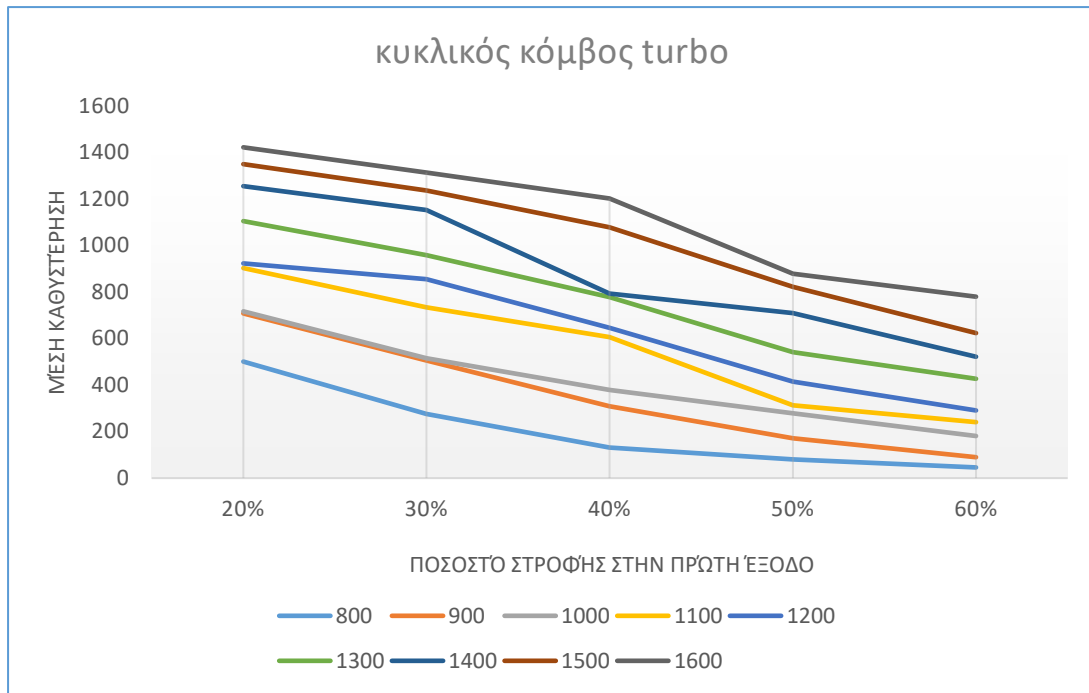
1 ^η έξοδος	2 ^η έξοδος	3 ^η έξοδος
20%	40%	40%
30%	35%	35%
40%	30%	30%
50%	25%	25%
60%	20%	20%

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1 η παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε είναι το ποσοστό των οχημάτων που στρίβουν στην πρώτη έξοδο, ενώ τα υπόλοιπα οχήματα θεωρείται ότι ισομοιράζονται στις άλλες δύο εξόδους.

Αρχικά θα παρουσιαστούν δύο διαγράμματα, ένα για κάθε κόμβο, στα οποία θα εξετάζεται η μεταβολή της μέσης καθυστέρησης του κόμβου σε σχέση με το ποσοστό στροφής στην πρώτη έξοδο, για διάφορες τιμές του κυκλοφοριακού φόρτου. Για το σκοπό αυτό το ελάχιστο χρονικό διάκενο θεωρήθηκε σταθερό και ίσο με 4 δλ.



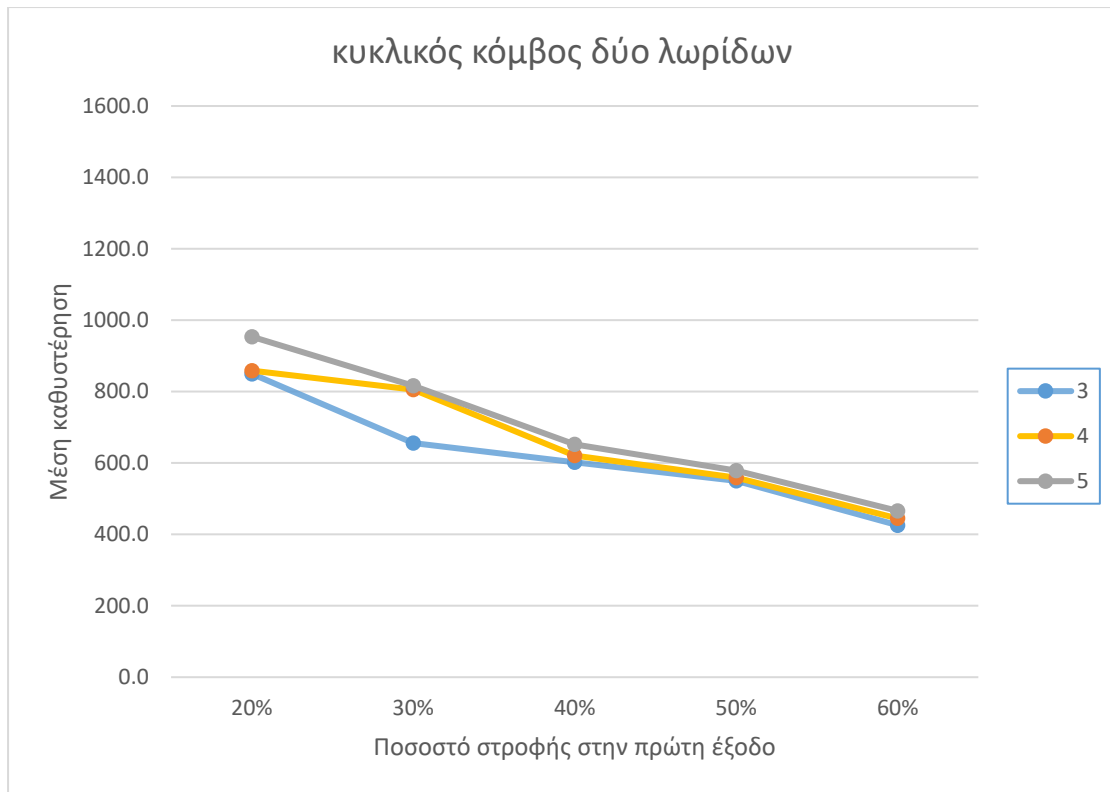
Εικόνα 4.1: Σχέση φόρτου και ποσοστού στροφής στην πρώτη έξοδο – Κυκλικός κόμβος 2 λωρίδων



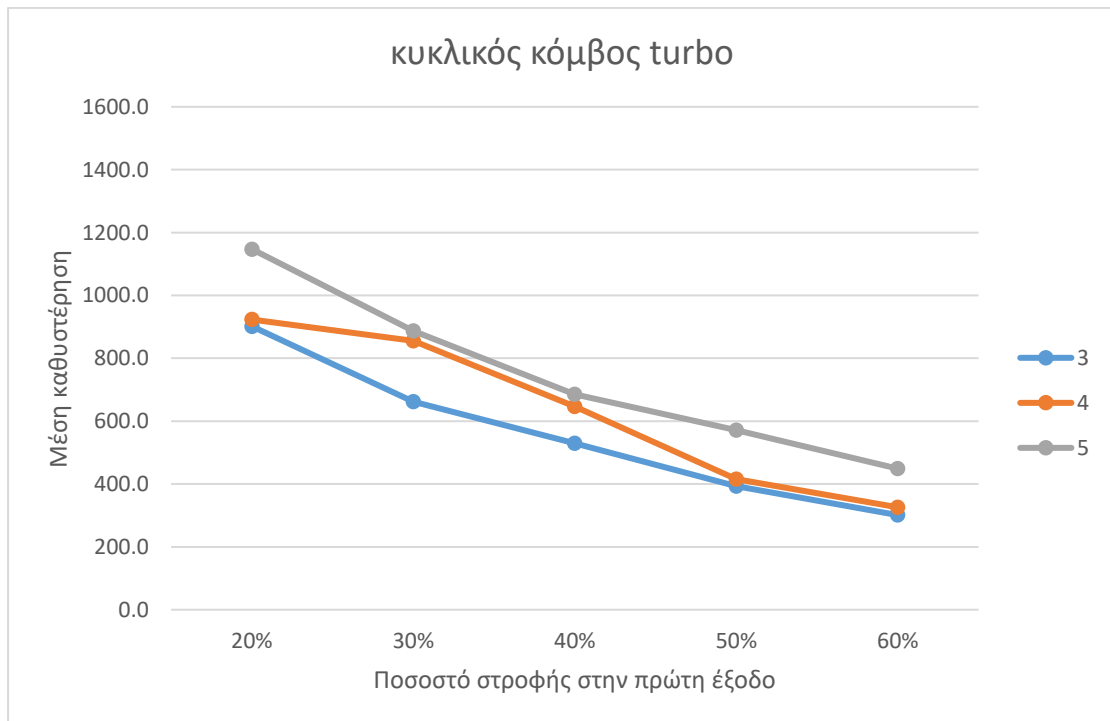
Εικόνα 4.2: Σχέση κυκλοφοριακού φόρτου και ποσοστού στροφής στην πρώτη έξοδο – κυκλικός κόμβος turbo

Παρατηρούμε ότι η μέση καθυστέρηση μειώνεται με σχετικά σταθερό ρυθμό όσο αυξάνεται το ποσοστό στροφής στην πρώτη έξοδο και για τους δύο κόμβους. Αυτό ισχύει για όλους τους εξεταζόμενους κυκλοφοριακούς φόρτους με παρόμοιο τρόπο, χωρίς δηλαδή να παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη αλλαγή όσο αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος. Επίσης παρατηρούμε ότι ο κυκλικός κόμβος turbo παρουσιάζει μεγαλύτερη μείωση στη μέση καθυστέρηση σε σχέση με τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων, δηλαδή βελτιώνεται περισσότερο η λειτουργικότητά του καθώς αυξάνεται το ποσοστό των οχημάτων που βγαίνουν στην πρώτη έξοδο.

Αντίστοιχα στη συνέχεια θα θεωρηθεί ο κυκλοφοριακός φόρτος σταθερός ίσος με 1200 οχήματα και θα παρουσιαστούν δύο διαγράμματα στα οποία θα εξετάζεται η μεταβολή της μέσης καθυστέρησης σε σχέση με τα ποσοστά στροφής στην πρώτη έξοδο, για όλες τις τιμές του ελάχιστου χρονικού διακένου που έχουν εξεταστεί.



Εικόνα 4.3: Σχέση ελάχιστου χρονικού διακένου και ποσοστού στροφής στην πρώτη έξοδο – Κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων



Εικόνα 4.4: Σχέση ελάχιστου χρονικού διακένου και ποσοστού στροφής στην πρώτη έξοδο – κυκλικός κόμβος turbo

Παρατηρούμε, όπως είναι λογικό, ότι η μέση καθυστέρηση μειώνεται καθώς μειώνεται το ελάχιστο χρονικό διάκενο. Επίσης είναι φανερό ότι ο κυκλικός κόμβος turbo δείχνει να επηρεάζεται πιο πολύ από τη μείωση του διακένου.

Σύγκριση των δύο κυκλικών κόμβων

Με βάση τα Εικόνματα 4.3 και 4.4 θα διερευνήσουμε περαιτέρω το πώς επηρεάζεται ο κάθε κυκλικός κόμβος από την αύξηση του ελάχιστου χρονικού διακένου. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται δύο πίνακες: ένας με τις τιμές της μέσης καθυστέρησης για κάθε κόμβο σε σχέση με το ελάχιστο διάκενο και το ποσοστό δεξιάς στροφής και ένας πίνακας μεταβολών όπου θα φαίνεται πώς μεταβάλλεται η μέση καθυστέρηση στους δύο κόμβους με την αύξηση του ποσοστού στροφής και την αύξηση του ελάχιστου χρονικού διακένου. Ο κυκλοφοριακός φόρτος θα θεωρηθεί πάλι ίσος με 1200.

Πίνακας 4.2 : Πίνακας μέσης καθυστέρησης

κυκλοφοριακός φόρτος	ελάχιστο διάκενο (δλ)	Ποσοστό δεξιάς στροφής	Μέση καθυστέρηση (κυκλικός κόμβος 2 λωρίδων)	Μέση καθυστέρηση (κυκλικός κόμβος turbo)
1200	4	20%	858.8	923.2
1200	4	30%	805.3	855.6
1200	4	40%	620.5	646.7
1200	4	50%	559.2	415.4
1200	4	60%	444.8	325.9

Πίνακας 4.3 : Πίνακας μεταβολών με βάση το ποσοστό στροφής στην πρώτη έξοδο

Ελάχιστο χρονικό διάκενο	3 δλ		4 δλ		5 δλ	
	2 λωρίδων	turbo	2 λωρίδων	turbo	2 λωρίδων	turbo
20% - 30%	-22.8	-26.6	-6.2	-7.3	-14.4	-22.7
30% - 40%	-8.3	-20.0	-22.9	-24.4	-20.1	-22.7
40% - 50%	-8.7	-25.8	-9.9	-35.8	-11.3	-16.7
50% - 60%	-22.6	-23.4	-20.5	-21.5	-19.5	-21.4

Από τους πίνακες 4.2 και 4.3 παρατηρούμε ότι παρά το ότι η μέση καθυστέρηση μειώνεται όσο μειώνεται το ποσοστό στροφής για όλες τις τιμές του ελάχιστου χρονικού διακένου,

υπάρχει διαφορετική συμπεριφορά στη μεταξύ τους σύγκριση για διαφορετικές τιμές του διακένου. Για ποσοστό 20% συνήθως ο κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων λειτουργεί καλύτερα από τον κυκλικό κόμβο turbo ενώ όσο αυξάνεται το ποσοστό δεξιάς στροφής η διαφορά μεταξύ τους μειώνεται. Για παράδειγμα, με ελάχιστο χρονικό διάκενο ίσο με 3 δλ, για ποσοστό δεξιάς στροφής πάνω από 40% ο κυκλικός κόμβος turbo λειτουργεί καλύτερα. Παρατηρούμε όμως ότι όταν αυξάνεται το διάκενο η απόδοση του κυκλικού κόμβου turbo χειροτερεύει πολύ. Για παράδειγμα για διάκενο ίσο με 5 δλ σε ποσοστό στροφής 50% ο κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων εξακολουθεί να λειτουργεί καλύτερα από τον κυκλικό κόμβο turbo και για ποσοστό 60% οι τιμές των καθυστερήσεων τους είναι σχετικά παρόμοιες. Παρατηρούμε λοιπόν ότι, όσο αυξάνεται το διάκενο, ο κυκλικός κόμβος turbo χειροτερεύει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων. Άρα συμπεραίνουμε ότι ο κυκλικός κόμβος turbo απαιτεί εξοικωμένους με αυτόν οδηγούς οι οποίοι θα κινούνται και θα αποφασίζουν γρήγορα μέσα στον κόμβο. Σε αντίθετη περίπτωση δημιουργούνται μεγάλες καθυστερήσεις.

Στη συνέχεια για τα σενάρια που εξετάστηκαν παραπάνω θα παρουσιαστούν δύο πίνακες με τα μήκη των ουρών για κάθε κλάδο του κόμβου.

Πίνακας 4.4: Μήκη ουρών – Κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων

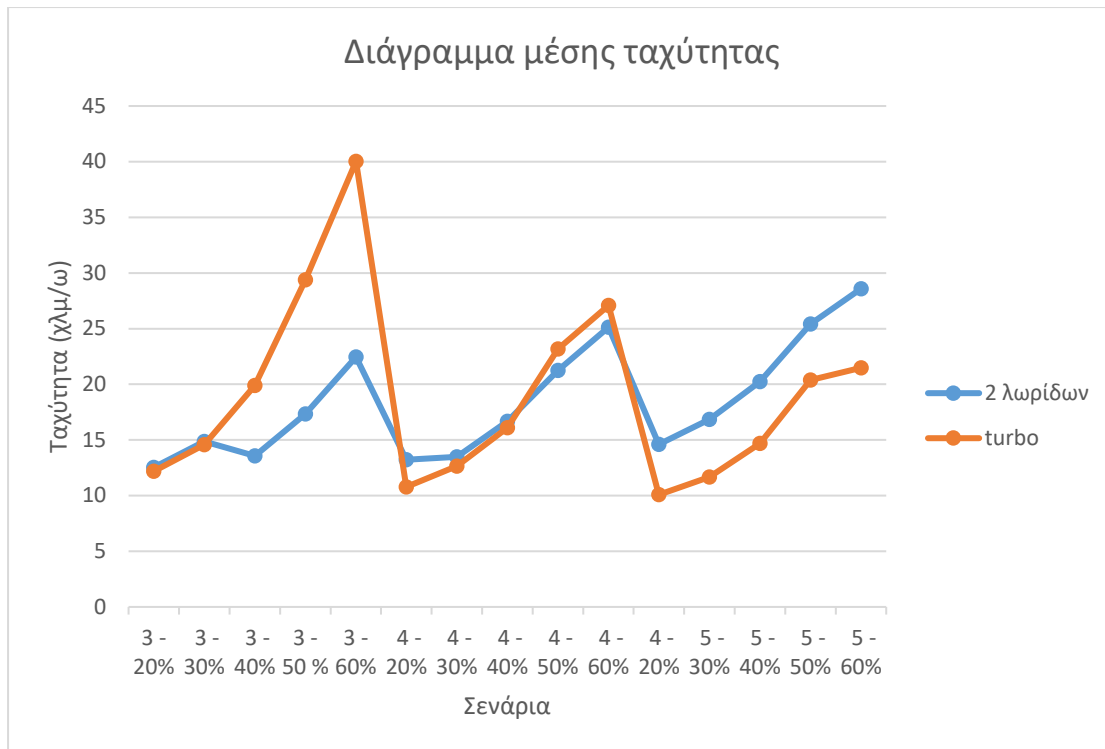
Κυκλοφοριακός φόρτος	ελάχιστο χρονικό διάκενο (δλ)	Ποσοστό στροφής	κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων			
			Νότια είσοδος	Ανατολική είσοδος	Βόρεια είσοδος	Δυτική είσοδος
1200	3	20%	476.2	502.5	541.5	500.3
1200	3	30%	465.9	511.5	531.4	493.7
1200	3	40%	420.1	500.0	500.0	478.6
1200	3	50%	317.5	491.9	494.5	457.0
1200	3	60%	271.9	471.5	480.9	364.1
1200	4	20%	439.6	501.7	501.3	492.6
1200	4	30%	427.0	500.9	501.5	471.7
1200	4	40%	279.7	500.2	500.8	447.8
1200	4	50%	208.8	499.1	498.4	371.2
1200	4	60%	147.0	494.8	494.9	229.5
1200	5	20%	338.4	501.7	501.8	467.1

1200	5	30%	283.9	501.2	501.8	434.7
1200	5	40%	188.6	500.6	501.6	278.1
1200	5	50%	86.2	500.9	500.9	154.7
1200	5	60%	50.0	500.7	499.7	56.0

Πίνακας 4.5 : Μήκη ουρών – κυκλικός κόμβος turbo

Κυκλοφοριακός φόρτος	ελάχιστο χρονικό διάκενο (δλ)	Ποσοστό στροφής	κυκλικός κόμβος turbo			
			Νότια είσοδος	Ανατολική είσοδος	Βόρεια είσοδος	Δυτική είσοδος
1200	3	20%	510.0	505.02	498.92	492.82
1200	3	30%	498.2	491.93	497.3	471.66
1200	3	40%	491.5	454.65	493.27	309.18
1200	3	50%	441.5	262.44	436.6	162.98
1200	3	60%	115.8	340.24	41.77	119.88
1200	4	20%	501.8	498.52	501.71	496.36
1200	4	30%	501.2	490.54	501.08	474.95
1200	4	40%	499.9	478.11	500.2	378.9
1200	4	50%	491.4	308.73	495.14	203.05
1200	4	60%	477.5	324.3	476.96	201.21
1200	5	20%	502.1	499.95	501.92	497.52
1200	5	30%	501.9	493.09	501.69	473.94
1200	5	40%	501.7	472.85	501.06	412.24
1200	5	50%	499.9	388.77	500.14	207.12
1200	5	60%	498.6	352.74	500.3	200.55

Παρατηρούμε αντίστοιχα ότι όταν το ελάχιστο χρονικό διάκενο είναι ίσο με 5, τα μήκη των ουρών στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων είναι μικρότερα από αυτά στον κυκλικό κόμβο turbo. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η μέση ταχύτητα που έχουν τα οχήματα του κόμβου για καθένα από τα παραπάνω σενάρια.



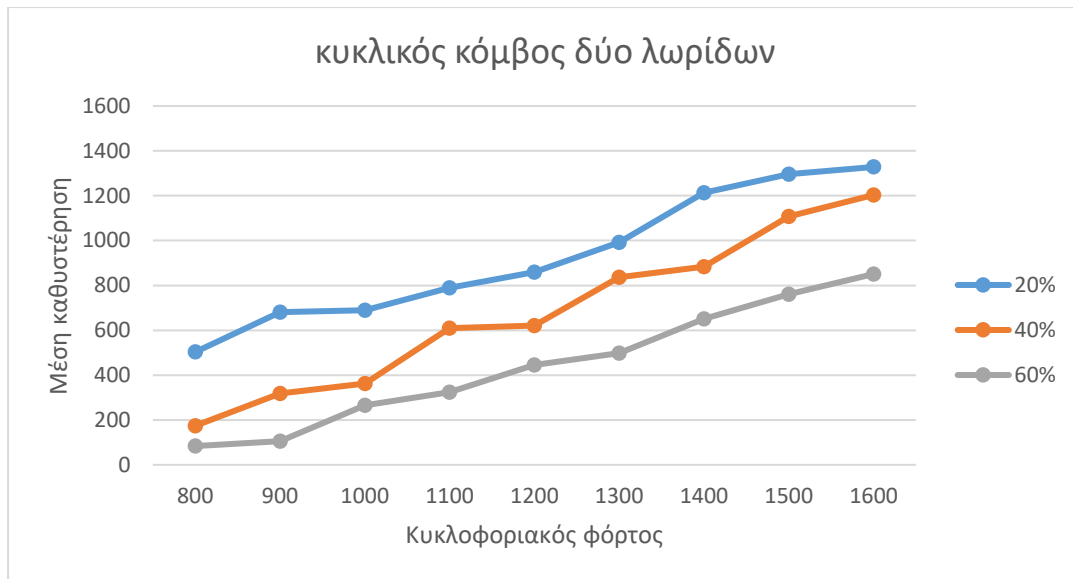
Εικόνα 4.5: Διάγραμμα μέσης ταχύτητας με ποσοστό στροφής στην πρώτη έξοδο

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό των οχημάτων που στρίβουν στην πρώτη έξοδο, τόσο αυξάνεται και η μέση ταχύτητα του κόμβου. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς όπως είδαμε από πριν υπήρχαν μικρότερες καθυστερήσεις.

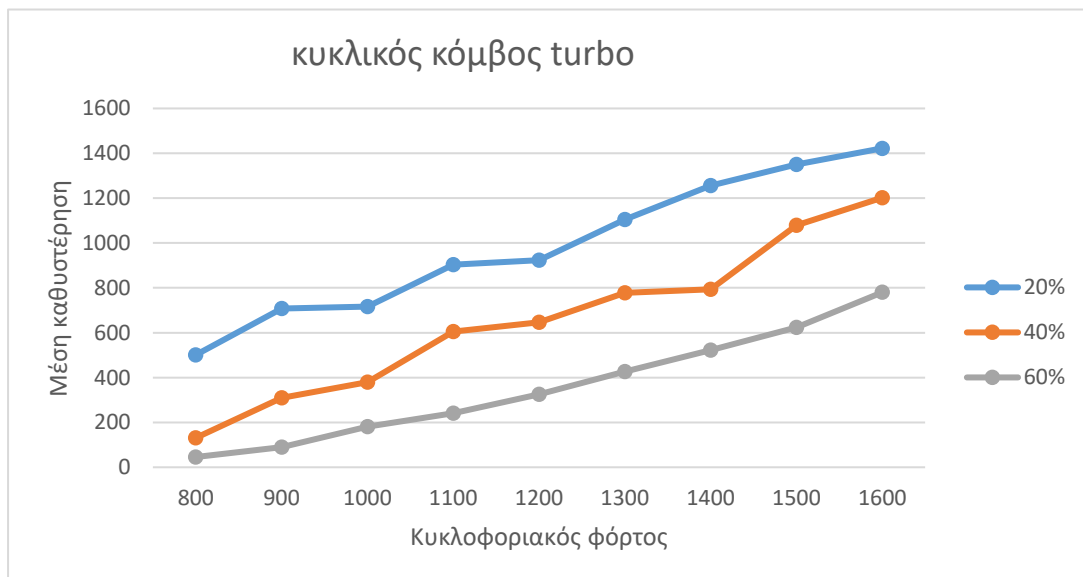
4.3: Επιρροή του φόρτου κυκλοφορίας

Στη συγκεκριμένη διερεύνηση για τους δύο κόμβους μελέτης, επιλέχθηκαν οι εξής εννιά τιμές που αφορούν στον κυκλοφοριακό φόρτο των οχημάτων που θα κινηθούν μέσα σε κάθε κόμβο: 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600. Επισημαίνεται ότι οι παραπάνω τιμές αφορούν τον φόρτο κάθε κλάδου, που προσεγγίζει τους υπό μελέτη κόμβους. Επιλέχθηκαν υψηλές τιμές φόρτου για να εξεταστούν οι δύο κυκλικόι κόμβοι σε συνθήκες μεγάλης κίνησης. Γι' αυτό το λόγο τα αποτελέσματα έδειξαν μεγάλες καθυστερήσεις και μεγάλα μήκη ουρών.

Αρχικά θα εξετάσουμε κάθε κόμβο ξεχωριστά. Θα παρουσιαστεί σε ένα διάγραμμα η μέση καθυστέρηση κάθε κόμβου για όλους τους κυκλοφοριακούς φόρτους, θεωρώντας το ελάχιστο χρονικό διάκενο ίσο με 4 δλ και με τρεις περιπτώσεις για το ποσοστό στροφής στην πρώτη έξοδο 20%, 40%, 60%.



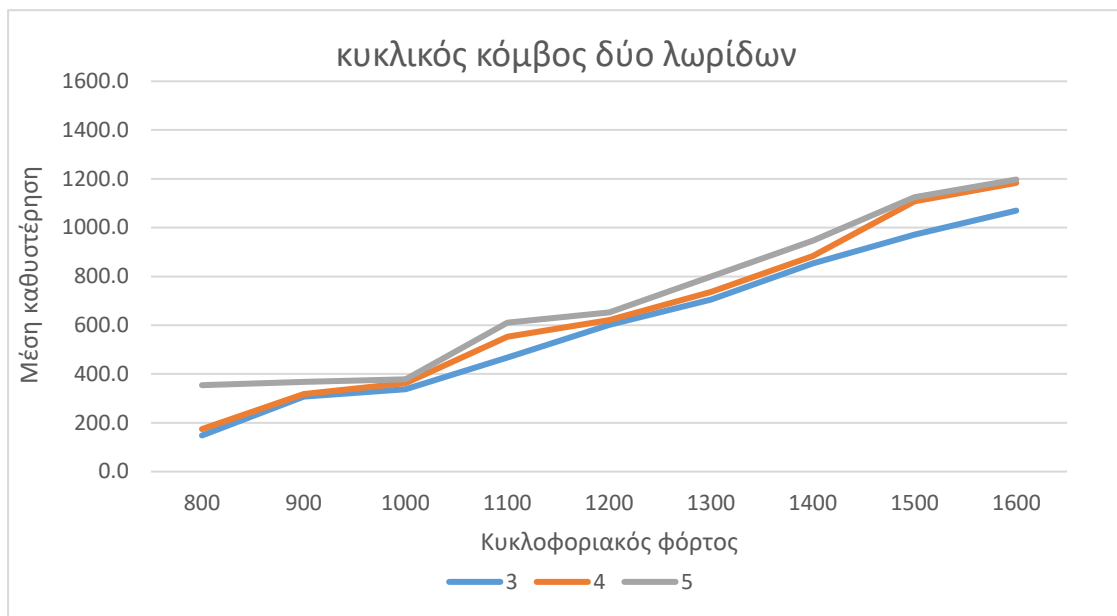
Εικόνα 4.6: Διάγραμμα φόρτου μέσης καθυστέρησης – Κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων



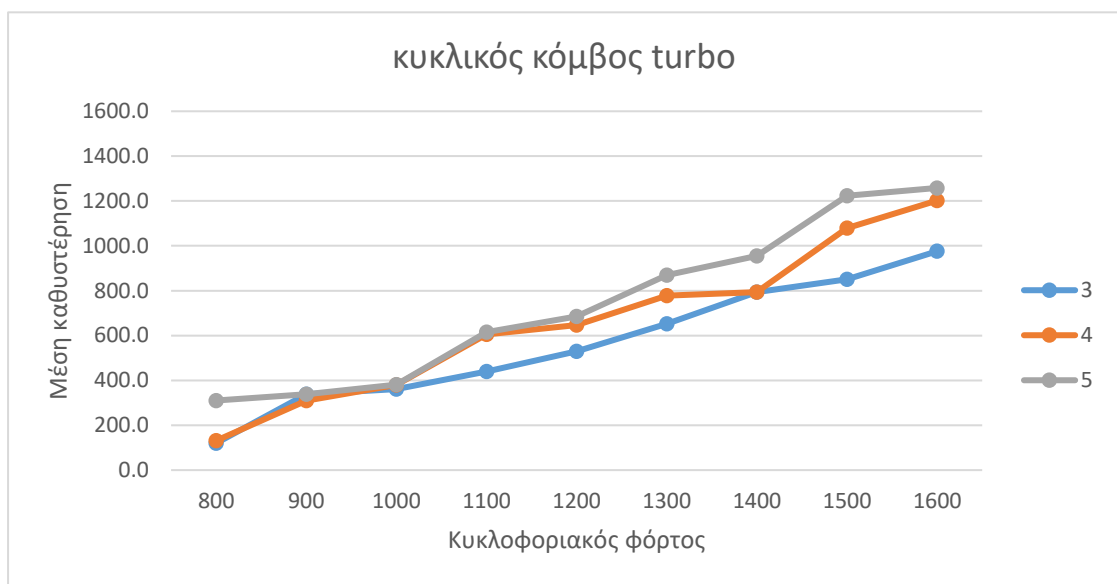
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα κυκλοφοριακού φόρτου μέσης καθυστέρησης – κυκλικός κόμβος turbo

Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις η μέση καθυστέρηση αυξάνεται περίπου γραμμικά σε σχέση με τον κυκλοφοριακό φόρτο, χωρίς πολλές διαφορές μεταξύ των δύο κόμβων. Φαίνεται λοιπόν ότι η κατανομή στην κίνηση των οχημάτων δεν επηρεάζει την αύξηση της μέσης καθυστέρησης που προκαλεί η αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου.

Στη συνέχεια τα παραπάνω διαγράμματα θα παρουσιαστούν για ποσοστό δεξιάς στροφής 40% για τις τρεις περιπτώσεις τιμών του ελάχιστου διακένου.



Εικόνα 4.8: Επιρροή κυκλοφοριακού φόρτου και ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – Κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων

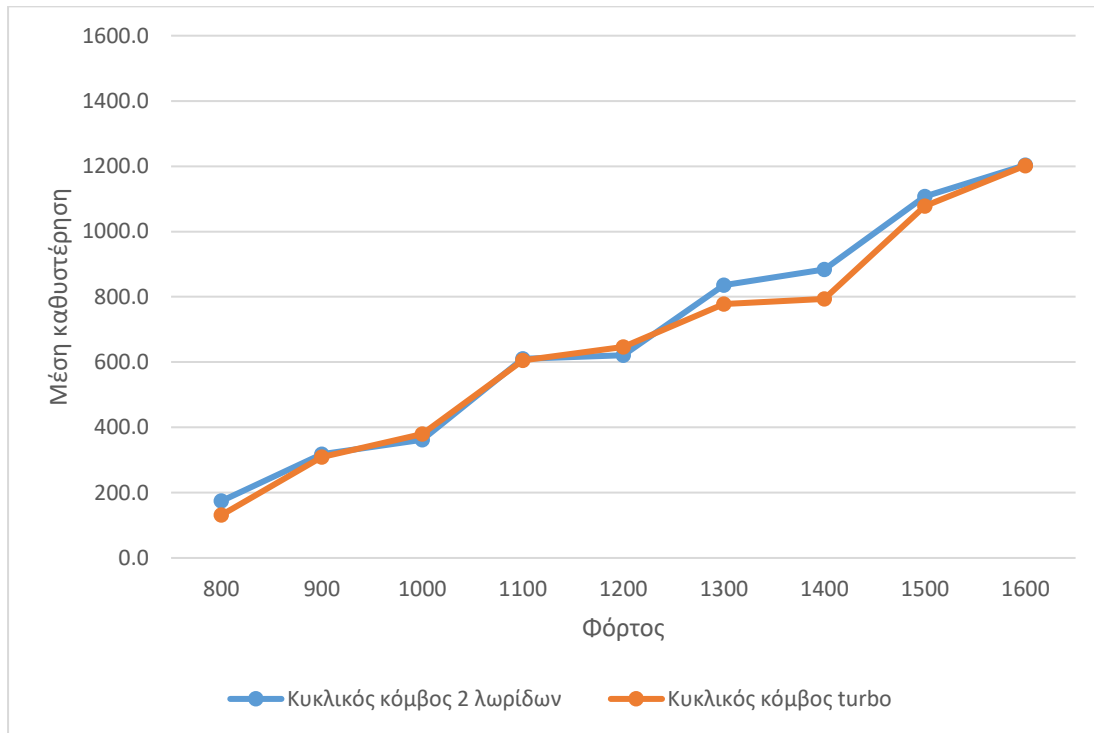


Εικόνα 4.9: Επιρροή κυκλοφοριακού φόρτου και ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – κυκλικός κόμβος turbo

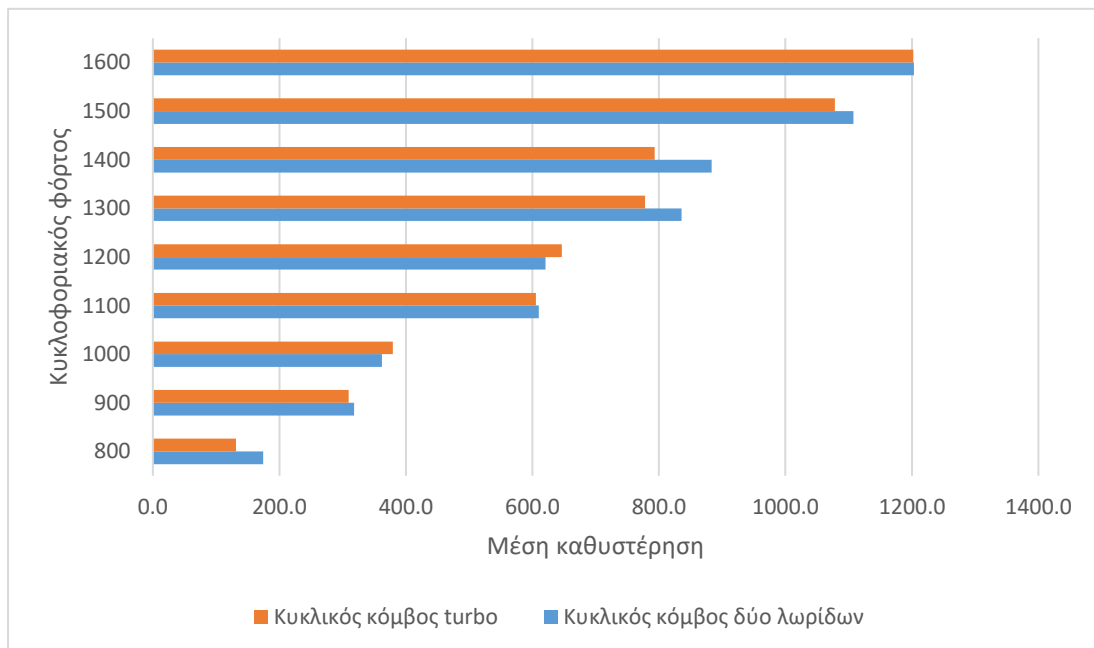
Παρατηρούμε ότι στον κυκλικό κόμβο turbo για χαμηλούς φόρτους η τιμή της μέσης καθυστέρησης και στις τρεις τιμές του ελάχιστου διακένου είναι παρόμοια. Όταν αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος βλέπουμε μεγαλύτερες διαφορές στη μέση καθυστέρηση.

Σύγκριση των δύο κυκλικών κόμβων

Στη συνέχεια θα γίνει η σύγκριση των δύο κόμβων καθώς μεταβάλλεται ο κυκλοφοριακός φόρτος που εισέρχεται στους δύο κόμβους. Αρχικά θα θεωρηθεί το ελάχιστο χρονικό διάκενο ίσο με 4 δλ και το ποσοστό των οχημάτων που στρίβουν στην πρώτη έξοδο ίσο με 40% και θα παρουσιαστούν δύο διαγράμματα που θα συγκρίνουν τους δύο κόμβους.

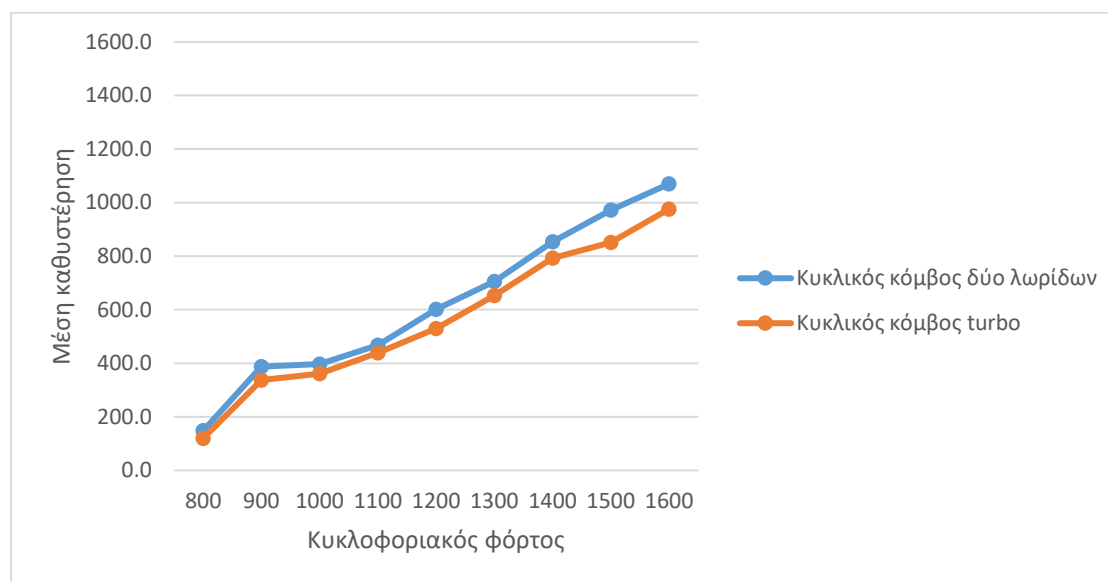


Εικόνα 4.10: Διάγραμμα σύγκρισης των κόμβων

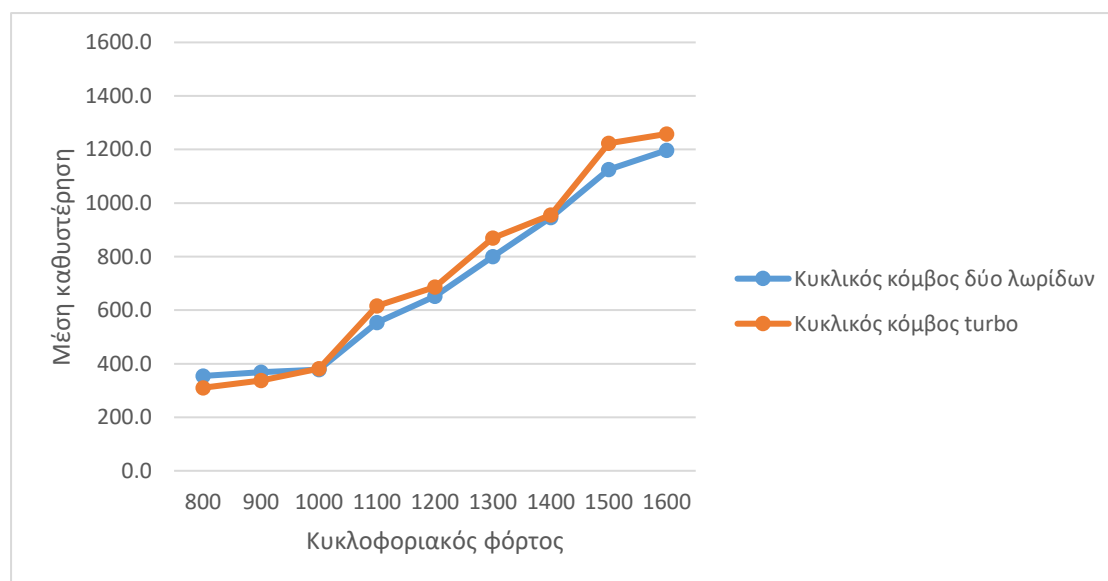


Εικόνα 4.11: Σύγκριση των κόμβων μέσω μπαρών

Παρατηρούμε ότι η μέση καθυστέρηση είναι παρόμοια στους δύο κόμβους με κάποιες μικρές διακυμάνσεις. Ας εξετάσουμε λοιπόν το ίδιο παράδειγμα με ελάχιστο διάκενο ίσο με 3 δλ και 5 δλ.



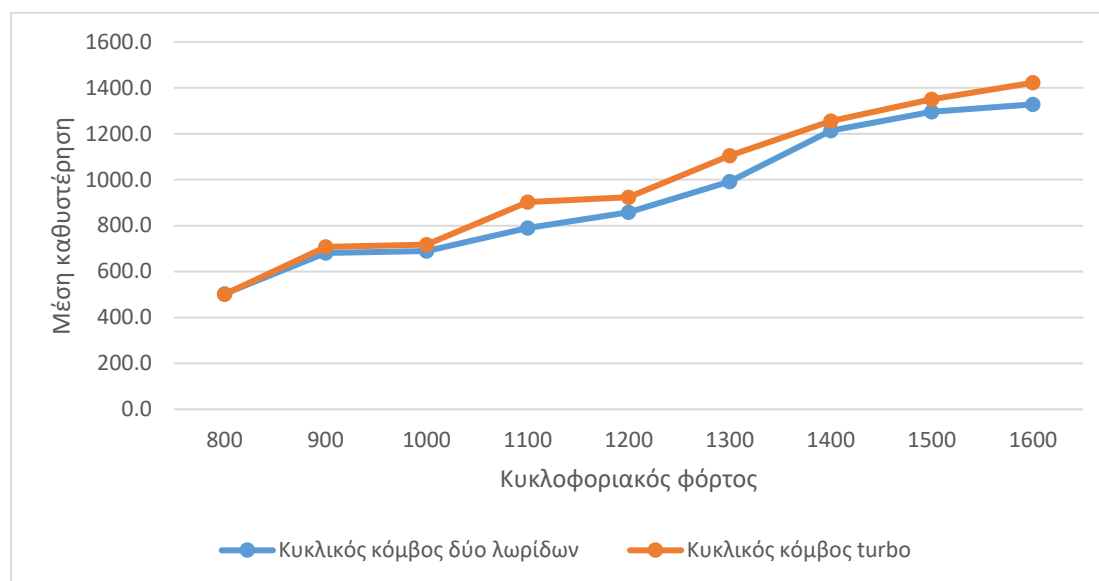
Εικόνα 4.12: Σύγκριση των δύο κόμβων – Διάκενο ίσο 3 δλ



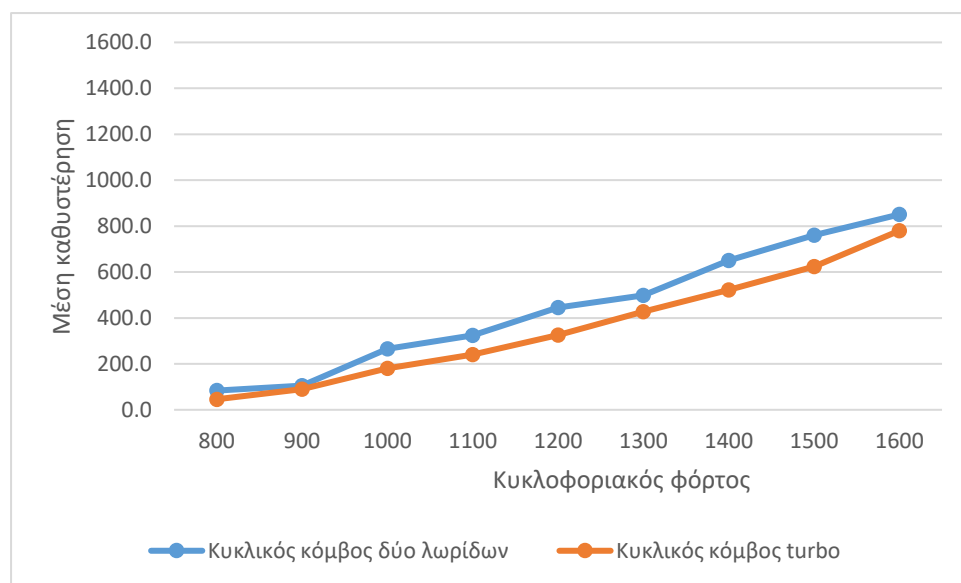
Εικόνα 4.13: Σύγκριση των δύο κόμβων – Διάκενο ίσο με 5 δλ

Παρατηρούμε ότι, για ελάχιστο χρονικό διάκενο ίσο με 3 δλ, όταν αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος η τιμή της μέσης καθυστέρησης του κυκλικού κόμβου είναι σταθερά υψηλότερη και μάλιστα όσο μεγαλώνει ο φόρτος η διαφορά μεγαλώνει. Για ελάχιστο χρονικό διάκενο ίσο με 5 δλ ενώ για χαμηλούς φόρτους οι δύο κόμβοι έχουν παρόμοιες τιμές καθυστέρησης, όσο ο κυκλοφοριακός φόρτος αυξάνεται ο κυκλικός κόμβος turbo αποκτά σταθερά μεγαλύτερη καθυστέρηση.

Στα επόμενα διαγράμματα θα εξεταστεί πώς επηρεάζει τους κόμβους η αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου, για ποσοστό οχημάτων που στρίβουν στην πρώτη έξοδο ίσο με 20% και 60% αντίστοιχα και για ελάχιστο χρονικό διάκενο ίσο με 4 δλ.



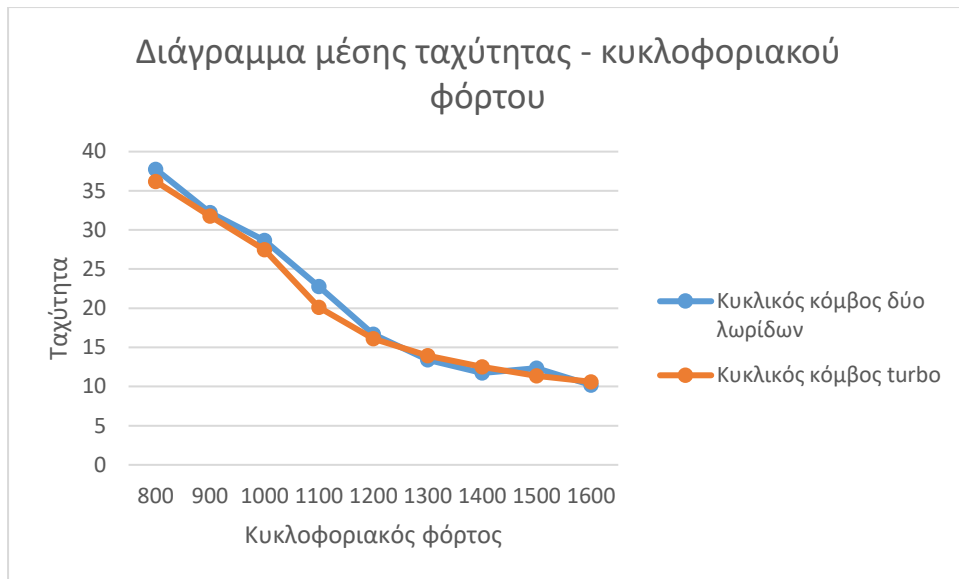
Εικόνα 4.14: Σύγκριση των δύο κόμβων- Ποσοστό δεξιάς στροφής ίσο με 20%



Εικόνα 4.14: Σύγκριση των δύο κόμβων- Ποσοστό δεξιάς στροφής ίσο με 60%

Στις παραπάνω περιπτώσεις παρατηρούμε τους δύο κόμβους να συμπεριφέρονται παρόμοια για όλους τους κυκλοφοριακούς φόρτους χωρίς να έχουμε μεγάλες διαφοροποιήσεις.

Τέλος θα εξετάσουμε την πορεία της μέσης ταχύτητας κάθε κόμβου σε σχέση με την αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου, θεωρώντας σταθερά το ελάχιστο χρονικό διάκενο ίσο με 4 δλ και το ποσοστό των οχημάτων που στρίβουν στην πρώτη έξοδο ίσο με 40%.

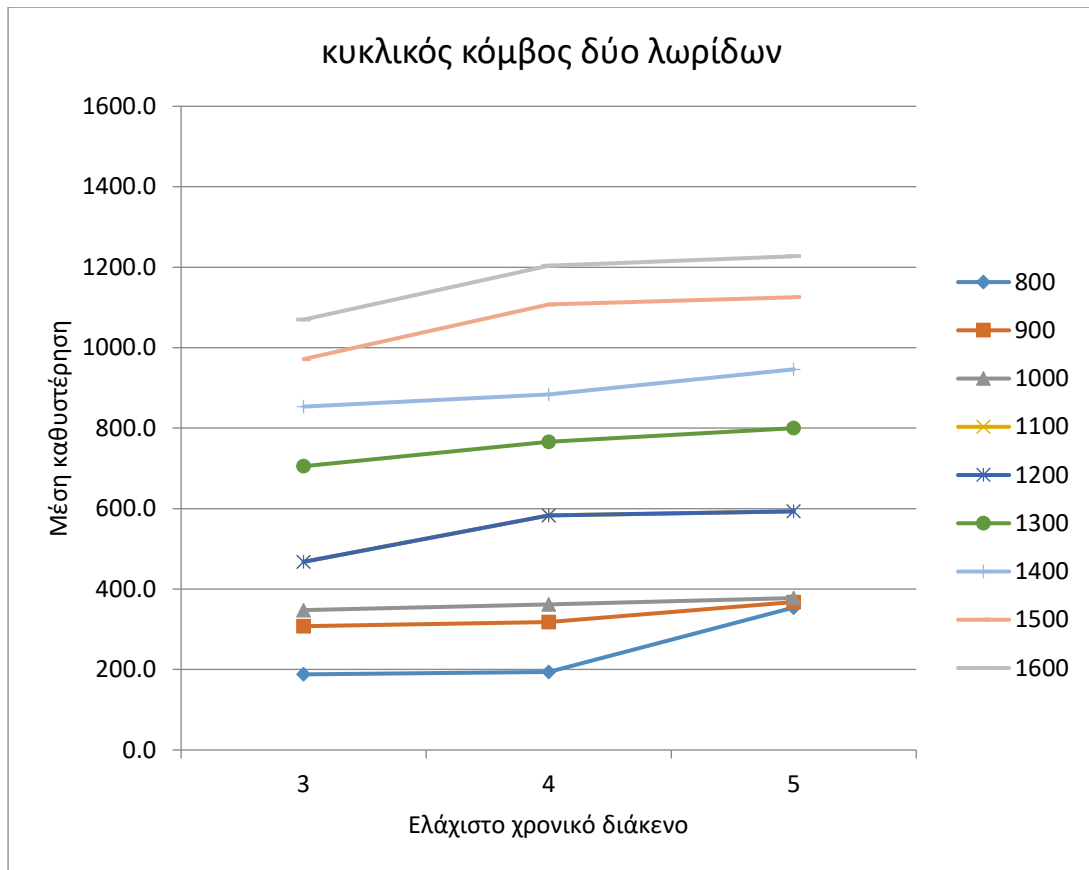


Εικόνα 4.15: Διάγραμμα ταχύτητας – κυκλοφοριακού φόρτου

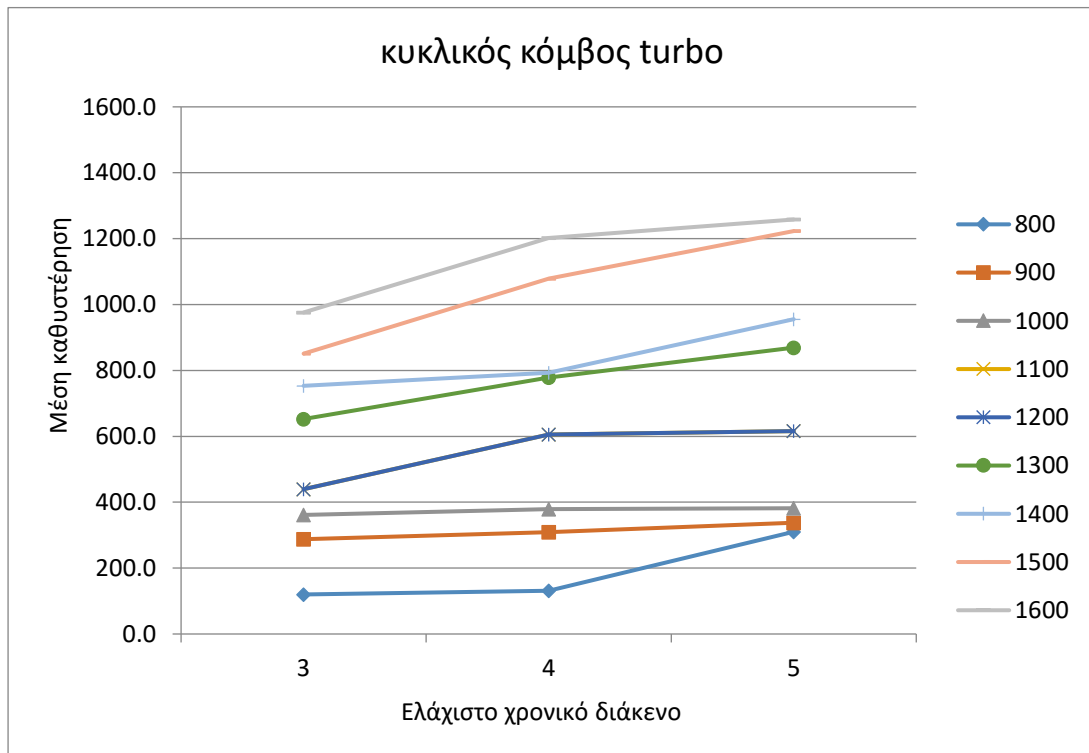
Παρατηρούμε ότι η μέση ταχύτητα μειώνεται όσο αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος και οι τιμές της για τους δύο κόμβους είναι παρόμοιες.

4.4: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου

Στα σενάρια που διερευνήθηκαν επιλέχθηκαν τρεις τιμές για το ελάχιστο χρονικό διάκενο 3 δλ, 4 δλ και 5 δλ. Αρχικά θα εξεταστεί η μέση καθυστέρηση των κόμβων, ώστε να διερευνηθεί το πως συμπεριφέρονται αυτοί στη μεταβολή του ελάχιστου χρονικού διακένου. Το ποσοστό των οχημάτων που στρίβουν στην πρώτη έξοδο θα θεωρηθεί 40% και η μέση καθυστέρηση θα παρουσιαστεί στα παρακάτω διαγράμματα για όλους τους φόρτους κυκλοφορίας που χρησιμοποιήθηκαν.



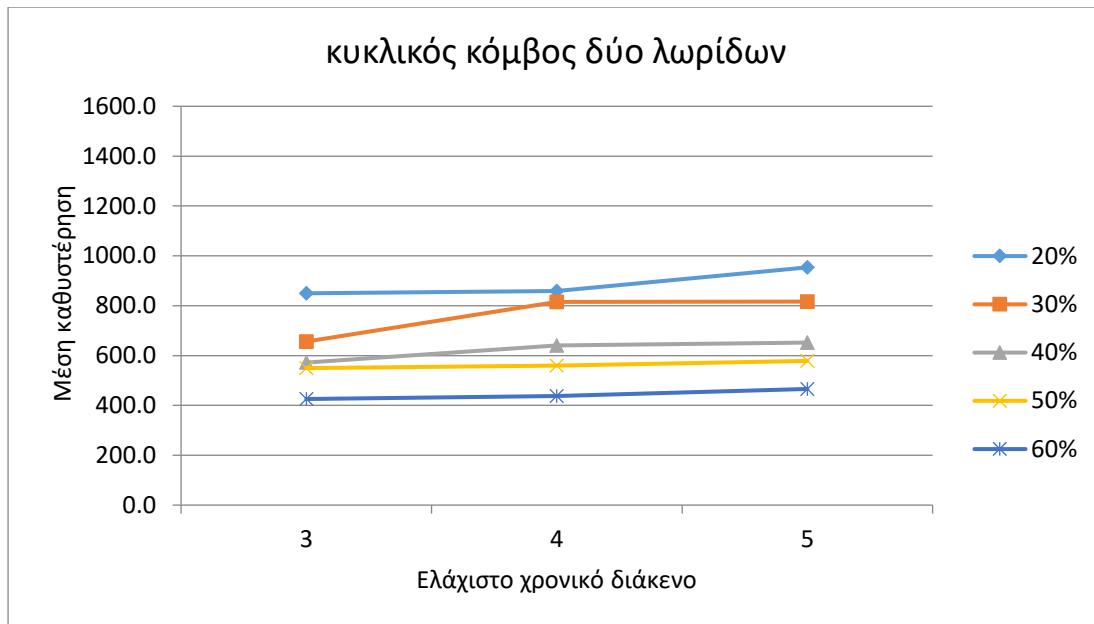
Εικόνα 4.16: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – Κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων



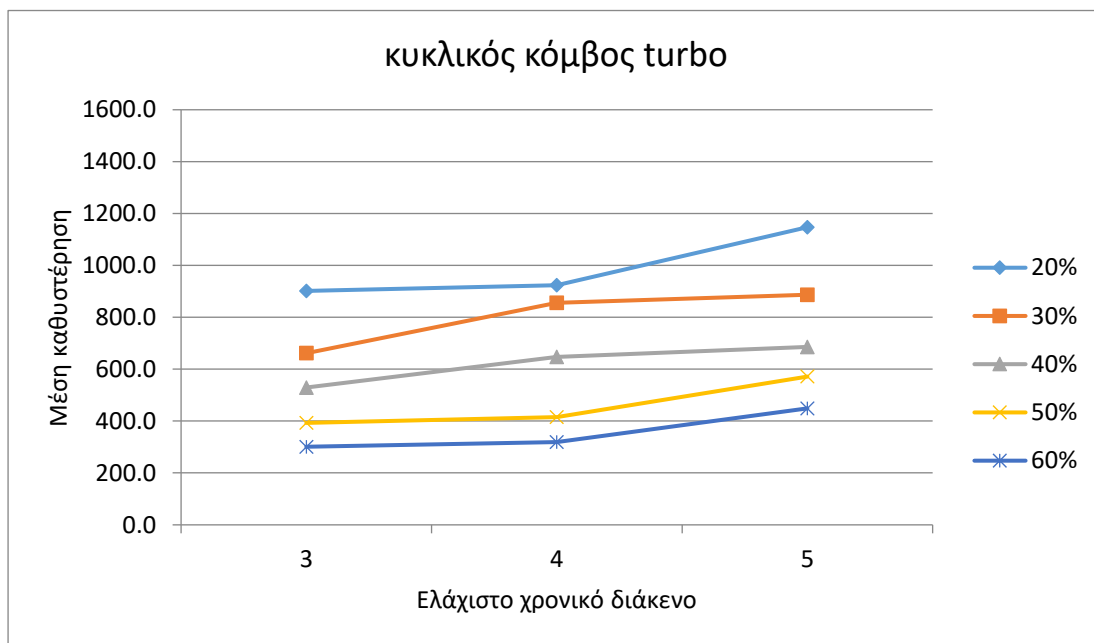
Εικόνα 4.17: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – κυκλικός κόμβος turbo

Όπως ήταν αναμενόμενο και στους δύο κόμβους η μέση καθυστέρηση αυξάνεται καθώς αυξάνεται το ελάχιστο χρονικό διάκενο. Παρατηρούμε όμως ότι η μέση καθυστέρηση έχει μια πιο απότομη αύξηση στον κυκλικό κόμβο turbo καθώς αυξάνεται το ελάχιστο χρονικό διάκενο. Για ελάχιστο χρονικό διάκενο ίσο με 3 δλ ο κυκλικός κόμβος turbo συμπεριφέρεται καλύτερα ενώ για 5 δλ συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Ενώ στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων φαίνεται ότι για κάθε κυκλοφοριακό φόρτο, αυτός συμπεριφέρεται παρόμοια στην αύξηση του ελάχιστου χρονικού διακένου, στον κυκλικό κόμβο turbo στους πιο υψηλούς φόρτους η αύξηση στη μέση καθυστέρηση καθώς αυξάνεται το διάκενο είναι μεγαλύτερη.

Στη συνέχεια, με σταθερό τον κυκλοφοριακό φόρτο ίσο με 1200 οχήματα/ώρα θα εξεταστεί η αύξηση της μέσης καθυστέρησης σε σχέση με την αύξηση του ελάχιστου χρονικού διακένου για όλα τα ποσοστά στροφής στην πρώτη έξοδο που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 4.18: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων



Εικόνα 4.19: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση - κυκλικός κόμβος turbo

Έπειτα παρουσιάζεται και ένας πίνακας μεταβολής της μέσης καθυστέρησης σε σχέση με το ελάχιστο χρονικό διάκενο, για όλες τις περιπτώσεις δεξιάς στροφής και για τους δύο κόμβους.

Πίνακας 4.6: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων

	20%	30%	40%	50%	60%
3 - 4	22.2	22.7	3.1	1.7	4.5
4 - 5	6.0	1.4	5.1	3.5	4.8

Πίνακας 4.7: Επιρροή ελάχιστου χρονικού διακένου στη μέση καθυστέρηση – κυκλικός κόμβος turbo

	20%	30%	40%	50%	60%
3 4	2.4	29.3	22.2	5.7	8.3
4 5	14.3	3.7	6.1	37.6	37.7

Παρατηρούμε πάλι ότι στον κυκλικό κόμβο turbo υπάρχουν μεγαλύτερες αυξήσεις στη μέση καθυστέρηση σε σχέση με τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων.

Σύγκριση των δύο κυκλικών κόμβων

Με βάση τα παραπάνω έχουμε ήδη συμπεράνει ότι η αλλαγή του ελάχιστου χρονικού διακένου επηρεάζει περισσότερο τον κυκλικό κόμβο turbo από τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων. Παρακάτω θα συγκρίνουμε πάλι τους δύο κόμβους μέσα από δύο πίνακες που αναφέρονται στο μήκος των ουρών του κάθε κόμβου για έξι σενάρια που επιλέξαμε. Το ποσοστό δεξιάς στροφής θεωρείται ίσο με 40% .

Πίνακας 4.8: Μήκος ουρών – κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων

κυκλοφοριακός φόρτος	ελάχιστο χρονικό διάκενο (δλ)	ποσοστό δεξιάς στροφής	Νότια είσοδος	Ανατολική είσοδος	Βόρεια είσοδος	Δυτική είσοδος
800	3	40%	9.0	60.1	104.7	12.7
	4	40%	6.3	311.7	259.1	9.6
	5	40%	4.9	485.4	365.4	5.1
1000	3	40%	96.18	476.5	478.5	74.5
	4	40%	152.2	489.2	483.6	174.5
	5	40%	130.2	499.8	495.9	227.9

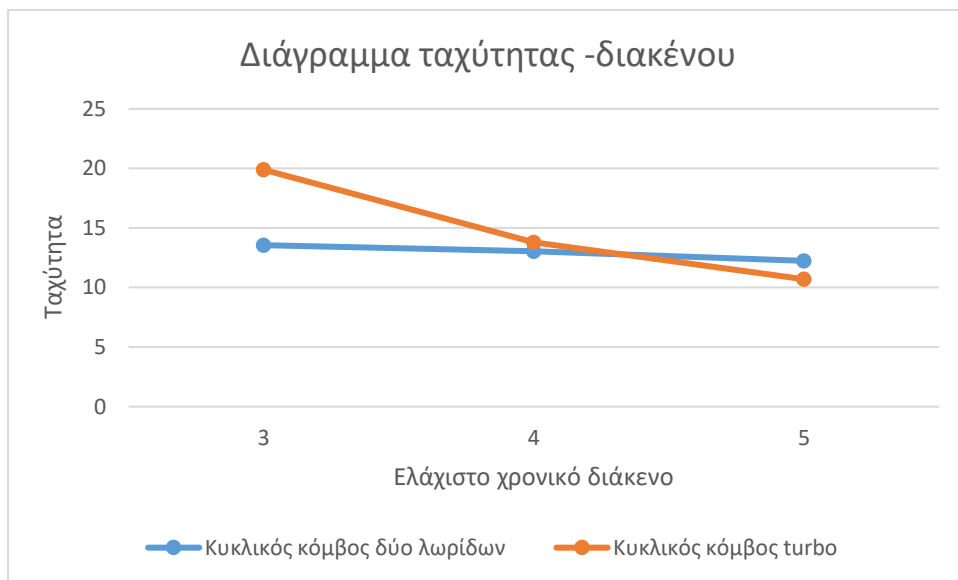
Πίνακας 4.9: Μήκος ουρών – κυκλικός κόμβος turbo

κυκλοφοριακός φόρτος	ελάχιστο χρονικό διάκενο (δλ)	ποσοστό δεξιάς στροφής	Νότια είσοδος	Ανατολική είσοδος	Βόρεια είσοδος	Δυτική είσοδος
----------------------	-------------------------------	------------------------	---------------	-------------------	----------------	----------------

800	3	40%	27.0	8.99	28.09	6.145
	4	40%	316.6	13.66	335.155	9.515
	5	40%	456.1	121.99	463.87	15.11
1000	3	40%	386.31	98.47	404.01	55.32
	4	40%	485.7	127.55	488.69	79.95
	5	40%	499.0	282.85	498.71	218.97

Τα αποτελέσματα για τα μήκη των ουρών ήταν αυτά που αναμέναμε. Ο κυκλικός κόμβος turbo φαίνεται να έχει σαφή υπεροχή στη λειτουργικότητά του για διάκενο ίσο με 3 δλ, γεγονός που αλλάζει και αντιστρέφεται όταν το ελάχιστο χρονικό διάκενο αυξάνεται.

Τέλος θα εξετάσουμε την πορεία της μέσης ταχύτητας κάθε κόμβου με την αύξηση του ελάχιστου χρονικού διακένου, θεωρώντας σταθερά τον κυκλοφοριακό φόρτο ίσο με 1200 οχήματα και το ποσοστό των οχημάτων που στρίβουν στην πρώτη έξοδο ίσο με 40%.



Εικόνα 4.20: Διάγραμμα ταχύτητας - ελάχιστου χρονικού διακένου

Εδώ παρατηρούμε την ταχύτητα στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων να έχει μια σταθερή πορεία καθώς αυξάνεται το διάκενο που είναι ελαφρώς μειούμενο. Στον κυκλικό κόμβο turbo αντίθετα η ταχύτητα μειώνεται πιο απότομα. Ενώ για διάκενο 3 δλ τα οχήματα κινούνται πολύ πιο γρήγορα σε αυτόν, όταν το διάκενο φτάνει στα 5 δλ ο κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων εμφανίζει μεγαλύτερη μέση ταχύτητα.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

5.1 Σύνοψη συμπερασμάτων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των 135 σεναρίων που πραγματοποιήθηκαν. Αυτά τα σενάρια περιείχαν διαφορετικές περιπτώσεις κυκλοφοριακών συνθηκών και οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το ελάχιστο χρονικό διάκενο, ο κυκλοφοριακός φόρτος και η κατανομή των οχημάτων στις εξόδους του κόμβου. Παρατηρούμε ότι κανείς απ' τους δύο κόμβους δεν υπερτερεί σε επίπεδο λειτουργίας για όλα τα σενάρια αλλά κάποιες περιπτώσεις ευνοούν τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων και άλλες τον κυκλικό κόμβο turbo. Όπως επισημάνθηκε και παραπάνω ο κυκλικός κόμβος turbo υπερέχει στον τομέα της οδικής ασφάλειας καθώς δημιουργεί λιγότερα σημεία εμπλοκής. Φτάνει λοιπόν να διερευνηθεί σε ποιες περιπτώσεις η λειτουργικότητα του κυμαίνεται στα ίδιο ή και σε καλύτερο επίπεδο σε σχέση με τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων ώστε να δικαιολογείται και να είναι εφικτή η κατασκευή του. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν απ' τις προσομοιώσεις σύμφωνα με την επιρροή των παραμέτρων προσομοίωσης στους δύο κυκλικούς κόμβους.

Επιρροή του ποσοστού στροφής στην πρώτη έξοδο

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν σαν περιπτώσεις του ποσοστού στροφής στην πρώτη έξοδο οι 20%, 30%, 40%, 50%, 60% ενώ ο εναπομείνας κυκλοφοριακός φόρτος ισομοιράζεται στη δεύτερη και τρίτη έξοδο. Από τα αποτελέσματα είναι φανερό ότι ο κυκλικός κόμβος turbo έχει μικρότερες καθυστερήσεις από τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων στις περιπτώσεις που υπάρχουν υψηλά ποσοστά οχημάτων που βγαίνουν στην πρώτη έξοδο. Για τις περιπτώσεις που το 50% ή 60% των οχημάτων εξέρχονται στην πρώτη έξοδο, ο κυκλικός κόμβος turbo είναι η ιδανική λύση για εγκατάσταση καθώς έχει πολύ μικρότερες καθυστερήσεις και λειτουργεί πολύ καλύτερα. Για περιπτώσεις που το 30% ή 40% των οχημάτων εξέρχονται στην πρώτη έξοδο οι δύο κόμβοι λειτουργούν περίπου στο ίδιο επίπεδο άρα επίσης προκρίνεται η εγκατάσταση κυκλικού κόμβου turbo. Όταν το ποσοστό είναι μικρότερο από 30% ο κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων έχει πολύ καλύτερη λειτουργικότητα και άρα η εγκατάσταση κυκλικού κόμβου turbo δεν θα αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Επισημαίνεται ότι το πώς συμπεριφέρεται κάθε κόμβος στο ποσοστό στροφής εξαρτάται άμεσα και από την τιμή του ελάχιστου χρονικού διακένου. Για παράδειγμα για διάκενο ίσο με 3 δλ ο κυκλικός κόμβος turbo λειτουργεί πολύ καλύτερα, τόσο που σε κάποιες περιπτώσεις για ποσοστό 30% έχει μικρότερες καθυστερήσεις απ' τον κυκλικό κόμβο δύο

λωρίδων. Αντίθετα για διάκενο ίσο με 5 δλ ο κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων δύο λωρίδων λειτουργεί πολύ καλύτερα, και μάλιστα υπάρχουν περιπτώσεις που για ποσοστό 50% έχει ελαφρώς χαμηλότερες καθυστερήσεις απ' τον κυκλικό κόμβο turbo. Η επίδραση του ελάχιστου χρονικού διακένου θα αναλυθεί στην συνέχεια.

Επιρροή του ελάχιστου χρονικού διακένου

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν σαν τιμές του ελάχιστου χρονικού διακένου οι εξής: 3 δλ, 4 δλ, 5 δλ. Παρατηρήθηκε ότι το μικρό διάκενο (3 δλ) ευνοεί πολύ τη λειτουργία του κυκλικού κόμβου turbo που στην προκειμένη περίπτωση λειτουργεί πολύ καλύτερα απ' τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων. Όταν το διάκενο αυξάνεται, οι καθυστερήσεις αυξάνονται αρκετά και όταν το διάκενο είναι ίσο με 5 δλ παρατηρούμε ότι ο κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων λειτουργεί πολύ καλύτερα. Αυτό σημαίνει ότι ο κυκλικός κόμβος turbo απαιτεί απ' τους οδηγούς να κινούνται γρήγορα και να παίρνουν γρήγορες αποφάσεις. Αυτό βέβαια προϋποθέτει ο οδηγός να έχει ένα βαθμό εξοικίωσης με την λειτουργία του κόμβου. Σε ενδεχόμενη εγκατάσταση ενός κυκλικού κόμβου turbo λοιπόν, είναι πιθανόν κατά την αρχή της λειτουργίας του να παρουσιάζονται προβλήματα αυξημένων καθυστερήσεων και ουρών. Αυτά βέβαια με το πέρασμα του χρόνου που οι οδηγοί θα εξοικιώνονται με τον κόμβο θα ξεπερνιούνται και η λειτουργία του κόμβου θα γίνεται συνεχώς και καλύτερη. Αντίθετα στην περίπτωση σχεδιασμού κυκλικού κόμβου σε οδικά τμήματα που χρησιμοποιούνται από περιστασιακούς χρήστες ίσως ο απλός κυκλικός δύο λωρίδων να αποτελεί βέλτιστη λύση. Κατά συνέπεια σε αστικές περιοχές, όπου κατά κύριο λόγο οι χρήστες του δικτύου αποτελούν καθημερινούς και εξοικιωμένους χρήστες κρίνεται σκόπιμος ο σχεδιασμός κυκλικού κόμβου turbo.

Επιρροή του κυκλοφοριακού φόρτου

Για τις προσομοιώσεις επιλέχθηκαν οι τιμές του κυκλοφοριακού φόρτου: 800,900,1000,1100,1200,1300,1400,1500,1600. Παρατηρούμε ότι κι οι δύο κυκλικοί κόμβοι ανταποκρίνονται με παρόμοιο τρόπο στην αύξηση του φόρτου. Επιπλέον παρατηρείται ότι για διάκενο ίσο με 3 δλ και όσο ο κυκλοφοριακός φόρτος αυξάνεται, ο κυκλικός κόμβος turbo λειτουργεί ολο και καλύτερα σε σχέση με τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων. Αντίθετα για διάκενο ίσο με 5 δλ και όσο ο φόρτος αυξάνεται ο κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων λειτουργεί ολο και καλύτερα σε σχέση με τον κυκλικό κόμβο turbo. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου έχει άμεση σχέση με το ελάχιστο κρίσιμο διάκενο στο πως επηρεάζει τον κόμβο.

Σαν γενικό συμπέρασμα λοιπόν, ο κυκλικός κόμβος turbo μπορεί να αντικαταστάσει έναν κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων στην περίπτωση που τα οχήματα που στρίβουν στην πρώτη έξοδο ξεπερνούν το 30% χωρίς να υπάρχει πρόβλημα να εξυπηρετήσουν πολύ μεγάλο αριθμό οχημάτων. Το βασικό πρόβλημα είναι η μη εξοικίωση των οδηγών με τον κόμβο που θα οδηγήσει σε αυξημένες καθυστερήσεις και ουρές, το οποίο βέβαια θα λυθεί με το πέρασμα του χρόνου. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη ενδεχόμενη αντικατάσταση δεν θα επιφέρει αύξηση στις καθυστερήσεις του κόμβου αλλά αντίθετα μπορεί να οδηγήσει και σε καλύτερη λειτουργικότητα.

5.2 Προτάσεις για διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας πάνω στη λειτουργία των ισόπεδων κυκλικών κόμβων με χρήση λογισμικού προσομοίωσης προτείνονται περαιτέρω έρευνες που μπορούν να πραγματοποιηθούν. Αρχικά προτείνεται να πραγματοποιηθεί αντίστοιχη διερεύνηση ώστε να συγκριθούν οι δύο τύποι κόμβων ως προς την εκπομπή ρύπων. Επίσης προτείνεται να πραγματοποιηθεί περαιτέρω διερεύνηση για τους δύο κόμβους αλλά να ληφθεί υπόψη και η επίδραση των πεζών. Έτσι θα υπάρχει μια ολοκληρωμένη εικόνα για το πως ανταποκρίνονται οι δύο κόμβοι σε πραγματικές συνθήκες και θα μπορεί να γίνει εκ νέου η σύγκρισή τους.

Επιπλέον προτείνεται να διερευνηθούν κι άλλοι τύποι κυκλικών κόμβων που χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη εναλλακτικοί ως προς τον συμβατικό κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων. Χαρακτηριστικά τέτοιοι κυκλικοί κόμβοι είναι οι κυκλικοί κόμβοι “flower”, “target”, “four-flyover” (Tollazi & al, 2016).

Βιβλιογραφία

- Ahmed. (1999). *Modelling Drivers' Acceleration and Lane Changing Behavior*. Diploma Thesis at Massachusetts Institution of Technology.
- Akçelik. (2009). Evaluating Roundabout Capacity, Level of Service and Performance. *paper presented at the ITE 2009 Annual Meeting*. San Antonio, Texas, USA.
- Brilon. (2011). Studies on Roundabouts in Germany: Lessons Learned. *In: Proceedings of the 3d International Book on Roundabouts, U.S.A.*
- Brilon, Wu, & Bondzio. (1997). Unsignalized Intersections in Germany, A State of the Art, Turbo Roundabout - an experience from Germany. *In Proceedings of the 2nd International Symposium for Unsignalized Intersections*.
- Corriere, & Guerrieri. (2012). *Performance Analysis of Basic Turbo-Roundabouts in Urban Context*. SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures.
- Engelsman, & Uken. (2007). *TURBO ROUNDABOUTS AS AN ALTERNATIVE TO TWO LANE ROUNDABOUTS*.
- Fisk. (1991). *Traffic performance analysis at roundabouts*. Transpn. Res.-B, Vol. 25B, Nos 2/3, pp. 89-102, 1991.
- Galleli, luele, & Vaiana. (2016). *Conversion of a semi-two lanes roundabout into a turbo-roundabout: a performance comparison*. The 7th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2016).
- Gipps. (1981). *A behavioural car-following model for computer simulation*. Transportation Research Board.
- Giuffre, Guerrieri, & Grana. (2009). *Evaluating capacity and efficiency of turbo-roundabouts*. Washington D.C, U.S.A.
- Gredoska, Bombol, & Nechoska. (2016). *AN EVALUATION OF TURBO ROUNDABOUT PERFORMANCES: CASE STUDY OF THE CITY OF OHRID*.
- Murphy. (2015). *THE TURBO ROUNDABOUT : A FIRST IN NORTH AMERICA*. 2015 Conference of the Transportation Association of Canada Charlottetown, PEI.
- National Cooperative Highway Research Program. (2010). *Roundabouts: An Informational Guide, Second Edition, NCHRP Report 672, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA), Washington*.
- Pitlova, & Kocianova. (2017). *Case study: capacity characteristics comparison of single-lane roundabout and turbo-roundabouts*. TRANSCOM 2017: International scientific conference on sustainable, modern and safe transport.
- Tollazi, & al, e. (2016). *Comparative Analysis of Four New Alternative Types of Roundabouts "Turbo", "Flower", "Target" and "Four-Flyover" Roundabout*. Periodica Polytechnica Civil Engineering.

- Tollazzi, Turnšek, & Renčelj. (2012). *SLOVENIAN EXPERIENCES WITH "TURBO – ROUNDABOUTS"*.
- Vasconelos, & al., e. (2012). *Turboroundabouts - Multicriterion Assessment of Intersection Capacity*,.
- Wiedemann, & Reiter. (1972). *Microscopic Traffic Simulation, the Simulation system MISSION*.
- Αντωνίου, & Παπαδημητρίου. (2012). *Σημειώσεις μαθήματος Σχεδιασμός - Μελέτη - Λειτουργία κόμβων*.
- Κουκουτίμπας. (2011). *Διαχείριση της κυκλοφορίας με τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης, Διπλωματική Εργασία*.
- Σπυροπούλου, & Αντωνίου. *Σημειώσεις μαθήματος Οδοποιίας III ΣΑΤΜ-ΕΜΠ*.
- ΥΠΥΜΕΔΙ. (2011). *Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας - Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων*. Τεύχος 10 Μέρος 2: Κόμβοι Κυκλικής Κίνησης (ΟΜΟΕ - Κ3), Σύμβουλος: NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί & Μελετητές ΑΕ, (Σχέδιο), Έκδοση 2011.
- Φραντζεσκάκης, Πιτσιάβα, & Γκόλιας. (2009). *Κυκλοφοριακή τεχνική*. Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

