



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΙΣΟΠΕΔΩΝ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΚΟΜΒΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

Κεφάλαια Αντωνία

Επίβλεψη: Σπυροπούλου Ιωάννα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ
ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ**



Αθήνα, Οκτώβρης 2022



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

**SCHOOL OF RURAL, SURVEYING AND GEOINFORMATICS
ENGINEERING**

DEP. OF INFRASTRUCTURE AND RURAL DEVELOPMENT

Diploma Thesis

**INVESTIGATION OF THE OPERATIONAL PERFORMANCE OF
PRIORITY LEVEL ROUNDABOUTS USING MICROSCOPIC
SIMULATION**

Kefala Antonia

Supervisor: Spyropoulou Ioanna, Associate Professor NTUA

**LABORATORY OF
TRANSPORTATION ENGINEERING**



Athens, October 2022

ΔΗΛΩΣΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Δηλώνω ότι η διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί στο σύνολο της δική μου εργασία, και κανένα τμήμα της δεν έχει χρησιμοποιηθεί για την κτήση άλλου τίτλου σπουδών. Όπου έχει χρησιμοποιηθεί υλικό από άλλες πηγές, αυτές έχουν αναφερθεί με ακρίβεια και πληρότητα.

Κεφάλαια Αντωνία

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στην Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Ιωάννα Σπυροπούλου, αναπληρώτρια καθηγήτρια του τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής Ε.Μ.Π. για την επίβλεψη, την στήριξη και την σημαντική καθοδήγησή της στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Δημήτρη Τριανταφύλλου, ανώτερος ειδικός προϊόντων στο πρόγραμμα μικροσκοπικής προσομοίωσης AIMSUN, για την συνεισφορά του στα προβλήματα που προέκυψαν στο λογισμικό AIMSUN.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδερφή μου, οι οποίοι μου συμπαραστάθηκαν και στήριξαν όλες μου τις αποφάσεις κατά την διάρκεια των σπουδών μου, και τους φίλους μου για την πολύτιμη βοήθειά τους όλα αυτά τα χρόνια.

Κεφάλια Αντωνία

Αθήνα, Οκτώβρης 2022

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την διερεύνηση της λειτουργίας ισόπεδων κυκλικών κόμβων με τη χρήση μικροσκοπικής προσομοίωσης. Σκοπός της έρευνας είναι η αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων προσομοίωσης σε κυκλικούς κόμβους για την βέλτιστη λειτουργική αποδοτικότητα. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, έγινε χρήση του λογισμικού μικροσκοπικής προσομοίωσης AIMSUN. Η μικροσκοπική προσομοίωση υλοποιήθηκε σε τρεις κυκλικούς κόμβους, στον απλό κυκλικό κόμβο (με μία και δύο λωρίδες αντίστοιχα) και στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο, μεταβάλλοντας συγκεκριμένες παραμέτρους. Οι παράμετροι επιρροής που εξετάστηκαν ήταν ο κυκλοφοριακός φόρτος, το ποσοστό κινήσεων δεξιάς στροφής και η παράμετρος ευαισθησίας, η οποία βασίζεται το πρότυπο ακολουθίας οχήματος. Στην επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων, προσομοιώθηκαν σενάρια για κάθε τιμή των παραμέτρων επιρροής. Παρατηρήθηκε ισχυρή επίδραση της παραμέτρου ευαισθησίας (sensitivity factor) τόσο στη μέση καθυστέρηση, όσο στην μέση ταχύτητα και στον χρόνο μετακίνησης και στους τρεις κυκλικούς κόμβους. Εν κατακλείδι, προέκυψε ο πιο αποτελεσματικός κόμβος, αυτός δηλαδή με την βέλτιστη λειτουργική αποδοτικότητα για όλους τους υπό μελέτη κόμβους.

Λέξεις κλειδιά: σπειροειδής κυκλικός κόμβος, μικροσκοπική προσομοίωση, AIMSUN, κυκλοφοριακός φόρτος, παράμετρος ευαισθησίας, μέση καθυστέρηση, λειτουργική αποδοτικότητα

ABSTRACT

This diploma thesis investigates the operational performance of priority level roundabouts using microscopic simulation. The aim of the research is to evaluate alternative simulation scenarios to roundabouts for the ideal operational performance. To achieve this goal, AIMSUN microscopic simulation software was used. The microscopic simulation was performed on three roundabouts, a conventional roundabout (with one and two lanes respectively) and a turbo roundabout, while varying specific predefined traffic influence parameters. The examined parameters were the traffic flow, the right turn's percentage, and the sensitivity factor, which is based on the car-following model. In processing and analyzing the results, scenarios were simulated for each value of the influence parameters. A severe effect of the sensitivity factor was observed on both average delay, average speed and travel time at three roundabouts. In conclusion, the most efficient node emerged, meaning the one with the best operational performance for all the nodes under study.

Keywords: turbo roundabout, microscopic simulation, AIMSUN, traffic flow, sensitivity factor, average delay, operational performance

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Γενικά Στοιχεία.....	1
1.2	Στόχος διπλωματικής εργασίας.....	2
1.3	Δομή διπλωματικής εργασίας.....	2
2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	5
2.1	Βασικά μεγέθη και έννοιες κυκλοφοριακής ροής	5
2.2	Κυκλικοί Κόμβοι	12
2.2.1	Ιστορική Αναδρομή	12
2.2.2	Γενικά Στοιχεία	15
2.2.3	Σημεία Εμπλοκής	25
2.3	Λειτουργία κόμβων κατά Highway Capacity Manual (HCM)	27
2.3.1	Αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού κυκλοφοριακής ικανότητας για τους κυκλικούς κόμβους – Μέθοδος HCM.....	29
2.4	Κυκλοφοριακή Προσομοίωση.....	32
2.4.1	Γενικά Στοιχεία	32
2.4.2	Κατηγορίες Μοντέλων Προσομοίωσης	33
2.5	Λογισμικό AIMSUN	42
2.5.1	Μοντέλο Ακολουθούντος Οχήματος (Car-Following Model) (Gipps, 1981)	43
2.5.2	Μοντέλο Αλλαγής Λωρίδας (Lane-Changing Model) (Gipps, 1986a & 1986b)	45
2.5.3	Μοντέλο Αποδοχής Διακένου (Gap Acceptance Model).....	45
2.6	Σύγκριση μεθόδων στην ανάλυση κυκλοφοριακής ικανότητας.....	47
3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	57
3.1	Σχεδιασμός Δικτύου	57
3.1.1	Στοιχεία δικτύου στο λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN.....	58
3.1.2	Σχεδιασμός απλού/συμβατικού κυκλικού κόμβου	59
3.1.3	Σχεδιασμός σπειροειδή κυκλικού κόμβου	68
3.2	Σχεδιασμός Σεναρίων	70
3.2.1	Προσδιορισμός τιμών σεναρίων προσομοίωσης.....	73
3.2.2	Σενάρια Προσομοίωσης	77
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	81
4.1	Γενικά Στοιχεία	81
4.2	Ανάλυση απλού κυκλικού κόμβου με μία λωρίδα κυκλοφορίας	81
4.3	Ανάλυση απλού κυκλικού κόμβου με δύο λωρίδες κυκλοφορίας	91
4.4	Ανάλυση σπειροειδούς κυκλικού κόμβου (Turbo roundabout).....	100
4.5	Σύγκριση κυκλικών κόμβων	109

5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	117
5.1	Συμπεράσματα.....	117
5.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	119
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	121
6.1	Διεθνής Βιβλιογραφία.....	121
6.2	Ελληνική Βιβλιογραφία.....	122

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Λεπτομερές σχέδιο για την μετατροπή του Place de l'Opera σε κυκλικό κόμβο	12
Εικόνα 2.2: Columbus Circle - Ο κύκλος του Κολόμβου στη Νέα Υόρκη	13
Εικόνα 2.3: Η Αψίδα του Θριάμβου στο Παρίσι	13
Εικόνα 2.4: Τυπικός σχεδιασμός μικρού κυκλικού κόμβου	17
Εικόνα 2.5: Μικρός κυκλικός κόμβος στο Μίσιγκαν.....	17
Εικόνα 2.6: Τυπικός σχεδιασμός αστικού κυκλικού κόμβου.....	18
Εικόνα 2.7: Αστικός κυκλικός κόμβος στην Μονπελιέ Γαλλίας.....	18
Εικόνα 2.8: Τυπικός σχεδιασμός αστικού κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας	19
Εικόνα 2.9: Αστικός κυκλικός κόμβος μιας λωρίδας στο Οντάριο του Καναδά	19
Εικόνα 2.10: Τυπικός σχεδιασμός αστικού κυκλικού κόμβου με δύο ή/και περισσότερες λωρίδες κυκλοφορίας.....	20
Εικόνα 2.11: Αστικός κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων στο Ίνταρ-'Ομπερσταϊν της Γερμανίας	20
Εικόνα 2.12: Τυπικός σχεδιασμός υπεραστικού κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας κυκλοφορίας	21
Εικόνα 2.13: Υπεραστικός κυκλικός κόμβος μιας λωρίδας στο Κολοράντο των ΗΠΑ.....	21
Εικόνα 2.14: Τυπικός σχεδιασμός υπεραστικού κυκλικού κόμβου δύο ή/και περισσότερες λωρίδες κυκλοφορίας.....	22
Εικόνα 2.15: Υπεραστικός κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων Καλαμάτα-Σπάρτης.....	22
Εικόνα 2.16: Τυπικός σχεδιασμός σπειροειδή κυκλικού κόμβου (Fortuijn, 2003).....	23
Εικόνα 2.17: Παράδειγμα σπειροειδή κυκλικού κόμβου στις ΗΠΑ	24
Εικόνα 2.18: Ο πρώτος κυκλικός κόμβος dutch που κατασκευάστηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο	24
Εικόνα 2.19: Σημεία εμπλοκής οχημάτων σε τυπικό τετρασκελή και σε αντίστοιχο κυκλικό κόμβο [Πηγή: ΥΠΥΜΕΔΙ - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας, 2011]	25
Εικόνα 2.20: Σημεία εμπλοκής οχημάτων σε τυπικό κόμβο διασταύρωσης και σε αντίστοιχο κυκλικό κόμβο [Πηγή: ΥΠΥΜΕΔΙ - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας, 2011]	26
Εικόνα 2.21: Σημεία εμπλοκής οχημάτων σε τυπικό κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας, δύο λωρίδων κυκλοφορίας και κυκλικό κόμβο turbo, αντίστοιχα	27

Εικόνα 2.22: (Αριστερή) Διαχωρισμός κυκλοφοριακής ροής κυκλοφορίας και κυκλοφοριακής ροής πρόσβασης , (Δεξιά) Τετρασκελής κυκλικός κόμβος με τις κινήσεις κυκλοφορίας ανά πρόσβαση [Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Οδοποιίας III ΣΑΤΜ-ΕΜΠ]	30
Εικόνα 2.23: Διάκριση μοντέλων προσομοίωσης βάσει επιπέδου λεπτομέρειας	34
Εικόνα 2.24: Το όχημα που οδηγεί και το όχημα που ακολουθεί, καθώς και η απόσταση της μεταξύ τους πορείας [Πηγή: Kazi Iftekhar Ahmed, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 1999]	35
Εικόνα 2.25: Η δομή του μοντέλου ακολουθίας οχήματος	36
Εικόνα 2.26: Η δομή του μοντέλου αλλαγή λωρίδας [Πηγή: Kazi Iftekhar Ahmed, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 1999].....	37
Εικόνα 2.27: Διαδικασία προτύπου αλλαγής λωρίδας	38
Εικόνα 2.28: Αναπαράσταση των διάκενων και της διαδικασίας αποδοχής τους από τον οδηγό [Πηγή: Kazi Iftekhar Ahmed, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 1999]..	39
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση ενός οδικού τμήματος [Πηγή: Aimsun 8 Users' Manual]	58
Εικόνα 3.2: Απεικόνιση ενός κεντροειδούς [Πηγή: Aimsun Next 20]	58
Εικόνα 3.3: Σχεδιασμός κυκλικού κόμβου μίας λωρίδας κυκλοφορίας στο AutoCAD.....	60
Εικόνα 3.4: Δημιουργία ενός οδικού τμήματος μιας λωρίδας κυκλοφορίας και της αντίθετης κατεύθυνσης	60
Εικόνα 3.5: Δημιουργία οχτώ οδικών τμημάτων	60
Εικόνα 3.6: Επιλογή πλάτους λωρίδας για τον απλό κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας	61
Εικόνα 3.7: Επιλογή τύπου οδικού τμήματος, μέγιστης ταχύτητας και χωρητικότητας μίας λωρίδας	61
Εικόνα 3.8: Κυκλικός κόμβος μίας λωρίδας κυκλοφορίας στο Aimsun.....	62
Εικόνα 3.9: Επιλογή πλάτος λωρίδας εντός κυκλικού κόμβου	62
Εικόνα 3.10: Επιλογή μέγιστης ταχύτητας και χωρητικότητας εντός του κυκλικού κόμβου... ..	63
Εικόνα 3.11: Αναπαράσταση κεντροειδούς σημείου	63
Εικόνα 3.12: Αναπαράσταση τεσσάρων κεντροειδών σημείων	64
Εικόνα 3.13: Σχεδιασμός κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων στο AutoCAD.....	64
Εικόνα 3.14: Δημιουργία ενός οδικού τμήματος δύο λωρίδων κυκλοφορίας και της αντίθετης κατεύθυνσης	65
Εικόνα 3.15: Δημιουργία οχτώ οδικών τμημάτων για την κατασκευή του δικτύου	65
Εικόνα 3.16: Επιλογή πλάτους λωρίδας για τον απλό κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων	66

Εικόνα 3.17: Επιλογή τύπου οδικού τμήματος, μέγιστης ταχύτητας και χωρητικότητας δύο λωρίδων.....	66
Εικόνα 3.18: Κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων κυκλοφορίας στο Aimsun.....	67
Εικόνα 3.19: Επιλογή πλάτους λωρίδας εντός του απλού κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων ..	67
Εικόνα 3.20: Επιλογή τύπου οδικού τμήματος, μέγιστης ταχύτητας και χωρητικότητας εντός του κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων κυκλοφορίας	68
Εικόνα 3.21: Αναπαράσταση κεντροειδούς σημείου στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων.....	68
Εικόνα 3.22: Σχεδιασμός σπειροειδή κυκλικού κόμβου στο AutoCAD	69
Εικόνα 3.23: Σπειροειδής κυκλικός κόμβος στο AIMSUN	69
Εικόνα 3.24: Αναπαράσταση δυναμικού σεναρίου, πειράματος, μέσου όρου και αναπαραγωγών στο AIMSUN	70
Εικόνα 3.25: Καθορισμός ώρας εκκίνησης, διάρκειας προσομοίωσης και τύπου οχήματος.	71
Εικόνα 3.26: Παράδειγμα πίνακα προέλευσης – προορισμού	71
Εικόνα 3.27: Πληροφορίες κυκλοφοριακής ζήτησης	72
Εικόνα 3.28: Πληροφορίες δυναμικού σεναρίου	72

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Αριθμός και τύπος σημείων εμπλοκής οχημάτων σε ισόπεδο κόμβο	26
Πίνακας 2.2: Αριθμός και τύπος σημείων εμπλοκής οχημάτων σε ισόπεδο κόμβο διασταύρωσης και κυκλικό κόμβο αντίστοιχα (3 κλάδοι προσέγγισης).....	26
Πίνακας 2.3: Προσδιορισμός στάθμης εξυπηρέτησης κυκλικού κόμβου	32
Πίνακας 3.1: Ανάλυση απλού κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας κυκλοφορίας με χαμηλό και υψηλό φόρτο ως προς τα ποσοστά κινήσεων δεξιάς στροφής	75
Πίνακας 3.2: Ανάλυση ακραίων τιμών της παραμέτρου ευαισθησίας για χαμηλό ποσοστό δεξιάς στροφής	76
Πίνακας 3.3: Ανάλυση ακραίων τιμών της παραμέτρου ευαισθησίας για υψηλό ποσοστό δεξιάς στροφής.....	77
Πίνακας 3.4: Σενάρια τύπων κυκλικών κόμβων	77
Πίνακας 3.5: Σενάρια κυκλοφοριακών φόρτων	78
Πίνακας 3.6: Σενάρια ποσοστά δεξιάς στροφής	78
Πίνακας 3.7: Σενάρια ποσοστών για τις τρεις προσβάσεις	78
Πίνακας 3.8: Σενάρια παραμέτρου ευαισθησίας	79
Πίνακας 3.9: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα τελικά σενάρια προσομοίωσης	79
Πίνακας 4.1: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 1000 και 1500 για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας.....	88
Πίνακας 4.2: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 1500 και 2000 για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας.....	88
Πίνακας 4.3: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 2000 και 2500 για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας.....	89
Πίνακας 4.4: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 2500 και 3000 για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας.....	89
Πίνακας 4.5: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 20% με 30% για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας.....	89
Πίνακας 4.6: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 30% με 40% για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας.....	90
Πίνακας 4.7: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 40% με 50% για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας.....	90
Πίνακας 4.8: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 50% με 60% για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας.....	90

Πίνακας 4.9: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των παραμέτρων ευαισθησίας για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας.....	91
Πίνακας 4.10: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 2000 και 2500 για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας.....	98
Πίνακας 4.11: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 2500 και 3000 για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας.....	98
Πίνακας 4.12: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 3000 και 3500 για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας.....	98
Πίνακας 4.13: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 3500 και 4000 για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας.....	98
Πίνακας 4.14: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 20% με 30% για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας.....	99
Πίνακας 4.15: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 30% με 40% για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας.....	99
Πίνακας 4.16: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 40% με 50% για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας.....	99
Πίνακας 4.17: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 50% με 60% για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας.....	99
Πίνακας 4.18: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των παραμέτρων ευαισθησίας για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας.....	100
Πίνακας 4.19: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 2000 και 2500 για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο.....	107
Πίνακας 4.20: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 2500 και 3000 για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο.....	107
Πίνακας 4.21: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 3000 και 3500 για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο.....	107
Πίνακας 4.22: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 3500 και 4000 για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο.....	108
Πίνακας 4.23: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των παραμέτρων ευαισθησίας για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο.....	108
Πίνακας 4.24: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης καθυστέρησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μίας λωρίδας και δύο λωρίδων για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο.....	109
Πίνακας 4.25: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης καθυστέρησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μίας λωρίδας και δύο λωρίδων για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο.....	110
Πίνακας 4.26: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης ταχύτητας μεταξύ κυκλικού κόμβου μίας λωρίδας και δύο λωρίδων για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο.....	110

Πίνακας 4.27: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης ταχύτητας μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και δύο λωρίδων για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο.....	110
Πίνακας 4.28: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσου χρόνου μετακίνησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και δύο λωρίδων για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο	111
Πίνακας 4.29: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσου χρόνου μετακίνησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και δύο λωρίδων για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο	111
Πίνακας 4.30: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης καθυστέρησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και σπειροειδή για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο	111
Πίνακας 4.31: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης καθυστέρησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και σπειροειδή για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο	112
Πίνακας 4.32: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης ταχύτητας μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και σπειροειδή για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο	112
Πίνακας 4.33: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης ταχύτητας μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και σπειροειδή για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο	112
Πίνακας 4.34: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσου χρόνου μετακίνησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και σπειροειδή για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο	113
Πίνακας 4.35: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσου χρόνου μετακίνησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και σπειροειδή για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο	113
Πίνακας 4.36: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης καθυστέρησης μεταξύ κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και σπειροειδή για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο.....	113
Πίνακας 4.37: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης καθυστέρησης μεταξύ κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και σπειροειδή για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο	114
Πίνακας 4.38: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης ταχύτητας μεταξύ κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και σπειροειδή για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο	114
Πίνακας 4.39: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης ταχύτητας μεταξύ κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και σπειροειδή για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο	114
Πίνακας 4.40: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσου χρόνου μετακίνησης μεταξύ κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και σπειροειδή για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο.....	115
Πίνακας 4.41: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσου χρόνου μετακίνησης μεταξύ κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και σπειροειδή για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο	115

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4-1: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%	82
Διάγραμμα 4-2: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%	82
Διάγραμμα 4-3: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%	83
Διάγραμμα 4-4: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%	83
Διάγραμμα 4-5: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%	84
Διάγραμμα 4-6: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%	84
Διάγραμμα 4-7: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%	85
Διάγραμμα 4-8: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%	85
Διάγραμμα 4-9: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%	86
Διάγραμμα 4-10: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%	86
Διάγραμμα 4-11: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%	87
Διάγραμμα 4-12: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%	87
Διάγραμμα 4-13: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60% σε μικρότερη κλίμακα	88
Διάγραμμα 4-14: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%	92
Διάγραμμα 4-15: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%	92
Διάγραμμα 4-16: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%	93
Διάγραμμα 4-17: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%	93
Διάγραμμα 4-18: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%	94

Διάγραμμα 4-19: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%.....	94
Διάγραμμα 4-20: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%	95
Διάγραμμα 4-21: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%	95
Διάγραμμα 4-22: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%	96
Διάγραμμα 4-23: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%.....	96
Διάγραμμα 4-24: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%	97
Διάγραμμα 4-25: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%	97
Διάγραμμα 4-26: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%	101
Διάγραμμα 4-27: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%.....	101
Διάγραμμα 4-28: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%	102
Διάγραμμα 4-29: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%	102
Διάγραμμα 4-30: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%	103
Διάγραμμα 4-31: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%.....	103
Διάγραμμα 4-32: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%	104
Διάγραμμα 4-33: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%	104
Διάγραμμα 4-34: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%	105
Διάγραμμα 4-35: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%.....	105
Διάγραμμα 4-36: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%	106

Διάγραμμα 4-37: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60% 106

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά Στοιχεία

Απαραίτητο τμήμα των μεταφορικών συστημάτων, για την επιστήμη του συγκοινωνιολόγου μηχανικού, που εξυπηρετούν τις απαιτήσεις και τις ανάγκες για μεταφορές προσώπων και αγαθών, αποτελούν τα οδικά δίκτυα. Πρωτεύοντας στόχος για τον μελετητή αποτελεί η εξασφάλιση ασφάλειας, άνεσης, ταχύτητας, οικονομίας, αλλά και ελάχιστων επιπτώσεων στο περιβάλλον.

Οι κυκλοφοριακοί κόμβοι λαμβάνουν σημαντική θέση στα οδικά δίκτυα. Υπάρχουν ποικίλες κατηγορίες κόμβων και παραλλαγών αυτών, με τις πρώτες να τους διακρίνουν κυρίως σε ισόπεδους και ανισόπεδους. Βασικό κριτήριο για το σχεδιασμό τους αποτελεί η παροχή ασφάλειας, καθώς και καλύτερης ανταπόκρισης στην ομαλή κυκλοφοριακή ροή στις περιπτώσεις διασταυρούμενων ρευμάτων. Μια ειδική μορφή των κόμβων που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι οι **κυκλικοί κόμβοι (roundabouts)**. Σε αυτή την κατηγορία τα οχήματα κινούνται συνεχώς κατά φορά αντίθετη προς εκείνη των δεικτών του ωρολογίου, γύρω από μια κεντρική νησίδα, συνηθέστατα κυκλική. Η χρήση τους έναντι των σηματοδοτούμενων κόμβων ενδείκνυται καθώς παρέχουν μεγαλύτερη ασφάλεια και μικρότερες καθυστερήσεις. Στην Ελλάδα η ύπαρξη κυκλικών κόμβων είναι περιορισμένη. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξητική τάση στη κατασκευή τους, καθώς προτιμώνται όλο και περισσότερο για τη διαχείριση της κυκλοφορίας σε διασταυρώσεις οδών.

Σημαντικό ενδιαφέρον για τους κυκλικούς κόμβους αποτελεί το γεγονός ότι οι διασταυρώσεις κυκλοφοριακών ρευμάτων μετατρέπονται σε διαδοχικούς ελιγμούς συμβολής και μερισμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αποφυγή των διασταυρώσεων, αλλά δημιουργείται μια περιοχή πολλαπλής πλέξης με σημεία πιθανής εμπλοκής. Η αδυναμία αποφυγής των σημείων πιθανής εμπλοκής, σε συνδυασμό με τυχόν κυκλοφοριακή συμφόρηση λόγω αυξημένης κίνησης των οχημάτων σε περιόδους και ώρες αιχμής, μειώνει σε σημαντικό βαθμό την κυκλοφοριακή ικανότητα του οδικού δικτύου, προκαλώντας συχνά προβλήματα κορεσμού.

Είναι φανερό, λοιπόν, ότι για την αντιμετώπιση των προβλημάτων κορεσμού κρίνονται αναγκαίες αποδοτικές κυκλοφοριακές ρυθμίσεις του οδικού δικτύου. Οι ρυθμίσεις αυτές για έναν κυκλικό κόμβο μπορεί να αφορούν στη διαχείριση των προτεραιοτήτων κίνησης των οχημάτων σε αυτόν, μέσω αναδιάταξης κανόνων και κυκλοφοριακών συνθηκών. Η αποτελεσματική διαχείριση μπορεί να μειώσει σε σημαντικό βαθμό τις επιδράσεις των προβλημάτων που δημιουργούνται στις εκάστοτε κυκλοφοριακές συνθήκες. Προκειμένου να

αποδοθεί και να αναλυθεί κατάλληλα ένα οδικό δίκτυο υπό διαφορετικές κάθε φορά κυκλοφοριακές συνθήκες, απαιτούνται ιδιαίτερα ανεπτυγμένες μεθοδολογίες και η **προσομοίωση (simulation)** αποτελεί μια ιδανική επιλογή. Η προσομοίωση παρέχει τη δυνατότητα παρατήρησης των επιπτώσεων και διευκόλυνσης στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εφαρμογή ή την κατάργηση των εκάστοτε κυκλοφοριακών ρυθμίσεων, χωρίς να πραγματοποιηθεί κάποια παρέμβαση στο πραγματικό σύστημα.

Σύμφωνα με όσο αναφέρθηκαν παραπάνω, κρίνεται η αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης προτεραιότητας σε κυκλικούς κόμβους, με τη χρήση μικροσκοπικού λογισμικού προσομοίωσης.

1.2 Στόχος διπλωματικής εργασίας

Θεμελιώδης στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η **διερεύνηση λειτουργίας ισόπεδων κυκλικών κόμβων με χρήση μικροσκοπικής προσομοίωσης**, το **AIMSUN**. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκαν τρεις κυκλικοί κόμβοι, ένας συμβατικός με μία λωρίδα κυκλοφορίας, ένας συμβατικός με δύο λωρίδες κυκλοφορίας και ένας σπειροειδής (turbo), στους οποίους εφαρμόστηκαν διάφορα σενάρια προσομοίωσης και, έπειτα, έγινε σύγκριση του επιπέδου λειτουργίας των κόμβων.

Προτιμήθηκε το παραπάνω λογισμικό, καθώς θεωρείται κατάλληλο για προσομοίωση τόσο σηματοδοτούμενων ή μη διασταυρώσεων, όσο και κυκλικών κόμβων, ενώ ταυτόχρονα είναι εύχρηστο προς τον χρήστη.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Για την καλύτερη κατανόηση αλλά και παρακολούθηση της Διπλωματικής Εργασίας από τον αναγνώστη, κρίνεται αναγκαίο η παρουσίαση με συνοπτικό τρόπο η δομή, καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

Το **πρώτο κεφάλαιο** αποτελεί την εισαγωγή και περιλαμβάνει μια γενική ανασκόπηση σχετικά με την ανάγκη της μελέτης και προσομοίωσης κυκλικών κόμβων, όπου παρατηρούνται προβλήματα κυκλοφοριακής συμφόρησης και καθίσταται απαραίτητη η ανάλυση και η αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων προτεραιότητας κίνησης των οχημάτων σε αυτούς. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται το αντικείμενο και ο στόχος της Διπλωματικής Εργασίας, μέσω

συνοπτικής παρουσίασης της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. Το κεφάλαιο καταλήγει με την παρούσα σύνοψη για την δομή της Διπλωματικής Εργασίας στο σύνολό της.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** παρατίθεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση, όπως αυτό προέκυψε μέσω μελέτης και έρευνας, για την απόκτηση του κατάλληλου επιστημονικού υποβάθρου, που πραγματοποιήθηκε σχετικά με το αντικείμενο της παρούσας Εργασίας. Αρχικά, παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της κυκλοφοριακής τεχνικής, καθώς και των βασικών μεθόδων υπολογισμού της κυκλοφοριακής ικανότητας ενός κόμβου προτεραιότητας. Ακόμα, αναφέρονται οι διάφοροι τύποι ισόπεδων κόμβων και τα χαρακτηριστικά αυτών. Στη συνέχεια, αναλύονται ο ορισμός της προσομοίωσης οι τρεις κατηγορίες προτύπων της: μικροσκοπικά, μεσοσκοπικά και μακροσκοπικά, καθώς και μια συνοπτική παρουσίαση διαφόρων λογισμικών προσομοίωσης. Ειδικότερα, στο κεφάλαιο αυτό δίνεται έμφαση στην παρουσίαση του λογισμικού προσομοίωσης AIMSUN, καθώς και των μοντέλων που ακολουθεί το λογισμικό αυτό: το μοντέλο ακολουθούντος οχήματος, το μοντέλο αλλαγής λωρίδας και το μοντέλο αποδοχής διακένου. Τέλος, παραθέτονται οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί και σχετίζονται με την διερεύνηση της κυκλοφοριακής ικανότητας και της προσομοίωσης ισόπεδων κυκλικών κόμβων.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Αρχικά, παρουσιάζονται οι λειτουργίες και οι δυνατότητες του μικροσκοπικού λογισμικού AIMSUN, με έμφαση σε αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Στη συνέχεια, αναλύθηκε ο σχεδιασμός του δικτύου στο πρόγραμμα προσομοίωσης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κόμβων, μέσω του κανονισμού ΟΜΟΕ. Έπειτα, αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο επιλέχθηκαν οι τιμές παράμετροι των προσομοιώσεων, καθώς και οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τις καθοριστικές προσομοιώσεις. Συνοψίζοντας, γίνεται ανακεφαλαίωση των τελικών παραμέτρων για την προσομοίωση του οδικού δικτύου.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα περιγράφουν την λειτουργία των κόμβων ως προς τη μέση καθυστέρηση, τη μέση ταχύτητα και το μέσο χρόνο μετακίνησης. Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε χρήση διαγραμμάτων και πινάκων.

Το **πέμπτο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τα τελικά συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν σύμφωνα με την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Τέλος, παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σχετικά με το συγκεκριμένο αντικείμενο.

Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Παρουσιάζεται με τη μορφή καταλόγου το σύνολο των ερευνών,

δημοσιευμάτων και επιστημονικών άρθρων που μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν, προκειμένου να ολοκληρωθεί η Εργασία.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Βασικά μεγέθη και έννοιες κυκλοφοριακής ροής

Η συγκοινωνιακή τεχνική είναι η εφαρμογή των επιστημονικών αρχών και της τεχνολογίας για τον σχεδιασμό, τη διαχείριση και τη λειτουργία των υποδομών που αφορούν σε όλα τα μέσα μετακίνησης με στόχο να παρέχουν ασφαλή, γρήγορη, άνετη, οικονομική και φιλική με το περιβάλλον μετακίνηση των προσώπων και αγαθών. Η κυκλοφοριακή τεχνική έχει ως βάση τη θεωρία της κυκλοφοριακής ροής (traffic flow), που αποτελεί έναν επιστημονικό κλάδο, ο οποίος αναλύει τη δυναμική της κυκλοφορίας και, πιο συγκεκριμένα, την κίνηση μονάδων που κινούνται από ένα σημείο στο άλλο στα συγκοινωνιακά δίκτυα. Μονάδες αποτελούν κυρίως οι οδηγοί και τα οχήματα, αλλά και τα ποδήλατα και οι πεζοί. Ως συγκοινωνιακά δίκτυα νοούνται οι υποδομές που εξυπηρετούν την κίνηση των παραπάνω μονάδων είτε είναι οδικά τμήματα, είτε πεζοδρόμια, είτε γραμμές Μέσων Μαζικής Μεταφοράς (ΜΜΜ) κ.ά. Η κυκλοφοριακή ροή (traffic flow) προσδιορίζεται από μεγέθη κυκλοφοριακής ροής (traffic flow variables) που μπορούν να μετρηθούν. Τα βασικά κυκλοφοριακά μεγέθη είναι: i) ο κυκλοφοριακός φόρτος (traffic volume), ii) η ταχύτητα (speed) των οχημάτων και iii) η πυκνότητα (density). Τα μεγέθη αυτά, καθώς και ένας ακόμα μεγάλος αριθμός μεγεθών ορίζονται στις επόμενες παραγράφους.

Κυκλοφοριακός Φόρτος (traffic volume)

Ο **κυκλοφοριακός φόρτος q (traffic volume)** αποτελεί μέγεθος με χρονική διάσταση και είναι ο συνολικός αριθμός οχημάτων που διέρχονται από μία διατομή στη μονάδα του χρόνου. Ο κυκλοφοριακός φόρτος εκφράζεται σε οχήματα ανά ώρα και ο τρόπος μέτρησής του αφορά μέτρηση σε σημείο του αριθμού των οχημάτων N που διέρχονται από αυτό στη διάρκεια κάποιας περιόδου T , ο οποίος ανάγεται στην ώρα.

$$q(x) = \frac{N(x)}{T}$$

Ο κυκλοφοριακός φόρτος παρουσιάζει τρεις κύκλους διακύμανσης: τη μηνιαία (ή εποχική), την ημερήσια και την ωριαία. Στην ωριαία διακύμανση σημαντικό ρόλο παρουσιάζει η **ώρα αιχμής (peak hour)**, που αντικατοπτρίζει την ώρα εκείνη που ο φόρτος λαμβάνει την υψηλότερη τιμή.

Για την κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου κατά είδος οχήματος χρησιμοποιείται ο όρος **σύνθεση κυκλοφορίας (traffic composition)**. Ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο θα

χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία σύνθεσης κυκλοφορίας και το αν οι μετρήσεις γίνονται 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 (περισσότερα από τέσσερα ελαστικά και ωφέλιμο φορτίο από 1.5 τόνο και πάνω).
- 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 της κυκλοφορίας.
- Σχεδιασμός και διαχείριση οδοστρωμάτων.

Αξίζει να τονιστεί πως η σύνθεση της κυκλοφορίας διαφέρει από πόλη σε πόλη και από περιοχή σε περιοχή, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των αντίστοιχων δραστηριοτήτων και τις χρήσεις γης. Η σύνθεση κυκλοφορίας μπορεί να διαφοροποιείται ακόμα και ανάμεσα στις δύο κατευθύνσεις μιας οδού. Τέλος, η σύνθεση της κυκλοφορίας μεταβάλλεται χρονικά, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια μια ημέρας. Σημαντική είναι και η ετήσια μεταβολή της σύνθεσης της κυκλοφορίας εξαιτίας του διαφορετικού ρυθμού μεταβολής των διαφόρων κατηγοριών μηχανοκίνητων οχημάτων.

Οι διάφορες κατηγορίες οχημάτων απαιτούν διαφορετικού μεγέθους χώρου στην οδό εξαιτίας των διαστάσεων και των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους και συνεπώς έχουν διαφορετική επιρροή στην κυκλοφοριακή ροή. Για τη μετατροπή των διαφόρων κατηγοριών οχημάτων σε συγκρίσιμες μονάδες χρησιμοποιείται ως βασική μονάδα το *επιβατικό όχημα (passenger car)* και ο κυκλοφοριακός φόρτος εκφράζεται σε *Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων – ΜΕΑ (Passenger Car Units – PCU)*.

Ταχύτητα (speed)

Στη θεωρία της κυκλοφοριακής τεχνικής, η ταχύτητα έχει δύο διαστάσεις: τη χρονική και τη χωρική. Πιο συγκεκριμένα:

- **Μέση χρονική ταχύτητα \bar{u}_t (time mean speed)** είναι ο αριθμητικός μέσος όρος των στιγμιαίων ταχυτήτων των οχημάτων που διέρχονται από μία διατομή και εκφράζεται σε μονάδες μήκους/χρόνο (χλμ./ώρα, μ./δλ.). Ο τρόπος μέτρησής της αφορά μέτρηση σε σημείο των στιγμιαίων ταχυτήτων u_i των οχημάτων (N) που διέρχονται από αυτό στη διάρκεια κάποιας περιόδου T και αποτελεί τον μέσο όρο τους.

$$\bar{u}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$$

- **Μέση χωρική ταχύτητα \bar{u}_s (space mean speed)** είναι ο αριθμητικός μέσος όρος των στιγμιαίων ταχυτήτων των οχημάτων που βρίσκονται σε κάποιο οδικό τμήμα σε δεδομένη χρονική στιγμή και εκφράζεται σε μονάδες μήκους/χρόνο (χλμ./ώρα, μ./δλ.). Ο τρόπος μέτρησής της αφορά μέτρηση των στιγμιαίων ταχυτήτων u_i των οχημάτων (M) που βρίσκονται σε οδικό τμήμα μήκους D σε δεδομένη χρονική στιγμή t και αποτελεί τον μέσο όρο τους.

$$\bar{u}_s = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M u_{i(t)}$$

Πέρα από τις παραπάνω έννοιες, υπάρχουν άλλα δύο είδη ταχυτήτων, τα οποία αναφέρονται στην κυκλοφοριακή τεχνική, και αυτά είναι: η ταχύτητα λειτουργίας (operating speed) και η ταχύτητα ελεύθερης ροής (free flow speed). Η **ταχύτητα λειτουργίας (operating speed)** είναι η μέγιστη ταχύτητα διαδρομής με την οποία μπορεί να κινηθεί ένα όχημα σε δεδομένο τμήμα του οδικού δικτύου κάτω από καλές καιρικές συνθήκες, με την υπάρχουσα κάθε φορά κυκλοφορία και χωρίς να ξεπεράσει τη μέγιστη ταχύτητα ασφαλείας που εκφράζεται από την ταχύτητα μελέτης, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού. Η **ταχύτητα ελεύθερης ροής (free flow speed)** είναι η ταχύτητα λειτουργίας σε τμήμα μιας αρτηρίας, όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι πολύ χαμηλός (συνθήκες ελεύθερης ροής).

Πυκνότητα (density)

Η **πυκνότητα k (density)**, μαζί με την χρονική κατάληψη o (occupancy), είναι δύο μεγέθη που εκφράζουν ουσιαστικά με άμεσο τρόπο την συγκέντρωση. Η πυκνότητα είναι ο αριθμός των οχημάτων στη μονάδα μήκους και εκφράζεται σε οχήματα ανά χιλιόμετρα. Συγκεκριμένα εκφράζει τη συγκέντρωση στη διάσταση του χώρου. Ο τρόπος μέτρησής της αφορά μέτρηση του αριθμού των οχημάτων (M) που βρίσκονται σε οδικό τμήμα μήκους D σε δεδομένη χρονική στιγμή t .

$$k = \frac{M}{D}$$

Με βάση τον ορισμό της, η πυκνότητα λαμβάνει ελάχιστη τιμή όταν δεν υπάρχει κανένα όχημα στο οδικό τμήμα που εξετάζεται και είναι ίση με 0. Αντίστοιχα, η πυκνότητα λαμβάνει μέγιστη τιμή όταν το τμήμα είναι πλήρες, δηλαδή όταν τα οχήματα βρίσκονται σε στάση με μικρή απόσταση μεταξύ τους. Η μέγιστη πυκνότητα συμβολίζεται με k_j (jam density) και ισούται με 110-150 οχήματα/χλμ. θεωρώντας ένα μέσο χωρικό διάκενο (μήκος οχήματος και απόσταση ασφαλείας) ίσο περίπου με 7-9 μέτρα/όχημα. Επιπλέον, μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής της πυκνότητας υπάρχει μία τιμή η οποία αναφέρεται ως **χαρακτηριστική τιμή της πυκνότητας** και παρατηρείται για συνθήκες μέγιστου φόρτου. Η χαρακτηριστική τιμή της πυκνότητας k_m κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 26-42 οχήματα/χλμ. που αντιστοιχεί σε χωρικό διάκενο 24-38 μέτρα/όχημα.

Η **χρονική κατάληψη ο (occupancy)** είναι το ποσοστό της μονάδας χρόνου που ένα σημείο του δρόμου καταλαμβάνεται από διερχόμενα οχήματα και εκφράζεται σε ποσοστό (%). Ουσιαστικά, εκφράζει τη συγκέντρωση στη διάσταση του χρόνου και ο τρόπος μέτρησής του αφορά το άθροισμα των επιμέρους χρονικών διαστημάτων κατά τα οποία μία διατομή είναι κατειλημμένη. Αντίστοιχα με την πυκνότητα, παρουσιάζει ελάχιστη και μέγιστη τιμή. Η ελάχιστη τιμή της χρονικής κατάληψης είναι 0% και χαρακτηρίζει διατομή από την οποία δεν έχει διέλθει κανένα όχημα στη διάρκεια της περιόδου μέτρησης. Η μέγιστη τιμή της χρονικής κατάληψης είναι 100% και χαρακτηρίζει διατομή η οποία είναι συνεχώς κατειλημμένη, κατά συνέπεια τα οχήματα είναι συνεχώς σταματημένα κατά τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης.

Χρονικός και Χωρικός Διαχωρισμός (time and space headway)

Ο **διαχωρισμός (headway)** εκφράζει την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων είτε στη χρονική είτε στην χωρική διάσταση με τα μεγέθη: μέσος χρονικός διαχωρισμός και μέσος χωρικός διαχωρισμός.

Ο **χρονικός διαχωρισμός h_t (time headway)** είναι ο χρόνος μεταξύ των διελεύσεων δύο διαδοχικών οχημάτων από μία διατομή και εκφράζεται σε μονάδες χρόνου (π.χ. δευτερόλεπτα). Ο τρόπος μέτρησής του αφορά την καταγραφή των χρονικών στιγμών διέλευσης των οχημάτων από μία συγκεκριμένη διατομή (π.χ. τη στιγμή διέλευσης των μπροστινών τροχών των οχημάτων) κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος, και ο μέσος χρονικός διαχωρισμός αποτελεί τον μέσο όρο τους.

Με βάση τον ορισμό, ο μέσος χρονικός διαχωρισμός ισούται με:

$$\bar{h}_t = \frac{\sum_{i=1}^N h_{t(i)}}{N}$$

Θεωρώντας ότι η χρονική περίοδος μέτρησης T είναι αρκετά μεγάλη, αυτή ισούται με:

$$T \approx \sum_{i=1}^N h_{t(i)}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο κυκλοφοριακός φόρτος ισούται με:

$$q = \frac{N}{T}$$

Προκύπτει ότι:

$$q \approx \frac{N}{\sum_{i=1}^N h_{t(i)}} \approx \frac{1}{\bar{h}_t}$$

Επομένως, ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι αντιστρόφως ανάλογος του μέσου χρονικού διαχωρισμού.

Ο **χωρικός διαχωρισμός h_s (space headway)** είναι η απόσταση μεταξύ των δύο διαδοχικών οχημάτων σε μια χρονική στιγμή και εκφράζεται σε μονάδες μήκους (π.χ. μέτρα). Ο τρόπος μέτρησης του αφορά την καταγραφή της θέσης των οχημάτων σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή (π.χ. η θέση των μπροστινών τροχών των οχημάτων) και τον υπολογισμό των επιμέρους αποστάσεων μεταξύ των διαδοχικών οχημάτων. Ο μέσος χωρικός διαχωρισμός αποτελεί τον μέσο όρο τους.

Με βάση τον ορισμό, ο μέσος χωρικός διαχωρισμός ισούται με:

$$\bar{h}_s = \frac{\sum_{i=1}^N h_{s(i)}}{N}$$

Θεωρώντας ότι η τιμή του μήκους D είναι αρκετά μεγάλη, αυτή ισούται με:

$$D \approx \sum_{i=1}^N h_{s(i)}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η πυκνότητα ισούται με:

$$k = \frac{N}{D}$$

Προκύπτει ότι:

$$k \approx \frac{N}{\sum_{i=1}^N h_{s(i)}} \approx \frac{1}{\bar{h}_s}$$

Επομένως, η πυκνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του μέσου χωρικού διαχωρισμού.

Ροή Κορεσμού (saturation flow)

Η **ροή κορεσμού s (saturation flow)** είναι ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος που μπορεί να διέλθει από μία διατομή (ή ομάδα λωρίδων που εξυπηρετούν από κοινού μία κατεύθυνση) υπό τις επικρατούσες οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες. Κατά συνέπεια, η ροή κορεσμού εκφράζει τη χωρητικότητα μιας διατομής λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Γνωρίζοντας τη σχέση μεταξύ κυκλοφοριακού φόρτου και χρονικού διαχωρισμού γίνεται αντιληπτό ότι η ροή κορεσμού αφορά ροή κυκλοφορίας κατά την οποία τα οχήματα διέρχονται με τον ελάχιστο χρονικό διαχωρισμό. Ο χρονικός διαχωρισμός που αφήνουν τα οχήματα μεταξύ τους εξαρτάται από μεγάλο πλήθος οδικών και κυκλοφοριακών χαρακτηριστικών, όπως το πλάτος λωρίδας, η ύπαρξη βαρέων οχημάτων κ.ά.

Κυκλοφοριακή Ικανότητα (capacity)

Η **κυκλοφοριακή ικανότητα c (capacity)** είναι ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος που μπορεί να διέλθει από μία διατομή (ή ομάδα λωρίδων που εξυπηρετούν από κοινού μία κατεύθυνση) υπό τις επικρατούσες οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες και συνθήκες ελέγχου της κυκλοφορίας. Η διαφοροποίηση μεταξύ ροής κορεσμού και κυκλοφοριακής ικανότητας είναι ότι στο δεύτερο μέγεθος υπεισέρχεται παρεμπόδιση του κυκλοφοριακού φόρτου εξαιτίας του ελέγχου της κυκλοφορίας (π.χ. συνθήκες φωτεινής σηματοδότησης).

Βαθμός Κορεσμού (degree of saturation)

Ο **βαθμός κορεσμού (degree of saturation)** ορίζεται ως το πηλίκο του κυκλοφοριακού φόρτου που θέλει να εξυπηρετηθεί/διέλθει από μία διατομή προς την κυκλοφοριακή ικανότητα της διατομής $\left(\frac{v}{c}\right)$. Αποτυπώνει άμεσα τη σχέση ζήτησης και προσφοράς και λαμβάνει τις χαρακτηριστικές τιμές 0 και 1. Στην πρώτη περίπτωση δεν υπάρχει ζήτηση, άρα έχουμε συνθήκες ελεύθερης ροής, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η ζήτηση ισούται με την προσφορά, που σημαίνει ότι έχουμε συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Μέση Καθυστέρηση (mean delay)

Η μέση καθυστέρηση d (mean delay) είναι ο επιπλέον χρόνος τον οποίο θα χρειαστεί κάποιο όχημα για να διανύσει ένα οδικό τμήμα στις επικρατούσες οδικές συνθήκες όταν η κίνησή του δεν γίνεται απρόσκοπτα. Αποτυπώνει τη διαφορά του χρόνου διαδρομής με βάση τις επικρατούσες συνθήκες και του χρόνου διαδρομής σε συνθήκες ελεύθερης ροής. Κατά συνέπεια, μέση καθυστέρηση για ένα όχημα μπορεί να υπάρξει είτε σε συνθήκες χαμηλού φόρτου εξαιτίας της κίνησης οχημάτων στο εξεταζόμενο οδικό τμήμα με χαμηλότερες ταχύτητες από την επιθυμητή του εξεταζόμενου οχήματος, είτε σε συνθήκες υψηλών κυκλοφοριακών φόρτων όπου η κίνηση των οχημάτων δεν γίνεται απρόσκοπτα είτε σε συνθήκες ελέγχου κυκλοφορίας όπου η κίνηση των οχημάτων παρεμποδίζεται από εξωγενείς παράγοντες (π.χ. σηματοδότηση) κ.ά.

Ουρά Αναμονής (queue)

Η ουρά αναμονής N (queue) αποτελεί ένα ποσοτικό μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται στην κυκλοφοριακή τεχνική για την αποτύπωση των συνθηκών κυκλοφορίας. Η ουρά αναμονής εκφράζεται είτε ως αριθμός οχημάτων που σχηματίζουν ουρά, είτε ως μήκος της ουράς αναμονής.

Στάθμη Εξυπηρέτησης (Level of Service – LoS)

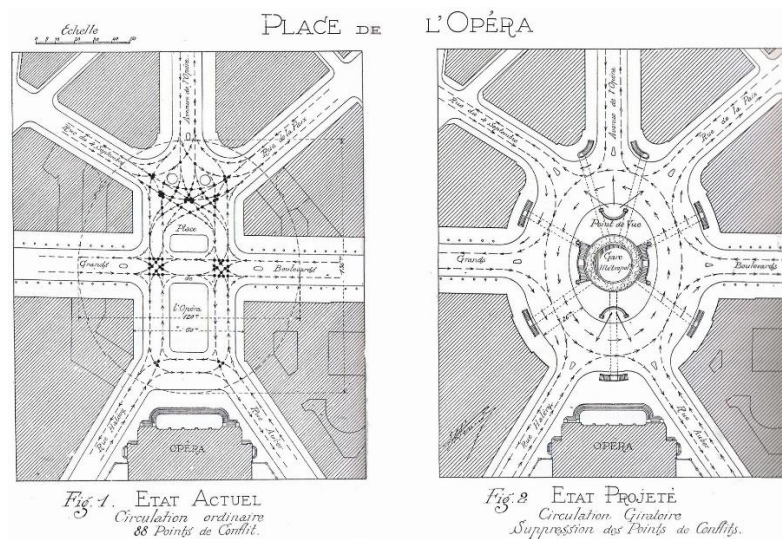
Η στάθμη εξυπηρέτησης αποτελεί ένα ποιοτικό μέγεθος που εκφράζει τις συνθήκες λειτουργίας μέσα σε ένα ρεύμα κυκλοφορίας, όπως τις αντιλαμβάνονται οι οδηγοί, οι επιβάτες ή οι πεζοί. Στην πράξη καθορίζονται διάφορες στάθμες εξυπηρέτησης με βάση ορισμένες οριακές τιμές παραμέτρων, όπως η ταχύτητα, ο χρόνος μετακίνησης, η πυκνότητα και οι καθυστερήσεις, που ονομάζονται *δείκτες εξυπηρέτησης (service measures)*. Από το 1965 (ΗΠΑ) έχουν καθιερωθεί έξι στάθμες εξυπηρέτησης, οι οποίες χαρακτηρίζονται με τα στοιχεία A, B, C, D, E, F και καλύπτουν όλες τις πιθανές συνθήκες λειτουργίας, από την καλύτερη: A, ελεύθερη ροή (free flow), μέχρι την χειρότερη: F, πλήρης κατάρρευση της κυκλοφορίας – κορεσμός (saturation).

2.2 Κυκλικοί Κόμβοι

2.2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η εμφάνιση των πρώτων κυκλικών κόμβων πραγματοποιείται στα μέσα τις δεκαετίας του '70 στην Μεγάλη Βρετανία, και στη συνέχεια στη Γαλλία. Ύστερα από τις πρώτες μελέτες, χρησιμοποιήθηκε ευρέως εξαιτίας του υψηλού επιπέδου ασφαλείας που παρείχε, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις αυξημένης επικινδυνότητας.

Ωστόσο, η κατασκευή πρώιμου κυκλικού κόμβου, δηλαδή του **πρώτου πλήρους μορφής κυκλοφοριακού κύκλου**, έγινε το 1905 στη Νέα Υόρκη από τον Williams Phelps Eno. Πρόκειται για τον «Κύκλο του Κολόμβου» ο οποίος και φιλοξενεί αντίστοιχο μνημείο προς τιμήν του γνωστού εξερευνητή. Στην Ευρώπη, η ιδέα για τον σχεδιασμό ενός πρώιμης μορφής κυκλικού κόμβου, που θα διευκολύνει την κυκλοφορία των οχημάτων στα σημεία συμβολής πολλών οδών, εισήχθη για πρώτη φορά το 1897 από τον Holroyd Smith στο Λονδίνο και το 1903 από τον Γάλλο αρχιτέκτονα Eugene Henard. Η σκέψη του Henard υλοποιήθηκε το 1907 με την κατασκευή της Place de l'Étoile, η οποία ουσιαστικά πλαισίωσε την Αψίδα του Θριάμβου στο Παρίσι.



Εικόνα 2.1: Λεπτομερές σχέδιο για την μετατροπή του Place de l'Opera σε κυκλικό κόμβο

[Πηγή: https://www.wikiwand.com/en/Eug%C3%A8ne_H%C3%A9nard]



Εικόνα 2.2: Columbus Circle - Ο κύκλος του Κολόμβου στη Νέα Υόρκη

[Πηγή: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Columbus_Circle_in_New_York_City.jpg]



Εικόνα 2.3: Η Αψίδα του Θριάμβου στο Παρίσι

[Πηγή: http://paris1900.lartnouveau.com/paris08/la_place_charles_de_gaulle.htm]

Οι κυκλικοί κόμβοι αναφέρονται ως **traffic circles**, που κατασκευάστηκαν μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '60, απέτυχαν να εκπληρώσουν τους προσδοκώμενους σκοπούς, εξαιτίας του λανθασμένου σχεδιασμού τόσο γεωμετρικά όσο και λειτουργικά. Προτεραιότητα κατείχαν τα εισερχόμενα οχήματα με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλές ταχύτητες, ενώ η ύπαρξη πολλών λωρίδων οδηγούσε πολλές φορές σε απαγορευμένους ελιγμούς και προσπεράσεις. Απόρροια των παραπάνω ήταν οι υψηλοί δείκτες ατυχημάτων και κυκλοφοριακής συμφόρησης, ιδίως σε περιόδους αιχμής. Το γεγονός αυτός, βέβαια, συνέβαλε και η απρόβλεπτη αυξητική τάση χρήσης των Ι.Χ. αυτοκινήτων.

Η ιδέα για τον σχεδιασμό σύγχρονων κυκλικών κόμβων εισήχθη για πρώτη φορά το 1963 όταν η Βρετανική κυβέρνηση υιοθέτησε την απόδοση προτεραιότητας στα οχήματα που κινούνται εντός του κυκλικού κόμβου, με σκοπό να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προβλήματα. Ταυτόχρονα, προτάθηκε η κατασκευή μικρότερων κυκλικών κόμβων, ώστε να επιτευχθούν χαμηλότερες ταχύτητες κυκλοφορίας τόσο κατά την είσοδο, όσο και επί του κυκλικού κόμβου.

Στην Ολλανδία ο αριθμός των κυκλικών κόμβων αυξήθηκε το διάστημα 1981-1990, καθώς μειώθηκαν οι ταχύτητες, η σοβαρότητα των ατυχημάτων και το κόστος συντήρησής τους. Στη Νορβηγία το 1985 τοποθετήθηκαν πινακίδες παραχώρησης προτεραιότητας στις εισόδους όλων των κυκλικών κόμβων, βελτιώνοντας τη ροή της κυκλοφορίας και μειώνοντας τα ατυχήματα. Στη ίδια χώρα, το πλήθος των κόμβων έφτασε μόλις τους 15 κατά το έτος 1980, ενώ αυξήθηκε δραματικά σε 350 το 1990 και σε 500 το 1992.

Στην Αμερική, ο πρώτος σύγχρονος κυκλικός κόμβος κατασκευάστηκε την άνοιξη του 1990 στο Summerlin, μια κοινότητα στη δυτική πλευρά του Las Vegas. Αντίστοιχα, στην Καλιφόρνια, ο πρώτος σύγχρονος κυκλικός κόμβος κατασκευάστηκε τον Οκτώβριο του 1992 στην πόλη Santa Barbara. Ο συγκεκριμένος κόμβος αντικατέστησε μια διασταύρωση πέντε κλάδων προσέγγισης, με 2 λωρίδες κυκλοφορίας ο καθένας, όπου η κυκλοφορία ρυθμιζόταν με την πινακίδα σήμανσης STOP, μειώνοντας αισθητά τον αριθμό των ατυχημάτων. Στο Maryland, ο πρώτος κυκλικός κόμβος κατασκευάστηκε τον Απρίλιο του 1993 στην πόλη της Λισαβόνας. Ο κόμβος αυτός αντικατέστησε διασταύρωση τεσσάρων κλάδων που λειτουργούσε με φωτεινή σηματοδότηση και, σε αυτή την περίπτωση, οδήγησε σε σημαντική μείωση των ατυχημάτων.

Οι αλλαγές στο σχεδιασμό των κυκλικών κόμβων επέφεραν μεγαλύτερη ασφάλεια κατά τη λειτουργία τους, γεγονός που αποδεικνύει και τη μείωση του αριθμού και της σοβαρότητας των ατυχημάτων. Επομένως, οι σύγχρονοι κυκλικοί κόμβοι είναι σαφώς βελτιωμένοι συγκριτικά με τους παλαιότερους, τόσο όσον αφορά στη λειτουργία τους όσο και στην οδική ασφάλεια που παρέχουν στους χρήστες τους (Federal Highway Administration, 2000, Najafi and Jivacate, 2002, Νίκου, 2012).

Στην Ελλάδα έχουν κατασκευαστεί στο παρελθόν πλήθος κυκλικών κόμβων γειτονιάς με όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά που τους καθιστούν αναποτελεσματικούς ως προς τη λειτουργία του και την ασφάλεια. Συνήθως, τηρείται η προτεραιότητα της δεξιάς κίνησης, δηλαδή τα οχήματα που κυκλοφορούν στον κυκλικό δακτύλιο υποχρεούνται να διακόπτουν την πορεία τους και να σταματούν όποτε κάποιο όχημα προσεγγίζει τη γραμμή εισόδου και επιθυμεί να εισέλθει στον κυκλικό δακτύλιο, ώστε να του παραχωρήσει την προτεραιότητα. Για τους πεζούς δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη πρόβλεψη και είναι αναγκασμένοι να αναμένουν μέχρι να δημιουργηθεί επαρκές χρονικό κενό στην κυκλοφορία της οδού που επιθυμούν να διαβούν και τότε να το πράξουν. Οι διαβάσεις των πεζών βρίσκονται στην είσοδο του κυκλικού δακτυλίου και όχι σε κάποια απόσταση ασφαλείας από αυτούς. Τέλος, έχει παρατηρηθεί πολλές φορές η στάθμευση οχημάτων εντός του κυκλικού κόμβου, γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα ατυχημάτων λόγω της μειωμένης ορατότητας που προκαλούν.

2.2.2 Γενικά Στοιχεία

Οι κυκλικοί κόμβοι αποτελούν μια ειδική κατηγορία κόμβων στην οποία τα οχήματα κινούνται με φορά αντίθετη αυτής των ωρολογιακών δεικτών γύρω από μια κεντρική, συνήθως κυκλική, νησίδα. Στους κυκλικούς κόμβους όλες οι διασταυρώσεις κυκλοφοριακών ρευμάτων μετατρέπονται σε διαδοχικούς ελιγμούς συμβολής και μερισμού, οπότε αποφεύγεται η διασταύρωση, αλλά δημιουργείται περιοχή πολλαπλής πλέξης (Φραντζεσκάκης και Γιαννόπουλος, 1986).

Οι τυπικοί κόμβοι διακρίνονται σε ισόπεδους και ανισόπεδους. Οι ισόπεδοι κυκλικοί κόμβοι μπορεί να διαμορφώνονται ως διασταυρώσεις ή συμβολές (σε μορφή -T-), ενώ περιλαμβάνουν και τις διακλαδώσεις. Οι κυκλικές διασταυρώσεις αποτελούν ισόπεδους κόμβους κυκλικής κίνησης και περιλαμβάνουν τουλάχιστον τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες:

- Κυκλικοί κόμβοι (Roundabouts)
- Περιστροφικές κυκλοφοριακές διαμορφώσεις (Rotaries)
- Σηματοδοτούμενοι κυκλικοί κόμβοι (Signalized traffic circles)
- Κυκλικοί κόμβοι γειτονιάς (Neighborhood traffic circles)

Είναι σημαντικός κανόνας των κυκλικών κόμβων το γεγονός ότι η κυκλοφοριακή ροή των οχημάτων εντός κόμβου έχει προτεραιότητα έναντι της ροής εισόδου. Διαφορετικά, αν τα εισερχόμενα οχήματα στον κόμβο είχαν προτεραιότητα, τότε θα υπήρχε κίνδυνος μπλοκαρίσματος εντός του κυκλικού κόμβου. Υπάρχει και η περίπτωση ελέγχου του κυκλικού κόμβου με φωτεινή σηματοδότηση. Τον παραπάνω κανόνα δεν ακολουθεί η Ελλάδα, καθώς

στους ελληνικούς κυκλικούς κόμβους προτεραιότητα έχουν τα οχήματα που εισέρχονται στον κόμβο, εντός αν υπάρχει σήμανση STOP για παραχώρηση προτεραιότητας στα οχήματα εντός του κυκλικού κόμβου.

Ανάλογα με το μέγεθος, τον αριθμό των λωρίδων πρόσβασης αλλά και τη διαρρύθμιση της κυκλοφορίας σε αυτούς, οι κυκλικοί κόμβοι διακρίνονται σε πέντε βασικές κατηγορίες:

1. Μικροί κυκλικοί κόμβοι (Mini-roundabouts)
2. Κυκλικοί κόμβοι 1 λωρίδας (Single-lane roundabouts)
3. Κυκλικοί κόμβοι πολλαπλών λωρίδων (Multilane roundabouts)
4. Σπειροειδείς κυκλικοί κόμβοι (Turbo roundabouts)
5. Κυκλικοί κόμβοι Dutch (Dutch roundabouts)

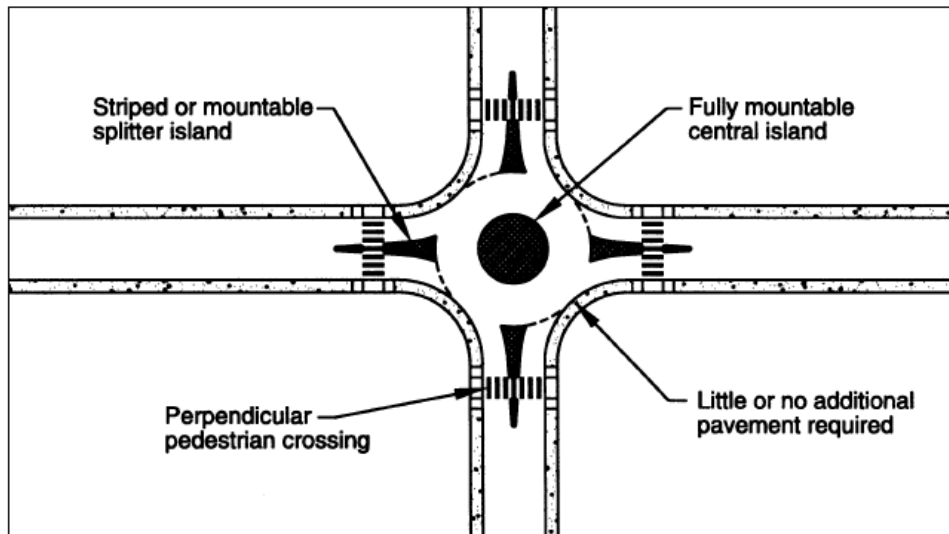
Λαμβάνοντας υπόψη και το εξωτερικό περιβάλλον του κυκλικού κόμβου, δηλαδή εάν πρόκειται για κατασκευή κόμβου σε αστική, υπεραστική ή περιαστική περιοχή, γίνεται μια περαιτέρω κατηγοριοποίηση στις εξής υποκατηγορίες:

- Αστικοί συνεπτυγμένοι κυκλικοί κόμβοι (Urban compact roundabouts)
- Αστικοί κόμβοι 1 λωρίδας (Urban single-lane roundabouts)
- Αστικοί κόμβοι 2+ λωρίδων (Urban double-lane roundabouts)
- Υπεραστικοί κόμβοι 1 λωρίδας (Rural single-lane roundabouts)
- Υπεραστικοί κόμβοι 2+ λωρίδων (Rural double-lane roundabouts)

Μικροί Κυκλικοί Κόμβοι (Mini Roundabouts)

Οι μικροί κυκλικοί κόμβοι είναι κυκλικοί κόμβοι που χρησιμοποιούνται σε αστικό περιβάλλον με χαμηλές ταχύτητες (μέση λειτουργική ταχύτητα μικρότερη των 60 χλμ/ώρα) και κατασκευάζονται σε περιπτώσεις όπου ο συμβατικός σχεδιασμός κυκλικών κόμβων εμποδίζεται λόγω διάφορων περιορισμών. Οι κόμβοι αυτού του είδους παρουσιάζουν σχετικά μικρό κόστος κατασκευής, καθώς απαιτούν μικρή πρόσθετη πεζοδρόμηση στις οδούς που διασταυρώνονται (π.χ. μικρή διαπλάτυνση στα γωνιακά κράσπεδα). Ακριβώς επειδή είναι μικροί, οι κόμβοι αυτοί θεωρούνται ιδιαίτερα φιλικό προς τους πεζούς, με σύντομες αποστάσεις διαβάσεων και πολύ χαμηλές ταχύτητες κυκλοφορίας των οχημάτων τόσο στις εισόδους όσο και στις εξόδους τους. Οι μικροί κόμβοι είναι σχεδιασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπουν στα επιβατικά αυτοκίνητα να κινούνται μέσα σε αυτούς, χωρίς να χρειάζεται να περάσουν πάνω από την κεντρική νησίδα. Παρόλα αυτά, η κεντρική νησίδα είναι υπερβατή, έτσι ώστε να διευκολύνονται τα μεγαλύτερα οχήματα και τα βαρέα οχήματα, τα οποία μπορούν να κινηθούν πάνω σε αυτή, ακολουθώντας πάντα κυκλική πορεία. Η κυκλοφοριακή ικανότητα σε αυτή την κατηγορία αναμένεται να είναι παρόμοια με αυτή των αστικών συνεπτυγμένων

κόμβων (urban compact roundabouts). Ο σχεδιασμός μικρών κυκλικών κόμβων στηρίζεται στις γερμανικές προδιαγραφές, περιλαμβάνοντας στοιχεία από αυτές του Ηνωμένου Βασιλείου.



Εικόνα 2.4: Τυπικός σχεδιασμός μικρού κυκλικού κόμβου
[Πηγή: <https://engineer-educators.com/topic/mini-roundabouts/>]

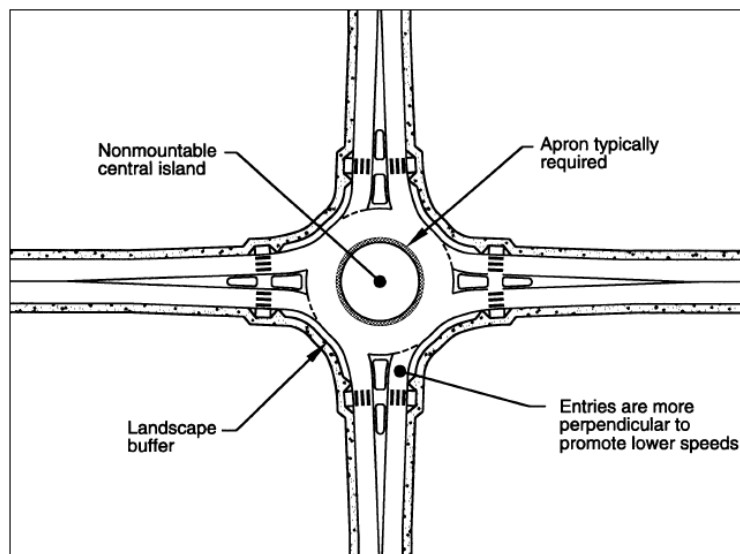


Εικόνα 2.5: Μικρός κυκλικός κόμβος στο Μίσιγκαν

Αστικοί Συνεπτυγμένοι Κυκλικοί Κόμβοι (Urban Compact Roundabouts)

Όπως οι μικροί κυκλικοί κόμβοι, έτσι και οι αστικοί συνεπτυγμένοι κυκλικοί κόμβοι στοχεύουν στο να είναι φιλικό προς τους πεζούς και τους ποδηλάτες, καθώς απαιτούν πολύ μικρές ταχύτητες κυκλοφορίας, ώστε να πραγματοποιηθεί σωστά η δεξιά στροφή μέσα και έξω από

το κυκλικό κατάστρωμα. Όλοι οι κλάδοι πρόσβασης διαθέτουν εισόδους μιας λωρίδας κυκλοφορίας. Ο πρωταρχικός σκοπός ενός τέτοιου σχεδιασμού είναι να δοθεί η δυνατότητα στους πεζούς να διασχίσουν τη διασταύρωση αποτελεσματικά και με ασφάλεια. Ο γεωμετρικός σχεδιασμός σε αυτή την κατηγορία προβλέπει, επίσης, υπερυψωμένες διαχωριστικές νησίδες που διαθέτουν χώρο αναμονής για τους πεζούς, καθώς και μη υπερβατή κεντρική νησίδα. Συνήθως, υπάρχει μια υπερβατή ζώνη περιμετρικά της κεντρικής νησίδας, ώστε να διευκολύνονται τα βαρέα οχήματα. Ο σχεδιασμός των αστικών συνεπτυγμένων κυκλικών κόμβων είναι παρόμοιος με αυτόν της Γερμανίας και των άλλων βορείων Ευρωπαϊκών χωρών.



Εικόνα 2.6: Τυπικός σχεδιασμός αστικού κυκλικού κόμβου

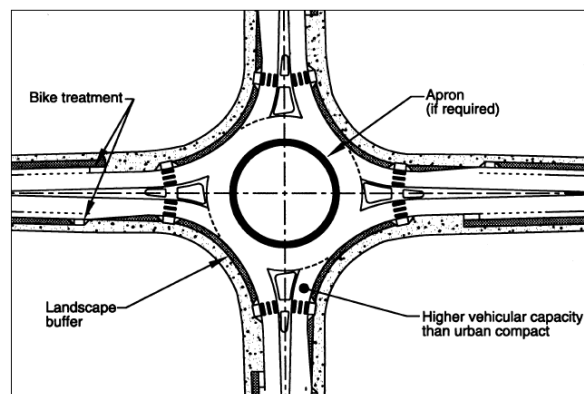
[Πηγή: <https://engineer-educators.com/topic/urban-compact-roundabouts/>]



Εικόνα 2.7: Αστικός κυκλικός κόμβος στην Μονπελιέ Γαλλίας

Αστικοί Κυκλικόι Κόμβοι 1 Λωρίδας (Urban Single-Lane Roundabouts)

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι κυκλικόι κόμβοι που έχουν μια λωρίδα εισόδου ανά κλάδο πρόσβασης και μια λωρίδα επί του κυκλικού καταστρώματος. Αυτό που τους διακρίνει από τους αστικούς συνεπτυγμένους κυκλικούς κόμβους είναι η μεγαλύτερη διάμετρος εγγεγραμμένου κύκλου, καθώς και οι περισσότερο επαπτομενικές εισοδοι και έξοδοι, επιτυγχάνοντας έτσι μεγαλύτερη κυκλοφοριακή ικανότητα. Ο σχεδιασμός των αστικών κυκλικών κόμβων 1 λωρίδας επιτρέπει ελαφρώς υψηλότερες ταχύτητες κατά την είσοδο και έξοδο, όπως επίσης και κατά μήκος του κυκλικού καταστρώματος. Παρόλα αυτά, οι επίσημοι κανονισμοί ορίζουν χαμηλότερες ταχύτητες για τις Ηνωμένες Πολιτείες συγκριτικά με άλλες χώρες, με απώτερο σκοπό την ασφάλεια πεζών και ποδηλατιστών. Ο γεωμετρικός σχεδιασμός αυτού του είδους κυκλικών κόμβων επικεντρώνεται στο να επιτύχει σταθερές ταχύτητες εισόδου και κινήσεις επί του κυκλικού καταστρώματος και περιλαμβάνει υπερυψωμένες διαχωριστικές νησίδες, μη υπερβατή κεντρική νησίδα και υπερβατή περιμετρική ζώνη, όπου απαιτείται. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός είναι παρόμοιος με αυτόν που ακολουθείται στην Αυστραλία, τη Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο.



Εικόνα 2.8: Τυπικός σχεδιασμός αστικού κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας

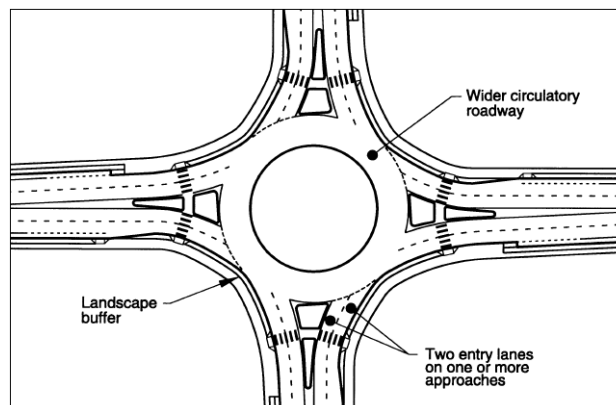
[Πηγή: <https://engineer-educators.com/topic/urban-single-lane-roundabouts/>]



Εικόνα 2.9: Αστικός κυκλικός κόμβος μιας λωρίδας στο Οντάριο του Καναδά

Αστικοί Κυκλικόι Κόμβοι 2+ Λωρίδων (Urban Double-Lane Roundabouts)

Αστικοί κυκλικόι κόμβοι δύο ή/και περισσοτέρων λωρίδων θεωρούνται όλοι οι κυκλικόι κόμβοι σε αστικό περιβάλλον που έχουν τουλάχιστον έναν κλάδο εισόδου με δύο ή/και παραπάνω λωρίδες κυκλοφορίας. Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται διευρυμένο κυκλικό κατάστρωμα, ώστε να κινούνται περισσότερα από ένα οχήματα το ένα δίπλα στο άλλο. Οι ταχύτητες κατά την είσοδο και έξοδο, καθώς και επί του κυκλικού καταστρώματος, είναι παρόμοιες με αυτές των κυκλικών κόμβων μιας λωρίδας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως οι ταχύτητες των οχημάτων πρέπει να είναι σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια παραμονής τους μέσα στον κόμβο. Ο γεωμετρικός σχεδιασμός των κόμβων αυτής της κατηγορίας απαιτεί υπερυψωμένες διαχωριστικές νησίδες, μη υπερβατή κεντρική νησίδα και, σε ορισμένες περιπτώσεις, υπερβατή περιμετρική ζώνη. Ο σχεδιασμός αυτός χρησιμοποιείται στο Ηνωμένο Βασίλειο, με ορισμένες επιρροές από την Αυστραλία και τη Γαλλία, ενώ σε περιοχές με υψηλό βαθμό χρήσης των κόμβων αυτών είναι πιθανό να απαιτούνται ιδιαίτερες διαμορφώσεις και αλλαγές.



Εικόνα 2.10: Τυπικός σχεδιασμός αστικού κυκλικού κόμβου με δύο ή/και περισσότερες λωρίδες κυκλοφορίας

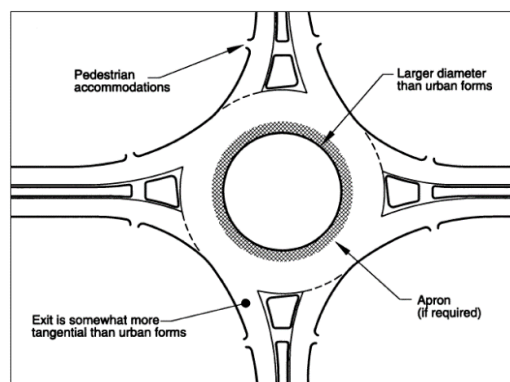
[Πηγή: <https://engineer-educators.com/topic/urban-double-lane-roundabouts/>]



Εικόνα 2.11: Αστικός κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων στο Ίνταρ-'Ομπερσταϊν της Γερμανίας

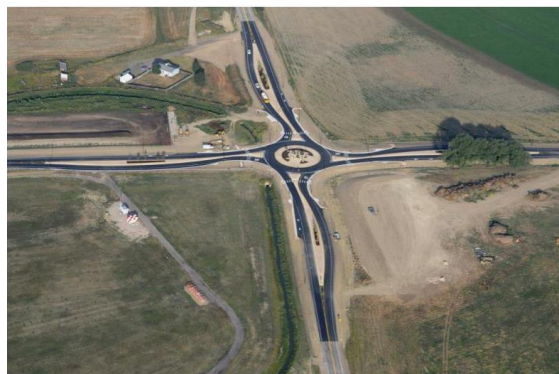
Υπεραστικοί Κυκλικοί Κόμβοι 1 Λωρίδας (Rural Single-Lane Roundabouts)

Υπεραστικοί κυκλικοί κόμβοι μιας λωρίδας κυκλοφορίας θεωρούνται αυτοί που η μέση ταχύτητα πρόσβασής τους δεν ξεπερνά τα 80 με 100 χλμ/ώρα. Πρόκειται για κόμβους με υψηλές ταχύτητες και οι οδηγοί προκειμένου να επιβραδύνουν και να αποκτήσουν μια κατάλληλη ταχύτητα προτού εισέλθουν στον κόμβο, απαιτούνται συμπληρωματικές γεωμετρικές και κυκλοφοριακές ρυθμίσεις στους κλάδους πρόσβασης. Οι υπεραστικοί κυκλικοί κόμβοι μπορεί να έχουν μεγαλύτερη διάμετρο σε σχέση με τους αστικούς, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο ελαφρώς υψηλότερες ταχύτητες στις εισόδους, στις εξόδους και σε όλο το μήκος του κυκλικού καταστρώματος. Οι μεγαλύτερες διάμετροι δικαιολογούν την απουσία υπερβατής περιμετρικής ζώνης, εφόσον αυτή δεν απαιτείται, ενώ συμπληρωματικά στοιχεία σχεδιασμού αποτελούν οι εκτεταμένες και υπερυψωμένες διαχωριστικές νησίδες και η μη υπερβατή κεντρική νησίδα. Αυτό προϋποθέτει πως ο αριθμός των πεζών που θα χρησιμοποιούν τη διασταύρωση θα είναι χαμηλός. Ο σχεδιασμός των συγκεκριμένων κυκλικών κόμβων στηρίζεται κυρίως σε αυτόν που χρησιμοποιείται στην Αυστραλία, τη Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο.



Εικόνα 2.12: Τυπικός σχεδιασμός υπεραστικού κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας κυκλοφορίας

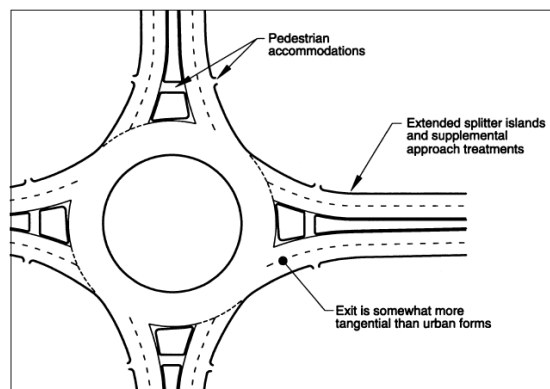
[Πηγή: <https://engineer-educators.com/topic/rural-single-lane-roundabouts/>]



Εικόνα 2.13: Υπεραστικός κυκλικός κόμβος μιας λωρίδας στο Κολοράντο των ΗΠΑ

Υπεραστικοί Κυκλικόι Κόμβοι 2+ Λωρίδων (Rural Double-Lane Roundabouts)

Οι υπεραστικοί κυκλικόι κόμβοι δύο ή/και περισσοτέρων λωρίδων εμφανίζουν παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά των υπεραστικών μιας λωρίδας ως προς την ταχύτητα, ενώ διαφέρουν στο ότι έχουν παραπάνω λωρίδες κυκλοφορίας εισόδου σε έναν τουλάχιστον κλάδο πρόσβασης. Συνεπώς, πολλά χαρακτηριστικά και στοιχεία σχεδιασμού τους είναι κοινά με τα αντίστοιχα των αστικών κυκλικών κόμβων δύο λωρίδων. Οι κύριες σχεδιαστικές διαφορές εντοπίζονται στις υψηλότερες ταχύτητες εισόδου, στις μεγαλύτερες διαμέτρους και σε συμπληρωματικές διαμορφώσεις των κλάδων πρόσβασης. Ο σχεδιασμός των συγκεκριμένων κυκλικών κόμβων βασίζεται σε αυτόν του Ηνωμένου Βασιλείου, της Αυστραλίας και της Γαλλίας. Σε περίπτωση όπου αναμένεται αστική ανάπτυξη στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τον κόμβο, ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στην παραπάνω κατηγορία (Federal Highway Administration, 2000, National Cooperative Highway Research Program, 2010, ΥΠΥΜΕΔΙ - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας, 2011).



Εικόνα 2.14: Τυπικός σχεδιασμός υπεραστικού κυκλικού κόμβου δύο ή/και περισσότερες λωρίδες κυκλοφορίας

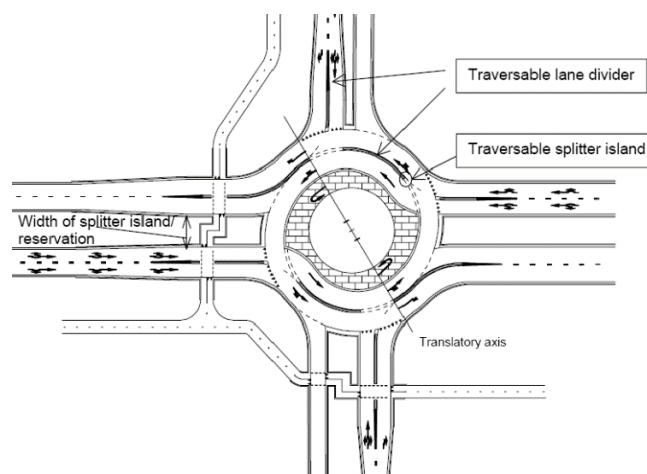
[Πηγή: <https://engineer-educators.com/topic/rural-double-lane-roundabouts/>]



Εικόνα 2.15: Υπεραστικός κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων Καλαμάτα-Σπάρτης

Σπειροειδείς Κυκλικό Κόμβοι (Turbo Roundabouts)

Ως κυκλικό κόμβοι turbo ονομάζονται οι διευθετημένες οβάλ διασταυρώσεις με μια μη διασχίσιμη ή μερικώς διασχίσιμη κεντρική νησίδα και με σπιράλ κυκλοφοριακό δακτύλιο έχοντας τρία ή περισσότερα τμήματα με πολλαπλά κέντρα εξωτερικής και εσωτερικής διαμέτρου. Η ιδέα του κυκλικού κόμβου turbo αναπτύχθηκε το 1996 στην Ολλανδία από τον Bertus Fortuijn, έναν ερευνητή από το πανεπιστήμιο του Delft, που στόχευε να λύσει τα προβλήματα των συμβατών κυκλικών κόμβων. Ο πρώτος κυκλικός κόμβος turbo κατασκευάστηκε το 2000 στην Ολλανδία, ενώ μέχρι το έτος 2007 ήταν ήδη σε λειτουργία 70. Άλλες χώρες όπως η Πολωνία, η Γερμανία, η Τσεχία, η Ουγγαρία, το Βέλγιο αλλά και χώρες της πρώην Γιουγκοσλαβίας έχουν εφαρμόσει τον συγκεκριμένο τύπο κυκλικού κόμβου. Συνολικά υπάρχουν 468 κυκλικό κόμβοι turbo παγκοσμίως, από τους οποίους οι 344 βρίσκονται στην Ολλανδία. Οι σπειροειδείς κυκλικό κόμβοι έχουν συγκεκριμένη γεωμετρία η οποία επιτρέπει το διαχωρισμό των ρευμάτων κυκλοφορίας, αποσκοπώντας στην αποφυγή των εμπλοκών λόγω εναλλαγής λωρίδας εντός του κυκλικού καταστρώματος. Αυτές οι διαμορφώσεις διαχωρισμού των λωρίδων αναγκάζουν την κινούμενη επί του κόμβου κυκλοφορία να ακολουθήσει σπειροειδείς τροχιές και έτσι οι εισερχόμενοι οδηγοί οφείλουν να επιλέξουν την κατάλληλη λωρίδα στην οποία θα κινηθούν, προτού εισέλθουν στον κόμβο. Ένα ακόμη βασικό χαρακτηριστικό των κόμβων αυτών είναι ότι, ο αριθμός των λωρίδων κυκλοφορίας μπορεί να διαφέρει στους κλάδους εισόδου και εξόδου, καθώς και επί του κυκλικού καταστρώματος, όπου προσαρμόζονται κατά περίπτωση. Επιπλέον, σύμφωνα με μια Ολλανδική μελέτη, οι σπειροειδείς κυκλικό κόμβοι μπορούν να διαχειριστούν χωρητικότητα από 2800 οχήματα/ώρα έως 5500 οχήματα/ώρα. Οι κόμβοι αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται συνήθως σε διασταυρώσεις κύριων οδών με δευτερεύουσες αρτηρίες (Giuffrè, Guerrieri and Granà, 2009, ΥΠΥΜΕΔΙ - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας, 2011).



Εικόνα 2.16: Τυπικός σχεδιασμός σπειροειδή κυκλικό κόμβου (Fortuijn, 2003)



Εικόνα 2.17: Παράδειγμα σπειροειδή κυκλικού κόμβου στις ΗΠΑ

Κυκλικοί Κόμβοι Dutch (Dutch Roundabouts)

Οι κυκλικοί κόμβοι dutch είναι σχετικά νέοι σχεδιασμοί στον χώρο των υποδομών, οι οποίοι δίνουν προτεραιότητα στους ποδηλάτες και τους πεζούς. Ο πρώτος κυκλικός κόμβος dutch σχεδιάστηκε το 1992 στο Ένσχεντε της Ολλανδίας. Αναλυτικότερα, οι ποδηλάτες έχουν έναν εσωτερικό δακτύλιο στον κυκλικό κόμβο dutch και υπάρχουν ποδηλατικές διαβάσεις σε καθέναν από τους τέσσερις κλάδους προσέγγισης με κόκκινο χρώμα. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 2.18, εντοπίζονται οι διαβάσεις πεζών που είναι έντονα σχεδιασμένες κάθετα στους άξονες. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα μειωμένα πλάτη στον κυκλικό κόμβο και στα σημεία εισόδου/εξόδου αποτρέπουν τους οδηγούς να επιταχύνουν και, κατά συνέπεια, εξασφαλίζουν την άμεση ασφάλεια τόσο στους ποδηλάτες όσο και στους πεζούς.

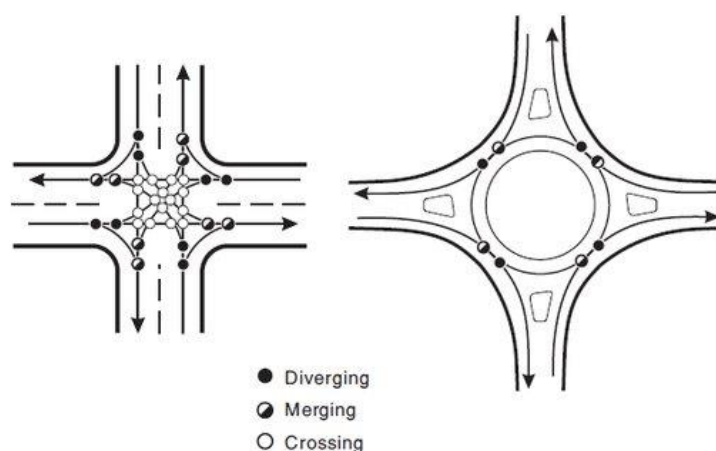


Εικόνα 2.18: Ο πρώτος κυκλικός κόμβος dutch που κατασκευάστηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο

2.2.3 Σημεία Εμπλοκής

Οι κυκλικοί κόμβοι πλεονεκτούν από τους συμβατικούς ισόπεδους κόμβους σχετικά με τον περιορισμό των πιθανών σημείων συγκρούσεων μεταξύ των οχημάτων, καθώς για τον ίδιο αριθμό κλάδων προσέγγισης εμφανίζουν συνολικά πολύ λιγότερα σημεία εμπλοκής. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, ποσοστό μεγαλύτερο από το 50% των ατυχημάτων παρατηρείται σε ισόπεδους κόμβους.

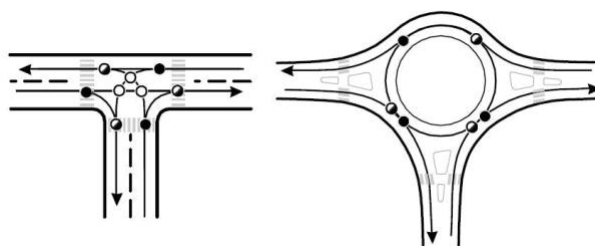
Πιο συγκεκριμένα, σε έναν τυπικό ισόπεδο κόμβο τεσσάρων κλάδων συναντώνται 32 σημεία εμπλοκής, ενώ σε έναν κυκλικό κόμβο με τον ίδιο αριθμό κλάδων τα σημεία εμπλοκής φτάνουν μόλις τα 8. Αυτό που επιτυγχάνεται μέσω της γεωμετρίας των κυκλικών κόμβων είναι η εξάλειψη των επικίνδυνων περιπτώσεων εμπλοκής λόγω διασταύρωσης, οι οποίες αυξάνουν την πιθανότητα πλαγιομετωπικών συγκρούσεων. Με τον τρόπο αυτό, απομένουν μόνο οι 4 περιπτώσεις εμπλοκής λόγω συμβολής στις εισόδους του κόμβου και οι 4 περιπτώσεις εμπλοκής λόγω μερισμού στις αντίστοιχες εξόδους. Ομοίως, σε έναν κυκλικό κόμβο τριών κλάδων προσέγγισης, τα σημεία εμπλοκής που σχετίζονται με τις πλαγιομετωπικές συγκρούσεις υπολογίζονται σε 6, από 9 που εμφανίζονται στην περίπτωση ενός συμβατικού ισόπεδου κόμβου.



Εικόνα 2.19: Σημεία εμπλοκής οχημάτων σε τυπικό τετρασκελή και σε αντίστοιχο κυκλικό κόμβο [Πηγή: ΥΠΥΜΕΔΙ - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας, 2011]

Πίνακας 2.1: Αριθμός και τύπος σημείων εμπλοκής οχημάτων σε ισόπεδο κόμβο
 [Πηγή: ΥΠΥΜΕΔΙ - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Διεύθυνση Μελετών Έργων
 Οδοποιίας, 2011]

Τύπος Εμπλοκής	Μορφή Κόμβου / Αριθμός σημείων σύγκρουσης	
	Διασταύρωση	Κυκλικός Κόμβος
● Μερισμός	8	4
◐ Συμβολή	8	4
○ Διασταύρωση	16	0
Σύνολο	32	8



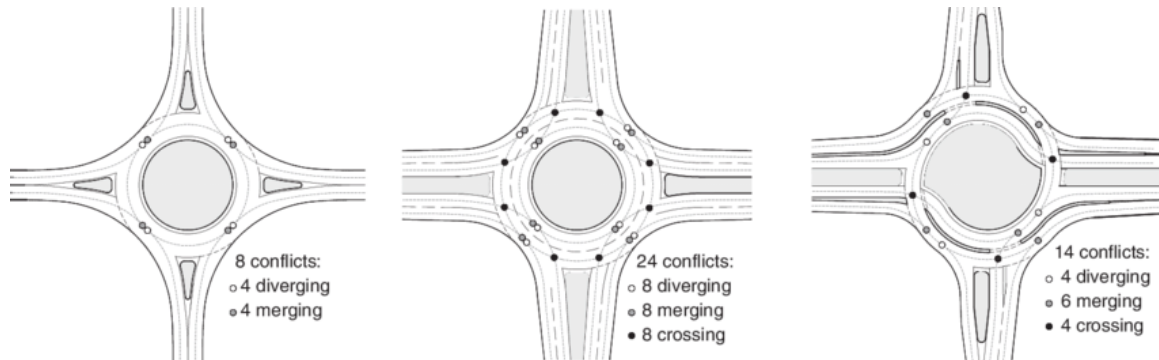
Εικόνα 2.20: Σημεία εμπλοκής οχημάτων σε τυπικό κόμβο διασταύρωσης και σε αντίστοιχο κυκλικό κόμβο [Πηγή: ΥΠΥΜΕΔΙ - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας, 2011]

Πίνακας 2.2: Αριθμός και τύπος σημείων εμπλοκής οχημάτων σε ισόπεδο κόμβο διασταύρωσης και κυκλικό κόμβο αντίστοιχα (3 κλάδοι προσέγγισης)
 [Πηγή: ΥΠΥΜΕΔΙ - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας, 2011]

Τύπος Εμπλοκής	Μορφή Κόμβου / Αριθμός σημείων σύγκρουσης	
	Κόμβος τύπου «Τ»	Κυκλικός Κόμβος
● Μερισμός	3	3
◐ Συμβολή	3	3
○ Διασταύρωση	3	0
Σύνολο	9	6

Όσον αφορά τους σπειροειδείς κυκλικούς κόμβους σε σύγκριση με κυκλικούς κόμβους δύο λωρίδων κυκλοφορίας, παρατηρείται ότι οι turbo έχουν λιγότερα σημεία εμπλοκής. Συγκεκριμένα, ένας κυκλικός κόμβος με δύο λωρίδες κυκλοφορίας έχει 24 σημεία εμπλοκής, δηλαδή 8 περιπτώσεις εμπλοκής λόγω συμβολής στις εισόδους του κόμβου, 8 περιπτώσεις εμπλοκής λόγω μερισμού στις εξόδους του κόμβου και 8 περιπτώσεις εμπλοκής λόγω

διασταύρωσης. Αντίστοιχα, ένας σπειροειδής κυκλικός κόμβος εμφανίζει 14 σημεία εμπλοκής, δηλαδή 6 περιπτώσεις εμπλοκής λόγω συμβολής στις εισόδους του κόμβου, 4 περιπτώσεις εμπλοκής λόγω μερισμού στις εξόδους του κόμβου και 4 περιπτώσεις εμπλοκής λόγω διασταύρωσης.



Εικόνα 2.21: Σημεία εμπλοκής οχημάτων σε τυπικό κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας, δύο λωρίδων κυκλοφορίας και κυκλικό κόμβο turbo, αντίστοιχα

2.3 Λειτουργία κόμβων κατά Highway Capacity Manual (HCM)

Μεθοδολογίες υπολογισμού του επιπέδου λειτουργίας κόμβων έχουν αναπτύξει διάφορες χώρες, όπως οι ΗΠΑ (Highway Capacity Manual–HCM, 2010), το Ηνωμένο Βασίλειο (Kimber&Coombe, 1980), η Αυστραλία (Akcelik&Chung, 1994), κ.ά. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η μεθοδολογία του HCM (2010).

Η κυκλοφοριακή ικανότητα κάθε πρόσβασης εισόδου του κόμβου είναι ο μέγιστος ρυθμός με τον οποίο τα οχήματα αναμένονται να εισέλθουν στον κόμβο υπό τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κόμβου. Τα μοντέλα ανάλυσης κόμβων χωρίζονται γενικά σε δύο κατηγορίες:

- Στατιστικά (εμπειρικά) μοντέλα που βασίζονται σε μετρήσεις πεδίου.
- Αναλυτικά μοντέλα βασισμένα στη θεωρία της αποδοχής διάκενου.

Τα **εμπειρικά μοντέλα** συσχετίζονται με γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μετρήσεις της λειτουργίας του κόμβου, όπως η κυκλοφοριακή ικανότητα, η μέση καθυστέρηση και το μήκος της σχηματιζόμενης ουράς, από δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πεδίο. Δημιουργούν μια σχέση μεταξύ της κυκλοφοριακής ροής που προσεγγίζει μια είσοδο του κόμβου και της κυκλοφοριακής ροής μετά από αυτή. Η σχέση αυτή είναι γραμμική ή εκθετική. Τα μοντέλα αυτά θεωρούνται γενικά καλύτερα από τα αναλυτικά αλλά ο σχεδιασμός τους απαιτεί μετρήσεις σε

έναν μεγάλο αριθμό κόμβων σε συνθήκες κορεσμού και μπορεί να προσαρμόζονται καλά στις οδικές συνθήκες όλων των χωρών.

Τα *αναλυτικά μοντέλα, ή μοντέλα αποδοχής διάκενου*, μπορούν να αναπτυχθούν χωρίς να υπάρχει κατάσταση συμφόρησης, και στηρίζονται στο ότι ο οδηγός που φτάνει στην είσοδο το κόμβου πρέπει να επιλέξει ένα αποδεκτό από αυτόν κενό στην κυκλοφοριακή ροή ώστε να εισέλθει στον κόμβο. Το κενό αυτό είναι ο διαχωρισμός μεταξύ δύο συνεχόμενων οχημάτων, οπότε το κρίσιμο κενό είναι ο ελάχιστος διαχωρισμός που γίνεται αποδεκτός από τον οδηγό. Εάν το αποδεχόμενο κενό είναι μεγαλύτερο από το ελάχιστο, τότε περισσότερα από ένα οχήματα μπορούν να διασχίσουν τον κόμβο. Ο χρόνος που απαιτείται για το δεύτερο όχημα να εισέλθει στον κόμβο χρησιμοποιώντας το ίδιο διάκενο ονομάζεται χρόνος ακολουθίας.

Κρίσιμο Διάκενο (Critical Gap)

Το κρίσιμο διάκενο t_c (critical gap), σύμφωνα με τον ορισμό HCM, είναι η διάμεσος (median) των χρονικών διακένων μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων στον πρωτεύοντα άξονα που γίνονται αποδεκτά από τους οδηγούς που εκτελούν τον υπό εξέταση ελιγμό. Το κρίσιμο διάκενο εξαρτάται από τον τύπο του ελιγμού, το σύστημα προτεραιότητας (STOP ή προτεραιότητα από δεξιά), τη μέση ταχύτητα στον πρωτεύοντα άξονα, τον αριθμό λωρίδων στον πρωτεύοντα, τη γεωμετρία και τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Το κρίσιμο διάκενο εξαρτάται από:

- Τον τύπο ελιγμού
- Το σύστημα προτεραιότητας, STOP ή προτεραιότητα από δεξιά.
- Τη μέση ταχύτητα στον πρωτεύοντα άξονα.
- Τον αριθμό λωρίδων στον πρωτεύοντα άξονα.
- Τη γεωμετρία του κόμβου.
- Τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Χρόνος Ακολουθίας (Follow – Up Time)

Ο χρόνος ακολουθίας t_f (follow-up time) είναι ο χρόνος ανάμεσα στην αναχώρηση ενός οχήματος από τον δευτερεύοντα άξονα και στην αναχώρηση του επόμενου οχήματος που χρησιμοποιεί το ίδιο διάκενο επί του πρωτεύοντα άξονα, κάτω από συνθήκες ουράς στον δευτερεύοντα άξονα (HCM 2000).

Συνεπώς, τα αναλυτικά μοντέλα υπολογίζουν την κυκλοφοριακή ικανότητα του κόμβου ως συνάρτηση του κρίσιμου διάκενου, του χρόνου ακολουθίας και του φόρτου. Παρόλα αυτά, για την εκτίμηση της κυκλοφοριακής ικανότητας απαιτείται να γίνουν κάποιες παραδοχές, όπως:

- Σταθερές τιμές για το κρίσιμο διάκενο t_c και τον χρόνο ακολουθίας t_f .

- Εκθετική κατανομή για τα διάκενα στην κυκλοφοριακή ροή.
- Σταθερές τιμές φόρτων.

Αυτές οι παραδοχές κάνουν την χρήση αυτών των μοντέλων δύσκολη στην πράξη. Επιπροσθέτως υπάρχουν και ορισμένοι ακόμα περιορισμοί, όπως:

- Η εκτίμηση του κρίσιμου διάκενου δεν είναι εύκολη.
- Οι παράγοντες που σχετίζονται με τη γεωμετρία το κόμβου δεν προσμετρούνται άμεσα.
- Τα ασύμφωνα κενά δεν υπολογίζονται στη θεωρία.

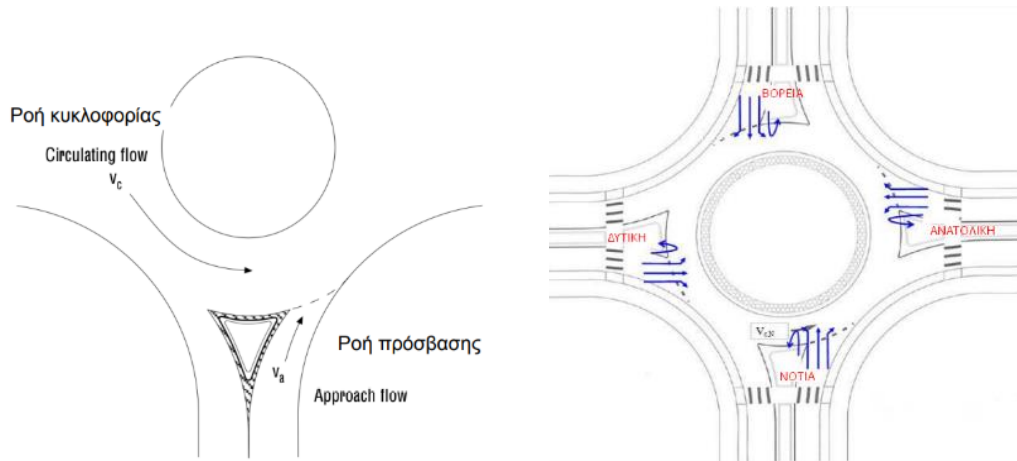
2.3.1 Αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού κυκλοφοριακής ικανότητας για τους κυκλικούς κόμβους – Μέθοδος HCM

Στους κυκλικούς κόμβους υπάρχουν δύο κατηγορίες μοντέλων ανάλυσης. Η πρώτη κατηγορία είναι τα **εμπειρικά μοντέλα (empirical models)**, τα οποία βασίζονται σε δεδομένα πεδίου για την ανάπτυξη σχέσεων μεταξύ των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των δεικτών συμπεριφοράς, όπως κυκλοφοριακή ικανότητα και καθυστερήσεις, ενώ η δεύτερη κατηγορίας είναι τα **αναλυτικά μοντέλα (analytical models)**, τα οποία βασίζονται στη θεωρία αποδοχής του κρίσιμου κυκλοφοριακού κενού. Όσον αφορά την επιλογή του μοντέλου, εξαρτάται από τα εκάστοτε διαθέσιμα δεδομένα. Έχει διαπιστωθεί ότι τα εμπειρικά μοντέλα είναι γενικώς καλύτερα, αλλά απαιτούν τη χρήση ενός μεγάλου αριθμού συμφορημένων κυκλικών κόμβων για επανάληψη, ενώ τα μοντέλα αποδοχής κρίσιμου κυκλοφοριακού κενού μπορούν να αναπτυχθούν και χωρίς τη χρήση συμφορημένων κόμβων.

Ο υπολογισμός της κυκλοφοριακής ικανότητας των κυκλικών κόμβων βασίζεται σε τεχνικές αποδοχής του κρίσιμου κυκλοφοριακού κενού με βασικές παραμέτρους το κρίσιμο κυκλοφοριακό διάκενο και το χρονικό διαχωρισμό ακολουθίας.

Στους κυκλικούς κόμβους ως εξεταζόμενο επίπεδο δεν λαμβάνεται η προτεραιότητα, αλλά η πρόσβαση. Εάν ο κυκλικός κόμβος έχει τέσσερις κλάδους, τότε οι προσβάσεις είναι η Ανατολική, Δυτική, Βόρεια και Νότια. Παρατηρώντας το παρακάτω σχήμα, εάν θέλουμε να υπολογίσουμε τον εμπλεκόμενο φόρτο της Νότιας πρόσβασης, τότε ο τύπος θα ήταν ίσως με:

$$v_{C,Νότια} = v_{DA} + v_{DB} + v_{DD} + v_{AA} + v_{BA} + v_{BB}$$



Εικόνα 2.22: (Αριστερή) Διαχωρισμός κυκλοφοριακής ροής κυκλοφορίας και κυκλοφοριακής ροής πρόσβασης, (Δεξιά) Τετρασκελής κυκλικός κόμβος με τις κινήσεις κυκλοφορίας ανά πρόσβαση [Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Οδοποιίας ΙΙΙ ΣΑΤΜ-ΕΜΠ]

Για τον προσδιορισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί ένας συντελεστής εμπόδισης από την κυκλοφορία των πεζών f_{ped} :

$$f_{ped} = \begin{cases} 1 - 0.000137n_{ped}, v_{c,pce} \leq 881 \text{ and } n_{ped} \leq 101 \\ \frac{1119.5 - 0.175v_{c,pce} - 0.644n_{ped} + 0.00073v_{c,pce}n_{ped}}{1068.6 - 0.654v_{c,pce}}, v_{c,pce} \leq 881 \text{ and } n_{ped} > 101 \\ 1, v_{c,pce} > 881 \end{cases}$$

Επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός της κυκλοφοριακής ικανότητας για μια λωρίδα σε ΜΕΑ/ώρα. Ανάλογα με τις λωρίδες κυκλοφορίας εντός του κόμβου και των προσβάσεων, υπάρχουν οι εξής τύποι:

A. Κυκλικοί κόμβοι μιας λωρίδας κυκλοφορίας:

$$c_{l,pce} = 1130e^{(-1.0 \cdot 10^{-3})v_{c,pce}}$$

B. Κυκλικοί κόμβοι μιας λωρίδας κυκλοφορίας εντός του κόμβου και 2 λωρίδες κυκλοφορίας στις προσβάσεις:

$$c_{l,pce} = 1130e^{(-1.0 \cdot 10^{-3})v_{c,pce}}$$

C. Κυκλικοί κόμβοι δύο λωρίδων κυκλοφορίας εντός του κόμβου και 1 λωρίδα κυκλοφορίας στις προσβάσεις:

$$c_{l,pce} = 1130e^{(-0.7*10^{-3})v_{c,pce}}$$

D. Κυκλικοί κόμβοι δύο λωρίδων κυκλοφορίας εντός του κόμβου και 2 λωρίδες κυκλοφορίας στις προσβάσεις:

$$c_{l,R,pce} = 1130e^{(-0.7*10^{-3})v_{c,pce}} \text{ και } c_{l,L,pce} = 1130e^{(-0.75*10^{-3})v_{c,pce}}$$

Επομένως, η κυκλοφοριακή ικανότητα ισούται με τον παρακάτω τύπο:

$$c_l = c_{l,pce} * f_{HV,l} * f_{ped}$$

Όπου:

c_l = η κυκλοφοριακή ικανότητα για τη λωρίδα I του κλάδου εισόδου (οχ/ώρα).

$c_{l,pce}$ = η κυκλοφοριακή ικανότητα για τη λωρίδα I (ΜΕΑ/ώρα).

$f_{HV,l}$ = ο συντελεστής προσαρμογής για βαρέα οχήματα για την εξεταζόμενη λωρίδα.

$f_{HV,l} = \frac{\sum_i f_{HV,i} * v_{i,pce}}{\sum_i v_{i,pce}}$, όπου $f_{HV,i}$ = ο συντελεστής προσαρμογής για βαρέα οχήματα για την κίνηση i της λωρίδας I και $v_{i,pce}$ = ο κυκλοφοριακός φόρτος για την κίνηση i της λωρίδας I.

f_{ped} = ο συντελεστής προσαρμογής για την παρεμπόδιση από πεζούς.

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της μέσης καθυστέρησης για την κάθε πρόσβαση που εξετάζεται, ώστε να προσδιοριστεί η στάθμη εξυπηρέτησης του κυκλικού κόμβου:

$$d = \frac{3600}{c_{m,x}} + 900T \left[\frac{V_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{V_x}{c_{m,x}} - 1 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}} \right) \left(\frac{V_x}{c_{m,x}} \right)}{450T}} \right] + 5$$

Όπου:

T = η χρονική περίοδος ανάλυσης, έστω T=0.25 για περίοδο 15λεπτά.

V_x = ο κυκλοφοριακός φόρτος σε ΜΕΑ/ώρα.

$c_{m,x}$ = η κυκλοφοριακή ικανότητα σε ΜΕΑ/ώρα.

Τελικό βήμα είναι ο προσδιορισμός της μέσης καθυστέρησης του κόμβου:

$$d_I = \frac{d_{A,1}v_{A,1} + d_{A,2}v_{A,2} + d_{A,3}v_{A,3} + d_{A,4}v_{A,4}}{v_{A,1} + v_{A,2} + v_{A,3} + v_{A,4}}$$

Όπου:

d_I = η μέση καθυστέρηση του κόμβου I.

$d_{A,x}$ = η μέση καθυστέρηση της πρόσβασης x.

$v_{A,x}$ = ο κυκλοφοριακός φόρτος της πρόσβασης x.

Με βάση την τιμή της μέσης καθυστέρησης όλου του κόμβου, δηλαδή τον μέσο χρόνο αναμονής των οχημάτων, προκύπτει η στάθμη εξυπηρέτησης του κόμβου:

Πίνακας 2.3: Προσδιορισμός στάθμης εξυπηρέτησης κυκλικού κόμβου

Στάθμη Εξυπηρέτησης	Μέση Αναμονή ανά όχημα (sec)
A	$d \leq 10$
B	$10 < d \leq 15$
C	$15 < d \leq 25$
D	$25 < d \leq 35$
E	$35 < d \leq 50$
F	$50 < d$

2.4 Κυκλοφοριακή Προσομοίωση

2.4.1 Γενικά Στοιχεία

Η **προσομοίωση (simulation)** είναι η αναπαράσταση μιας διεργασίας με τη βοήθεια ενός μοντέλου. Όσον αφορά στην **κυκλοφορία**, ο όρος αναφέρεται στην μαθηματική μοντελοποίηση των συστημάτων μεταφορών, όπως είναι οι οδικές αρτηρίες, οι κόμβοι αυτοκινητόδρομων, οι κυκλικοί κόμβοι κ.ά., μέσω της εφαρμογής κατάλληλου λογισμικού σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η αναπαράσταση αυτή μπορεί να είναι οικονομικότερη, ταχύτερη, λιγότερο επικίνδυνη ή περισσότερο προσιτή από την πραγματική διεργασία.

Η σημαντικότητα της προσομοίωσης στον τομέα των μεταφορών έγκειται στη δυνατότητα ανάλυσης και διερεύνησης εξαιρετικά περίπλοκων συστημάτων, στα οποία δεν είναι δυνατό να εφαρμοσθούν απλά μαθηματικά μοντέλα. Επιπρόσθετα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πειραματικές μελέτες και να μελετήσει αναλυτικές σχέσεις, στοιχεία των οποίων μπορεί να χάνονται σε αριθμητικές. Απώτερος σκοπός της, είναι η **μέτρηση της αποδοτικότητας ενός οδικού δικτύου**, καθώς και η περιγραφή και η αξιολόγηση του υπό συνήθειες και ασυνήθειες συνθήκες.

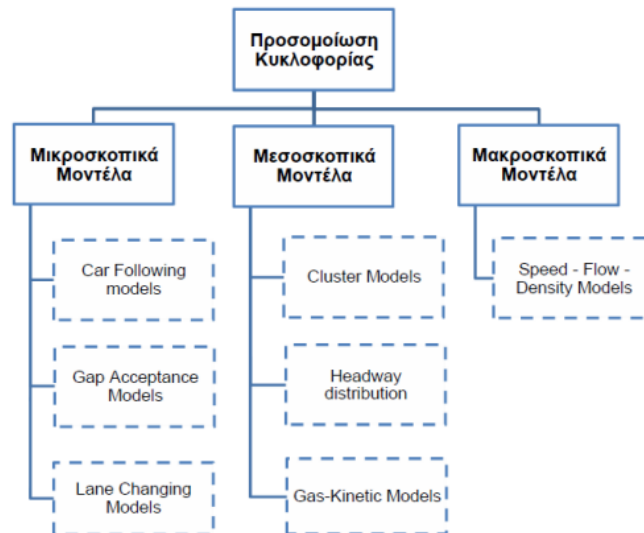
2.4.2 Κατηγορίες Μοντέλων Προσομοίωσης

Τα **μοντέλα προσομοίωσης** αποτελούν πρότυπα αναπαράστασης της συμπεριφοράς της κυκλοφορίας ενός συστήματος μεταφορών στον χωροχρόνο προβλέποντας την απόδοσή του. Περιλαμβάνουν πλήθος μεταβλητών με τις απαραίτητες πληροφορίες για την περιγραφή της χρονικής εξέλιξης του συστήματος. Μπορούν να θεωρηθούν ως πείραμα που γίνεται στο εργαστήριο και όχι στο πεδίο. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο Highway Capacity Manual (2000), οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα διάφορα μοντέλα προσομοίωσης, παρουσιάζονται παρακάτω.

Ανάλογα με το *είδος των μεταβλητών* κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες. Τα **συνεχή (continuous)** και τα **διακριτά (discrete)** μοντέλα. Ένα συνεχές μοντέλο περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο η κατάσταση ενός κυκλοφοριακού συστήματος επιδέχεται αλλαγές στην πάροδο του χρόνου ως απάντηση στα ερεθίσματα που δέχεται. Τα διακριτά μοντέλα, υιοθετούν την παραδοχή ότι οι αλλαγές τις οποίες επιδέχεται η κατάσταση αυτή, συμβαίνουν ασυνεχώς στην πάροδο του χρόνου, σε διακριτές χρονικές στιγμές.

Ανάλογα με τη *θεώρηση των γεγονότων ως βέβαιων να συμβούν ή όχι*, διακρίνονται στα **στοχαστικά (stochastic)** και στα **ντετερμινιστικά (deterministic)** μοντέλα. Στα αιτιοκρατικά μοντέλα οι γνωστές μεταβλητές αρκούν ώστε να γίνει ακριβής πρόβλεψη των τελικών αποτελεσμάτων. Δεν υπόκεινται δηλαδή σε τυχαιότητα καθώς το μοντέλο παράγει το ίδιο αποτέλεσμα σε κάθε επανάληψη. Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί ο τόκος που θα ληφθεί για καταθέσεις δεδομένου ύψους και με γνωστό επιτόκιο. Αντιθέτως, στα στοχαστικά μοντέλα οι γνωστές μεταβλητές δεν αρκούν για την ακριβή πρόβλεψη των τελικών αποτελεσμάτων. Στα μοντέλα αυτά εξετάζεται η πιθανότητα για την πραγματοποίηση των προβλεπόμενων γεγονότων.

Τέλος, τα μοντέλα προσομοίωσης, βάσει του *επιπέδου λεπτομέρειας*, δηλαδή το μέγεθος του βαθμού στον οποίο αναπαριστώνται τα φαινόμενα κυκλοφοριακής ροής, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Τα **μικροσκοπικά (microscopic)**, τα **μεσοσκοπικά (mesoscopic)** και τέλος τα **μακροσκοπικά (macroscopic)** μοντέλα προσομοίωσης. Για τα μοντέλα αυτά γίνεται εκτενής αναφορά στην επόμενη ενότητα του κεφαλαίου.



Εικόνα 2.23: Διάκριση μοντέλων προσομοίωσης βάσει επιπέδου λεπτομέρειας

Μικροσκοπικά Μοντέλα Προσομοίωσης (Micro-Simulation Models)

Τα μοντέλα μικροσκοπικής προσομοίωσης (micro-simulation models) περιγράφουν τις κινήσεις μεμονωμένων οχημάτων ξεχωριστά για το καθένα μέσω ενός διανύσματος με συνιστώσες τη θέση στο χωροχρόνο, την ταχύτητα και την επιτάχυνση. Τα μικροσκοπικά πρότυπα, σύμφωνα με την εξέλιξη των κυκλοφοριακών μεγεθών, μπορεί να είναι συνεχή σε χώρο και χρόνο (**πρότυπα ακολουθούντος οχήματος**), διακριτά σε χρόνο και συνεχή σε χώρο ή διακριτά σε χρόνο και χώρο (**cellular automata**). Μοναδικό χαρακτηριστικό της μικροπροσομοίωσης είναι ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η κίνηση των οχημάτων μπορεί να επηρεαστεί σε κάποιο βαθμό από την κίνηση των προπορευόμενων ή γειτονικών οχημάτων.

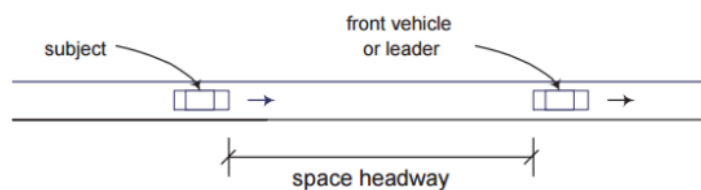
Τα μοντέλα μικροπροσομοίωσης βασίζονται στην **τυχαιότητα**. Η εμφάνιση των οχημάτων στο δίκτυο, η επιλογή λήψης αποφάσεων και η οδηγική συμπεριφορά καθορίζονται κάθε φορά από τυχαίους αριθμούς. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η πολλαπλή εκτέλεσή τους με διαφορετικές γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Συνήθως επιλέγονται για μικρομεσαία δίκτυα, καθώς η δυσκολία των απαιτήσεων για μεγαλύτερα δίκτυα πολλές φορές οδηγεί σε λανθασμένες επιλογές και ως επακόλουθο λανθασμένα αποτελέσματα.

Τα περισσότερα μικροσκοπικά μοντέλα χρησιμοποιούν διάφορους αλγορίθμους και μοντέλα οδηγικής συμπεριφοράς για την προσομοίωση της κίνησης μεμονωμένων οχημάτων στο δίκτυο. Για κάθε όχημα που εισέρχεται στο δίκτυο ανατίθεται ένας τύπος (για παράδειγμα επιβατικό, φορτηγό, λεωφορείο κ.ά.) και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά επιδόσεων που έχει, όπως επιτάχυνση, επιβράδυνση, ταχύτητα, επιτρεπόμενες κινήσεις κ.ά. Αποδίδεται ταυτόχρονα ένα οδηγικό προφίλ, προσδίδοντας σε κάθε όχημα μοναδικότητα και ρεαλιστικότητα. Η κίνησή του στο δίκτυο καθορίζεται από αλγορίθμους που αφορούν στο

ακολουθών όχημα (*car following*), την αποδεκτή απόσταση μεταξύ των οχημάτων (*gap acceptance*) και την αλλαγή λωρίδας (*lane changing*).

❖ Πρότυπο Ακολουθίας Οχημάτων (Car-Following Model)

Το πρότυπο ακολουθίας οχημάτων περιγράφει την οδική συμπεριφορά ενός οχήματος όταν αυτό ακολουθεί ένα άλλο (προπορευόμενο όχημα) σε συνθήκες μη διακοπτόμενης κυκλοφοριακής ροής. Όταν δεν υπάρχει προπορευμένο όχημα, το εξεταζόμενο όχημα είναι ελεύθερο και δύναται να αναπτύξει την επιθυμητή ταχύτητά του, που αν το έκανε με τη παρουσία κάποιου προπορευμένου, θα οδηγούσε σε σύγκρουση. Βασική προϋπόθεση για το πρότυπο αυτό, είναι η συνεχής κυκλοφοριακή ροή σε χώρο και χρόνο.



Εικόνα 2.24: Το όχημα που οδηγεί και το όχημα που ακολουθεί, καθώς και η απόσταση της μεταξύ τους πορείας [Πηγή: Kazi Iftekhhar Ahmed, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 1999]

Η γενική σχέση που περιγράφει το πρότυπο ακολουθίας οχημάτων είναι η παρακάτω:

$$[\text{Επιτάχυνση}] = [\text{Ευαισθησία}] * [\text{Ερέθισμα}]$$

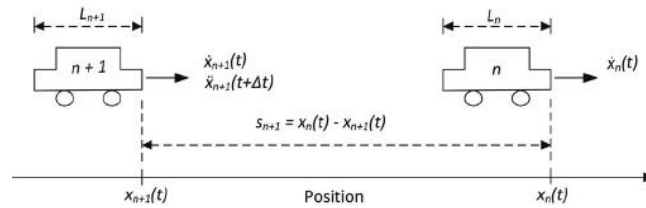
Το ερέθισμα είναι μια συνάρτηση της θέσης των οχημάτων x_i και των ταχυτήτων τους. Έχει αποδειχτεί ότι υπάρχει σχέση μεταξύ της αντίδρασης του οδηγού και της σχετικής ταχύτητας μεταξύ του οχήματός του και του προπορευόμενου. Κάθε οδηγός ανταποκρίνεται στις κυκλοφοριακές συνθήκες επιταχύνοντας ή επιβραδύνοντας. Το ερέθισμα προσδιορίζεται από την ταχύτητα του οχήματος u_k , τη διαφορά ταχυτήτων του οχήματος από το προπορευόμενο του Δu_n και την απόσταση ή το χρονικό διαχωρισμό Δx_i , επομένως για την επιτάχυνση \ddot{x}_i ισχύει:

$$\ddot{x}_i = f_{sti}(u_i, \Delta x_i, \Delta u_i)$$

Όπου f_{sti} η συνάρτηση που περιγράφει το ερέθισμα από το όχημα i .

Έστω δύο διαδοχικά οχήματα n (προπορευόμενο όχημα) και $n+1$ (όχημα που ακολουθεί) σε μια λωρίδα οδού, x_n και x_{n+1} οι αποστάσεις τους από ένα σταθερό σημείο και $\dot{x}_n(t)$ και $\dot{x}_{n+1}(t)$ οι ταχύτητες του προπορευόμενου και του οχήματος που ακολουθεί, αντίστοιχα.. Σύμφωνα και με το παρακάτω σχήμα, η γενική μορφή προτύπου ακολουθούστος οχήματος δίνεται από τη σχέση:

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \lambda[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]$$



Εικόνα 2.25: Η δομή του μοντέλου ακολουθίας οχήματος

Ο συντελεστής λ στην παραπάνω σχέση λέγεται παράγοντας ευαισθησίας του προτύπου και ισούται με:

$$\lambda = \alpha \frac{\dot{x}_{n+1}^m(t + \Delta t)}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l}$$

Όπου α η σταθερά ευαισθησίας, m η παράμετρος που ελέγχει την ευαισθησία του προτύπου ως προς την ταχύτητα του προπορευόμενου οχήματος και l η παράμετρος που ελέγχει την ευαισθησία του προτύπου ως προς την απόσταση του οχήματος $n+1$ από το προπορευόμενο του n . Ο παράγοντας ευαισθησίας λ είναι:

- σταθερός όταν $m=l=0$,
- εξαρτώμενος από το χωρικό διαχωρισμό τη χρονική στιγμή t , όταν $m=0, l \neq 0$,
- εξαρτώμενος από την ταχύτητα του οχήματος που ακολουθεί τη χρονική στιγμή $t+T$, όταν $m \neq 0, l=0$, και
- εξαρτώμενος και από τον χωρικό διαχωρισμό και από την ταχύτητα του οχήματος που ακολουθεί, όταν $m=0, l=0$.

Για τιμές $m=0$ και $l=1$, η σχέση της επιτάχυνσης ισούται με:

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \Delta t) = \frac{\alpha}{x_n(t) - x_{n+1}(t)} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]$$

Όπου μπορεί να απλοποιηθεί με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{du}{dt} = \frac{a}{s} * \frac{ds}{dt}$$

όπου $s = x_n - x_{n+1}$

Η προηγούμενη σχέση είναι παράγωγος της: $u = a * \ln s + c$

Επειδή $s = \frac{1}{k}$, αν $k = k_j$ τότε $u = 0$ και προκύπτει ότι: $c = a * \ln k_j$

Επομένως, ισχύει ότι:

$$u = a * \ln\left(\frac{k_j}{k}\right)$$

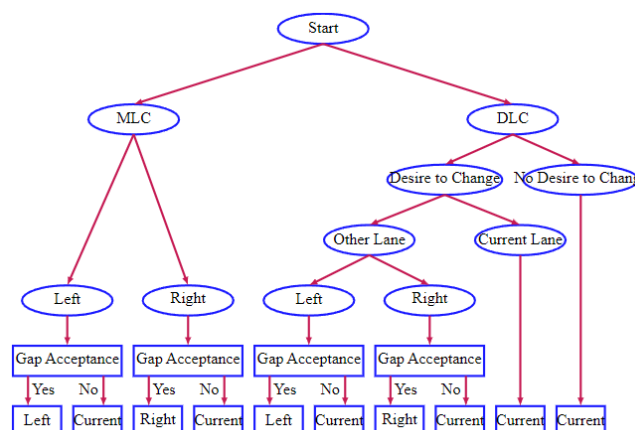
Όπου a η ταχύτητα u_c , όταν ο φόρτος παίρνει τη μέγιστή του τιμή. Η τελευταία σχέση αποτελεί το πρότυπο Greenberg.

Πρότυπα ακολουθώντας οχήματος προτάθηκαν από τους Pipes (1953), Chandler et al. (1958), Forbes et al. (1958), Herman et al. (1959), Gatis et al. (1959, 1961), Newel (1961), Herman and Potts (1961), Forbes (1963), και Girps (1981). Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί το μικροσκοπικό μαθηματικό πρότυπο του Girps, το οποίο αποτελεί τη βάση για ευρέως διαδεδομένα λογισμικά προσομοίωσης, όπως είναι το AIMSUN (Barcelo & Ferrer, 1994).

❖ Πρότυπο Αλλαγής Λωρίδας (Lane Changing Model)

Ως αλλαγή λωρίδας ορίζεται η μεταφορά ενός οχήματος από μια λωρίδα σε διπλανή. Η αλλαγή λωρίδας έχει σημαντικό αντίκτυπο στη ροή της κυκλοφορίας και είναι εξίσου σημαντική στη μικροσκοπική προσομοίωση κυκλοφορίας. Οι τύποι ελιγμού αλλαγής λωρίδας διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Κατ' επιλογήν (Discretionary lane change, DLC), όταν ο οδηγός εξετάζει τη δυνατότητα αλλαγής λωρίδας για να βελτιώσει τις συνθήκες κίνησής του, όπως την ταχύτητα.
- Υποχρεωτική (Mandatory lane change, MLC), όταν ο οδηγός πρέπει να εκτελέσει αλλαγή λωρίδας για να αλλάξει κατεύθυνση, για παράδειγμα να βγει από κάποια έξοδο του αυτοκινητόδρομου ή να στρίψει στον δρόμο όπου βρίσκεται ο προορισμός του.
- Συνδυασμός και των δύο.

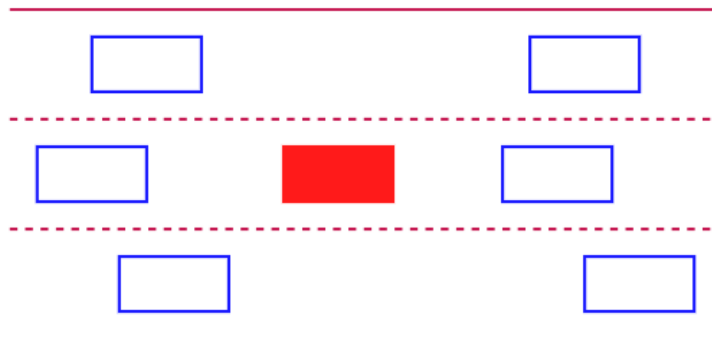


Εικόνα 2.26: Η δομή του μοντέλου αλλαγή λωρίδας [Πηγή: Kazi Iftekhhar Ahmed, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 1999]

Το μαθηματικό αυτό πρότυπο περιγράφει την οδηγική συμπεριφορά, μέσω αλγορίθμων, όταν οι οδηγοί είναι πρόθυμοι να αλλάξουν λωρίδα κυκλοφορίας, καθώς και την κατάλληλη επιλογή των διακένων που θα παρθούν από τους οδηγούς για την πραγματοποίηση αυτής της αλλαγής. Για το λόγο αυτό, τα μοντέλα αλλαγής λωρίδας είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα, με αποτέλεσμα να αποτελούν πηγή σφαλμάτων κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

Τα στοιχεία απόφασης αλλαγής λωρίδας περιλαμβάνουν τα εξής βήματα:

- Απόφαση αλλαγή λωρίδας.
- Επιλογή της λωρίδας προορισμού, μεταξύ των πιθανών επιλογών.
- Επιλογή διακένου, μεταξύ των διαφόρων διαθέσιμων διακένων.
- Αποδοχή (ή όχι) του διακένου που έχει επιλεγεί.



Εικόνα 2.27: Διαδικασία προτύπου αλλαγής λωρίδας

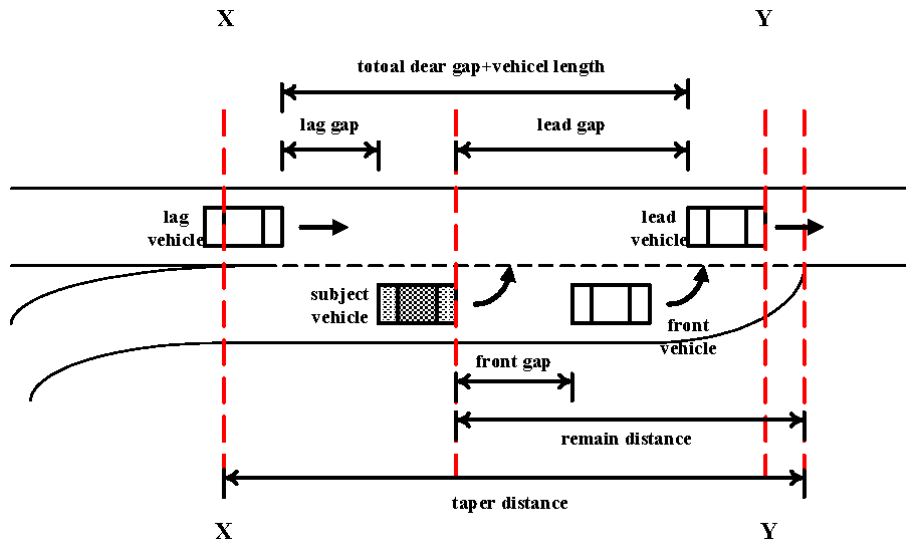
❖ Πρότυπο Επιλογής Διακένου (Gap Acceptance Model)

Τα πρότυπα αποδοχής διάκενου ελέγχουν το τρόπο με τον οποίο προσομοιωμένα οχήματα στρέφουν σε αντικρουόμενα ρεύματα κυκλοφορίας. 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 κενού που θα περιμένει ο οδηγός επηρεάζει σημαντικά τη ρεαλιστικότητα της προσομοίωσης. Μεγάλα κενά μπορεί να επιφέρουν υπερβολικά μεγάλες ουρές, ενώ αντίθετα μικρά κενά μπορεί να επιφέρουν μη ρεαλιστική επιθετική συμπεριφορά των οδηγών και ταυτόχρονα υποτίμηση των καθυστερήσεων στις διασταυρώσεις.

Η αποδοχή διακένου εξαρτάται καταρχάς από το διαθέσιμο και το κρίσιμο διάκενο, καθώς και τη σχέση μεταξύ τους:

- Αν το διαθέσιμο διάκενο είναι μικρότερο από το κρίσιμο διάκενο, ο οδηγός το απορρίπτει και δεν εκτελεί την αλλαγή λωρίδας.
- Αν το διαθέσιμο διάκενο είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το κρίσιμο διάκενο, τότε ο οδηγός το αποδέχεται και αποπειράται να εκτελέσει την αλλαγή λωρίδας.

Εκτός από το συνολικό διάκενο, ο οδηγός εκτιμά και άλλα δύο είδη διακένων, το μπροστά (lead gap) και το πίσω (lag gap) διάκενο. Το άθροισμα του συνολικού καθαρού διακένου και του μήκους του οχήματος ισούται με την απόσταση του προπορευόμενου οχήματος και του προηγούμενού του, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.28: Αναπαράσταση των διακένων και της διαδικασίας αποδοχής τους από τον οδηγό [Πηγή: Kazi Iftekhar Ahmed, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 1999]

Το κρίσιμο διάκενο εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- i. Τη σχετική ταχύτητα μεταξύ του οχήματος που επιχειρεί να αλλάξει λωρίδα και των οχημάτων στη λωρίδα στόχο.
- ii. Το πρώτο διάκενο που αντιμετώπισε και απέρριψε ο οδηγός.
- iii. Τον αριθμό απορριφθέντων διακένων στη διαδικασία αλλαγής λωρίδας.
- iv. Το εναπομείναν μήκος για την εκτέλεση του ελιγμού (στην περίπτωση της υποχρεωτικής αλλαγής λωρίδας).
- v. Τον αριθμό λωρίδων που πρέπει να διασχίσει ο οδηγός για να εκτελέσει τον ελιγμό αλλαγής λωρίδας.
- vi. Τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες (πυκνότητα, ταχύτητα).

❖ Μικροσκοπικά Προγράμματα Προσομοίωσης (Micro-Simulation Programs)

Ένας μεγάλος αριθμός μικροσκοπικών προγραμμάτων προσομοίωσης, ο οποίος βασίζεται σε μικροσκοπικά πρότυπα κυκλοφοριακής ροής, έχει αναπτυχθεί όλα αυτά τα χρόνια. Σύμφωνα με έρευνα, έχουν αναγνωρισθεί 58 μικροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης. Κάποια από αυτά περιγράφονται ενδεικτικά παρακάτω.

AIMSUN

Το μικροσκοπικό πρόγραμμα AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) αναπτύχθηκε το 1994 στο πολυτεχνείο της Βαρκελώνης από τους J. Barceló και J. L. Ferrer. Ακολουθεί το πρότυπο ακολουθώντας οχήματος του Gipps. Βασικό χαρακτηριστικό του λογισμικού είναι η μεγάλη ποικιλία δεικτών λειτουργικής απόδοσης που διαθέτει. Χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της οδικής υποδομής, τη μείωση των εκπομπών αερίων, τη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης και το σχεδιασμό αστικών περιβαλλόντων για οχήματα και πεζούς.

AIMSUN 2

Πρόκειται για ένα από τα νεότερα μικροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης στην πρωτοπορία της εφαρμογής των Ευφυών Συστημάτων Μεταφοράς (ITS), καθώς ανταποκρίνεται σε ένα μεγάλο αριθμό αυτών. Ξεκίνησε ως ερευνητικό πρόγραμμα και στη συνέχεια διατέθηκε για εμπορική χρήση.

PTV VISSIM

Το πρόγραμμα PTV Vissim (Planung Transport Verkehr AG), (Fellendorf, 1994), είναι ένα μικροσκοπικό πακέτο λογισμικού προσομοίωσης κυκλοφοριακής ροής πολλαπλών μέσων που αναπτύχθηκε από την εταιρεία PTV στην Καρλσρούη της Γερμανίας. Το όνομα του προγράμματος προέρχεται από την φράση “Verkehr In Städten – **SIM**mulationsmodell”, που στα γερμανικά σημαίνει “Traffic in cities – simulation model”. Χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση όλου του φάσματος των λειτουργικά κατηγοριοποιημένων οδών και των λειτουργιών δημόσιας μεταφοράς, καθώς επίσης και για προσομοίωση κυκλοφορίας γενικού σκοπού, όπως λεωφορείων, φορτηγών, πεζών και άλλων.

PARAMICS

Το πρόγραμμα προσομοίωσης PARAMICS αναπτύχθηκε από το Computing Center του πανεπιστημίου του Εδιμβούργου στις αρχές του 1990. Βασικό χαρακτηριστικό του είναι η χρήση του για την προσομοίωση συμφορημένων οδικών δικτύων. Το μοντέλο αυτό παρέχει την πιο ολοκληρωμένη οπτική απεικόνιση για την προβολή των αποτελεσμάτων μέσω πολλαπλών παραθύρων, συμπεριλαμβανομένων των κινήσεων των οχημάτων με τη χρήση 3-D απεικόνισης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

CORSIM

Το πρόγραμμα CORSIM (**COR**idor **SIM**ulation) αναπτύχθηκε από την Federal Highway Administration (FHWA) το 1996. Φαίνεται να είναι το κορυφαίο πρόγραμμα προσομοίωσης στο είδος του ως προς τη δοκιμή πολλαπλών σεναρίων που μπορεί να αφορούν σε

γεωμετρικές διαμορφώσεις, περιστατικά και επενεργούμενη ρύθμιση της κυκλοφορίας. Βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης τεσσάρων διαφορετικών τύπων μετρήσεων κυκλοφοριακών μεγεθών (ώρα, ζήτηση – χωρητικότητα, έλεγχος ταχύτητας, αποδοχή διακένου). Το γεγονός αυτό το καθιστά ως ένα από τα αξιόλογα και αξιόπιστα προγράμματα προσομοίωσης.

SUMO

Το SUMO (**S**imulation of **U**rban **M**obility) είναι ένα ελεύθερο και ανοιχτό λογισμικό προσομοίωσης κυκλοφορίας, το οποίο είναι διαθέσιμο από το 2001. Το SUMO επιτρέπει τη προτυποποίηση συστημάτων διατροφικής κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένων των οδικών οχημάτων, των δημόσιων συγκοινωνιών και των πεζών. Περιέχει μια πληθώρα υποστηρικτικών εργαλείων που χειρίζονται εργασίες όπως η εύρεση διαδρομής, η οπτικοποίηση, η εισαγωγή δικτύου και ο υπολογισμός εκπομπών. Το SUMO είναι δυνατό να βελτιωθεί με προσαρμοσμένα μοντέλα και παρέχει διάφορες προγραμματιστικές εφαρμογές γνωστές ως API (Application Programming Interface) για τον έλεγχο της προσομοίωσης από απόσταση.

Μεσοσκοπικά Μοντέλα Προσομοίωσης (Mesoscopic Simulation Models)

Τα μεσοσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης βρίσκονται ανάμεσα στα μικροσκοπικά και στα μακροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης. Δημιουργήθηκαν προκειμένου να εξυπηρετούν τον χειρισμό μεγάλων σχετικά δικτύων αλλά με μικρό χρόνο υπολογισμών. Περιγράφουν λεπτομερώς τα οχήματα στο δίκτυο ωστόσο μειονεκτούν σε μεγάλο βαθμό στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των οδηγών. Συνήθως, επιλέγονται για την προσομοίωση των σηματοδοτούμενων δικτύων, όπου τα οχήματα τείνουν να κινούνται ως ομάδες παρουσιάζοντας προβλέψιμες αλλαγές στην κίνησή τους. Τα μοντέλα μεσοσκοπικής προσομοίωσης αν και δεν περιγράφουν ένα σύστημα λεπτομερώς, παρέχουν αξιόλογα αποτελέσματα και με χαμηλό υπολογιστικό κόστος.

Γνωστά μεσοσκοπικά προγράμματα είναι το TRANSYT, το DYNAMIT, το DYNEMO και το TRANSIMS.

Μακροσκοπικά Μοντέλα Προσομοίωσης (Macroscopic Simulation Models)

Τα μοντέλα μακροσκοπικής προσομοίωσης ανήκουν στο άλλο άκρο του φάσματος που αντιπροσωπεύουν τα μικροσκοπικά μοντέλα. Τα πρώτα, τείνουν να χρησιμοποιούν μεταβλητές του ρυθμού ροής και άλλες γενικότερες περιγραφές για την κυκλοφοριακή κίνηση. Αφορούν στην προσομοίωση υψηλότερου επιπέδου από εκείνο των μεμονωμένων οχημάτων. Τα μακροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης βασίζονται σε εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να εξετάσουν την κυκλοφορία των οχημάτων για παράδειγμα, συνολικά και για συγκεκριμένα

κυκλοφοριακά μεγέθη, όπως η ροή, η χωρική πυκνότητα και η μέση ταχύτητα, ως μια συνάρτηση στο χωροχρόνο.

Γνωστά μακροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται κατά κόρον, είναι τα: AUTOS, TRAF, FREFLO, CONTRAM, PTV VISION, Vissum, DYNEV, TransCAD, OREMS, Cube Voyager.

2.5 Λογισμικό AIMSUN

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό AIMSUN της έκδοσης 20.0.3, με σκοπό την κυκλοφοριακή προσομοίωση κυκλικών κόμβων.

Το λογισμικό πρόγραμμα AIMSUN είναι ένα μικροσκοπικό πρόγραμμα προσομοίωσης, το οποίο αναπτύχθηκε και κυκλοφόρησε από την TSS (Transport Simulation Systems – Συστήματα Προσομοίωσης Μεταφορών). Περιέχει τρία στοιχεία με τα οποία πραγματοποιεί δυναμικές προσομοιώσεις, τον μικροσκοπικό, τον μεσοσκοπικό και τον μακροσκοπικό προσομοιωτή, οι οποίοι μπορούν να ασχοληθούν με διαφορετικά δίκτυα κυκλοφορίας, όπως αστικά δίκτυα, αυτοκινητόδρομους, ελεύθερες λεωφόρους, περιφερειακούς δρόμους κ.ά. Οι δυναμικοί προσομοιωτές έχουν σχεδιαστεί και εφαρμοστεί ως ένα εργαλείο ανάλυσης κυκλοφορίας για να βοηθήσουν τους μηχανικούς στον σχεδιασμό και να αξιολογήσουν τα κυκλοφοριακά συστήματα. Έχει αποδειχθεί ότι είναι πολύ χρήσιμοι στην εκτίμηση νέων συστημάτων ελέγχου κυκλοφορίας και πολιτικών διαχείρισης. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στους μικροσκοπικούς προσομοιωτές.

Ο μικροσκοπικός προσομοιωτής ακολουθεί μια μικροσκοπική προσέγγιση, που σημαίνει ότι η συμπεριφορά κάθε οχήματος στο δίκτυο μοντελοποιείται συνεχώς καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ κινείται μέσω του δικτύου κυκλοφορίας, σύμφωνα με αρκετές προσομοιώσεις συμπεριφοράς οχημάτων. Ο μικροσκοπικός προσομοιωτής στο λογισμικό AIMSUN είναι συνδυασμός διακριτής και συνεχούς προσομοίωσης, δηλαδή υπάρχουν κάποιες παράμετροι στο σύστημα, όπως οχήματα ή/και ανιχνευτές, οι οποίες αλλάζουν συνεχώς στον χρόνο προσομοίωσης, ο οποίος χωρίζεται σε μικρά χρονικά διαστήματα που λέγονται **κύκλοι ή βήματα προσομοίωσης**. Επιπλέον, υπάρχουν άλλες παράμετροι, όπως φωτεινοί σηματοδότες, σημεία εισόδου, οι οποίες αλλάζουν διακριτά σε συγκεκριμένα σημεία στον χρόνο προσομοίωσης.

Τα μαθηματικά πρότυπα που υιοθετεί το λογισμικό είναι το μοντέλο ακολουθούντος οχήματος (car-following model), το μοντέλο αλλαγής λωρίδας (lane changing model) και το μοντέλο αποδοχής διακένου (gap acceptance model), τα οποία βασίζονται στο μοντέλο του Gipps.

2.5.1 Μοντέλο Ακολουθούντος Οχήματος (Car-Following Model) (Gipps, 1981)

Το μαθηματικό πρότυπο του Gipps είναι πρότυπο διακριτού χρόνου και συνεχούς χώρου, στο οποίο υπολογίζονται η ταχύτητα και η θέση των οχημάτων ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το μαθηματικό αυτό πρότυπο βασίζεται στη θεώρηση του Gipps ότι οι οδηγοί βάζουν όρια στις επιθυμητές τιμές επιβράδυνσης και επιτάχυνσης. Τα δύο αυτά μεγέθη αποτελούν τις βασικές παραμέτρους του μαθηματικού προτύπου στις οποίες υπεισέρχονται τρεις περιορισμοί, δύο για την επιτάχυνση και ένας για την επιβράδυνση.

Οι δύο περιορισμοί του προτύπου του Gipps που αφορούν στην επιτάχυνση βασίζονται στη θεώρηση ότι η ταχύτητα των οχημάτων δεν δύναται να είναι μεγαλύτερη της επιθυμητής ταχύτητας των οδηγών και ότι η επιτάχυνση αυξάνεται με την εκκίνηση της μηχανής, και στη συνέχεια τείνει στο μηδέν όσο η ταχύτητα τείνει στην τιμή της επιθυμητής ταχύτητας. Οι περιορισμοί αυτοί περιγράφονται από την παρακάτω σχέση:

$$u_n(t + \tau) \leq u_n(t) + 2.5a_n\tau \left(1 - \frac{u_n(t)}{V_n}\right) \sqrt{\left(0.025 + \frac{u_n(t)}{V_n}\right)}$$

Όπου:

$u_n(t)$: η ταχύτητα του οχήματος n τη χρονική στιγμή t ,

a_n : η μέγιστη επιθυμητή επιτάχυνση του οχήματος n ,

τ : ο χρόνος αντίδρασης (σταθερός για όλα τα οχήματα),

V_n : η επιθυμητή ταχύτητα του οχήματος n .

Ο τρίτος περιορισμός του προτύπου του Gipps αφορά στην επιβράδυνση και βασίζεται στη θεώρηση ότι αν κάποιο όχημα επιβραδύνει με τη μέγιστη επιθυμητή επιβράδυνσή του, τότε το όχημα που ακολουθεί θα δύναται να αντιδράσει με τέτοιο τρόπο ώστε να σταματήσει έγκαιρα. Η θεώρηση αυτή ενσωματώνεται στην παρακάτω σχέση:

$$u_n(t + \tau) \leq b_n \tau + \sqrt{b_n^2 \tau^2 - b_n \left[2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - u_n(t)\tau - \frac{u_{n-1}(t)^2}{\hat{b}} \right]}$$

Όπου:

b_n : η μέγιστη επιθυμητή επιβράδυνση του οχήματος n ($b_n < 0$),

$x_n(t)$: η θέση του οχήματος (μπροστινού μέρους) n τη χρονική στιγμή t ,

s_n : το ενεργό μήκος του οχήματος n , το οποίο ισούται με το πραγματικό του μήκος προσαυξημένο με ένα διάστημα ασφαλείας το οποίο ο οδηγός επιθυμεί να κρατήσει από το προπορευόμενο όχημα,

\hat{b} : αποτελεί εκτίμηση του μεγέθους b_{n-1} , διότι ο οδηγός του οχήματος n δεν μπορεί να γνωρίζει την τιμή αυτή.

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του οχήματος n τη χρονική στιγμή $t + \tau$, υπολογίζονται οι ταχύτητες επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, όπως περιγράφηκαν από τις δύο παραπάνω σχέσεις. Η τελική ταχύτητα του οχήματος είναι η μικρότερη εκ των δύο προαναφερθέντων ταχυτήτων:

$$u_n(t + \tau) = \min \left\{ u_n(t) + 2.5a_n \tau \left(1 - \frac{u_n(t)}{V_n} \right) \sqrt{\left(0.025 + \frac{u_n(t)}{V_n} \right)}, b_n \tau + \sqrt{b_n^2 \tau^2 - b_n \left[2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - u_n(t)\tau - \frac{u_{n-1}(t)^2}{\hat{b}} \right]} \right\}$$

Στην περίπτωση όπου η ταχύτητα του οχήματος ισούται με την πρώτη τιμή (ταχύτητα επιτάχυνσης), η ροή των οχημάτων είναι τοπικά ελεύθερη. Αντίθετα, αν η ταχύτητα ισούται με την δεύτερη τιμή (ταχύτητα επιβράδυνσης), παρατηρείται τοπική συμφόρηση.

Και στις δύο περιπτώσεις, η θέση του οχήματος n τη χρονική στιγμή $t + \tau$ είναι:

$$x_n(t + \tau) = x_n(t) + 0.5[u_n(t) + u_n(t + \tau)]\tau$$

Στο μαθηματικό πρότυπο του Gipps ο χρόνος αντίδρασης τ , ο οποίος αποτελεί και το

χρονικό βήμα υπολογισμών, είναι εξωγενής παράμετρος και ισούται με 2/3 δευτερόλεπτα.

2.5.2 Μοντέλο Αλλαγής Λωρίδας (Lane-Changing Model) (Gipps, 1986a & 1986b)

Το μοντέλο αλλαγής λωρίδας στο πρόγραμμα AIMSUN θεωρείται ότι είναι μια επιπλέον εξέλιξη του μοντέλου Gipps (Gipps, 1986a και 1986b). Η αλλαγή λωρίδας βαθμονομήθηκε σε μια διαδικασία απόφασης αναλύοντας την αναγκαιότητα, την επιθυμία και τις συνθήκες σκοπιμότητας για αλλαγή λωρίδας που είναι και τοπικές, ανάλογα με τη θέση του οχήματος στο οδικό δίκτυο. Είναι ένα μοντέλο απόφασης που προσεγγίζει τη συμπεριφορά του οδηγού με την αλλαγή λωρίδας. Η απόφαση του οδηγού να αλλάξει λωρίδα κυκλοφορίας είναι αποτέλεσμα των απαντήσεων σε μια σειρά σύνθετων ερωτήσεων, οι οποίες είναι οι εξής:

- *Είναι απαραίτητο να αλλάξει λωρίδα;* Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες: η δυνατότητα στροφής στην τρέχουσα λωρίδα, η απόσταση για την επόμενη στροφή και οι κυκλοφοριακές συνθήκες στην τρέχουσα λωρίδα. Οι κυκλοφοριακές συνθήκες μετρώνται ως προς την ταχύτητα και το μήκος ουράς.
- *Είναι επιθυμητό να αλλάξει λωρίδα;* Αυτό απαιτεί έλεγχο εάν θα υπάρξει κάποια βελτίωση στις κυκλοφοριακές συνθήκες του οδηγού, ως αποτέλεσμα της αλλαγής λωρίδας. Η βελτίωση αυτή μετριέται ως προς την ταχύτητα και την απόσταση.
- *Είναι δυνατόν να αλλάξει λωρίδα;* Απαιτείται επαλήθευση εάν υπάρχει επαρκές κενό για να πραγματοποιηθεί η αλλαγή λωρίδας με απόλυτη ασφάλεια. Για το σκοπό αυτό υπολογίζεται τόσο η πέδηση που επιβάλλεται από το επόμενο όχημα κατάντη προς το εναλλασσόμενο όχημα, όσο και η πέδηση που εφαρμόζεται από το μεταβαλλόμενο όχημα στο μελλοντικό όχημα ανάντη. Εάν και οι δύο αναλογίες πέδησης είναι αποδεκτές, τότε είναι πιθανή η αλλαγή λωρίδας.

2.5.3 Μοντέλο Αποδοχής Διακένου (Gap Acceptance Model)

Το μοντέλο αποδοχής διακένου χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς παραχώρησης προτεραιότητας. Αυτό το μοντέλο καθορίζει εάν ένα όχημα χαμηλότερης προτεραιότητας που πλησιάζει μία διασταύρωση μπορεί ή όχι να διασχίσει ανάλογα με τις συνθήκες των οχημάτων υψηλότερης προτεραιότητας (θέση και ταχύτητα). Επιπλέον, λαμβάνει υπόψη την απόσταση των οχημάτων από το υποθετικό σημείο σύγκρουσης, τις ταχύτητες και τους ρυθμούς επιτάχυνσής τους. Στη συνέχεια, καθορίζει τον χρόνο που

χρειάζονται τα οχήματα για να απομακρυνθούν από τη διασταύρωση και παράγει μια απόφαση, που είναι επίσης συνάρτηση του επιπέδου επικινδυνότητας κάθε οδηγού.

Πολλές παράμετροι των οχημάτων μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του μοντέλου αποδοχής κενού, όπως ο ρυθμός επιτάχυνσης, η επιθυμητή ταχύτητα, η αποδοχή ταχύτητας και ο μέγιστος χρόνος παραχώρησης προτεραιότητας. Άλλες παράμετροι, όπως η απόσταση ορατότητας στη διασταύρωση και η ταχύτητα στροφής, που σχετίζονται με το οδικό τμήμα, μπορεί επίσης να έχουν επίδραση. Μεταξύ αυτών, ο ρυθμός επιτάχυνσης, ο μέγιστος χρόνος εκκίνησης και η απόσταση ορατότητας στη διασταύρωση είναι τα πιο σημαντικά.

Ο ρυθμός επιτάχυνσης παρέχει την ικανότητα επιτάχυνσης του οχήματος και, επομένως, έχει άμεσο αντίκτυπο στο απαιτούμενο διάκενο ασφαλείας. Ο μέγιστος χρόνος παραχώρησης προτεραιότητας χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί πότε ο οδηγός αρχίζει να γίνεται ανυπόμονος εάν δεν μπορεί να εντοπίσει το διάκενο. Όταν ο οδηγός ξεπεράσει αυτόν τον χρόνο αναμονής, τότε το περιθώριο ασφαλείας (συνήθως είναι δύο βήματα προσομοίωσης) μειώνεται στο μισό του (μόνο ένα βήμα).

Ο παρακάτω αλγόριθμος εφαρμόζεται με σκοπό να καθοριστεί εάν ένα όχημα που πλησιάζει μια πινακίδα παραχώρησης προτεραιότητας μπορεί να διασχίσει ή όχι:

Δεδομένου ενός οχήματος (VEHY) που πλησιάζει σε διασταύρωση:

1. Αποκτήστε το πλησιέστερο όχημα υψηλότερης προτεραιότητας (VEHP).
2. Προσδιορίστε το θεωρητικό σημείο σύγκρουσης (TCP).
3. Υπολογίστε το χρόνο (TP1) που χρειάζεται το VEHY για να φτάσει στο TCP.
4. Υπολογίστε τον εκτιμώμενο χρόνο (ETP1) που χρειάζεται το VEHP για να φτάσει στο TCP.
5. Υπολογίστε το χρόνο (TP2) που χρειάζεται το VEHY για να περάσει το TCP.
6. Υπολογίστε τον εκτιμώμενο χρόνο (ETP2) που χρειάζεται το VEHP για να απομακρυνθεί από τη διασταύρωση.
7. Εάν το TP2 (συν ένα περιθώριο ασφαλείας) είναι μικρότερο από το ETP1, το όχημα VEHY θα έχει αρκετό χρόνο για να περάσει, επομένως θα επιταχύνει και θα διασχίσει.
8. Διαφορετικά, εάν το ETP2 (συν ένα περιθώριο ασφαλείας) είναι μικρότερο από το TP1, το VEHP του οχήματος θα έχουν ήδη διασχίσει το TCP όταν το VEHY το είχε φτάσει. Ψάχνοντας για το επόμενο πλησιέστερο όχημα με υψηλότερη προτεραιότητα, θα γινόταν VEHP και θα πήγαινε στο βήμα 2.
9. Διαφορετικά, το όχημα VEHY πρέπει να υποχωρήσει, να επιβραδύνει και να σταματήσει εάν χρειάζεται.

2.6 Σύγκριση μεθόδων στην ανάλυση κυκλοφοριακής ικανότητας

1. *The SIDRA Based Analysis on Operations of Three-Leg Modern Roundabout with Single-Lane Approaches*

Οι Zhang et al. (2020) προσομοίωσαν έναν μοντέρνο κυκλικό κόμβο με τρεις κλάδους με προσεγγίσεις μονής λωρίδας στο Suichang της Κίνας, μέσω του μοντέλου προσομοίωσης SIDRA. Η συλλογή δεδομένων για την ταχύτητα των οχημάτων πραγματοποιήθηκε με ταχύμετρο λείζερ, ενώ για την ανάλυση μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής, όπως μέση καθυστέρηση, μήκος ουράς και βαθμός κορεσμού (V/C), τοποθετήθηκαν ψηφιακές κάμερες και πραγματοποιήθηκαν καταγραφές με μη επανδρωμένα σκάφη (UAV). Αξίζει να σημειωθεί ότι στην έρευνα αυτή δεν συμπεριλήφθηκαν οι πεζοί και τα μη μηχανοκίνητα οχήματα. Η ευαισθησία του κυκλικού κόμβου σε παράγοντες, όπως ο κυκλοφοριακός φόρτος εισόδου και το ποσοστό του φόρτου της αριστερής στροφής, πραγματοποιήθηκε μέσω της ανάλυσης της μέσης καθυστέρησης, του μήκους ουράς 95ου εκατοστημορίου και του βαθμού κορεσμού (v/C). Συγκεκριμένα, η μέση καθυστέρηση και το μήκος ουράς 95ου εκατοστημορίου αυξάνεται αργά με την αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου, ενώ αντιθέτως η μέση καθυστέρηση αυξάνεται απότομα όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος εισόδου είναι είτε χαμηλότερος είτε ίσος με 600 οχήματα/ώρα με το ποσοστό του φόρτου της αριστερής στροφής να είναι χαμηλότερο από 20%, είτε χαμηλότερος ή ίσος με 500 οχήματα/ώρα με το ποσοστό του φόρτου της αριστερής στροφής να είναι χαμηλότερο από 20%. Ο βαθμός κορεσμού είναι λιγότερο επηρεασμένος από τα ποσοστά του φόρτου της αριστερής στροφής. Η στάθμη εξυπηρέτησης του μοντέρνου κυκλικού κόμβου προέκυψε να είναι Level-III, δηλαδή C, όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος εισόδου είναι χαμηλότερος ή ίσος με 600 οχήματα/ώρα, όπως και προέκυψε στην παραπάνω έρευνα.

2. *A functional Operational Comparison between Signalized and Unsignalized Roundabouts*

Στόχος της έρευνας των Rashed και Imam (2020) ήταν η αξιολόγηση της λειτουργικής αποδοτικότητας μη σηματοδοτούμενων κυκλικών κόμβων και η σύγκριση αυτών με σηματοδοτούμενους κυκλικούς κόμβους. Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκαν πέντε κυκλικοί κόμβοι στην περιοχή Amman της Σαουδικής Αραβίας, εξαιτίας της μεγάλης κυκλοφοριακής συμφόρησης που δημιουργείται στους κόμβους αυτούς και της επίδρασης της λειτουργικής αποδοτικότητας στις γειτονικές διασταυρώσεις των κόμβων. Μέσω του πίνακα Προέλευσης-Προορισμού πραγματοποιήθηκε η συλλογή των δεδομένων και έγινε η υπόθεση ότι οι

μετακινήσεις από το 2018 προσαρμόστηκαν με ρυθμό αύξησης 3% έως το 2020, ενώ χρησιμοποιήθηκε το μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης PTV Vissim για την ανάλυση των υφιστάμενων κυκλοφοριακών συνθηκών και την προσομοίωση των σηματοδοτούμενων σεναρίων. Η λειτουργική αποδοτικότητα τόσο για τους σηματοδοτούμενους όσο και για τους μη σηματοδοτούμενους κυκλικούς κόμβους εκτιμήθηκε με βάση τη μέση καθυστέρηση, το μέγιστο μήκος ουράς και τη στάθμη εξυπηρέτησης. Η έρευνα έδειξε ότι η μέση καθυστέρηση για τους σηματοδοτούμενους κυκλικούς κόμβους βελτιώθηκε κατά 9% έως 35% και η στάθμη εξυπηρέτησης βελτιώθηκε κατά δύο επίπεδα, ενώ καμία αλλαγή δεν εντοπίστηκε στο μέγιστο μήκος ουράς. Οι συγγραφείς καταλήγουν στη σημαντική βελτιστοποίηση της λειτουργικής αποδοτικότητας των κυκλικών κόμβων με τη χρήση φωτεινού σηματοδότη, ενώ τονίζουν πως η αντίδραση του οδηγού δεν λήφθηκε υπόψη στο λογισμικό προσομοίωσης.

3. *Turbo, Flower and Conventional Roundabouts in Jordan*

Οι Alsaleh και Shbeeb (2018) διερεύνησαν την εφαρμογή συμβατότητας νέων τεχνικών κυκλοφοριακών διαχωρισμών σε τρεις κυκλικούς κόμβους, τον κυκλικό κόμβο turbo, τον κυκλικό κόμβο flower και τον συμβατικό κυκλικό κόμβο, και αξιολόγησαν τα μέτρα αποδοτικότητας των μελετούμενων περιοχών, επιλέγοντας δείκτες που σχετίζονται με την οδική ασφάλεια, την κυκλοφοριακή ικανότητα, το μήκος ουράς την καθυστέρηση και τη στάθμη εξυπηρέτησης. Οι κυκλικοί κόμβοι που επιλέχθηκαν για τη μελέτη ήταν οι Al-Thaqafa, Al-Durra και Al-Eyadat στην περιοχή Jordan της Σαουδικής Αραβίας, για την επιλογή των οποίων λήφθηκαν υπόψη δύο καθοριστικοί παράγοντες: να υπάρχει ευελιξία στις χρήσεις γης για την υλοποίηση του κυκλικού κόμβου Turbo χωρίς να επηρεάζονται τα πεζοδρόμια ή τα ιδιωτικά ακίνητα και να γίνει αναπαράσταση από πολλές κυκλοφοριακές συνθήκες. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε κάτω από συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης και η προσομοίωση διενεργήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Vissim. Αποδείχτηκε πως οι κυκλικοί κόμβοι turbo προσφέρουν υψηλότερη κυκλοφοριακή ικανότητα, χαμηλότερη καθυστέρηση και καλύτερη στάθμη εξυπηρέτησης σε σύγκριση με τους flower και τους συμβατικούς κυκλικούς κόμβους. Επιπλέον, οι κυκλικοί κόμβοι turbo παρουσιάζουν καλύτερη αποδοτικότητα όταν η κυκλοφοριακή ροή αποτελείται πάνω από ή ίσο με 40% των κινήσεων των αριστερών στροφών. Τονίστηκε, ακόμη, πως δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά της κυκλοφοριακής ικανότητας (επίπεδο εμπιστοσύνης 95%) μεταξύ των flower και των συμβατικών κυκλικών κόμβων υπό τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες. Επιπρόσθετα, οι συμβατικοί έχουν τη χαμηλότερη κυκλοφοριακή ικανότητα, τις υψηλότερες καθυστερήσεις και τη χειρότερη στάθμη εξυπηρέτησης σε όλους τους μελετούμενους κυκλικούς κόμβους υπό τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες, ενώ παρουσιάζουν την καλύτερη αποδοτικότητα

όταν η προσεγγιστική κυκλοφοριακή ροή περιέχει χαμηλά ποσοστά των κινήσεων της αριστερής στροφής. Τέλος, οι κυκλικοί κόμβοι flower μπορεί να παρουσιάζουν πιο υψηλά επίπεδα ασφάλειας από τους turbo και τους συμβατικούς, λόγω της μείωσης των συνολικών σημείων συμπλοκής (conflict points) από 32 στους συμβατικούς με δύο λωρίδες σε 8 στους flower και στους 30 στους turbo, αλλά είναι πιο κατάλληλοι όταν η κυκλοφοριακή ροή αποτελείται πάνω από ή ίσο με 40% των κινήσεων των αριστερών στροφών.

4. *A comparative analysis of the performance of turbo roundabouts based on geometric characteristics and traffic scenarios*

Οι Dabiri et al. (2020) ερεύνησαν την επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των κυκλοφοριακών σεναρίων στα μέτρα επίδοσης, συμπεριλαμβάνοντας την μέση καθυστέρηση, τον βαθμό κορεσμού $\frac{v}{c}$, την κυκλοφοριακή ικανότητα, και στην στάθμη εξυπηρέτησης σε έναν βασικό και έναν ρότορα σπειροειδή κυκλικό κόμβο. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα είναι το μικροσκοπικό πρόγραμμα προσομοίωσης AIMSUN. Συγκεκριμένα, για κάθε κυκλικό κόμβο έγινε διερεύνηση τριών διαφορετικών διαμέτρων, των 30 μέτρων, των 40 μέτρων και των 50 μέτρων, με σκοπό να εξεταστεί η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στα μέτρα επίδοσης. Για τον κυκλοφοριακό φόρτο έγινε θεώρηση ότι κυμαίνεται από 1000 έως 6000 οχήματα/ώρα με βήμα 500 οχήματα/ώρα και πως η κατανομή του φόρτου στους τέσσερις κλάδους είναι ισορροπημένη και μη. Επιπλέον, προτάθηκε να ερευνηθούν τέσσερις κινήσεις τόσο στους τρισκελείς όσο και στους τετρασκελείς κυκλικούς κόμβους: την δεξιά στροφή, την αριστερή στροφή, την ευθεία κίνηση και την αναστροφή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μέτρα επίδοσης μειώνονται σημαντικά με την αύξηση της διαμέτρου του τετρασκελή σπειροειδή κυκλικού κόμβου, ενώ στον τρισκελή βελτιώνονται. Ακόμη, οι βασικοί τρισκελείς και τετρασκελείς σπειροειδείς κυκλικοί κόμβοι έχουν καλύτερη αποδοτικότητα αλλάζοντας το σενάριο ισορροπημένης ροής κυκλοφορίας σε μη ισορροπημένη σε σύγκριση με τους σπειροειδείς κυκλικούς κόμβους τεσσάρων και τριών σκελών. Επιπρόσθετα, τα μέτρα επίδοσης αυξάνονται με την αντικατάσταση τους βασικούς τρισκελείς και τετρασκελείς σπειροειδείς κυκλικούς κόμβους με ρότορες (rotor) τρισκελείς και τετρασκελείς σπειροειδείς κυκλικούς κόμβους. Συνοψίζοντας, οι βασικοί σπειροειδείς κυκλικοί κόμβοι έχουν καλύτερη αποδοτικότητα σε σύγκριση με τον ρότορα σπειροειδή κυκλικό κόμβο υπό κορεσμένες και ακόρεστες συνθήκες κυκλοφορίας.

5. *Turbo Roundabouts as an Alternative to Two Lane Roundabouts*

Οι Engelsman και Uken (2007) διερεύνησαν την μετατροπή ενός κυκλικού κόμβου turbo σε υφιστάμενο τυπικό κυκλικό κόμβο με δύο λωρίδες σε μια περιοχή της Νότιας Αφρικής. Με δεδομένο κυκλοφοριακό φόρτο 3000-3500 οχήματα/ώρα, το μοντέλο γρήγορης σάρωσης (quick-scan model) έδειξε ότι η κυκλοφοριακή ικανότητα ενός κυκλικού κόμβου με δύο λωρίδες είναι υψηλότερη κατά 40%-50% από έναν κυκλικό κόμβο με μια λωρίδα. Σύμφωνα με την μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Ολλανδία από τον L.G.H. Fortuijn, αποδείχτηκε πως οι κυκλικοί κόμβοι turbo έχουν 10 σημεία εμπλοκής, σε αντίθεση με τους κυκλικούς κόμβους με δύο λωρίδες που έχουν 16 (Fortuijn και Carton, 2000). Επιπλέον, οι κυκλικοί κόμβοι turbo ελαχιστοποιούν την επιθυμία του οδηγού για πλέξη, και αυτό εντοπίζεται από την μείωση στα 4 σημεία εμπλοκής πλέξης και στα 2 σημεία εμπλοκής μερισμού. Οι συγγραφείς, επίσης, επισήμαναν το γεγονός ότι η κυκλοφοριακή ικανότητα, με βάση το μοντέλο γρήγορης σάρωσης, του κυκλικού κόμβου turbo είναι 25-30% υψηλότερη από την κυκλοφοριακή ικανότητα του κυκλικού κόμβου με δύο λωρίδες. Αυτό επεξηγείται και από την ελαχιστοποίηση των σημείων εμπλοκής. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι ο αριθμός των ατυχημάτων με σοβαρούς τραυματισμούς μπορεί να μειωθεί μέχρι και το 70% στους κυκλικούς κόμβους turbo. Τέλος, συμπεραίνουν ότι οι κυκλικοί κόμβοι turbo μπορούν να προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις απόδοσης σε σύγκριση με τους κυκλικούς κόμβους μιας ή δύο λωρίδων και τις σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις.

6. *Comparing Performances of Turbo-roundabouts and Double-lane Roundabouts*

Σκοπός της έρευνας των Giuffre et al. (2012) είναι η σύγκριση της λειτουργικής αποδοτικότητας κυκλοφορίας μεταξύ των βασικών κυκλικών κόμβων turbo και των κυκλικών κόμβων δύο λωρίδων. Η εργασία βασίστηκε στο μοντέλο Hagring (1998), το οποίο επιτρέπει να χρησιμοποιεί μια συσσωρευμένη εκθετική κατανομή για τον ποσοτικό προσδιορισμό της κατανομής απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων στον κύριο άξονα. Για την σύγκριση αυτή εξετάστηκαν δύο υποθέσεις σχετικά με τον κυκλοφοριακό φόρτο με τη χρήση του Πίνακα Προέλευσης-Προορισμού. Η πρώτη υπόθεση ήταν η ισοδύναμη κατανομή του ποσοστού του φόρτου τόσο στον πρωτεύοντα όσο και στον δευτερεύοντα άξονα, ενώ η δεύτερη υπέθετε πως τα ποσοστά των οχημάτων προς και από τον πρωτεύοντα άξονα ήταν σημαντικά περισσότερα από αυτά του δευτερεύοντα άξονα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις δύο αυτές περιπτώσεις που εξετάστηκαν, με κριτήριο τη μέση καθυστέρηση που παρατηρήθηκε κατά την είσοδο των οχημάτων στους κόμβους, έδειξαν ότι οι βασικοί κυκλικοί κόμβοι turbo έχουν υψηλότερες λειτουργικές αποδόσεις σε σχέση με τους κόμβους δύο λωρίδων κυκλοφορίας, όταν υπάρχει υψηλός κυκλοφοριακός φόρτος σε πρωτεύουσες

προσβάσεις μαζί με χαμηλό έως μεσαίο κυκλοφοριακό φόρτο σε δευτερεύουσες προσβάσεις. Η σύγκριση που αναπτύχθηκε σε αυτό την έρευνα μπορεί να είναι πράγματι χρήσιμη για την επιλογή του τύπου του κυκλικού κόμβου και ειδικότερα για την αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων απόδοσης που προκύπτουν από τη μετατροπή ενός υπάρχοντος κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων κυκλοφορίας σε έναν κυκλικό κόμβο turbo με παρόμοια χαρακτηριστικά.

7. The Implications of Converting a High-Volume Multilane Roundabout into a Turbo Roundabout

Οι Elhassy et al. (2020) μελέτησαν την προσαρμογή ενός σπειροειδή κυκλικού κόμβου τύπου «ρότορας» (rotor turbo roundabout) σε έναν απλό κυκλικό κόμβο με πολλαπλές λωρίδες κυκλοφορίας στην πόλη Ντόχα του Κατάρ, χρησιμοποιώντας το μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης VISSIM. Είχε παρατηρηθεί ότι στον κυκλικό κόμβο της πόλης η κυκλοφοριακή ζήτηση υπερέιχε της κυκλοφοριακής χωρητικότητας, με αποτέλεσμα να δημιουργείται συμφόρηση. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκε ο σχεδιασμός ενός γνωστού κυκλικού κόμβου στην Ευρώπη, του σπειροειδή κυκλικού κόμβου τύπου «ρότορας», με ορισμένα χαρακτηριστικά, όπως σπειροειδείς σημάσεις οδοστρώματος και υπερυψωμένα διαχωριστικά λωρίδων, με σκοπό να εμποδίσει τους ελιγμούς και να περιορίσει τις αλλαγές λωρίδας (cutting-offs) και τις πλέξεις (weavings). Για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις βιντεοκάμερες εγγραφής υψηλής ποιότητας και ανά δεκαπέντε (15) λεπτά λήφθηκαν μετρήσεις, ώστε να προσδιοριστούν οι πρωινές και οι απογευματινές ώρες αιχμής. Από τις καταγραφές, η πρωινή ώρα αιχμής ήταν το χρονικό διάστημα 7:15-8:15, ενώ η απογευματινή 17:00-18:00. Ταυτόχρονα, ο υψηλότερος ωριαίος φόρτος κυκλοφορίας που εισήλθε στον κυκλικό κόμβο σημειώθηκε την πρωινή ώρα αιχμής με συνολικά 6289 οχήματα, σε αντίθεση με 5734 οχήματα που εντοπίστηκαν κατά την απογευματινή ώρα αιχμής. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικούς εναλλακτικούς σχεδιασμούς κυκλικών κόμβων, προκειμένου να αντισταθμιστεί η μείωση των λωρίδων (από τρεις σε δύο) στην κύρια πρόσβαση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τρεις διαφορετικοί σχεδιασμοί σπειροειδών κυκλικών κόμβων τύπου «ρότορας» ίσως δεν είναι κατάλληλοι στις περιπτώσεις που πρέπει να εξυπηρετηθεί κυκλοφοριακός φόρτος μεγαλύτερος από 4500 οχήματα/ώρα ή στις περιπτώσεις που οι κυκλοφοριακοί φόρτοι είναι υψηλοί.

8. *Evaluation of Roundabout Safety Performance through Surrogate Safety Measures from Microsimulation*

Οι Giuffrè et al. (2018) ερεύνησαν την προσομοίωση είκοσι έξι (26) κυκλικών κόμβων στην περιοχή της Σλοβενίας για την αξιολόγηση της απόδοσης ασφάλειάς τους. Βασιζόμενοι στις τροχιές των οχημάτων που εξάχθηκαν από τα μικροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης AIMSUN και VISSIM, εκτίμησαν τα σημεία εμπλοκής χρησιμοποιώντας το Μοντέλο Υποκατάστασης Αξιολόγησης Ασφαλείας (Surrogate Safety Assessment Model – SSAM). Για τη μελέτη αυτή, πάρθηκε μια βάση δεδομένων από την αστυνομία της Σλοβενίας για τη χρονική περίοδο 2009 - 2016. Σε αυτή συμπεριλαμβάνονταν πληροφορίες για την ημερομηνία και την ώρα της ημέρας κατά την οποία σημειώθηκαν τα ατυχήματα, την κατάσταση πινακίδων και σημάτων, τις περιβαλλοντικές συνθήκες συμπεριλαμβανομένου του οδοστρώματος και της παρουσίας ζωνών εργασίας, τον τύπο και τον αριθμό των εμπλεκόμενων χρηστών, τους ελιγμούς και τον δρόμο από τον οποίο προσεγγίζουν τον κόμβο οι χρήστες, καθώς και τις τιμές της Ετήσιας Μέσης Ημερήσιας Κυκλοφορίας (ΕΜΗΚ) που εισέρχονται σε κάθε κυκλικό κόμβο. Το δείγμα των κυκλικών κόμβων περιλάμβανε:

- 13 κυκλικούς κόμβους μιας λωρίδας κυκλοφορίας με τέσσερις κλάδους προσέγγισης.
- 5 κυκλικούς κόμβους δύο λωρίδων κυκλοφορίας (1 με πέντε κλάδους, 1 με έξι κλάδους και 3 με τέσσερις κλάδους προσέγγισης).
- 8 σπειροειδείς κυκλικούς κόμβους (5 με τέσσερις κλάδους και 3 με τρεις κλάδους προσέγγισης).

Τα μικροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης AIMSUN και VISSIM βαθμονομήθηκαν για τους τρεις τύπους κυκλικών κόμβων χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη εμπειρική συνάρτηση χωρητικότητας, στην οποία περιείχαν κρίσιμους χρονικούς διαχωρισμούς και χρονικούς διαχωρισμούς ακολουθίας. Κατά τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων βαθμονόμησης για τα δύο μοντέλα, προέκυψε ένα μοντέλο πρόβλεψης ατυχημάτων από προσομοιωμένα σημεία εμπλοκής κατά την ώρα αιχμής. Ένα γενικευμένο γραμμικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του μοντέλου πρόβλεψης με βάση τα δεδομένα ατυχημάτων που συλλέχθηκαν στο πεδίο για 26 υπάρχοντες κυκλικούς κόμβους σε ολόκληρη τη χώρα. Η κατανομή της κυκλοφορίας στις ώρες αιχμής προσομοιώθηκε με το AIMSUN και, στη συνέχεια, οι ατυχήματα κατά την ώρα αιχμής υπολογίστηκαν με το SSAM, εφαρμόζοντας φίλτρα τα οποία προσδιορίστηκαν κατά τη βαθμονόμηση των AIMSUN και VISSIM. Το μοντέλο πρόβλεψης ατυχημάτων βασίστηκε στην υπόθεση ότι τα ατυχήματα ανά έτος είναι συνάρτηση των ατυχημάτων στις ώρες αιχμής, της αναλογίας του όγκου κυκλοφορίας στις ώρες αιχμής προς τον μέσο ημερήσιο όγκο κυκλοφορίας και της εξωτερικής διαμέτρου του κυκλικού κόμβου. Τα

κριτήρια των μέτρων προσαρμογής υπογράμμισαν πόσο καλά το μοντέλο πρόβλεψης ατυχημάτων αντέχει το σύνολο των παρατηρήσεων από το προγνωστικό μοντέλο SSAM. Τα αποτελέσματα της έρευνας επιβεβαίωσαν ότι η αξιολόγηση ασφάλειας οποιασδήποτε οδικής μονάδας μπορεί να βασίζεται σε υποκατάστατα μέτρα ασφαλείας, αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης κυκλοφορίας που χρησιμοποιείται. Καταλήγουν πως σχεδιάζοντας έναν κυκλικό κόμβο απαιτείται η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της ασφάλειας, της λειτουργικής απόδοσης και ούτω καθεξής, δεδομένων των περιορισμών για την τοποθεσία υπό αξιολόγηση.

9. *Investigating the Transferability of Calibrated Microsimulation Parameters for Operational Performance Analysis in Roundabouts*

Οι Gallelli et al. (2017) διερεύνησαν και αξιολόγησαν τη δυνατότητα μεταφοράς των παραμέτρων του μοντέλου μικροσκοπικής προσομοίωσης μεταξύ των τιμών μηκών ουράς που μετρήθηκαν στο πεδίο και της προσομοίωσης σε δύο συμβατικούς κυκλικούς κόμβους στην περιοχή της Ιταλίας, υπό παρεμφερείς συνθήκες κυκλοφορίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε μια τεχνική επεξεργασία εικόνας βίντεο για τη λήψη δεδομένων οχήματος για τη βαθμονόμηση του πακέτου μικροπροσομοίωσης (VISSIM). Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε μια καθημερινή μέρα μεταξύ 11:30 και 12:30. Στο πρώτο μέρος της εργασίας, πραγματοποιήθηκε μια διαδικασία βαθμονόμησης πολλαπλών σταδίων για τον κυκλικό κόμβο Marconi, καθορίζοντας τις τιμές συντελεστών του μοντέλου ακολουθώντας οχήματος Wiedemann 99, που έδωσαν λογικά αποτελέσματα όσον αφορά τα παρατηρούμενα μήκη ουράς. Χρησιμοποιήθηκε μια τεχνική γενετικού αλγορίθμου για τον προσδιορισμό των βέλτιστων εκτιμήσεων αυτών των παραμέτρων του μοντέλου. Στη συνέχεια, προκειμένου να αποδειχθεί η δυνατότητα μεταφοράς των βαθμονομημένων παραμέτρων προσομοίωσης, οι συγγραφείς υιοθέτησαν τόσο την προσέγγιση βάσει εφαρμογής όσο και την προσέγγιση βάσει εκτίμησης. Ειδικότερα, σύμφωνα με την πρώτη, οι βαθμονομημένες παράμετροι που προέρχονται από το κυκλικό κόμβο Marconi εφαρμόστηκαν για την προσομοίωση του κυκλικού κόμβου Cosmai. Επιπλέον, ακολουθώντας τη δεύτερη προσέγγιση, η διαδικασία βαθμονόμησης εφαρμόστηκε επίσης χρησιμοποιώντας μια βάση δεδομένων του κυκλικού κόμβου Cosmai. Στη συνέχεια, οι συγγραφείς συνέκριναν μετρημένα πεδία με προσομοιωμένα μήκη ουράς, λαμβάνοντας υπόψη τέσσερα διαφορετικά σενάρια:

1. Προσομοίωση του κυκλικού κόμβου Cosmai χρησιμοποιώντας προεπιλεγμένη κατανομή ταχύτητας VISSIM και τις προεπιλεγμένες παραμέτρους Wiedemann 99 (χωρίς καμία βαθμονόμηση).

2. Προσομοίωση του κυκλικού κόμβου Cosmai χρησιμοποιώντας παρατηρούμενη κατανομή ταχύτητας και προεπιλεγμένες παραμέτρους Wiedemann 99.
3. Προσομοίωση του κυκλικού κόμβου Cosmai χρησιμοποιώντας παρατηρούμενη κατανομή ταχύτητας και τις παραμέτρους Wiedemann 99 που βαθμονομήθηκαν για τον κυκλικό κόμβο Marconi.
4. Προσομοίωση του κυκλικού κόμβου Cosmai με σημαντικούς παράγοντες του Wiedemann 99 βαθμονομήθηκαν από μόνοι τους έναντι της προσομοίωσης του κυκλικού κόμβου Marconi με βαθμονομημένους σημαντικούς παράγοντες του Wiedemann 99.

Τέλος, τα αποτελέσματα, που αξιολογήθηκαν ως προς τη ρίζα μέσου τετραγωνικού κανονικοποιημένου σφάλματος και τον βαθμό δυνατότητας μεταφοράς μεταξύ των παραμέτρων που βαθμονομήθηκαν για τους κυκλικούς κόμβους Marconi και Cosmai, έδειξαν ότι:

- Στο Σενάριο 1, οι προεπιλεγμένες παράμετροι Wiedemann δίνουν σφάλμα ίσο με 1,29.
- Στο Σενάριο 2, παρά τη χρήση της παρατηρούμενης κατανομής ταχύτητας με τις προεπιλεγμένες παραμέτρους Wiedemann, το σφάλμα αυξάνεται έως και 1,35.
- Στο Σενάριο 3, μετά τη βαθμονόμηση, η τιμή του σφάλματος μειώνεται μέχρι το 0,59 ως συνέπεια της χρήσης των παραμέτρων Wiedemann 99 που βαθμονομήθηκαν για τον κυκλικό κόμβο Marconi.
- Στο Σενάριο 4, το ποσοστό μεταβολής που σχετίζεται με όλες τις σημαντικές παραμέτρους κυμαίνεται από το ελάχιστο -5,0% έως το μέγιστο 0,6%.

Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, στην προσομοίωση, η διαδικασία βαθμονόμησης είναι θεμελιώδης για την εξασφάλιση μιας συσχέτισης μεταξύ των παρατηρούμενων και των προσομοιωμένων παραμέτρων. Ωστόσο, χρειάζεται ακόμη μια εις βάθος ανάλυση για τον καθορισμό μεθοδολογιών μεταφοράς που επιτρέπουν την εφαρμογή των παραμέτρων που έχουν βαθμονομηθεί για μια μελέτη περίπτωσης σε άλλες παρόμοιες τοποθεσίες.

10. *Effectiveness of unconventional roundabouts in the design of suburban intersections*

Σκοπός της μελέτης των Ciampa et al. (2020) είναι η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας μη συμβατικών σχημάτων σχεδιασμού, όπως οι σπειροειδής κυκλικοί κόμβοι και οι κυκλικοί κόμβοι τύπου «Άνθος» (flower roundabouts), σε σύγκριση με συμβατικές λύσεις για τη μείωση τόσο λειτουργικών όσο και κρίσιμων ζητημάτων ασφάλειας. Έγινε χρήση της εφαρμογής μοντέλου μικροπροσομοίωσης κυκλοφορίας οχημάτων, PTV VISSIM, και του λογισμικού

ανάλυσης σαρωτικής διαδρομής, Autodesk Vehicle Tracking. Η έρευνα εξέτασε δύο τύπους κυκλικού κόμβου: (α) το σπειροειδές κυκλικό κόμβο και (β) τον κυκλικό κόμβο τύπου «άνθος», σε προαστιακές περιοχές της Ιταλίας, που χαρακτηρίζονται από την παρουσία οδικών διασταυρώσεων που επηρεάζονται από υψηλή κυκλοφοριακή κρισιμότητα. Τα δεδομένα για τις δύο περιπτώσεις πάρθηκαν με την διεξαγωγή του πίνακα Προέλευσης – Προορισμού από το πεδίο και οι ώρες αιχμής που επιλέχθηκαν ήταν 8-9π.μ., 1-2 μ.μ. και 6-7 μ.μ. Οι έρευνες διεξήχθησαν για αρκετές μέρες και αρκετές εβδομάδες του Οκτωβρίου και τους Νοεμβρίου 2018. Η μελέτη σύγκρινε την απόδοση ως προς τη μέση ταχύτητα, το μήκος ουρών, την απώλεια χρόνου, το μέγεθος ελιγμών του οχήματος κ.λπ., μεταξύ της πραγματικής κατάστασης και δύο λύσεων σχεδιασμού, αντίστοιχα συμβατικής και μη συμβατικής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν υπογραμμίζουν την αποτελεσματικότητα των μη συμβατικών σχημάτων που υιοθετήθηκαν τόσο για τη βελτίωση των παραμέτρων κυκλοφορίας και ασφάλειας όσο και για τον περιορισμό των ρυπογόνων εκπομπών στην ατμόσφαιρα. Τέλος, η εργασία προτείνει μια μεθοδολογική προσέγγιση που μπορεί να ακολουθήσει ο σχεδιαστής οδικών διαδρομών, για την επιλογή μεταξύ εναλλακτικών λύσεων σχεδιασμού συμβατικών και μη συμβατικών κυκλικών κόμβων.

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα εργασία πρόκειται να προσομοιωθούν δύο είδη κυκλικών κόμβων: ένας απλός/συμβατικός και ένας σπειροειδής (turbo roundabout). Στην συγκεκριμένη ενότητα, θα περιγραφούν τα επιμέρους στάδια του σχεδιασμού, ώστε το δίκτυο να είναι έτοιμο για προσομοίωση. Τέλος, στις παρακάτω υποενότητες θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάστηκε το δίκτυο και θα παρουσιαστούν τα σενάρια προσομοίωσης μέσα από τον προσδιορισμό των παραμέτρων, οι οποίες πρόκειται να διαφοροποιούνται στα επιμέρους σενάρια και των τιμών τους.

3.1 Σχεδιασμός Δικτύου

Για τον γεωμετρικό σχεδιασμό του δικτύου τόσο για τον συμβατικό όσο και για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο, έγινε χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD. Η επιλογή του προγράμματος επέτρεψε τον κατάλληλο γεωμετρικό σχεδιασμό των ευθυγραμμιών των οδικών τμημάτων, καθώς, επίσης, και άλλων βασικών χαρακτηριστικών που απαρτίζουν έναν κυκλικό κόμβο, όπως τα μήκη των οδικών τμημάτων, τα πλάτη των λωρίδων κυκλοφορίας, τις διαμέτρους των κυκλικών κόμβων, κ.ά. Ολοκληρώνοντας, λοιπόν, με το υπόβαθρο στο λογισμικό AutoCAD, ακολούθησε ο σχεδιασμός του δικτύου στο λογισμικό AIMSUN.

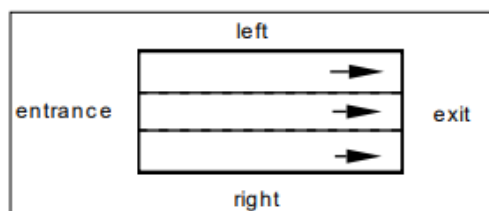
Πρώτο στάδιο του σχεδιασμού στο λογισμικό AIMSUN ήταν ο καθορισμός των οδικών τμημάτων και των βασικών παραμέτρων για τους κυκλικούς κόμβους. Συγκεκριμένα, ορίστηκαν ο τύπος των κλάδων προσέγγισης (κύριος ή δευτερεύοντας), καθώς και οι μέγιστες ταχύτητες τόσο στους κλάδους προσέγγισης όσο και εντός του κυκλικού κόμβου. Έπειτα, διαμορφώθηκε ο πίνακας Προέλευσης – Προορισμού τόσο για τις παραγωγές όσο και για τις έλξεις, δηλαδή για τους εκάστοτε κυκλοφοριακούς φόρτους εισόδου και εξόδου, με τη χρήση τεσσάρων κεντροειδών, μια για κάθε κλάδο προσέγγισης. Στη συνέχεια, φορτίστηκαν τα οδικά τμήματα με διαφορετικούς, κάθε φορά, κυκλοφοριακούς φόρτους, κάτι το οποίο θα αναλυθεί στις επόμενες υποενότητες. Παρακάτω παρουσιάζονται λεπτομερώς κάποιοι όροι που σχετίζονται με την κωδικοποίηση του δικτύου στο περιβάλλον AIMSUN, καθώς και ο σχεδιασμός που υλοποιήθηκε στο περιβάλλον του AutoCAD.

3.1.1 Στοιχεία δικτύου στο λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN

Το λογισμικό προσομοίωσης AIMSUN απαρτίζεται από διάφορες εντολές για τον σχεδιασμό ενός κυκλοφορικού δικτύου. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο “Aimsun 8 Users’ Manual”, στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται και αναλύονται τα στοιχεία εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στην προσομοίωση αυτή.

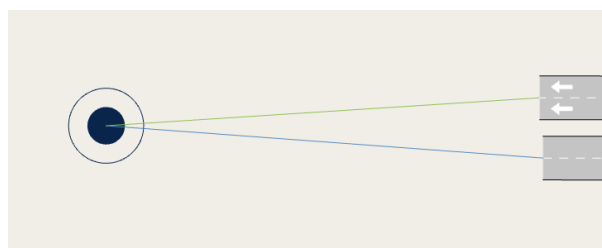
Οδικό Τμήμα (Section): Ένα οδικό τμήμα αποτελείται από ένα σύνολο συνεχόμενων λωρίδων όπου τα οχήματα κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση. Η κατάτμηση του κυκλοφοριακού δικτύου σε τμήματα συνήθως διέπεται από τα φυσικά όρια της περιοχής και την ύπαρξη κινήσεων στροφής. Σε ένα αστικό δίκτυο, ένα οδικό τμήμα αντιστοιχεί στενά με τον δρόμο μεταξύ διαδοχικών κόμβων. Αντίθετα, σε μια περιοχή αυτοκινητόδρομου, ένα τμήμα μπορεί να είναι το τμήμα του δρόμου ανάμεσα σε δύο κλάδους εισόδου ή εξόδου.

Η είσοδος, έξοδος και οι δεξιές και αριστερές πλευρές του οδικού τμήματος καθορίζονται από την κίνηση του οχήματος, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση ενός οδικού τμήματος [Πηγή: Aimsun 8 Users’ Manual]

Κεντροειδές (Centroid): Ένα κεντροειδές είναι ένα σημείο το οποίο τοποθετείται και χρησιμοποιείται ως σημείο προέλευσης και προορισμού των μετακινήσεων. Ουσιαστικά είναι σαν μια γεννήτρια οχημάτων που συνεχώς παράγει και προσελκύει οχήματα, ώστε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του δικτύου.



Εικόνα 3.2: Απεικόνιση ενός κεντροειδούς [Πηγή: Aimsun Next 20]

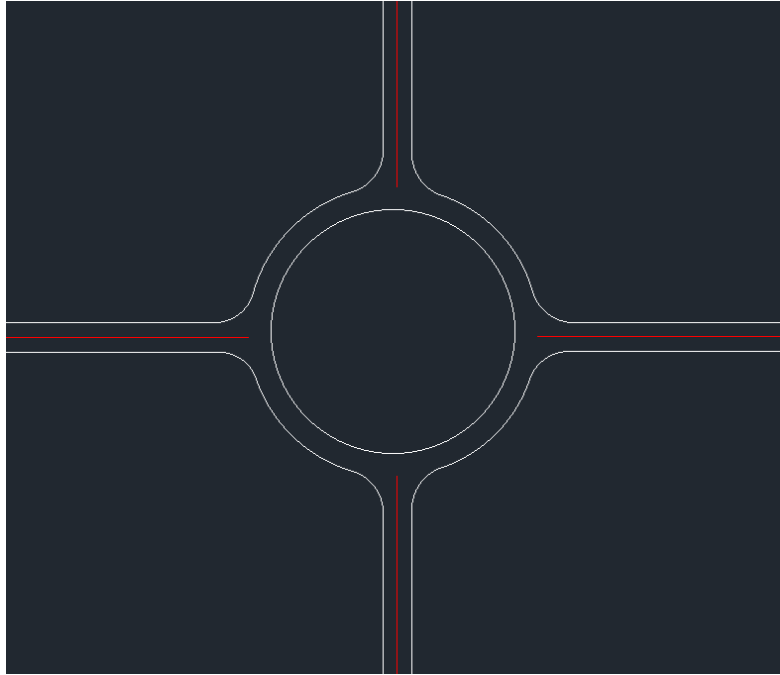
Πίνακας Προέλευσης – Προορισμού (O/D Matrix): Ένας πίνακας προέλευσης – προορισμού περιέχει δεδομένα, όπως μετακινήσεις, για κάθε ζεύγος κεντροειδών έλξης – παραγωγής στη διαμόρφωση του κέντρου, για μια δεδομένη κατηγορία οχήματος και χρονική περίοδο.

Σενάρια, Πειράματα & Επαναλήψεις (Scenarios, Experiments & Replications): Ένα σενάριο είναι σαν ένας χώρος όπου υπάρχουν δεδομένα εισόδου και πειράματα, ώστε να εκτελεστούν διάφορες διεργασίες: μικροσκοπικές, μεσοσκοπικές και υβριδικές προσομοιώσεις Aimsun, καθώς και διάφορες άλλες που αφορούν τις δημόσιες μεταφορές. Τα σενάρια για μικροσκοπικές, μακροσκοπικές και υβριδικές προσομοιώσεις χαρακτηρίζονται ως δυναμικά σενάρια. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται ανάλυση με χρήση μικροσκοπικής προσομοίωσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ένα σενάριο αποτελείται από διάφορες βασικές παραμέτρους, όπως η κυκλοφοριακή ζήτηση, που σχετίζεται με τον πίνακα προέλευσης-προορισμού, και οι κυκλοφοριακές καταστάσεις. Σε κάθε τέτοιο σενάριο περιλαμβάνονται διαφορετικά δυναμικά πειράματα (dynamic experiments) και σε κάθε πείραμα υπάρχουν διαφορετικές δυναμικές αναπαραγωγές (dynamic replications), ενώ μπορεί να δημιουργηθεί και ο μέσος όρος (average), ο οποίος περικλείει τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων των δυναμικών αναπαραγωγών. Οι δυναμικές αναπαραγωγές συμπεριλαμβάνουν τα αποτελέσματα του κάθε δυναμικού σεναρίου, οι οποίες είναι και αυτές που θα προσομοιωθούν, και στόχος εισαγωγής τους είναι η αναπαράσταση της στοχαστικότητας της κυκλοφοριακής ροής.

3.1.2 Σχεδιασμός απλού/συμβατικού κυκλικού κόμβου

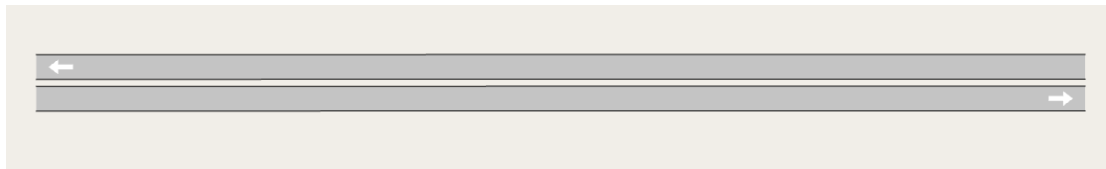
Απλός κυκλικός κόμβος μίας λωρίδας κυκλοφορίας

Μία από τις παραμέτρους που διαμορφώνει τα σενάρια προσομοίωσης της παρούσας εργασίας είναι οι λωρίδες κυκλοφορίας που θα περιέχουν οι κόμβοι. Οι λωρίδες κυκλοφορίας που θα προσομοιωθούν θα είναι μία ή δύο. Στην παρούσα υποενότητα θα γίνει εστίαση στη μία λωρίδα κυκλοφορίας. Για το σχεδιασμό του συγκεκριμένου σεναρίου, δημιουργήθηκε το υπόβαθρο του κυκλικού κόμβου μίας λωρίδας κυκλοφορίας στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD, όπως φαίνεται παρακάτω:

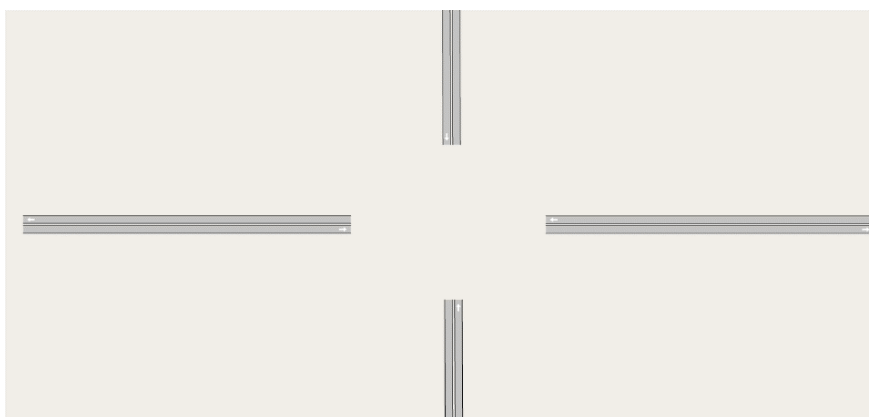


Εικόνα 3.3: Σχεδιασμός κυκλικού κόμβου μίας λωρίδας κυκλοφορίας στο AutoCAD

Στη συνέχεια, υλοποιήθηκε ο σχεδιασμός του τετρασκελή κυκλικού κόμβου στο πρόγραμμα προσομοίωσης Aimsun Next 20.0.3. Με υπόβαθρο τον κόμβο της εικόνας 3.3, σχεδιάστηκαν αρχικά οχτώ οδικά τμήματα (sections), δύο οδικά τμήματα σε κάθε πρόσβαση.

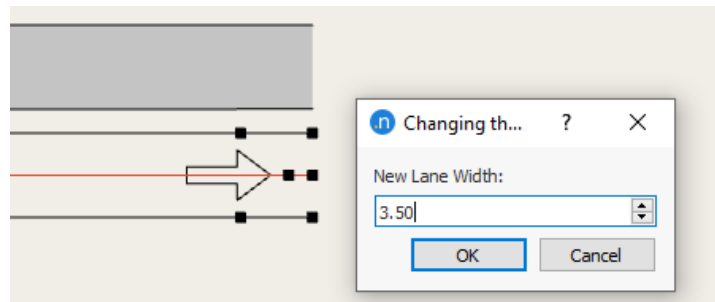


Εικόνα 3.4: Δημιουργία ενός οδικού τμήματος μιας λωρίδας κυκλοφορίας και της αντίθετης κατεύθυνσης



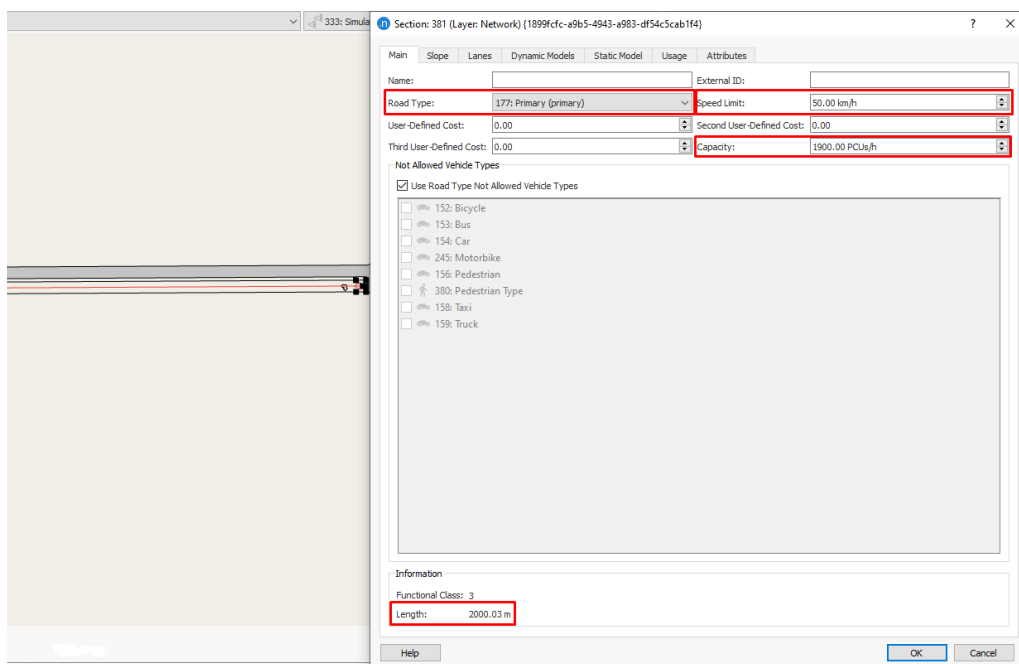
Εικόνα 3.5: Δημιουργία οχτώ οδικών τμημάτων

Επιπλέον, ορίστηκε το πλάτος λωρίδας να είναι ίσο με 3,50 μέτρα, η μέγιστη ταχύτητα στους κλάδους προσέγγισης να είναι ίση με 50 χλμ/ώρα. Έγινε υπόθεση ότι ο κόμβος που σχεδιάστηκε είναι αστικός.



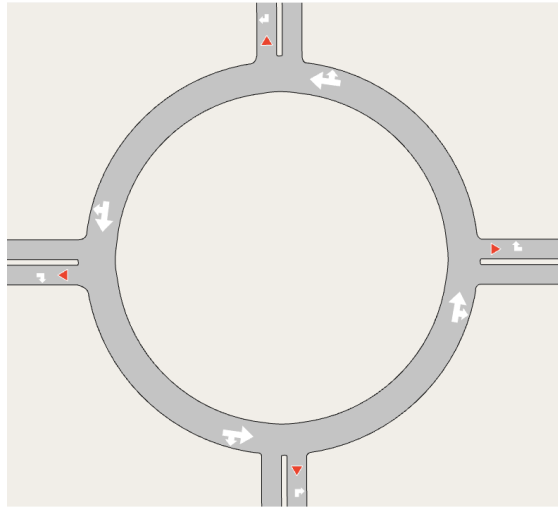
Εικόνα 3.6: Επιλογή πλάτους λωρίδας για τον απλό κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας

Επισημαίνεται πως η τιμή της χωρητικότητας δεν λαμβάνεται υπόψη. Οι αλγόριθμοι που εφαρμόζει το πρόγραμμα για την κίνηση των οχημάτων είναι τέτοιοι που κατά την μικροσκοπική προσομοίωση δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Κάθε οδικό τμήμα διαθέτει το δικό του «κουτάκι» ιδιοτήτων (properties), όπου αναφέρονται χρήσιμες πληροφορίες, όπως η μέγιστη ταχύτητα, ο τύπος του οδικού τμήματος, η κλίση του, το μήκος του, η χωρητικότητά του κ.ά. Όσον αφορά το μήκος το οδικού τμήματος, έγινε υπόθεση, ότι θα είναι ίσο με δύο χιλιόμετρα, ώστε στις δυσμενέστερες περιπτώσεις κυκλοφοριακού φόρτου να μπορούν να υπολογιστούν τα μήκη των ουρών αναμονής. Παρακάτω φαίνεται το πλαίσιο με τις ιδιότητες του κάθε τμήματος:



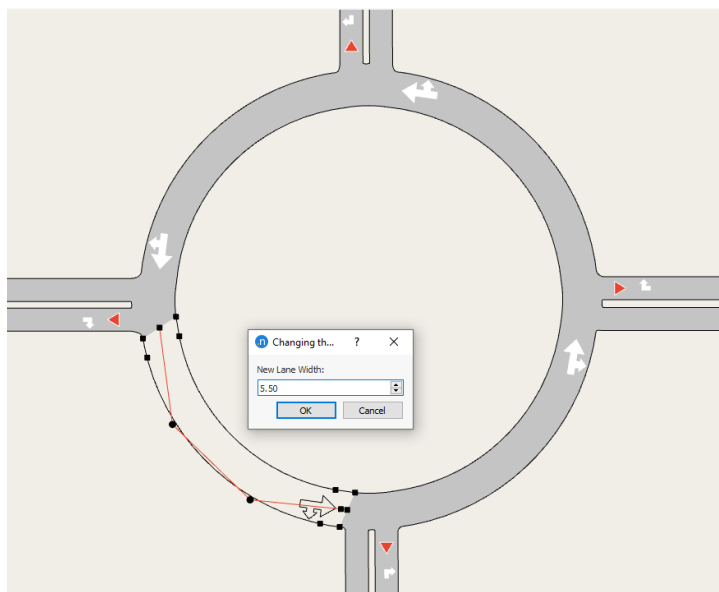
Εικόνα 3.7: Επιλογή τύπου οδικού τμήματος, μέγιστης ταχύτητας και χωρητικότητας μίας λωρίδας

Για την ολοκλήρωση του κυκλικού κόμβου, έπρεπε τα οχτώ αυτά οδικά τμήματα να ενωθούν. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια της εντολής “Roundabout” στο πρόγραμμα Aimsun.

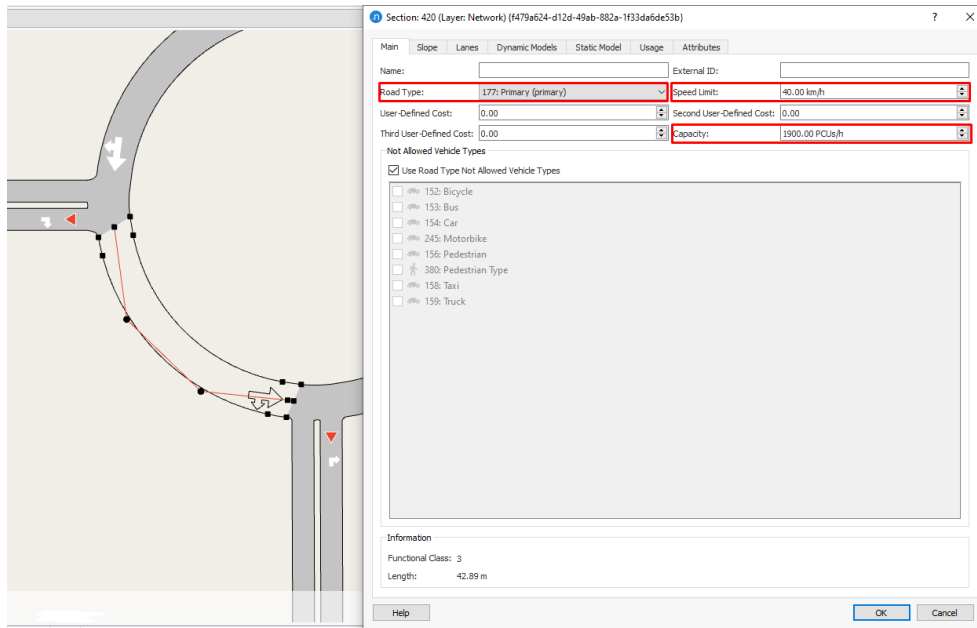


Εικόνα 3.8: Κυκλικός κόμβος μίας λωρίδας κυκλοφορίας στο Aimsun

Όσον αφορά τις βασικές παραμέτρους, το πλάτος λωρίδας εντός του κυκλικού κόμβου είναι 5.50 μέτρα, βάση των ορίων που είναι 5.30 – 6.70 μέτρα, και η διάμετρος του εγγεγραμμένου κύκλου επιλέχθηκε να είναι ίση με 35 μέτρα, βάση των ορίων που είναι 27 με 55 μέτρα. Η μέγιστη ταχύτητα εντός του κυκλικού κόμβου είναι ίση με 40 χλμ/ώρα και η χωρητικότητα εντός του δακτυλίου είναι ίδια με αυτή των τεσσάρων προσβάσεων, δηλαδή είναι ίση με 1900 οχήματα/ώρα.

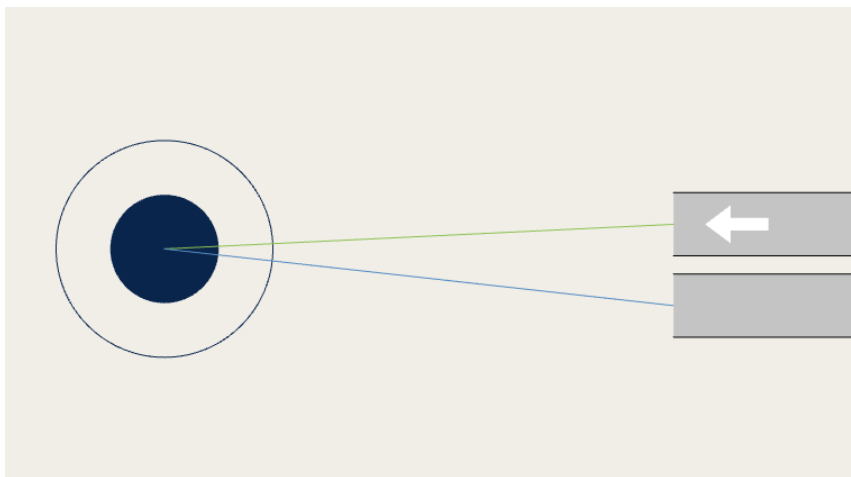


Εικόνα 3.9: Επιλογή πλάτος λωρίδας εντός κυκλικού κόμβου

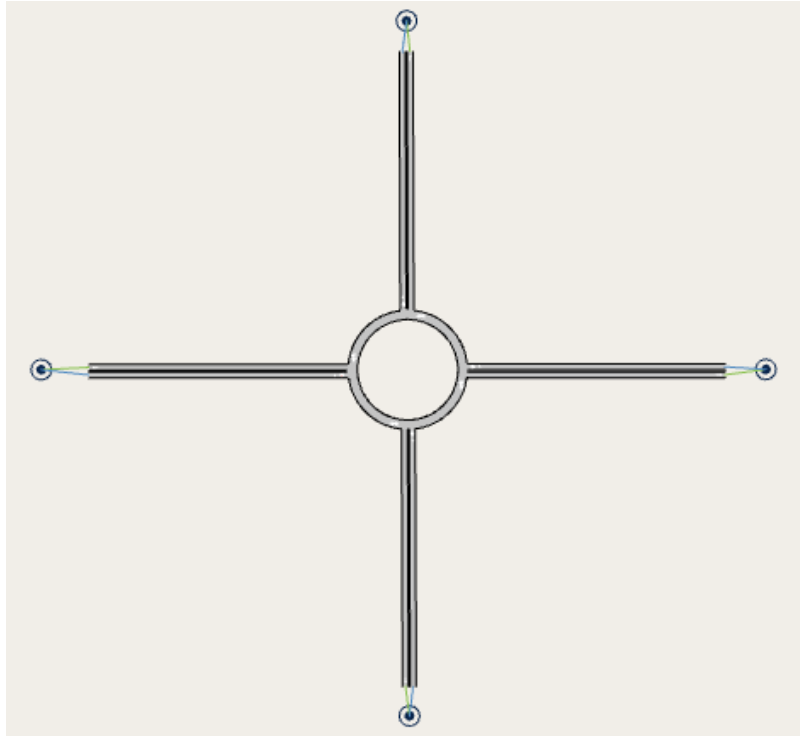


Εικόνα 3.10: Επιλογή μέγιστης ταχύτητας και χωρητικότητας εντός του κυκλικού κόμβου

Ύστερα από την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του απλού κυκλικού κόμβου μίας λωρίδας κυκλοφορίας, ακολούθησε η δημιουργία του πίνακα προέλευσης – προορισμού με τη βοήθεια των κεντροειδών σημείων. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα κεντροειδή, ένα κεντροειδές για κάθε πρόσβαση. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, το κεντροειδές αποτελείται από δύο γραμμές, την μπλε γραμμή η οποία παράγει κυκλοφορία στο τμήμα με το οποίο συνδέεται και την πράσινη γραμμή η οποία ελκύει την κυκλοφορία που προέρχεται από το τμήμα του δρόμου προς το κεντροειδές.



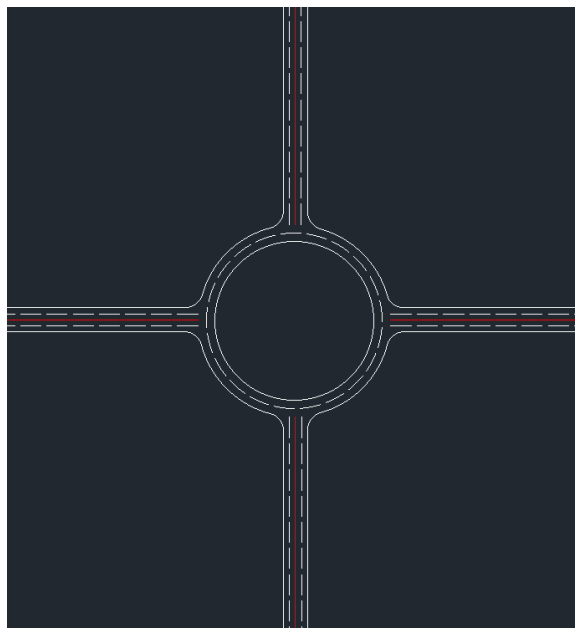
Εικόνα 3.11: Αναπαράσταση κεντροειδούς σημείου



Εικόνα 3.12: Αναπαράσταση τεσσάρων κεντροειδών σημείων

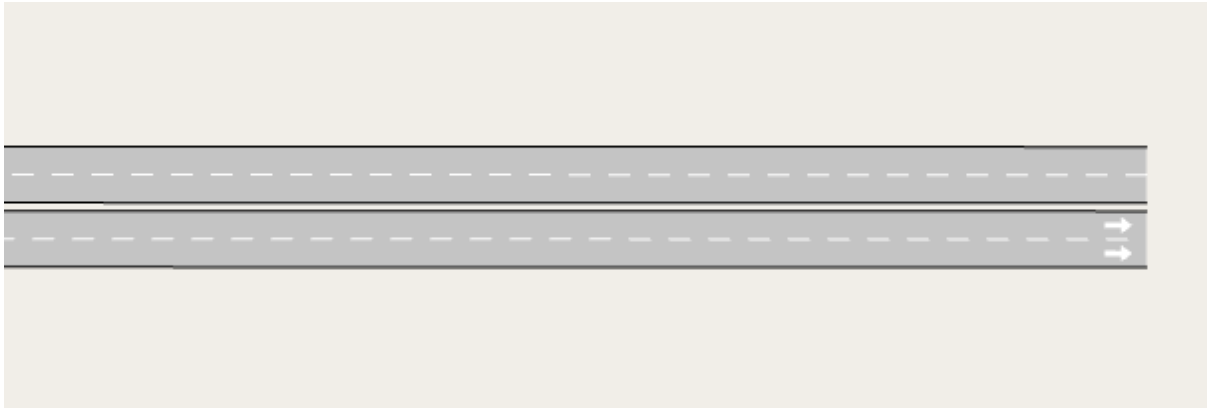
Απλός κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων κυκλοφορίας

Όπως προαναφέρθηκε και στη μεθοδολογία του απλού κυκλικού κόμβου με μία λωρίδα κυκλοφορίας, έτσι και σε αυτή την περίπτωση αρχικά σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD ο κυκλικός κόμβος:

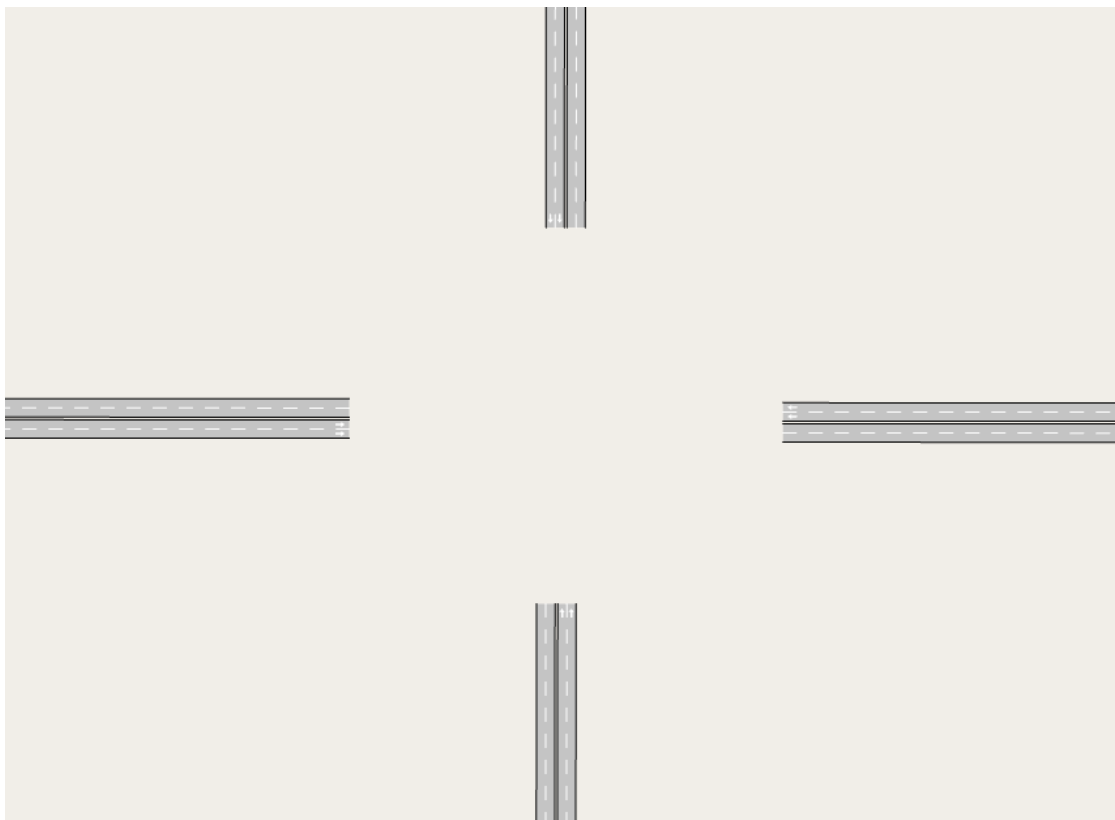


Εικόνα 3.13: Σχεδιασμός κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων στο AutoCAD

Έπειτα, αφού εισάχθηκε το παραπάνω υπόβαθρο στο πρόγραμμα AIMSUN, σχεδιάστηκαν τα οχτώ οδικά τμήματα (sections):



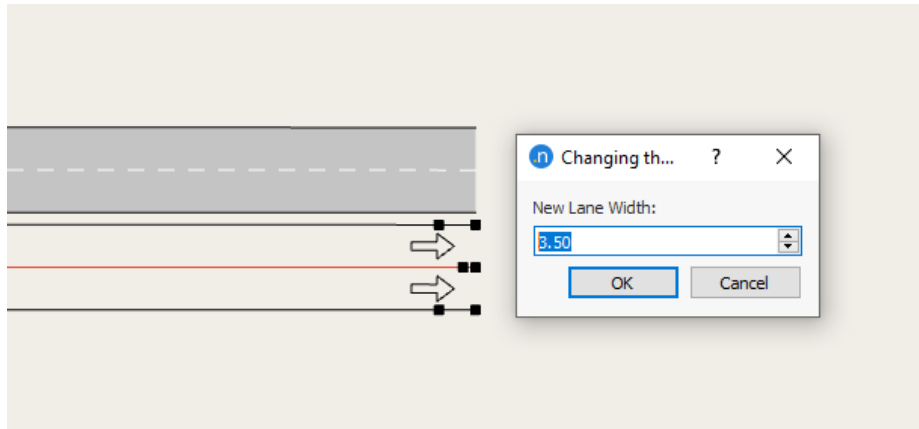
Εικόνα 3.14: Δημιουργία ενός οδικού τμήματος δύο λωρίδων κυκλοφορίας και της αντίθετης κατεύθυνσης



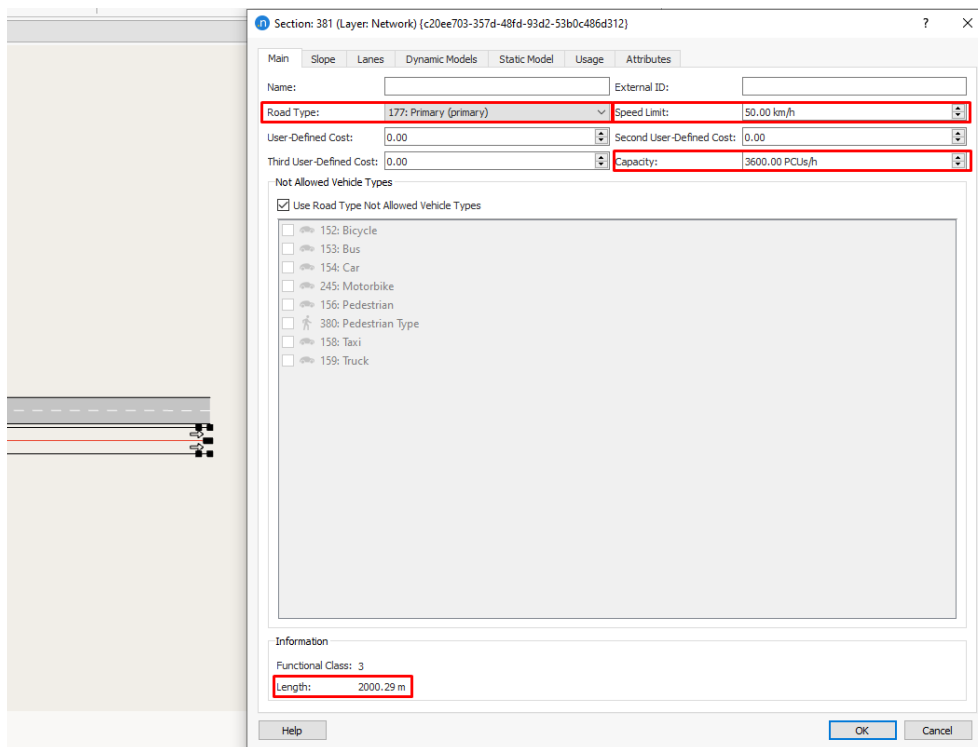
Εικόνα 3.15: Δημιουργία οχτώ οδικών τμημάτων για την κατασκευή του δικτύου

Όσον αφορά τις παραμέτρους, το πλάτος της κάθε λωρίδας κυκλοφορίας είναι ίσο με 3,5 μέτρα και η μέγιστη ταχύτητα στους κλάδους προσέγγισης είναι ίση με 50 χλμ/ώρα, ενώ η χωρητικότητα ορίστηκε να είναι διπλάσια από την χωρητικότητα του απλού κυκλικού κόμβου μίας λωρίδας, δηλαδή είναι ίση με 3600 οχήματα/ώρα. Επιπλέον, το μήκος των οδικών

τμημάτων είναι ίσο με δύο χιλιόμετρα, ώστε στις δυσμενέστερες περιπτώσεις κυκλοφοριακού φόρτου να μπορούν να υπολογιστούν τα μήκη των ουρών αναμονής. Όλες οι παράμετροι παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:

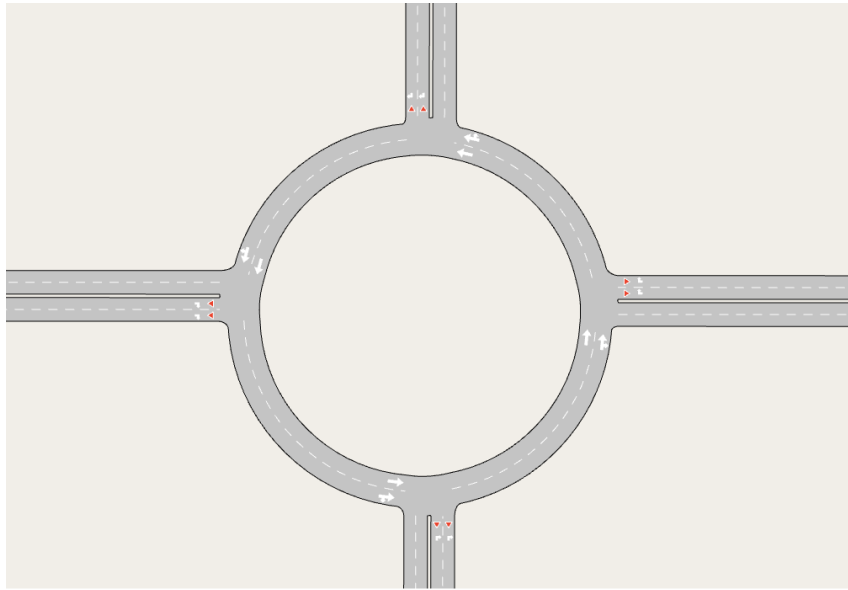


Εικόνα 3.16: Επιλογή πλάτους λωρίδας για τον απλό κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων



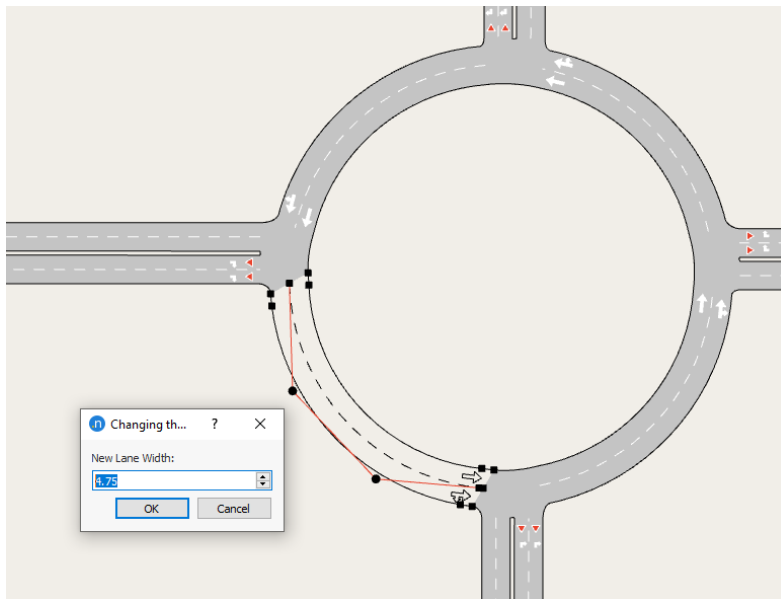
Εικόνα 3.17: Επιλογή τύπου οδικού τμήματος, μέγιστης ταχύτητας και χωρητικότητας δύο λωρίδων

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε ο κυκλικός κόμβος με δύο λωρίδες κυκλοφορίας στο πρόγραμμα προσομοίωσης AIMSUN, ο οποίος αναπαρίσταται παρακάτω ως εξής:

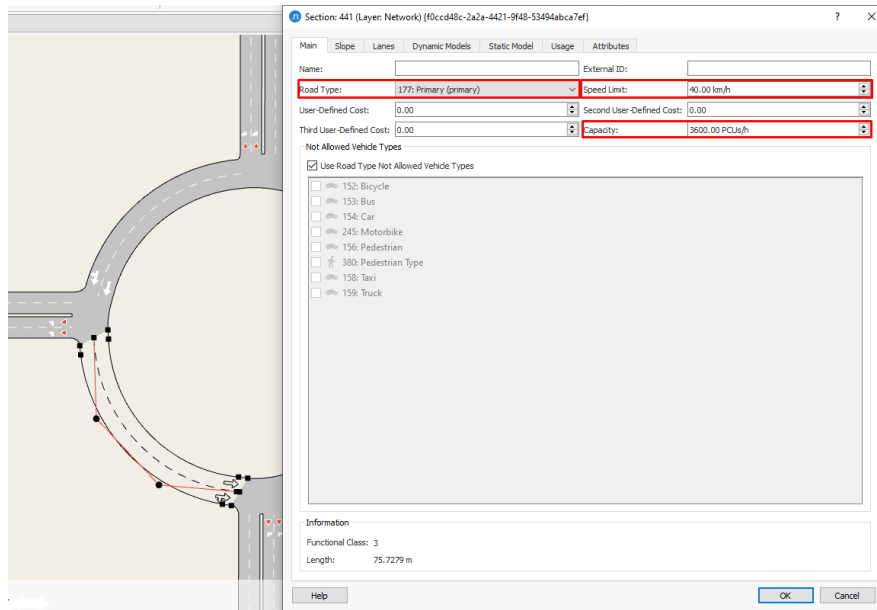


Εικόνα 3.18: Κυκλικός κόμβος δύο λωρίδων κυκλοφορίας στο Aimsun

Το πλάτος λωρίδας εντός του κυκλικού κόμβου είναι ίσο με 4,75 μέτρα, η μέγιστη ταχύτητα κυκλοφορίας εντός του κόμβου είναι ίση με 40 χλμ/ώρα και η χωρητικότητα είναι ίση με 3600 οχήματα/ώρα.

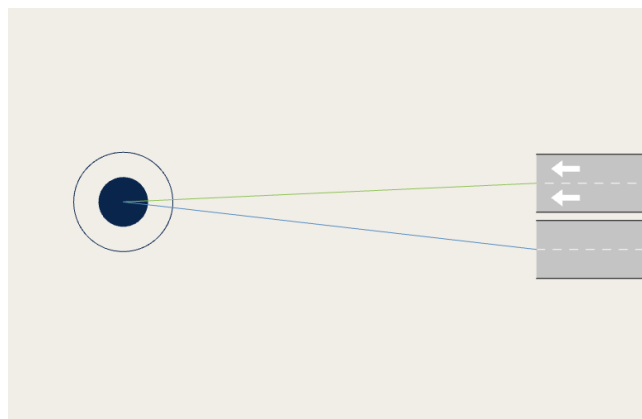


Εικόνα 3.19: Επιλογή πλάτους λωρίδας εντός του απλού κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων



Εικόνα 3.20: Επιλογή τύπου οδικού τμήματος, μέγιστης ταχύτητας και χωρητικότητας εντός του κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων κυκλοφορίας

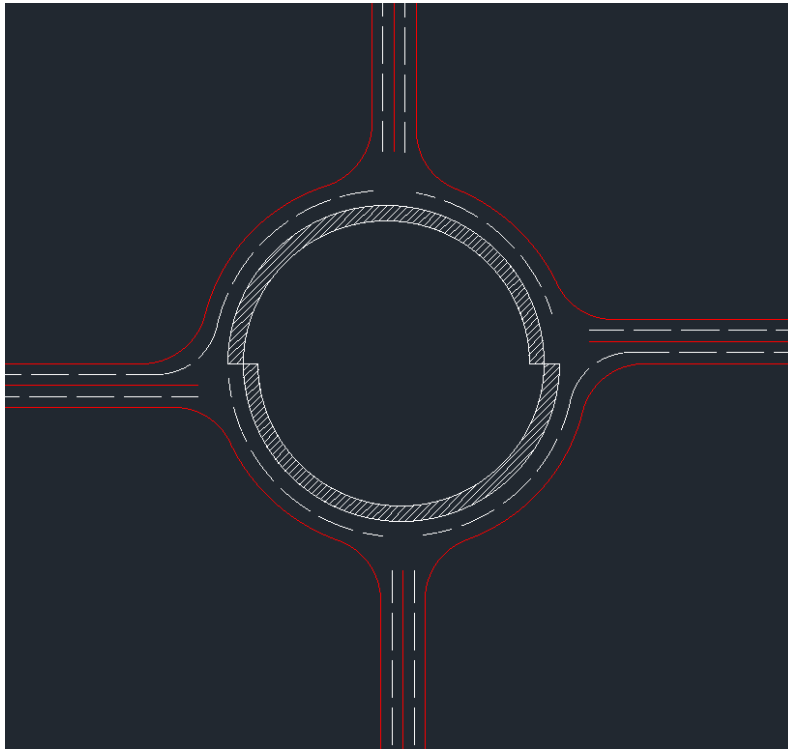
Τελευταίο στάδιο του γεωμετρικού σχεδιασμού απλού κυκλικού κόμβου με δύο λωρίδες κυκλοφορίας είναι, όπως προηγήθηκε και στον σχεδιασμό κυκλικού κόμβου με μία λωρίδα κυκλοφορίας, η δημιουργία του πίνακα προέλευσης – προορισμού με τη βοήθεια των κεντροειδών σημείων.



Εικόνα 3.21: Αναπαράσταση κεντροειδούς σημείου στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων

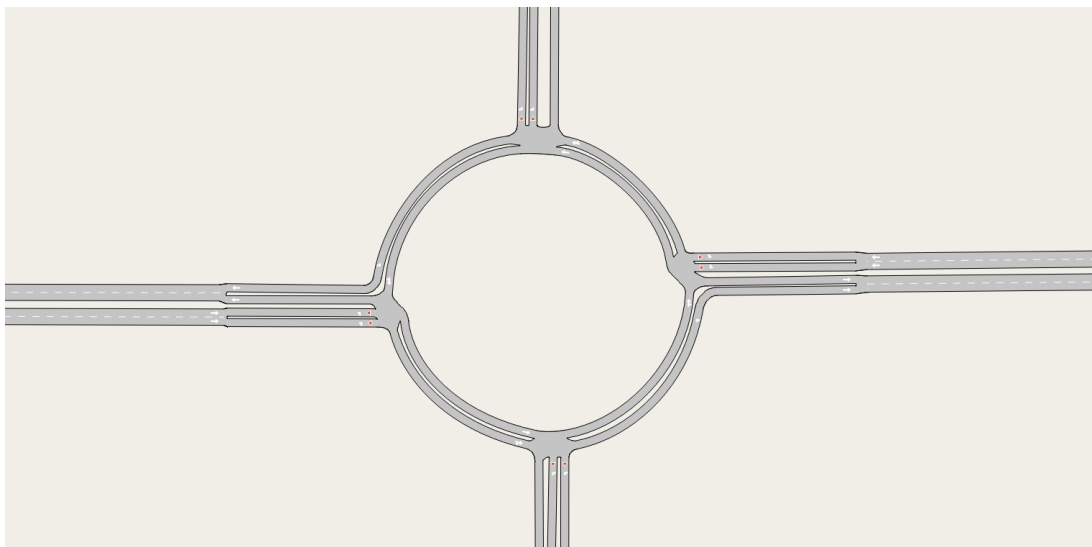
3.1.3 Σχεδιασμός σπειροειδή κυκλικού κόμβου

Η ειδική αυτή κατηγορία κυκλικού κόμβου, στην οποία πρόκειται να γίνει πλήρης ενδοσκόπηση στην παρούσα εργασία, σχεδιάστηκε αρχικά στο πρόγραμμα AutoCAD, με σκοπό να λειτουργήσει ως υπόβαθρο στο AIMSUN.



Εικόνα 3.22: Σχεδιασμός σπειροειδή κυκλικού κόμβου στο AutoCAD

Στη συνέχεια, έγινε η σχεδίαση του σπειροειδή κόμβου στο πρόγραμμα προσομοίωσης AIMSUN. Εδώ αξίζει να αναφερθεί πως η υλοποίηση αυτού του κόμβου είναι πιο ιδιαίτερη από αυτή ενός απλού κυκλικού κόμβου. Συγκεκριμένα, ο σπειροειδής κυκλικός κόμβος (turbo roundabout) σχεδιάστηκε με πρότυπο τον κυκλικό κόμβο που χρησιμοποιείται στην Ολλανδία (βλ. Εικόνα 2.16). Οι εισερχόμενοι οδηγοί οφείλουν να επιλέξουν την κατάλληλη λωρίδα στην οποία θα κινηθούν, προτού εισέλθουν στον κόμβο, ενώ οι αλλαγές στις λωρίδες κυκλοφορίας εντός του κόμβου είναι δυνατές μόνο στα σημεία εισόδου των επιμέρους κλάδων.

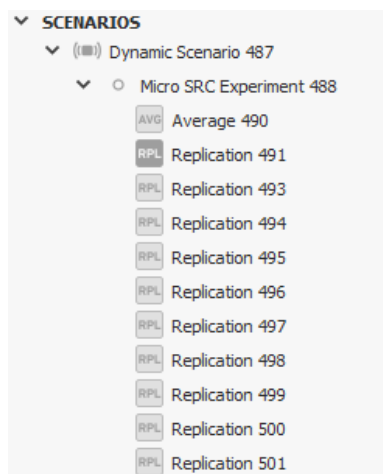


Εικόνα 3.23: Σπειροειδής κυκλικός κόμβος στο AIMSUN

Στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο το πλάτος λωρίδας τόσο στους κλάδους προσέγγισης όσο και εντός του κόμβου ορίστηκε να είναι ίσο με 3,5 μέτρα, η χωρητικότητα στους κλάδους είναι ίση με 3600 οχήματα/ώρα, ενώ εντός του κόμβου 1800 οχήματα/ώρα. Επιπλέον, το μήκος των οδικών τμημάτων ορίστηκε να είναι ίσο με 300 μέτρα. Η μέγιστη ταχύτητα στους κλάδους προσέγγισης ορίστηκε ίση με 50 χλμ/ώρα, ενώ κατά την είσοδο στον κυκλικό κόμβο είναι ίση με 40 χλμ/ώρα. Τέλος, η διαδικασία με τα τέσσερα κεντροειδή σημεία παραμένει η ίδια με τους προηγούμενους κόμβους.

3.2 Σχεδιασμός Σεναρίων

Βασικό στοιχείο της παρούσας εργασίας είναι η επιλογή των μεταβλητών και ο σχεδιασμός σεναρίων για την προσομοίωση του κυκλοφοριακού δικτύου για τους κυκλικούς κόμβους. Συγκεκριμένα, καθορίστηκαν δυναμικά σενάρια, που το καθένα περιέχει ένα πείραμα στο οποίο η επιλογή διαδρομής είναι στοχαστική και γι'αυτό υπάρχει κατάλληλο αριθμό αναπαραγωγών και έναν μέσο όρο αυτών. Από τις αναπαραγωγές αυτές λαμβάνεται υπόψη η τιμή του μέσου όρου και είναι και αυτή που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των αποτελεσμάτων του κάθε δυναμικού σεναρίου.



Εικόνα 3.24: Αναπαράσταση δυναμικού σεναρίου, πειράματος, μέσου όρου και αναπαραγωγών στο AIMSUN

Για να δημιουργηθεί το κάθε δυναμικό σενάριο είναι αναγκαίο να έχει προηγηθεί η υλοποίηση της κυκλοφοριακής ζήτησης (traffic demand), η οποία συνδέεται με το σενάριο αυτό. Από την άλλη, η κυκλοφοριακή ζήτηση αντλεί πληροφορίες από τον πίνακα προέλευσης – προορισμού, ο οποίος περιέχει τις παραγωγές και τις έλξεις κάθε ζώνης, δηλαδή πόσα οχήματα προέρχονται από ένα κεντροειδές σημείο και πόσοι έλκονται από αυτό. Μέσα στον

πίνακα προέλευσης – προορισμού καθορίζεται η ώρα εκκίνησης της προσομοίωσης, η διάρκεια της προσομοίωσης και ο τύπος των οχημάτων που θα περιέχει το οδικό δίκτυο.

OD Matrix: 906, Name: Total matrix {34f5e803-5d37-42f5-8894-f87ae4042c59} (Centroid Configuration: 893: Centroid Configuration 893)

Main Cells Histogram Path Assignment Parameters

Name: Total matrix External ID:

Contents: Trips Component: None

Initial Time: 08:00:00 Duration: 01:00:00

Unit: Vehicles Car Availability: No Distinction

Vehicle Type: 154: Car Trip Purpose: None

Store Location

Where: Aimsun

Summary

Origins: 4 Destinations: 4 Empty Cells: 4 Non-Empty Cells: 12

Total: 1000.00 Minimum Value (≠0): 40.00 Maximum Value: 150.00 Diagonal Total: 0.00

Help Duplicate OK Cancel

Εικόνα 3.25: Καθορισμός ώρας εκκίνησης, διάρκειας προσομοίωσης και τύπου οχήματος

OD Matrix: 906, Name: Total matrix {34f5e803-5d37-42f5-8894-f87ae4042c59} (Centroid Configuration: 893: Centroid Configuration 893)

Main Cells Histogram Path Assignment Parameters

Headers: ID: Name Grouping Category: None

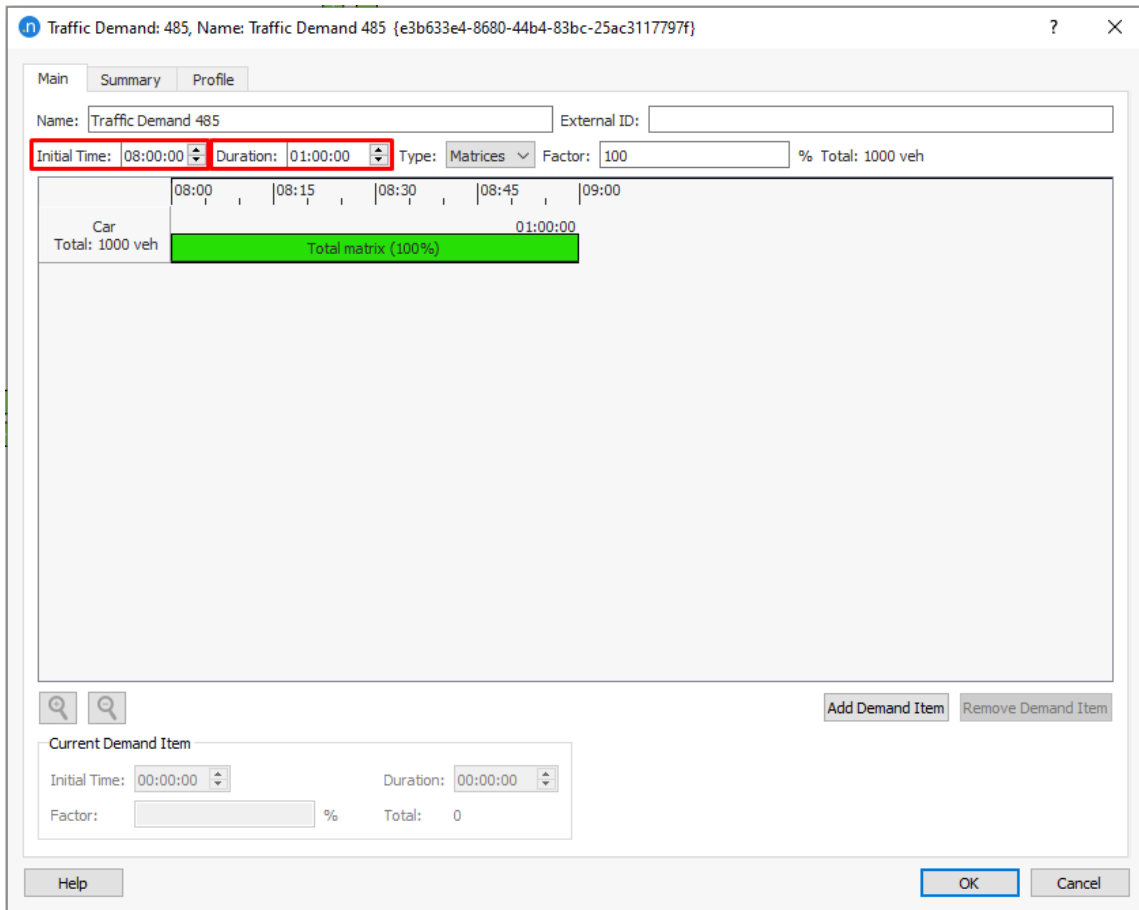
Show All Centroids Hide Empty Rows Hide Empty Columns Draw Desire Lines

	894: West	897: East	900: North	903: South	Total
894: West		150	60	90	300
897: East	150		90	60	300
900: North	60	40		100	200
903: South	40	60	100		200
Total	250	250	250	250	1000

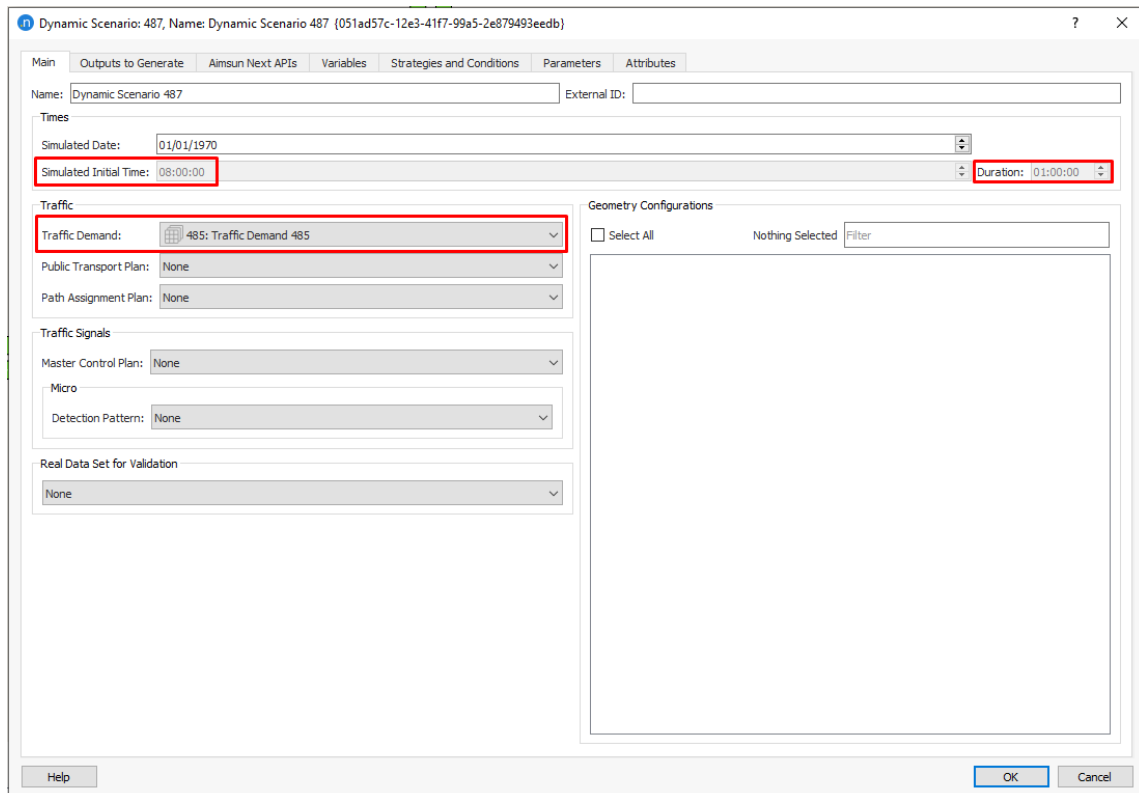
Operation: None

Help Duplicate OK Cancel

Εικόνα 3.26: Παράδειγμα πίνακα προέλευσης – προορισμού



Εικόνα 3.27: Πληροφορίες κυκλοφοριακής ζήτησης



Εικόνα 3.28: Πληροφορίες δυναμικού σεναρίου

Για τον καθορισμό των σεναρίων διερεύνησης επιλέχθηκαν οι παρακάτω μεταβλητές:

1. **Κυκλοφοριακός φόρτος**, ώστε να αναλυθεί η ανταπόκριση κάθε κόμβου τόσο σε συνθήκες ελεύθερης ροής όσο και σε καταστάσεις κορεσμού.
2. **Κατανομή φόρτου στις τρεις προσβάσεις**. Ανάλογα με το ποσοστό των οχημάτων που κατανέμονται στο δίκτυο θα αναλυθεί πόσο καταπονείται το δίκτυο.
3. **Παράμετρος ευαισθησίας (Sensitivity factor)** το οποίο πρόκειται για το πόσο «ευαίσθητος» είναι ο οδηγός στην επιβράδυνση του προπορευόμενου οχήματος και σχετίζεται με θέμα αποδοχής διακένου.

3.2.1 Προσδιορισμός τιμών σεναρίων προσομοίωσης

Σε αυτή την υποενότητα αναλύεται πως προσδιορίστηκαν οι τιμές, τα βήματα και οι ακραίες τιμές για συγκεκριμένα μεγέθη της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές προσομοιώσεις για τον καθορισμό των παρακάτω στοιχείων:

- α. Κυκλοφοριακός φόρτος του κόμβου
- β. Αριθμός επαναλήψεων – αναπαραγωγών (replications) για κάθε δυναμικό σενάριο
- γ. Ποσοστά κινήσεων δεξιάς στροφής
- δ. Ακραίες τιμές της παραμέτρου ευαισθησίας

Δοκιμές κυκλοφοριακού φόρτου

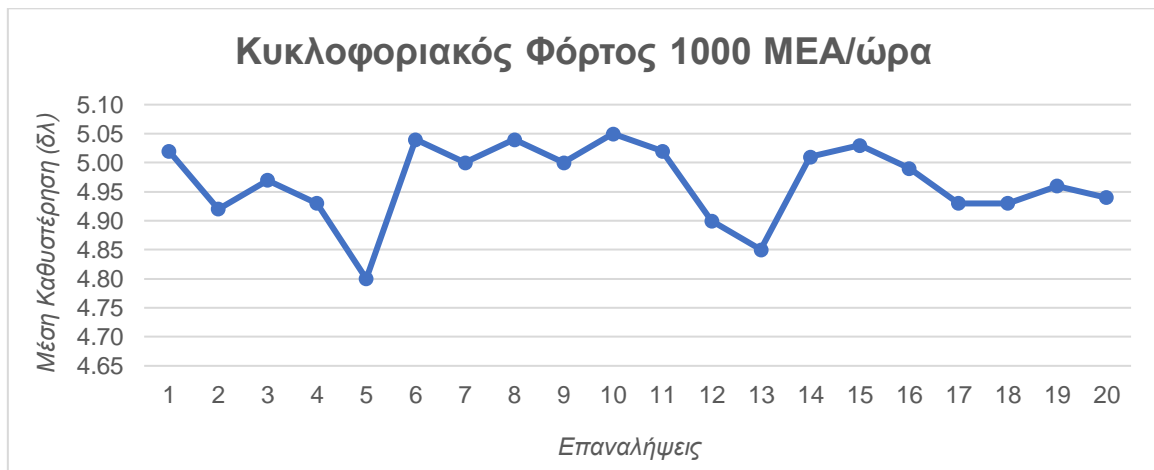
Ένα από τα μεγέθη που μελετήθηκαν για την απόδοση του κόμβου ήταν ο κυκλοφοριακός φόρτος. Το δίκτυο φορτίστηκε με ποικίλες τιμές, ώστε να προσδιοριστεί ο χαμηλός, ο μεσαίος, ο υψηλός και ο πολύ υψηλός κυκλοφοριακός φόρτος. Με βάση την έρευνα των Dabiri et al. (2020), η οποία αναλύθηκε στην υποενότητα 2.6., επιλέχθηκε ο κυκλοφοριακός φόρτος για τον απλό κυκλικό κόμβο με μία λωρίδα κυκλοφορίας να είναι από 1000 ΜΕΑ/ώρα έως 3000 ΜΕΑ/ώρα με βήμα 500, ενώ τόσο για τον απλό κυκλικό κόμβο με δύο λωρίδες κυκλοφορίας όσο και για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο να είναι από 2000 ΜΕΑ/ώρα έως 4000 ΜΕΑ/ώρα με βήμα 500.

Δοκιμές για τον αριθμό των επαναλήψεων

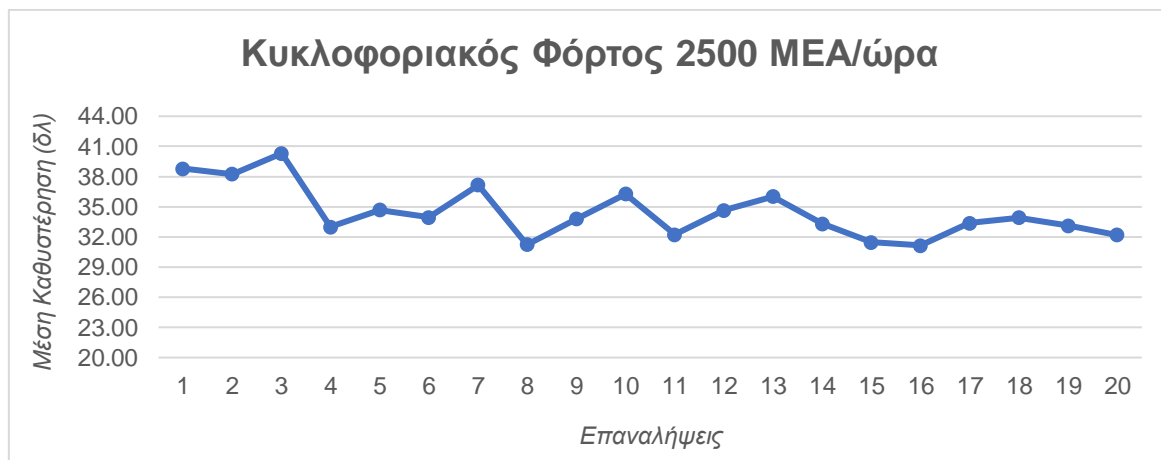
Αρχικά, χρήζει άμεσου προσδιορισμού ο αριθμός των επαναλήψεων της προσομοίωσης ενός σεναρίου. Πιο συγκεκριμένα, ένας χαμηλός αριθμός επαναλήψεων έχει ως αποτέλεσμα ταχύτερα, αλλά και λιγότερο ακριβή αποτελέσματα. Αντιθέτως, ένας υψηλός αριθμός επαναλήψεων θα αυξάνει τόσο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων όσο και τον χρόνο προσομοίωσης. Συνεπώς, αξιόπιστα αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν μόνο με την πραγματοποίηση πολλών (πάνω από μίας) επαναλήψεων. Αυτό επιτεύχθηκε με την

πραγματοποίηση πολλαπλών προσομοιώσεων, για τον υπολογισμό του αριθμού των επαναλήψεων που απαιτούνται ώστε η μέση καθυστέρηση να συγκλίνει, δηλαδή να μην εμφανίζει μεγάλες μεταβολές από μία επανάληψη στην άλλη.

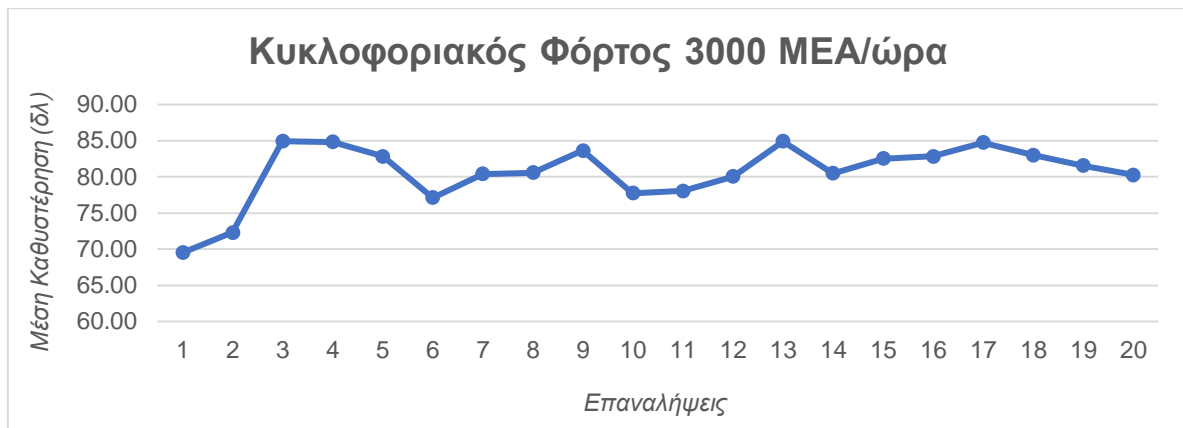
Όπως είναι φυσικό επόμενο, πραγματοποιήθηκαν 20 επαναλήψεις και ως μέγεθος ελέγχου ορίστηκε η μέση καθυστέρηση. Οι προσομοιώσεις αυτές έγιναν με χαμηλό, μεσαίο και υψηλό φόρτο κυκλοφορίας και, με κριτήριο το μέγεθος της μέσης καθυστέρησης, αναλύθηκαν τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Γενικότερα παρατηρείται διακύμανση των τιμών και στις τρεις κατηγορίες τιμών του φόρτου. Οι τιμές της μέσης καθυστέρησης σταθεροποιούνται από την 15^η επανάληψη, όμως για κυκλοφοριακό φόρτο 1000 οχήματα/ώρα η διακύμανση αυτή συνεχίζεται και οι τιμές της μέσης καθυστέρησης συγκλίνουν μεταξύ μετά την 16^η επανάληψη. Με βάση τα παραπάνω στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν και οι 20 επαναλήψεις.



Διάγραμμα 3-1: Ανάλυση κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας με χαμηλό φόρτο ως προς τις 20 επαναλήψεις



Διάγραμμα 3-2: Ανάλυση κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας με μεσαίο φόρτο ως προς τις 20 επαναλήψεις



Διάγραμμα 3-3: Ανάλυση κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας με υψηλό φόρτο ως προς τις 20 επαναλήψεις

Δοκιμές για τα ποσοστά στρεφουσών

Σημαντική παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί είναι η κατανομή των φόρτων στις επί μέρους προσβάσεις των κόμβων. Στην διεθνή βιβλιογραφία τονίζεται πως οι σπειροειδείς κυκλικοί κόμβοι πλεονεκτούν ως προς την πρώτη έξοδο που επιλέγουν οι οδηγοί, δηλαδή τη δεξιά στροφή. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν διάφορα ποσοστά κινήσεων για την δεξιά στροφή, με αποτέλεσμα να προκύψουν οι τελικές τιμές. Έγιναν προσομοιώσεις για χαμηλό και υψηλό φόρτο και τα αποτελέσματα ήταν τα εξής:

Πίνακας 3.1: Ανάλυση απλού κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας κυκλοφορίας με χαμηλό και υψηλό φόρτο ως προς τα ποσοστά κινήσεων δεξιάς στροφής

Με 20 επαναλήψεις - replications				
Ποσοστό Στρεφουσών	Χαμηλός Φόρτος		Υψηλός Φόρτος	
	Μέση Καθυστέρηση	Μεταβολή %	Μέση Καθυστέρηση	Μεταβολή %
20%	4.94		80.25	
25%	4.93	-0.20	89.35	11.34
30%	4.91	-0.41	91.53	2.44
35%	4.74	-3.46	80.99	-11.52
40%	4.83	1.90	80.73	-0.32
45%	4.75	-1.66	65.55	-18.80
50%	4.68	-1.47	56.18	-14.29
55%	4.72	0.85	52.38	-6.76
60%	4.73	0.21	34.90	-33.37

Να σημειωθεί πως οι παραπάνω τιμές αναφέρονται για τη δεξιά στροφή και εφαρμόστηκαν στον απλό κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας. Με βάση τα αποτελέσματα, παρατηρήθηκε πως υπάρχει μεταβολή ανά 10% των ποσοστών μεταξύ τους και πως για ποσοστό 60% με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο η μεταβολή είναι πολύ υψηλή. Επομένως, κρίθηκαν αναγκαία να εξεταστούν οι τιμές 20%, 30%, 40%, 50% και 60%.

Δοκιμές για τις ακραίες τιμές της παραμέτρου ευαισθησίας

Η παράμετρος ευαισθησίας (sensitivity factor) συναντάται στο μοντέλο ακολουθίας οχήματος (car-following model) και, όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, συσχετίζει τις επιβραδύνσεις, μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων και τη συμπεριφορά του ακολουθούντος οχήματος σε σχέση με το προπορευόμενο. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος που ορίζεται και συναντάται στο λογισμικό AIMSUN:

$$d'(n - 1) = d(n - 1) * a$$

όπου:

d' : η επιβράδυνση (deceleration) του προπορευόμενου οχήματος συναρτήσει του a

d : η επιβράδυνση (deceleration) του οχήματος n

n : ο φυσικός αύξων αριθμός οχημάτων

a : η παράμετρος ευαισθησίας

Στη συνέχεια, αναλόγως με την τιμή που λαμβάνει η παράμετρος ευαισθησίας a λαμβάνονται διαφορετικά αποτελέσματα. Ειδικότερα, όταν η τιμή της παραμέτρου a είναι μικρότερη του 1, τότε το ακόλουθο όχημα υποτιμά την επιβράδυνση του προπορευόμενου οχήματος και, κατά συνέπεια, το όχημα γίνεται πιο «επιθετικό», μειώνοντας την απόσταση από αυτό. Αντίθετα, όταν η τιμή της παραμέτρου a είναι μεγαλύτερη του 1, τότε το ακόλουθο όχημα υπερτιμά την επιβράδυνση του προπορευόμενου οχήματος, άρα γίνεται πιο «προσεκτικό», αυξάνοντας την απόσταση του από αυτό.

Για την εύρεση του άνω ορίου και ακραίας τιμής της παραμέτρου ευαισθησίας επιλέχθηκαν να μελετηθούν οι τιμές 1.5, 2, 2.5 και 5. Όπως φαίνεται και στον πίνακα παρακάτω, οι τιμές άνω του 1.5 δεν λαμβάνονται υπόψη στις μετέπειτα προσομοιώσεις, διότι αυξάνεται απότομα η μέση καθυστέρηση και επιβαρύνεται σημαντικά το οδικό δίκτυο.

Πίνακας 3.2: Ανάλυση ακραίων τιμών της παραμέτρου ευαισθησίας για χαμηλό ποσοστό δεξιάς στροφής

Για ποσοστό δεξιάς στροφής 20%				
Sensitivity Factor	Χαμηλός Φόρτος		Υψηλός Φόρτος	
	Μέση Καθυστέρηση	Μεταβολή %	Μέση Καθυστέρηση	Μεταβολή %
1.5	4.88		99.23	
2.0	4.98	2.05	103.18	3.98
2.5	5.03	1.00	105.52	2.27
5.0	5.15	2.39	108.58	2.90

Πίνακας 3.3: Ανάλυση ακραίων τιμών της παραμέτρου ευαισθησίας για υψηλό ποσοστό δεξιάς στροφής

Για ποσοστό δεξιάς στροφής 60%				
Sensitivity Factor	Χαμηλός Φόρτος		Υψηλός Φόρτος	
	Μέση Καθυστέρηση	Μεταβολή %	Μέση Καθυστέρηση	Μεταβολή %
1.5	4.88		44.24	
2.0	4.98	2.05	49.14	11.08
2.5	5.02	0.80	51.99	5.80
5.0	5.15	2.59	54.70	5.21

Τέλος, οι τελικές τιμές που επιλέχθηκαν να μελετηθούν για την παράμετρο ευαισθησίας ήταν από 0,5 έως 1,5 με βήμα 0,25.

3.2.2 Σενάρια Προσομοίωσης

Κόμβοι

Στην παρούσα υποενότητα, λαμβάνοντας υπόψη τις δοκιμές που προηγήθηκαν, σχεδιάζονται τα τελικά σενάρια. Οι τρεις τύποι κόμβων που σχεδιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τα σενάρια προσομοιώσεων είναι οι απλοί τετρασκελείς κυκλικοί κόμβοι, ο ένας με μία λωρίδα κυκλοφορίας και ο άλλος με δύο λωρίδες κυκλοφορίας, και ο σπειροειδής κυκλικός κόμβος (Turbo Roundabout). Μεταξύ αυτών των τριών τύπων κόμβου γίνεται η σύγκριση όσον αφορά τη μέση καθυστέρηση, τη μέση ταχύτητα και τον μέσο χρόνο μετακίνησης.

Πίνακας 3.4: Σενάρια τύπων κυκλικών κόμβων

Σενάριο	Κόμβος
1	Απλός τετρασκελής κυκλικός κόμβος με μία λωρίδα κυκλοφορίας
2	Απλός τετρασκελής κυκλικός κόμβος με δύο λωρίδες κυκλοφορίας
3	Σπειροειδής κυκλικός κόμβος (Turbo Roundabout)

Κυκλοφοριακός Φόρτος

Οι διαφορετικές συνθήκες κυκλοφορίας επηρεάζουν και μεταβάλλουν άμεσα την απόδοση ενός κυκλικού κόμβου. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με βάση την εργασία των Dabiri et al. (2020), όπου για τον απλό κυκλικό κόμβο με μία λωρίδα κυκλοφορίας ο συνολικός κυκλοφοριακός φόρτος κυμαίνεται από 1000 ΜΕΑ/ώρα έως 3000 ΜΕΑ/ώρα με βήμα 500, ενώ για τον απλό κυκλικό κόμβο με δύο λωρίδες κυκλοφορίας όσο και για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο είναι από 2000 ΜΕΑ/ώρα έως 4000 ΜΕΑ/ώρα με βήμα 500. Ο λόγος που στους δύο τελευταίους κόμβους ο φόρτος διπλασιάζεται είναι λόγω των επιπλέον

λωρίδων κυκλοφορίας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των κυκλοφοριακών φόρτων που λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 3.5: Σενάρια κυκλοφοριακών φόρτων

Κυκλοφοριακός Φόρτος (οχήματα/ώρα)			
Σενάριο	Απλός κυκλικός κόμβος με μία λωρίδα	Απλός κυκλικός κόμβος με δύο λωρίδες	Σπειροειδής κυκλικός κόμβος
1	1000	2000	2000
2	1500	2500	2500
3	2000	3000	3000
4	2500	3500	3500
5	3000	4000	4000

Ποσοστά κινήσεων δεξιάς στροφής

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη υποενότητα, το ποσοστό κινήσεων για την δεξιά στροφή επιλέχθηκε να μελετηθεί η διακύμανση της μέσης καθυστέρησης, της μέσης ταχύτητας και του χρόνου μετακίνησης για τις ποικίλες τιμές των ποσοστών. Με βάση τις δοκιμές που έγιναν στις προσομοιώσεις, οι τελικές τιμές των ποσοστών είναι οι εξής:

Πίνακας 3.6: Σενάρια ποσοστά δεξιάς στροφής

Σενάριο	Ποσοστά δεξιάς στροφής
1	20%
2	30%
3	40%
4	50%
5	60%

Όσον αφορά τις υπόλοιπες κινήσεις στους κόμβους, δηλαδή την ευθεία κίνηση και την αριστερή στροφή, έγινε παραδοχή ότι τα ποσοστά τους θα κυμαίνονται ως εξής:

Πίνακας 3.7: Σενάρια ποσοστών για τις τρεις προσβάσεις

Σενάριο	Ποσοστά δεξιάς στροφής	Ποσοστά ευθείας κίνησης	Ποσοστά αριστερής στροφής
1	20%	50%	30%
2	30%	45%	25%
3	40%	40%	20%
4	50%	35%	15%
5	60%	30%	10%

Παράμετρος ευαισθησίας

Η παράμετρος ευαισθησίας συναντάται στο μοντέλο ακολουθίας οχήματος και συσχετίζεται με τη συμπεριφορά του οδηγού. Με βάση τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, το εύρος τιμών της παραμέτρου που επιλέχθηκε είναι από 0.50 έως 1.50 με βήμα 0.25, ώστε να συμπεριληφθεί η τιμή 1.00. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συγκεντρωτικά οι τιμές της παραμέτρου ευαισθησίας:

Πίνακας 3.8: Σενάρια παραμέτρου ευαισθησίας

Σενάριο	Παράμετρος ευαισθησίας
1	0.50
2	0.75
3	1.00
4	1.25
5	1.50

Έχοντας καταλήξει στα σενάρια προσομοίωσης, που αναφέρθηκαν παραπάνω, προκύπτει ο ακόλουθος συγκεντρωτικός πίνακας με αυτά:

Πίνακας 3.9: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα τελικά σενάρια προσομοίωσης

Τύποι Κόμβων	Κυκλοφοριακός Φόρτος (ΜΕΑ/ώρα)	Ποσοστά δεξιάς στροφής	Παράμετρος Ευαισθησίας
Απλός κυκλικός κόμβος με μία λωρίδα κυκλοφορίας	1000	20%	0.50
	1500	30%	0.75
	2000	40%	1.00
	2500	50%	1.25
	3000	60%	1.50
Απλός κυκλικός κόμβος με δύο λωρίδες κυκλοφορίας	2000	20%	0.50
	2500	30%	0.75
	3000	40%	1.00
	3500	50%	1.25
	4000	60%	1.50
Σπειροειδής κυκλικός κόμβος	2000	20%	0.50
	2500	30%	0.75
	3000	40%	1.00
	3500	50%	1.25
	4000	60%	1.50

Σύμφωνα με τον πίνακα 3.9 και συγκεκριμένα τις τρεις τελευταίες στήλες, προκύπτουν ότι κάθε κόμβος έχει $5*5*5=125$ συνδυασμούς σεναρίων, δηλαδή 5 σεσάρια για τον φόρτο, 5 σεσάρια για τα ποσοστά δεξιάς στροφής και 5 σεσάρια για την παράμετρο ευαισθησίας. Επομένως, τα 125 σεσάρια εφαρμόστηκαν στους 3 κυκλικούς κόμβους, άρα σύνολο είναι $125*3= 375$ σεσάρια προσομοίωσης. Τέλος, είναι αναγκαίο να αναφερθεί πως για κάθε δυναμικό σεσάριο εκτελέστηκαν 20 επαναλήψεις (replications) και τα αποτελέσματα που αξιολογούνται αποτελούν τον μέσο όρο των τιμών που προκύπτουν από τις επαναλήψεις αυτές.

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Γενικά Στοιχεία

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο, μετά την ολοκλήρωση των 375 σεναρίων προσομοίωσης για τους τρεις κυκλικούς κόμβους, πραγματεύεται την ανάλυση και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η ανάλυση των κόμβων έγινε ανά πρόσβαση, δηλαδή ξεχωριστά για τη βόρεια, τη νότια, τη δυτική και την ανατολική πρόσβαση, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για τα σενάρια προσομοίωσης.

Τα σενάρια προσομοίωσης αξιολογήθηκαν με βάση τρία μεγέθη:

1. Την μέση καθυστέρηση
2. Την μέση ταχύτητα
3. Τον μέσο χρόνο μετακίνησης

Η ανάλυση για κάθε κόμβο πραγματοποιήθηκε ανά πρόσβαση και για κάθε προσομοίωση μια παράμετρος μεταβαλλόταν, ενώ οι άλλες δύο παρέμεναν σταθερές, και ούτω καθεξής. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν με τη μορφή διαγραμμάτων, ώστε να γίνονται πιο κατανοητά.

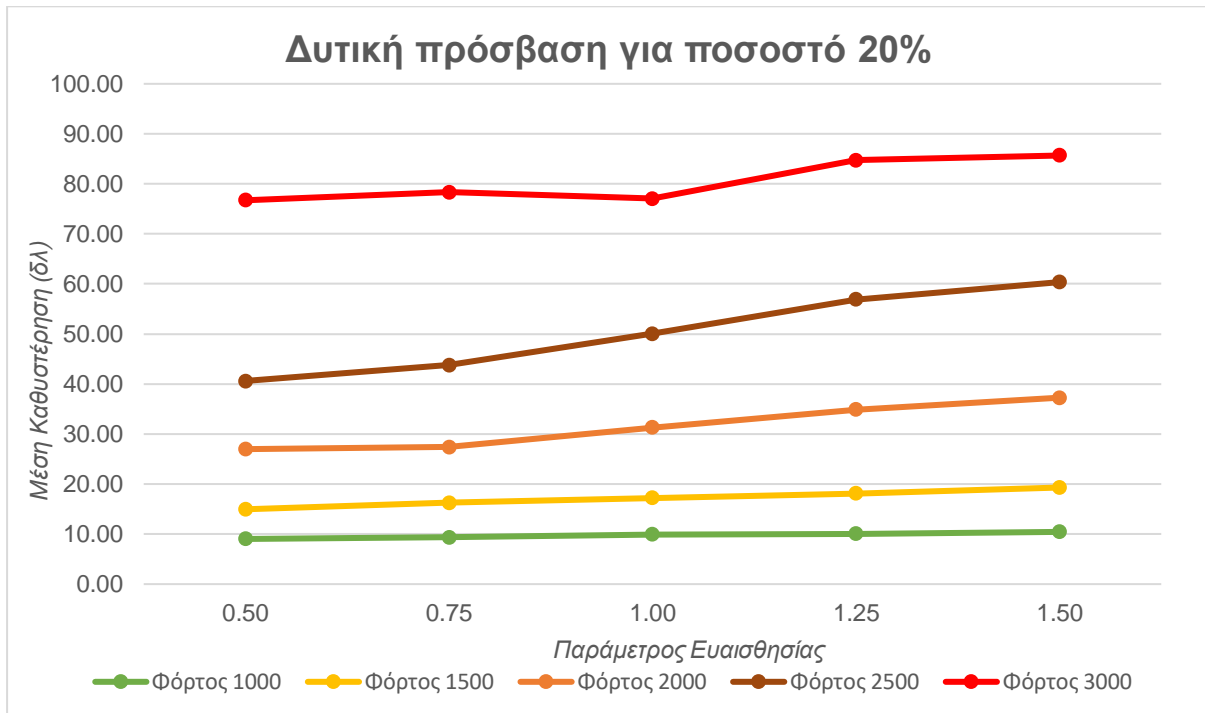
4.2 Ανάλυση απλού κυκλικού κόμβου με μία λωρίδα κυκλοφορίας

Στον συγκεκριμένο κυκλικό κόμβο πραγματοποιήθηκε ανάλυση ανά πρόσβαση με κριτήρια τη μέση καθυστέρηση, την ταχύτητα και τον χρόνο μετακίνησης. Πρώτο βήμα της ανάλυσης είναι να παραμένει σταθερό το ποσοστό δεξιάς στροφής και να μεταβάλλεται η παράμετρος ευαισθησίας, ενώ παράλληλα εξετάζονται όλες οι τιμές του κυκλοφοριακού φόρτου ως προς τη μέση καθυστέρηση.

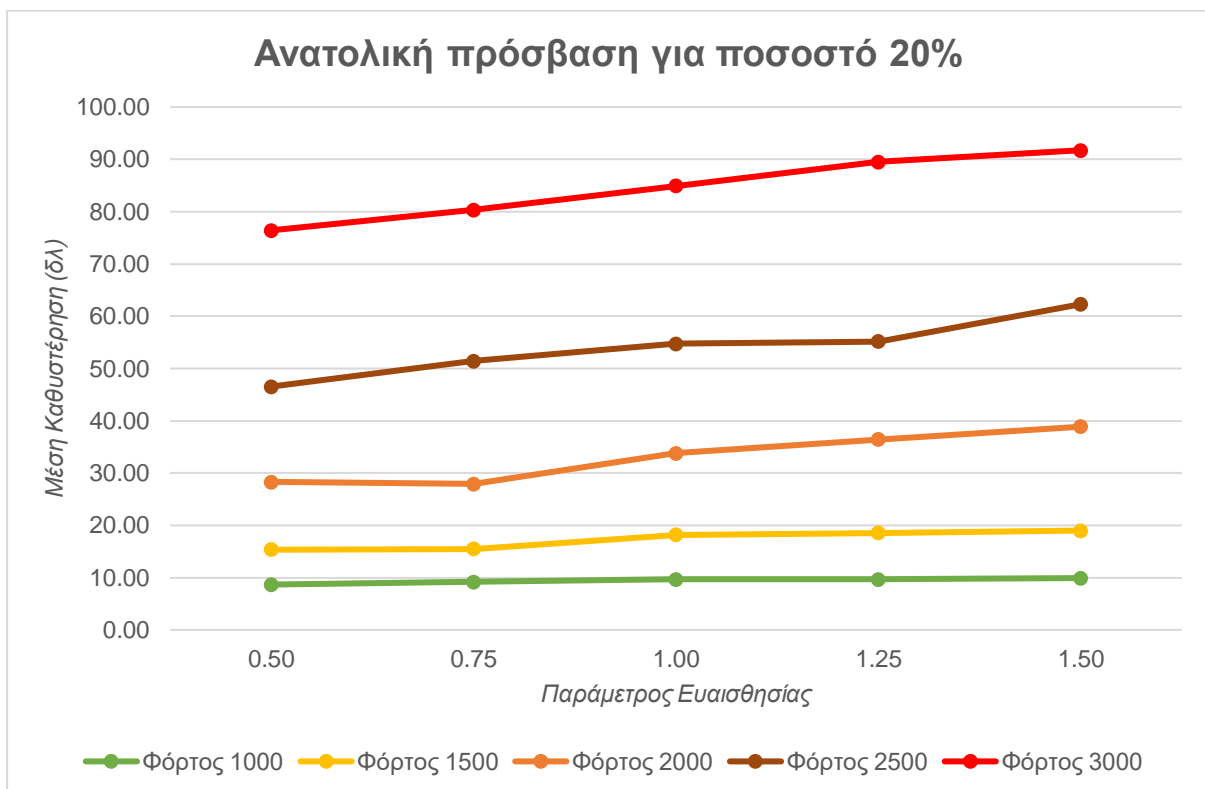
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η εξαγόμενη μέση καθυστέρηση με μεταβολή της παραμέτρου ευαισθησίας και, ταυτόχρονα, έχοντας σταθερό το ποσοστό της δεξιάς στροφής. Επιπλέον, όπως προαναφέρθηκε, τα διαγράμματα αποτυπώνουν την ανάλυση του κυκλικού κόμβου ανά πρόσβαση.

Αρχικά, παρατηρείται στους κύριους κλάδους, δηλαδή στη δυτική και στην ανατολική πρόσβαση, εκεί όπου ο επιμέρους φόρτος είναι υψηλότερος σε σχέση με τους δευτερεύοντες

κλάδους, η μέση καθυστέρηση να αυξάνεται όταν οι τιμές του κυκλοφοριακού φόρτου και της παραμέτρου ευαισθησίας μεταβάλλονται.

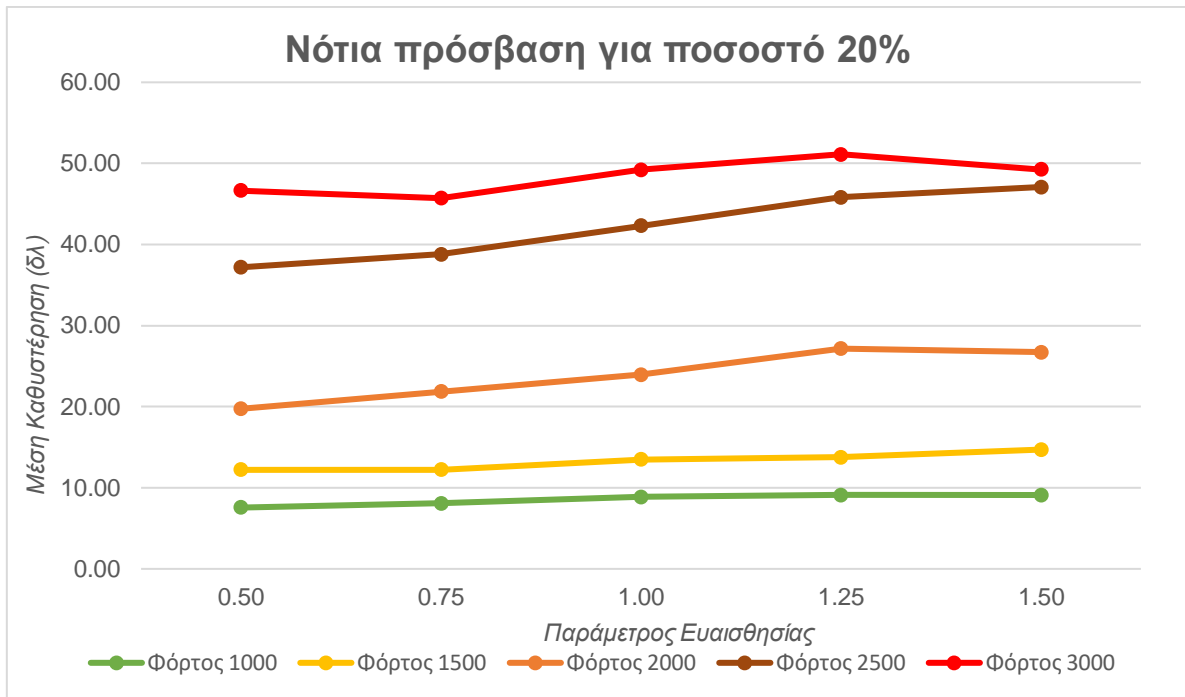


Διάγραμμα 4-1: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%

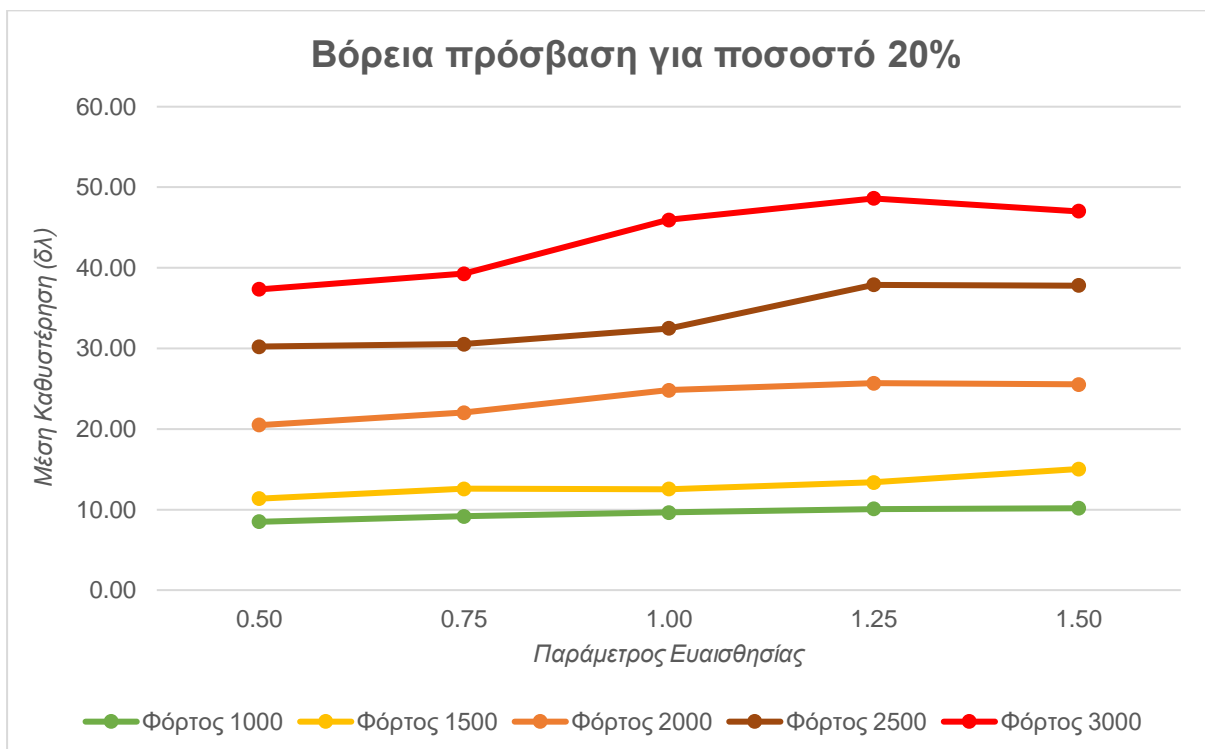


Διάγραμμα 4-2: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%

Όσον αφορά τους δευτερεύοντες κλάδους, τη νότια και τη βόρεια, παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση στη μέση καθυστέρηση, όμως οι τιμές της είναι χαμηλότερες σε σχέση με αυτές των κύριων κλάδων.

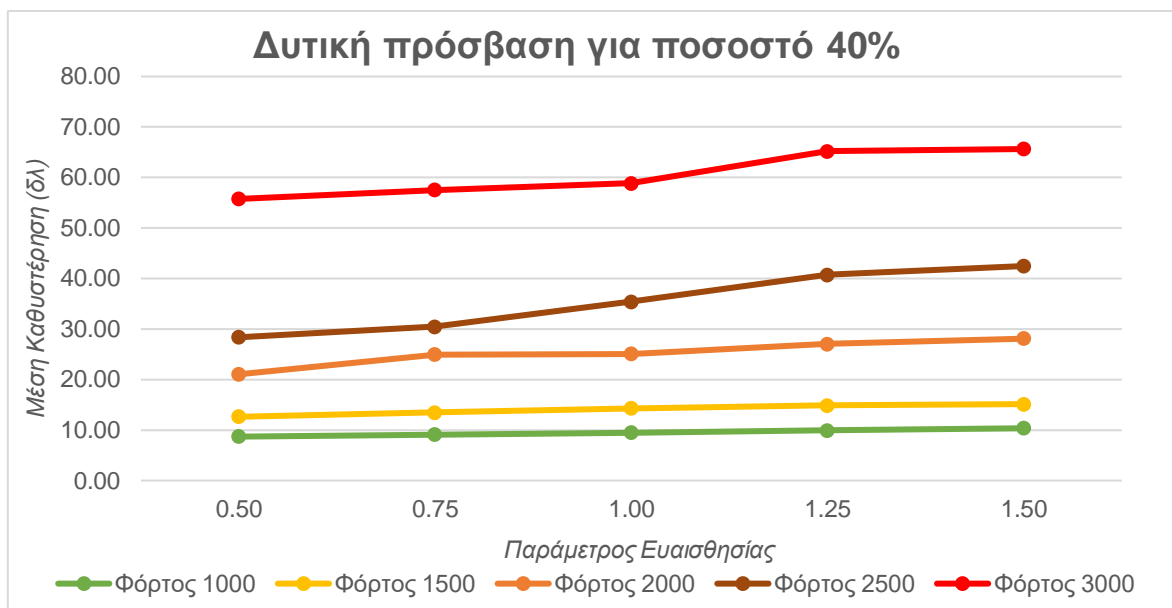


Διάγραμμα 4-3: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%

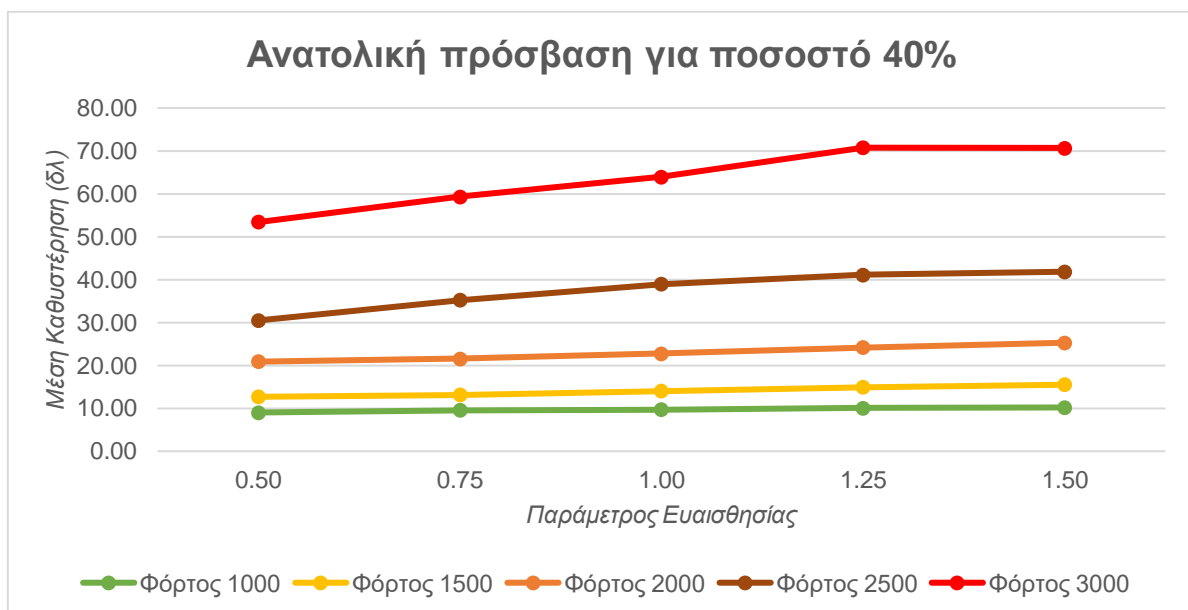


Διάγραμμα 4-4: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%

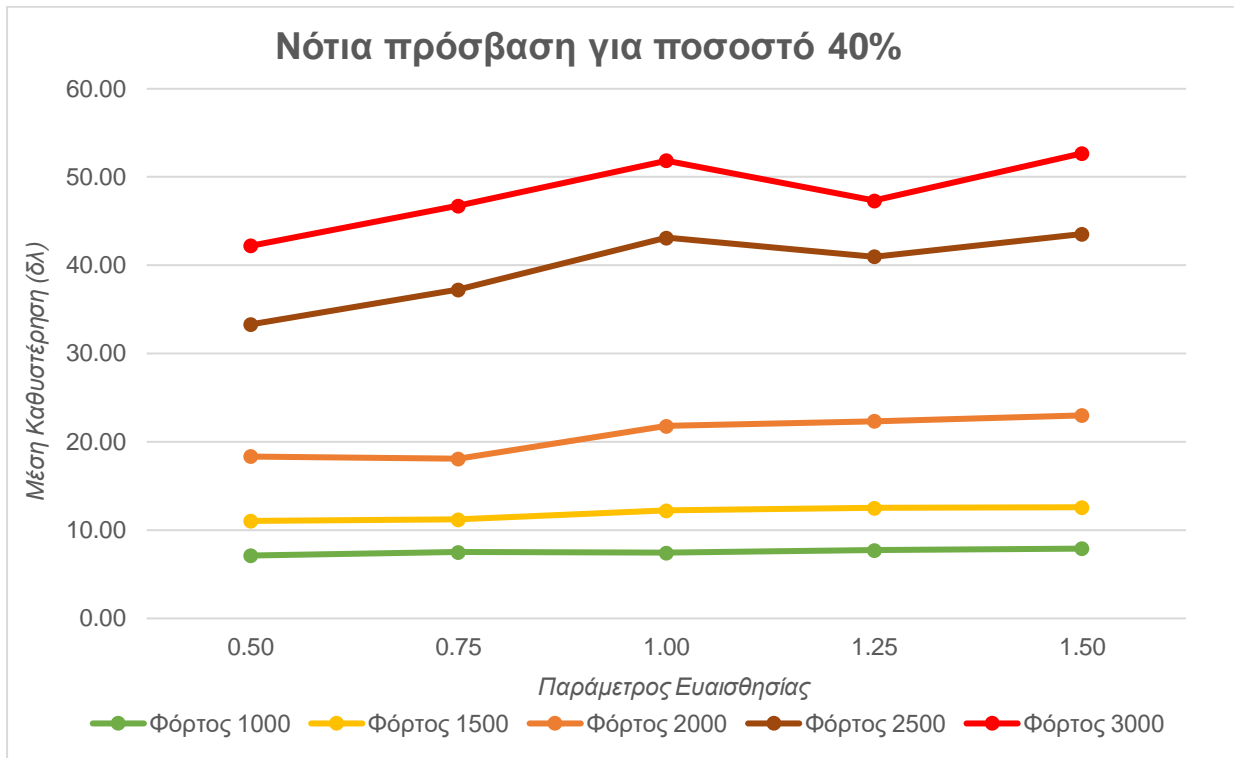
Όσο αυξάνεται το ποσοστό δεξιάς στροφής, διαπιστώνεται πως η μέση καθυστέρηση ελαττώνεται και στις τέσσερις προσβάσεις, καθώς οι οδηγοί που εισέρχονται στον κυκλικό κόμβο και επιθυμούν να βγουν στην πρώτη έξοδο βοηθούν στο να αποφορτιστεί το δίκτυο. Επιπλέον, οι ταχύτητες που αναπτύσσονται μέσα στον κόμβο αυξάνονται διότι είναι λιγότερα τα οχήματα μέσα στον κόμβο, ενώ ο μέσος χρόνος μετακίνησης για μεγάλα ποσοστά δεξιάς στροφής είναι μικρότερος σε σχέση με αυτά των μικρών ποσοστών. Ενδεικτικά παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των τεσσάρων προσβάσεων για ποσοστό δεξιάς στροφής 40% και 60%.



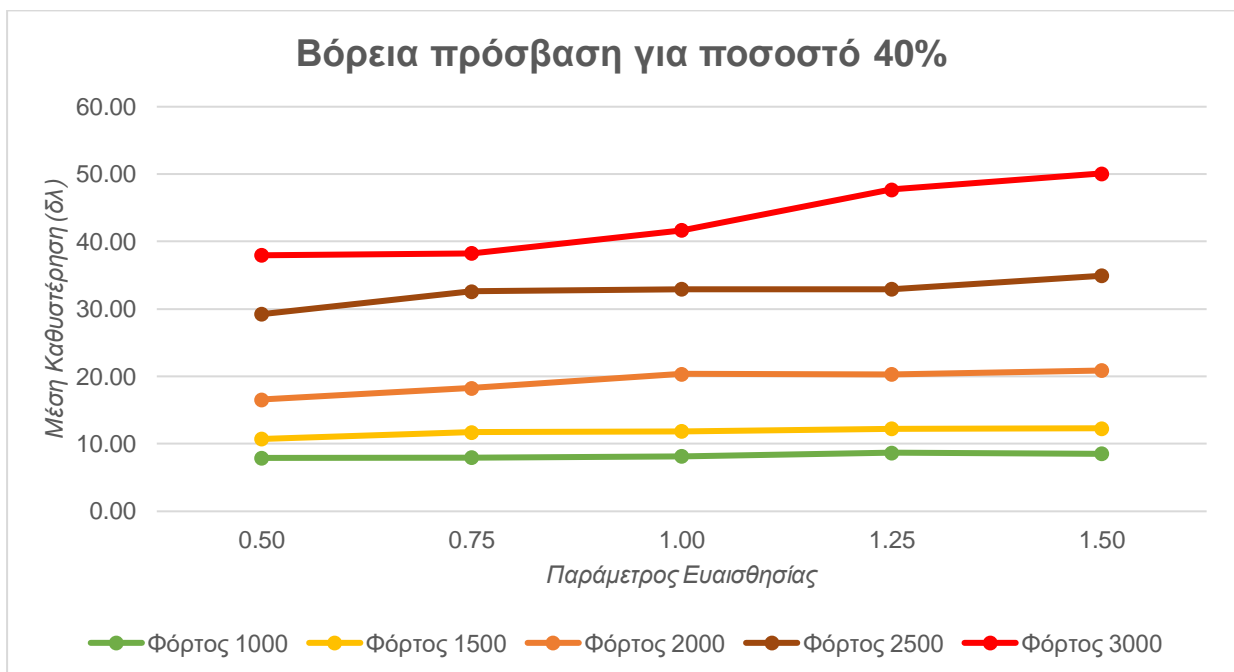
Διάγραμμα 4-5: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%



Διάγραμμα 4-6: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%

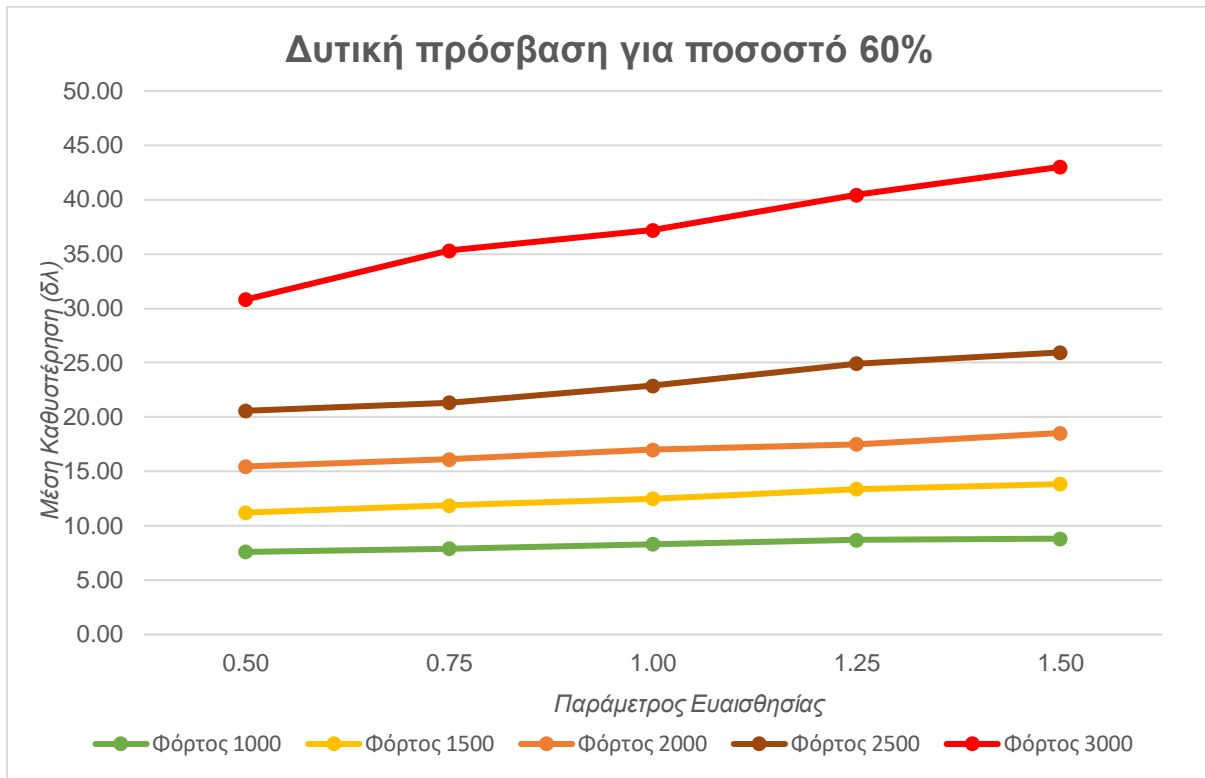


Διάγραμμα 4-7: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%

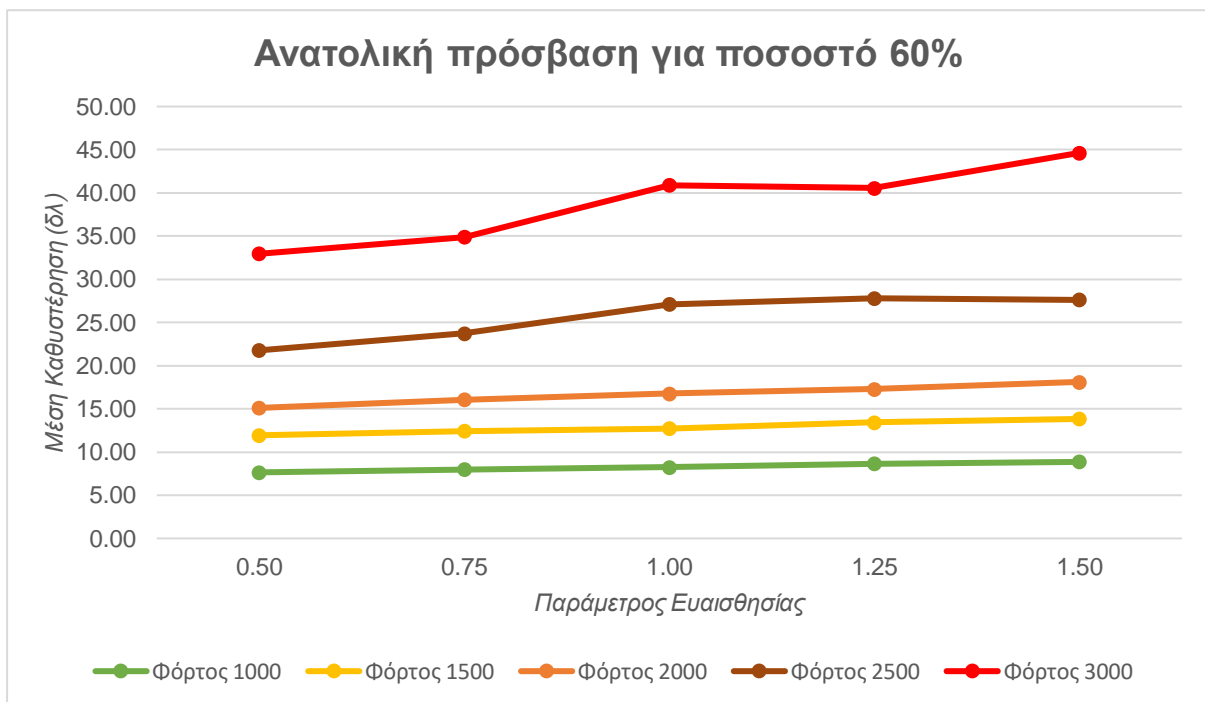


Διάγραμμα 4-8: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%

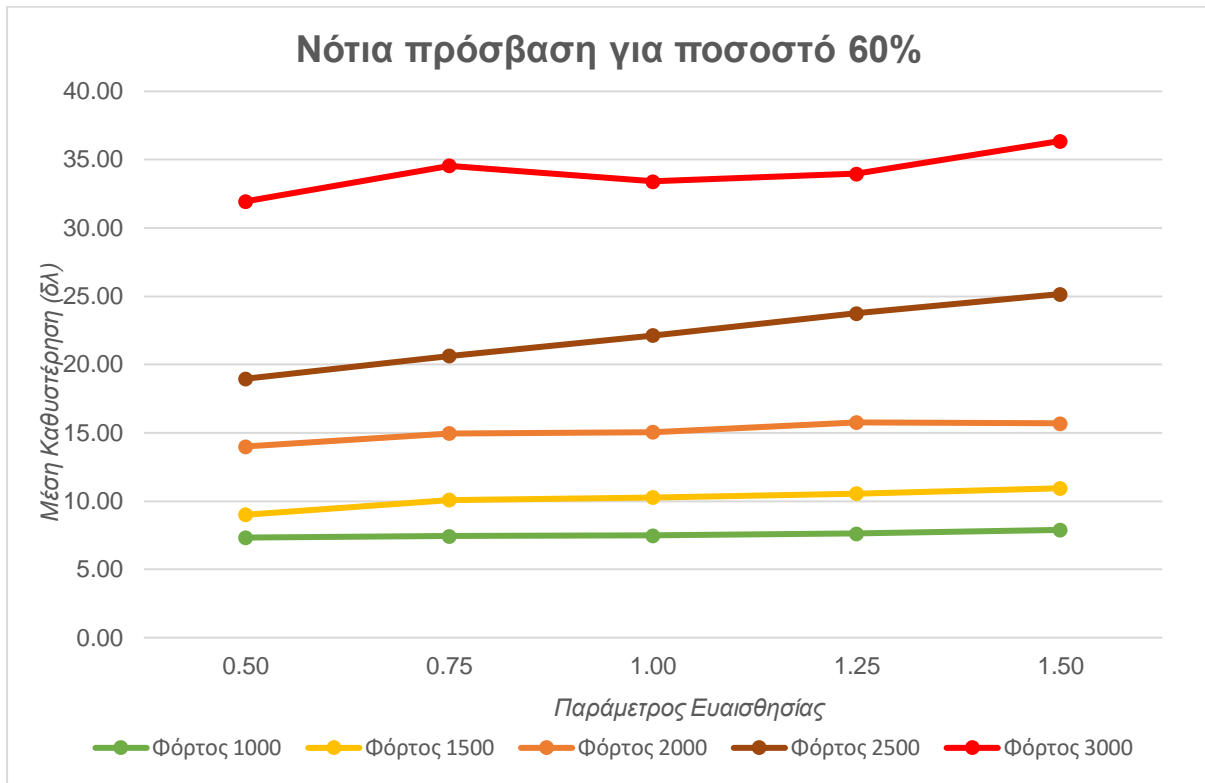
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι τέσσερις προσβάσεις για ποσοστό δεξιάς στροφής 60%, το μέγιστο δηλαδή ποσοστό που ορίστηκε για την εργασία αυτή.



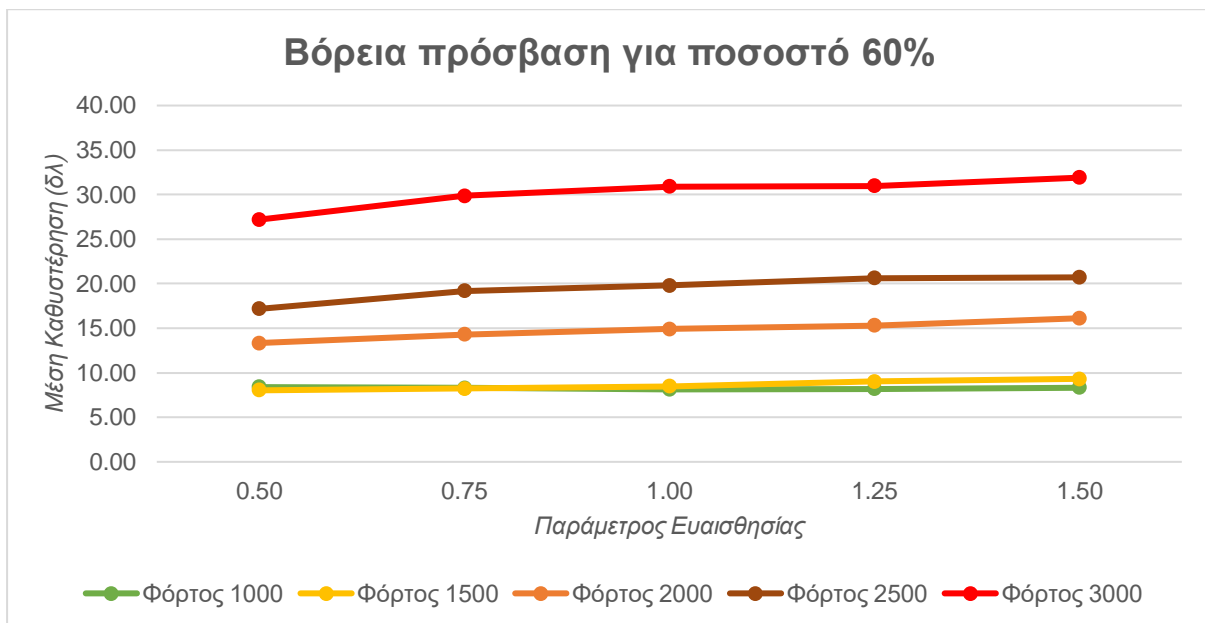
Διάγραμμα 4-9: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%



Διάγραμμα 4-10: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%

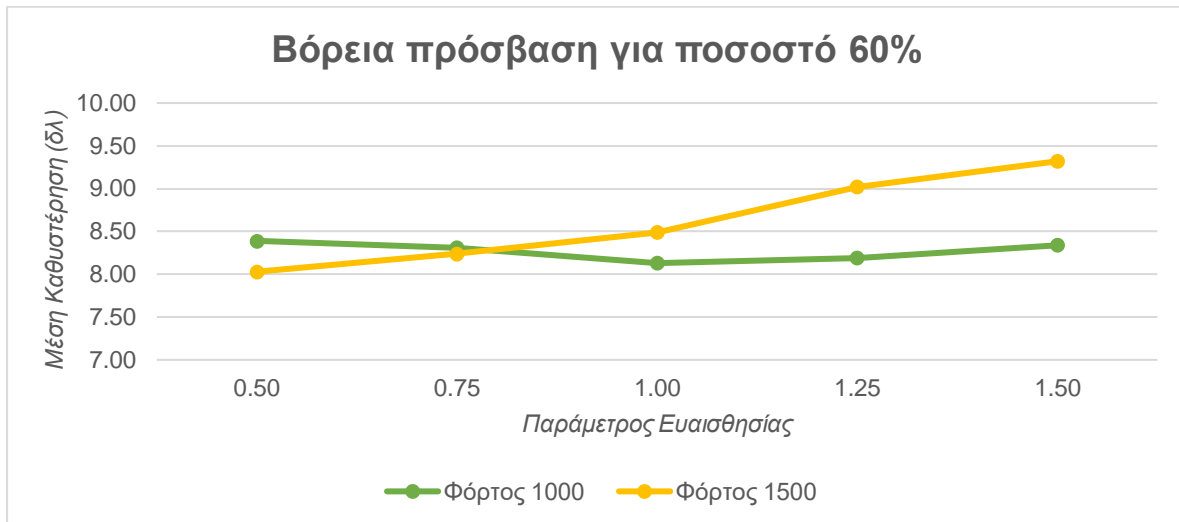


Διάγραμμα 4-11: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%



Διάγραμμα 4-12: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%

Για το διάγραμμα 4-12, έγινε παραπάνω ανάλυση σε μικρότερη κλίμακα ώστε να γίνει πιο αντιληπτό. Γίνεται αντιληπτό πως οι γραφικές παραστάσεις για τους μικρούς κυκλοφοριακούς φόρτους τέμνονται όταν η παράμετρος ευαισθησίας είναι κοντά στην τιμή 0,75.



Διάγραμμα 4-13: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60% σε μικρότερη κλίμακα

Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα σχετικά με τις μεταβολές της μέσης καθυστέρησης από την διαφοροποίηση του κυκλοφοριακού φόρτου, του ποσοστού δεξιάς στροφής και της παραμέτρου ευαισθησίας για τον απλό κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας παρουσιάζονται στους επόμενους πίνακες.

Οι παρακάτω πίνακες αναφέρονται στην ποσοστιαία μεταβολή της μέσης καθυστέρησης από τις αυξήσεις του κυκλοφοριακού φόρτου, κρατώντας το ποσοστό δεξιάς στροφής και την παράμετρο ευαισθησίας σταθερά.

Πίνακας 4.1: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 1000 και 1500 για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
1000 - 1500	20%	0.50	65.67%	61.51%	76.82%	33.84%
		0.75	74.22%	50.74%	68.85%	37.45%
		1.00	73.07%	51.97%	88.49%	29.84%
		1.25	80.56%	51.38%	91.52%	32.74%
		1.50	84.96%	61.47%	91.73%	47.93%

Πίνακας 4.2: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 1500 και 2000 για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
1500 - 2000	20%	0.50	80.35%	61.67%	84.41%	80.35%
		0.75	68.02%	78.95%	80.19%	74.98%
		1.00	81.82%	77.82%	86.08%	97.92%
		1.25	92.66%	97.38%	96.54%	92.00%
		1.50	93.01%	81.65%	104.53%	69.86%

Πίνακας 4.3: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 2000 και 2500 για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000 - 2500	20%	0.50	50.52%	88.40%	64.63%	47.68%
		0.75	60.07%	77.53%	84.07%	38.58%
		1.00	59.92%	76.43%	61.93%	30.93%
		1.25	63.08%	68.67%	51.59%	47.45%
		1.50	61.98%	76.24%	60.29%	48.14%

Πίνακας 4.4: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 2500 και 3000 για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2500 - 3000	20%	0.50	88.92%	25.49%	64.20%	23.45%
		0.75	78.73%	17.84%	56.20%	28.63%
		1.00	53.88%	16.36%	55.09%	41.52%
		1.25	48.95%	11.61%	62.20%	28.33%
		1.50	41.91%	4.63%	47.28%	24.33%

Από τους πίνακες παρατηρείται ότι οι τιμές των ποσοστών μεταβολής της μέσης καθυστέρησης είναι ιδιαίτερα μεγάλες κατά την αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου για όλες τις περιπτώσεις. Αυτό ίσως να οφείλεται στο μεγάλο βήμα που πάρθηκε για έρευνα του κυκλοφοριακού φόρτου. Το ίδιο φαινόμενο εντοπίζεται και όταν αλλάξει το ποσοστό δεξιάς στροφής και γίνει σύγκριση των κυκλοφοριακών φόρτων μεταξύ τους.

Οι επόμενοι πίνακες αναφέρονται στην ποσοστιαία μεταβολή του ποσοστού δεξιάς στροφής, κρατώντας σταθερά τον κυκλοφοριακό φόρτο και την παράμετρο ευαισθησίας.

Πίνακας 4.5: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 20% με 30% για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
1000	20% - 30%	0.50	12.96%	9.52%	4.04%	-12.38%
		0.75	11.44%	3.33%	6.43%	-14.30%
		1.00	8.54%	0.68%	1.56%	-13.58%
		1.25	12.26%	3.30%	7.76%	-16.17%
		1.50	11.59%	3.84%	9.89%	-14.37%

Πίνακας 4.6: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 30% με 40% για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
1000	30% - 40%	0.50	-14.71%	-13.89%	0.00%	6.59%
		0.75	-12.48%	-10.39%	-2.15%	1.40%
		1.00	-12.22%	-16.80%	-0.72%	-2.28%
		1.25	-11.63%	-17.68%	-3.65%	2.96%
		1.50	-11.16%	-16.38%	-6.43%	-1.72%

Πίνακας 4.7: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 40% με 50% για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
1000	40% - 50%	0.50	-6.32%	-0.28%	-19.62%	-6.06%
		0.75	-8.44%	-2.93%	-20.40%	-5.90%
		1.00	-10.86%	2.69%	-16.46%	-4.05%
		1.25	-11.16%	1.94%	-17.03%	-5.75%
		1.50	-11.79%	1.26%	-16.49%	-4.56%

Πίνακας 4.8: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 50% με 60% για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
1000	50% - 60%	0.50	-6.75%	3.09%	5.52%	12.77%
		0.75	-5.51%	2.06%	5.12%	10.95%
		1.00	-1.66%	-1.97%	1.35%	3.96%
		1.25	-1.47%	-3.17%	4.08%	-0.12%
		1.50	-3.40%	-1.50%	4.11%	2.21%

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρείται ότι οι διακυμάνσεις των ποσοστών μεταβολής του ποσοστού δεξιάς στροφής είναι μικρές. Καθώς αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος και γίνεται ανάλυση στο ποσοστό στρεφουσών, εντοπίζεται πως οι διακυμάνσεις αυτές αυξάνονται λόγω της συμφόρησης του οδικού δικτύου.

Τέλος, παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα η ποσοστιαία μεταβολή της παραμέτρου ευαισθησίας, κρατώντας σταθερά τον κυκλοφοριακό φόρτο και το ποσοστό δεξιάς στροφής.

Πίνακας 4.9: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των παραμέτρων ευαισθησίας για τον κυκλικό κόμβο μίας λωρίδας κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
1000	20%	0.50 - 0.75	3.54%	7.14%	5.88%	8.02%
		0.75 - 1.00	6.42%	9.51%	5.01%	5.35%
		1.00 - 1.25	0.80%	2.48%	0.31%	4.46%
		1.25 - 1.50	4.09%	0.22%	2.48%	0.79%
1500	30%	0.50 - 0.75	6.27%	5.45%	3.49%	7.42%
		0.75 - 1.00	8.81%	2.84%	6.32%	8.66%
		1.00 - 1.25	6.55%	3.41%	8.72%	10.39%
		1.25 - 1.50	1.17%	2.82%	1.58%	0.36%
2000	40%	0.50 - 0.75	18.44%	-1.42%	3.35%	10.31%
		0.75 - 1.00	0.64%	20.39%	5.28%	11.31%
		1.00 - 1.25	7.93%	2.52%	6.56%	-0.25%
		1.25 - 1.50	3.77%	2.95%	4.46%	2.76%
2500	50%	0.50 - 0.75	5.16%	1.46%	13.97%	6.97%
		0.75 - 1.00	3.70%	14.00%	-1.44%	5.03%
		1.00 - 1.25	7.68%	-1.33%	17.65%	15.41%
		1.25 - 1.50	1.91%	2.06%	3.28%	0.21%
3000	60%	0.50 - 0.75	14.64%	8.17%	5.92%	9.82%
		0.75 - 1.00	5.29%	-3.33%	17.16%	3.52%
		1.00 - 1.25	8.74%	1.71%	-0.78%	0.23%
		1.25 - 1.50	6.38%	7.03%	10.01%	2.97%

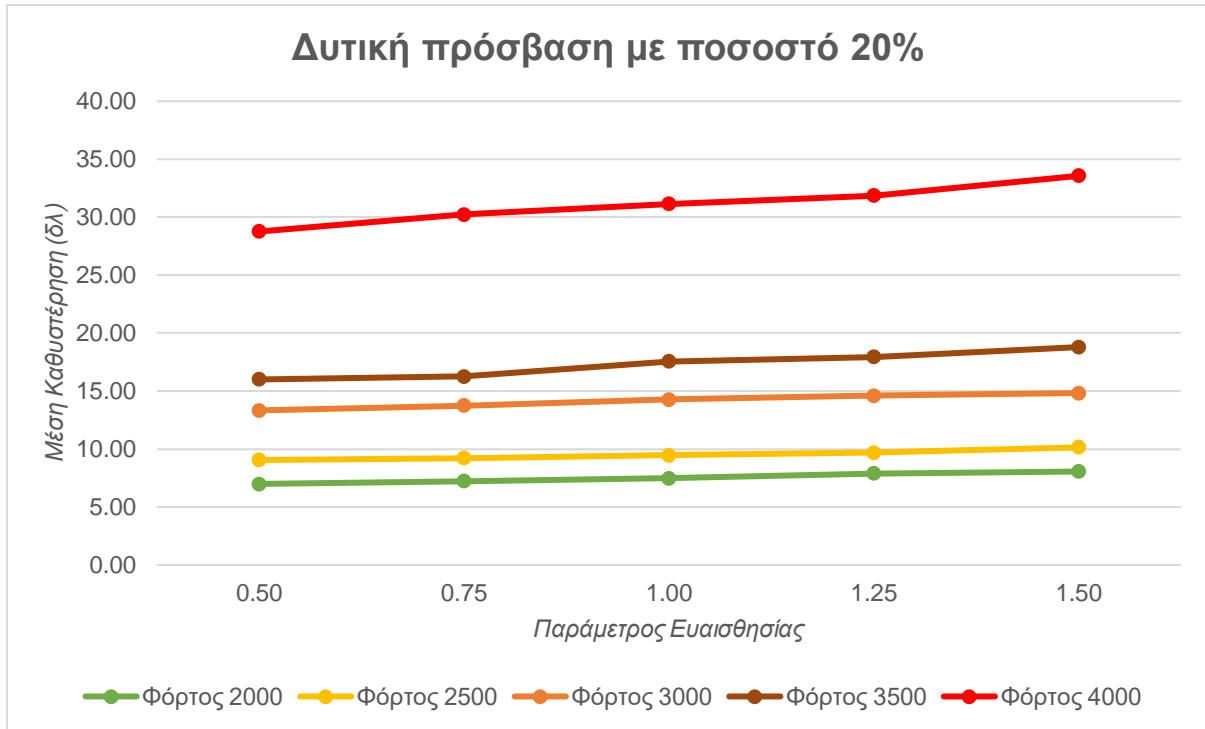
Σύμφωνα με τον πίνακα 4.9, επικρατούν σχετικά χαμηλές τιμές της μεταβολής της μέσης καθυστέρησης. Όποτε αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος και το ποσοστό δεξιάς στροφής, παρατηρείται αύξηση της μεταβολής, καθώς όσο περισσότερα οχήματα εισέρχονται στο δίκτυο και όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ τους, τόσο θα αυξάνεται η μέση καθυστέρηση.

4.3 Ανάλυση απλού κυκλικού κόμβου με δύο λωρίδες κυκλοφορίας

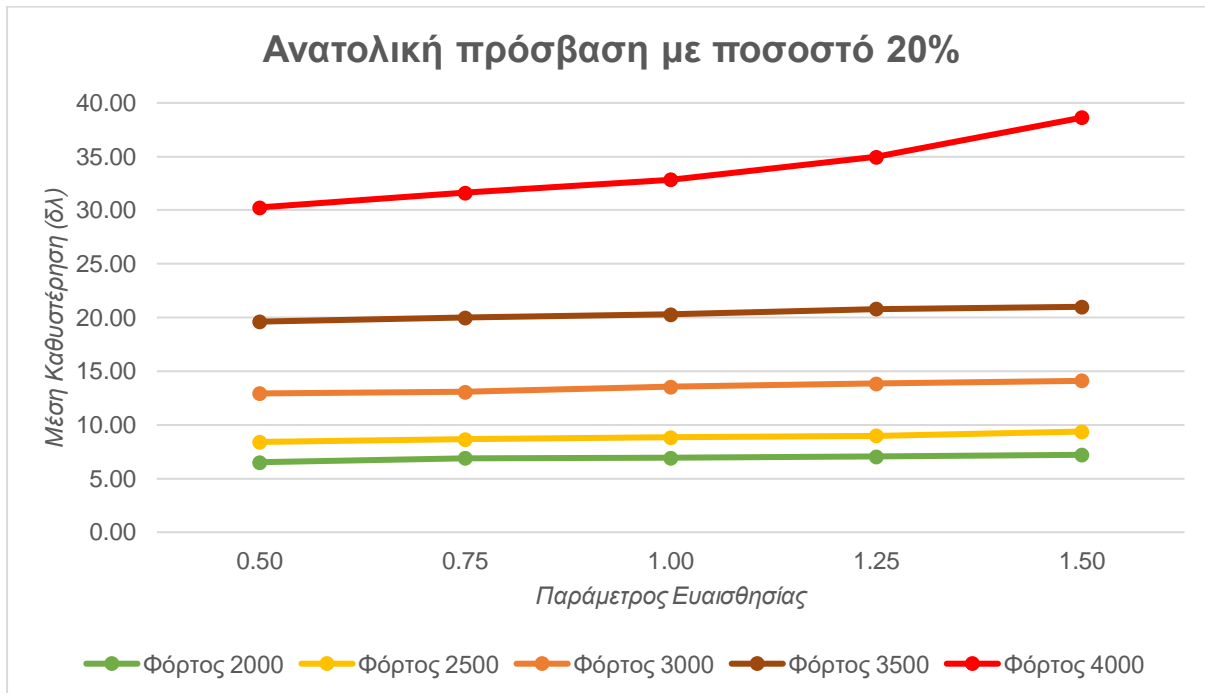
Παρόμοια μέθοδος ανάλυσης πραγματοποιήθηκε και στον κυκλικό κόμβο με δύο λωρίδες κυκλοφορίας, όπου αναλύθηκαν τα αποτελέσματα ανά πρόσβαση. Ακόμη, για να αποτύπωση των τελικών αποτελεσμάτων έγινε χρήση διαγραμμάτων, ώστε να είναι πιο κατανοητά. Η παράμετρος ευαισθησίας εξακολουθεί να μεταβάλλεται και το ποσοστό δεξιάς στροφής να παραμένει σταθερό και να μελετάται η μεταβολή της μέσης καθυστέρησης στις τέσσερις προσβάσεις.

Στα παρακάτω διαγράμματα αποτυπώνονται τα αποτελέσματα για ποσοστό δεξιάς στροφής 20%. Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η παράμετρος ευαισθησίας αυξάνεται και η μέση

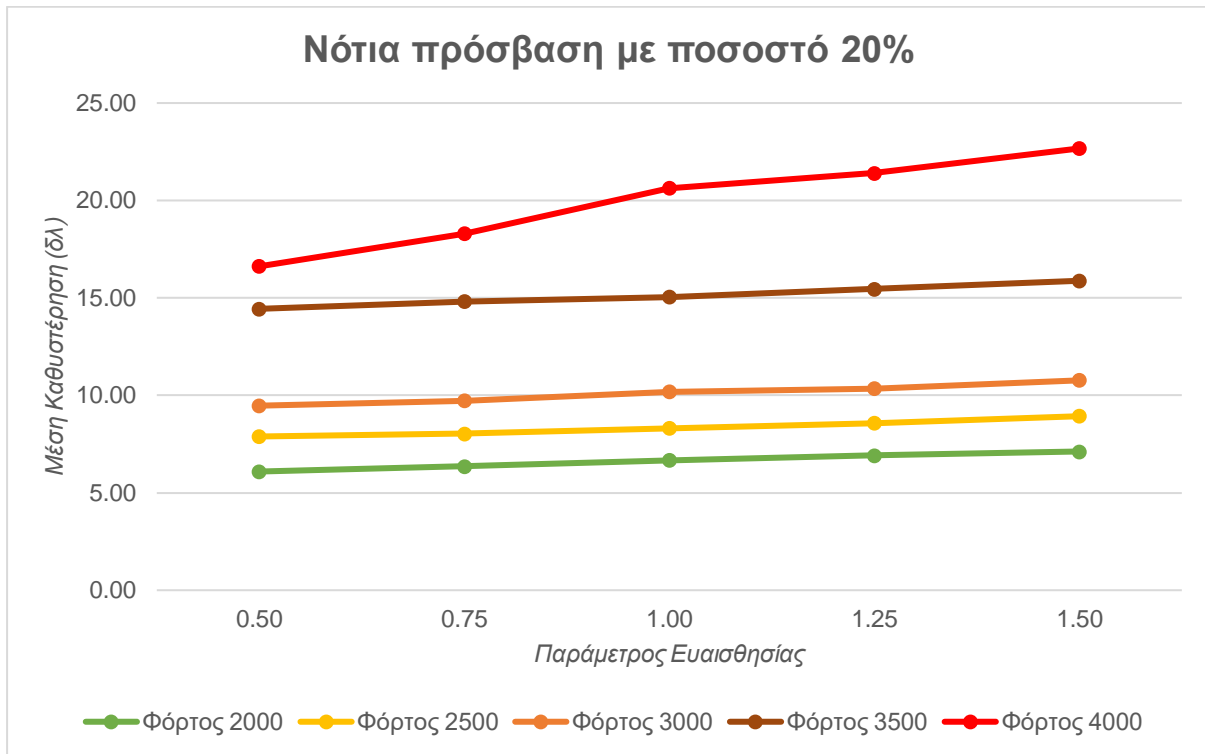
καθυστέρηση. Στους κύριους κλάδους η μέγιστη καθυστέρηση φτάνει περίπου στα 40δλ, ενώ στους δευτερεύοντες κλάδους φτάνει στα 23δλ περίπου. Τα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζουν τα τελικά αποτελέσματα για ποσοστό 20%.



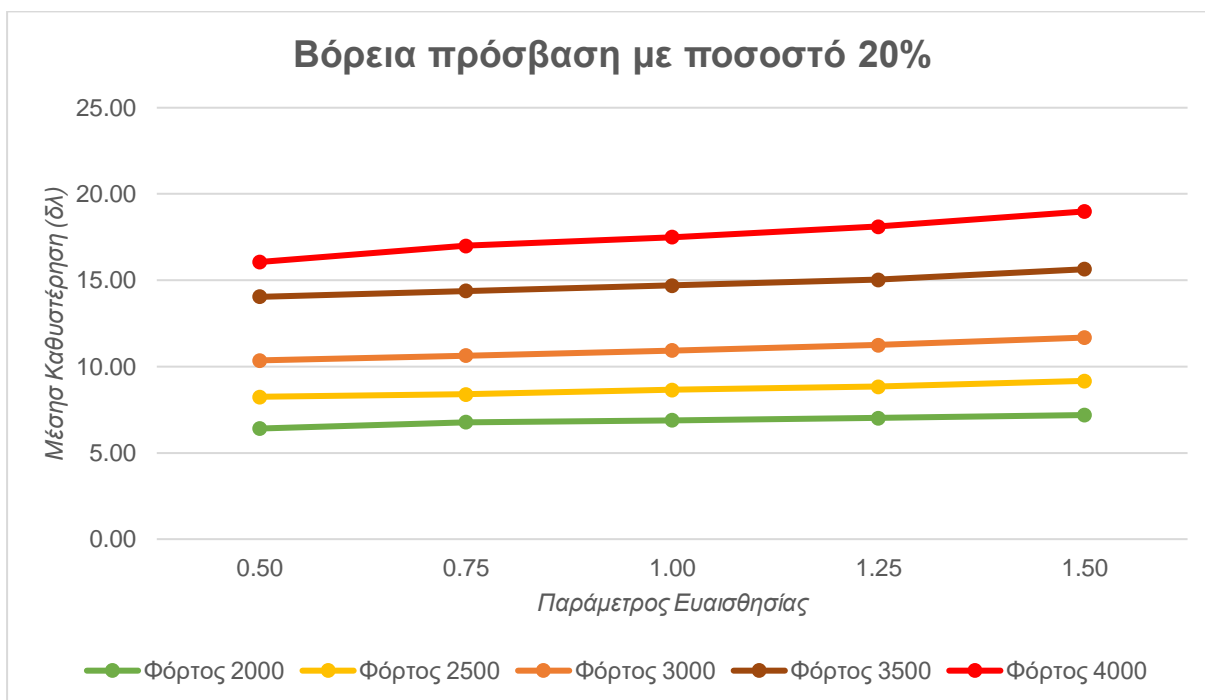
Διάγραμμα 4-14: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%



Διάγραμμα 4-15: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%

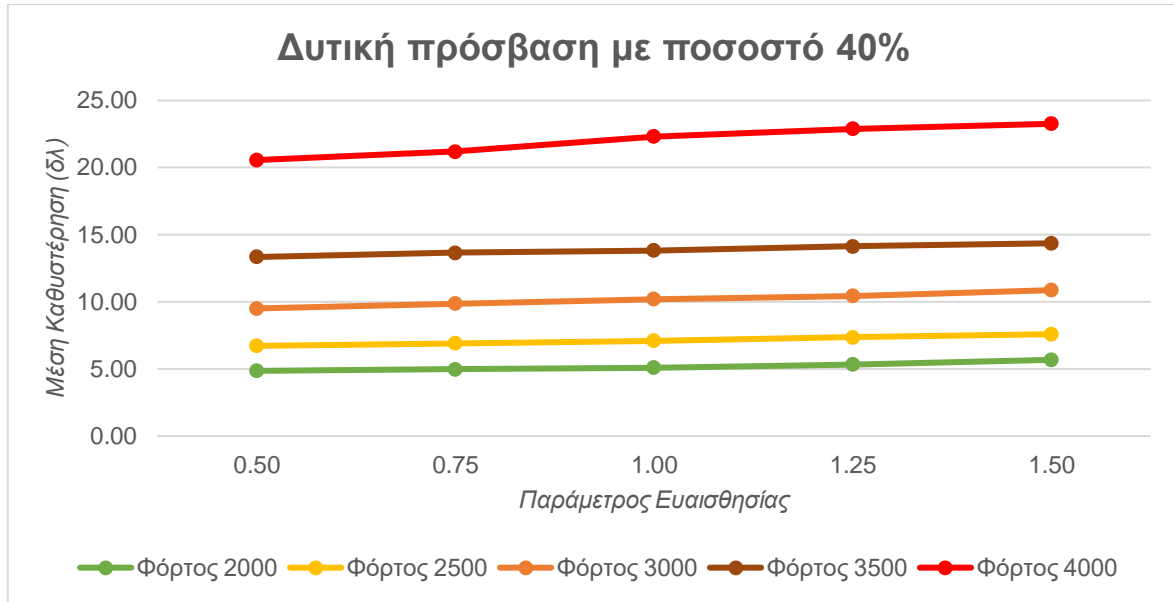


Διάγραμμα 4-16: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%

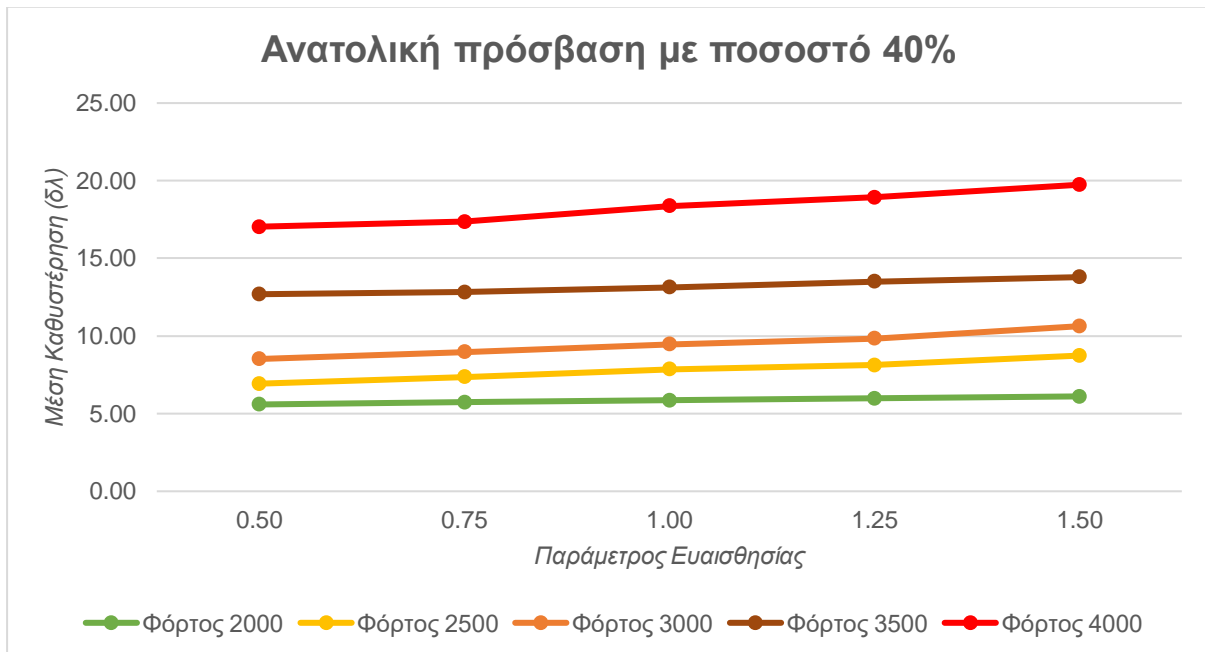


Διάγραμμα 4-17: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%

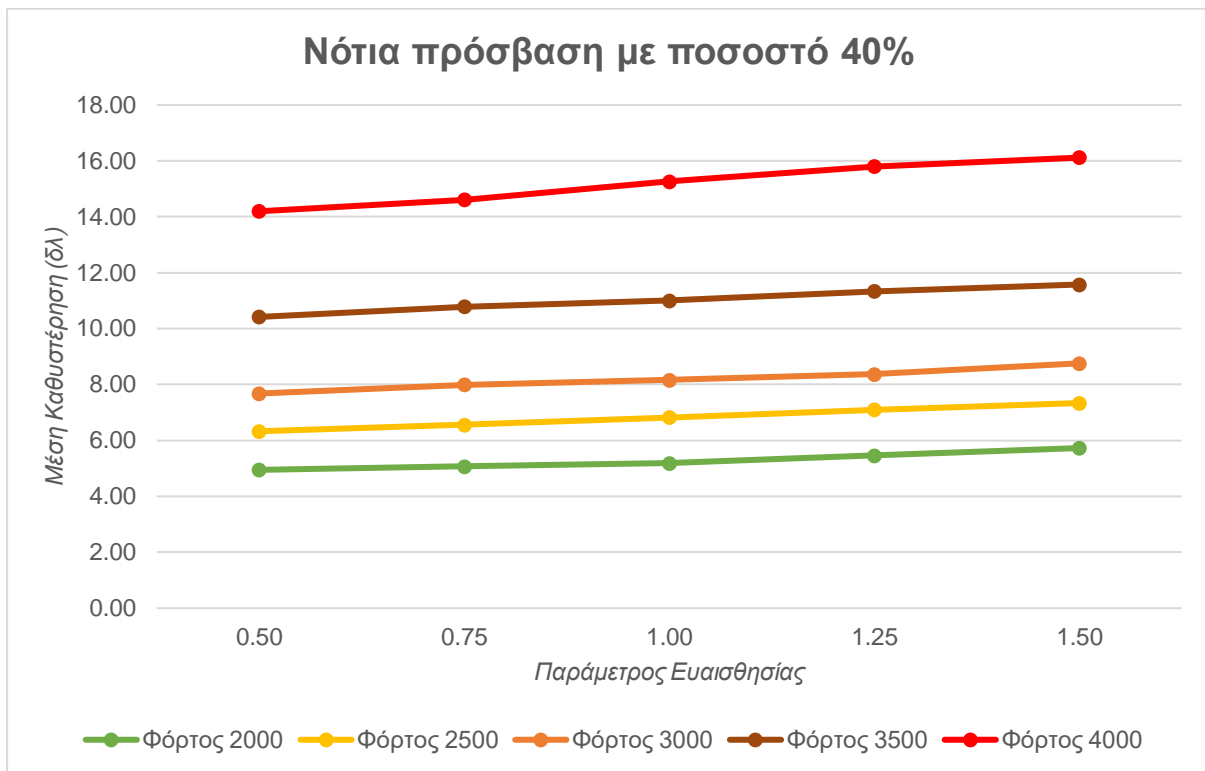
Όμοια με τον προηγούμενο κυκλικό κόμβο, όσο αυξάνεται το ποσοστό δεξιάς στροφής, συμπεραίνεται πως η μέση καθυστέρηση ελαττώνεται και στις τέσσερις προσβάσεις, καθώς οι οδηγοί που εισέρχονται στον κυκλικό κόμβο και επιθυμούν να βγουν στην πρώτη έξοδο βοηθούν στο να αποφορτιστεί το δίκτυο. Ενδεικτικά παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των τεσσάρων προσβάσεων για ποσοστό δεξιάς στροφής 40% και 60%.



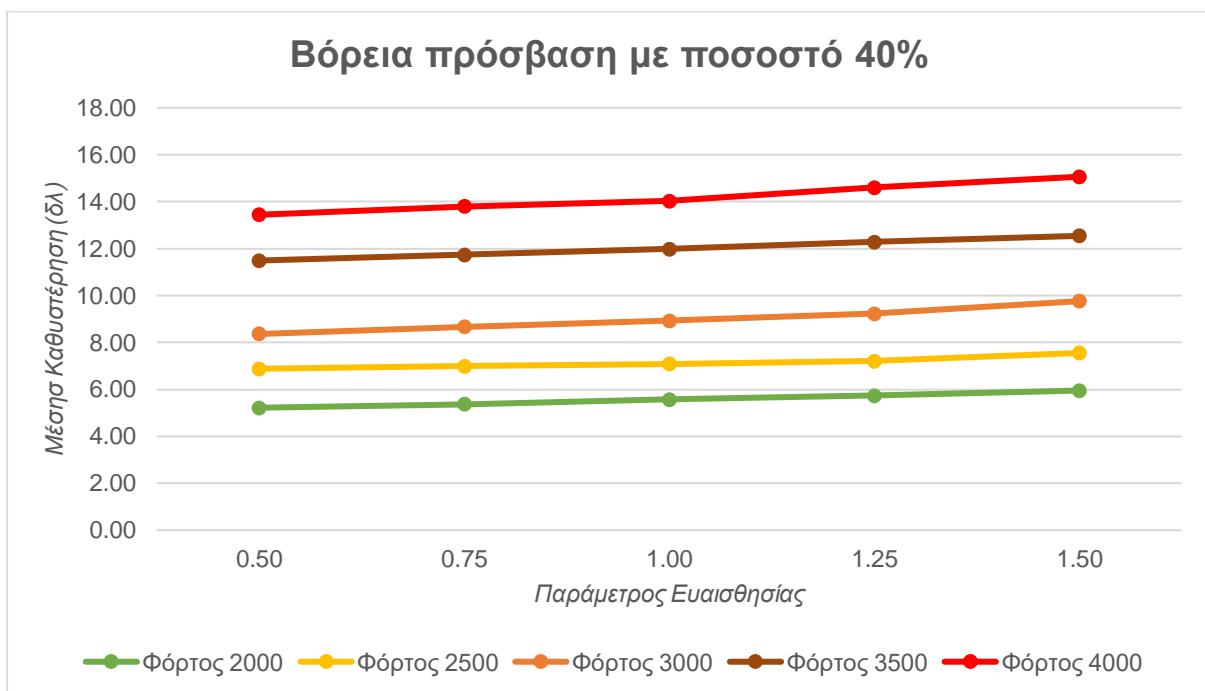
Διάγραμμα 4-18: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%



Διάγραμμα 4-19: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%

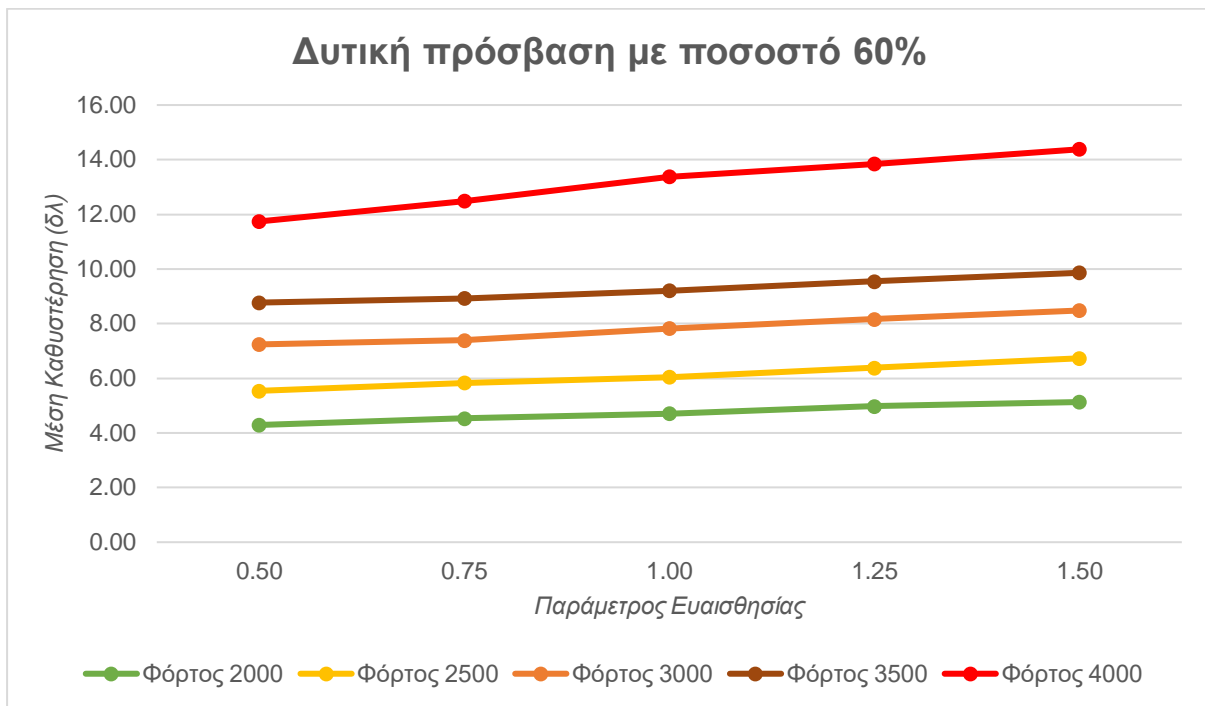


Διάγραμμα 4-20: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%

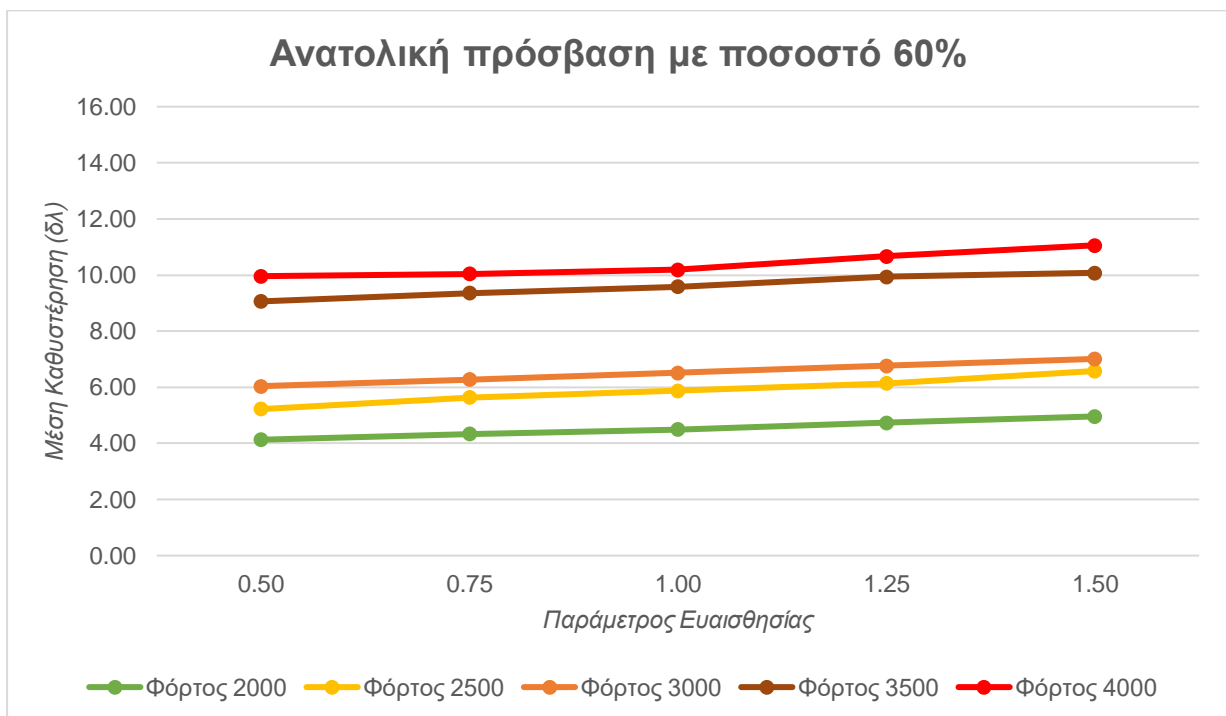


Διάγραμμα 4-21: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%

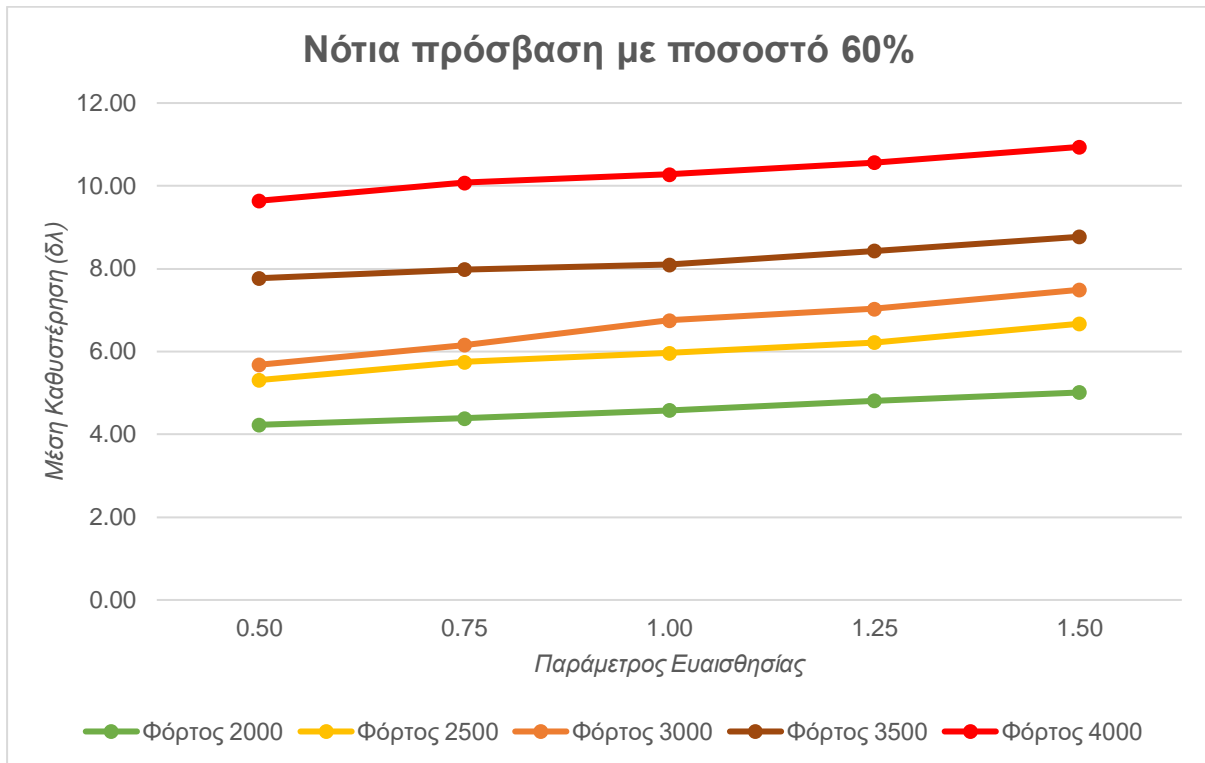
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι τέσσερις προσβάσεις για ποσοστό δεξιάς στροφής 60%, το μέγιστο δηλαδή ποσοστό που ορίστηκε για την διπλωματική εργασία.



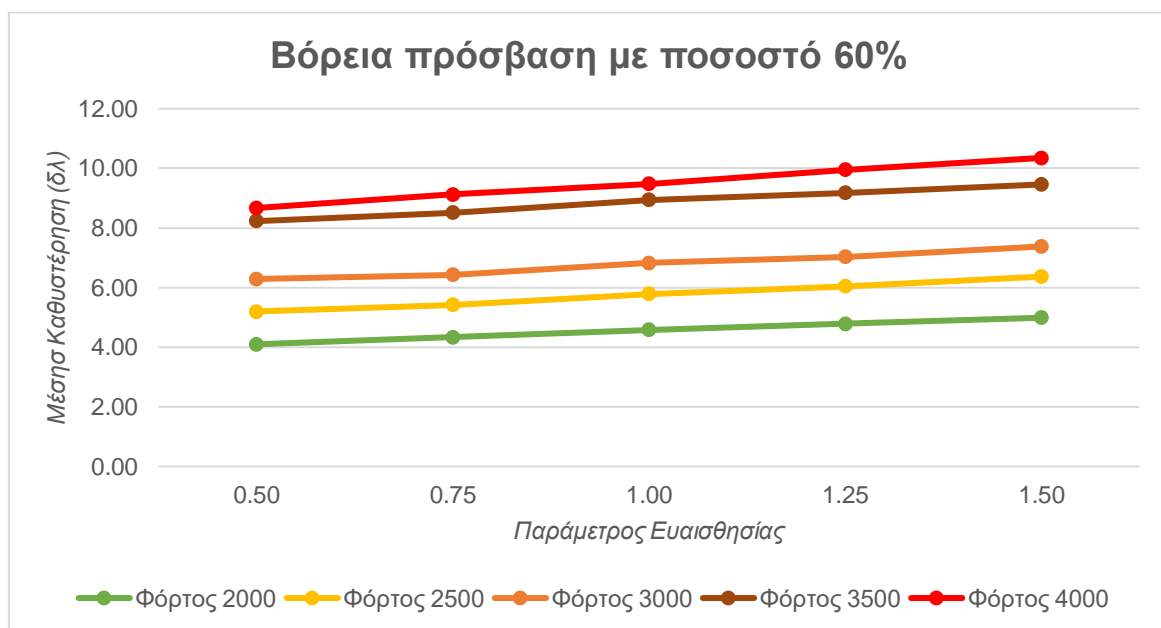
Διάγραμμα 4-22: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%



Διάγραμμα 4-23: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%



Διάγραμμα 4-24: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%



Διάγραμμα 4-25: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%

Στη συνέχεια, όπως και στον προηγούμενο κυκλικό κόμβο, τα αποτελέσματα σχετικά με τις μεταβολές της μέσης καθυστέρησης από την διαφοροποίηση του κυκλοφοριακού φόρτου, του ποσοστού δεξιάς στροφής και της παραμέτρου ευαισθησίας για τον απλό κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας παρουσιάζονται στους επόμενους πίνακες.

Οι παρακάτω πίνακες αναφέρονται στην ποσοστιαία μεταβολή της μέσης καθυστέρησης από τις αυξήσεις του κυκλοφοριακού φόρτου, κρατώντας το ποσοστό δεξιάς στροφής και την παράμετρο ευαισθησίας σταθερά.

Πίνακας 4.10: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 2000 και 2500 για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000 - 2500	20%	0.50	29.47%	29.56%	28.99%	28.71%
		0.75	27.39%	26.46%	25.83%	23.89%
		1.00	26.47%	24.59%	27.56%	25.69%
		1.25	22.69%	24.02%	27.23%	25.96%
		1.50	25.81%	25.42%	30.10%	27.54%

Πίνακας 4.11: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 2500 και 3000 για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2500 - 3000	20%	0.50	47.29%	20.03%	53.75%	25.58%
		0.75	49.29%	21.17%	50.87%	26.67%
		1.00	50.85%	22.62%	53.17%	26.21%
		1.25	50.93%	20.77%	54.40%	27.29%
		1.50	46.25%	20.60%	50.32%	27.37%

Πίνακας 4.12: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 3000 και 3500 για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
3000 - 3500	20%	0.50	20.03%	52.48%	51.74%	35.52%
		0.75	18.18%	52.21%	52.83%	35.15%
		1.00	22.99%	47.69%	49.78%	34.40%
		1.25	22.79%	49.37%	50.11%	33.72%
		1.50	26.70%	47.45%	48.94%	33.90%

Πίνακας 4.13: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 3500 και 4000 για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
3500 - 4000	20%	0.50	79.75%	15.10%	54.23%	14.39%
		0.75	86.09%	23.57%	58.18%	18.15%
		1.00	77.38%	37.08%	61.93%	19.13%
		1.25	77.59%	38.49%	68.16%	20.56%
		1.50	78.61%	42.76%	83.90%	21.42%

Όπως φαίνεται στους παραπάνω πίνακες, εξακολουθούν οι τιμές των ποσοστών μεταβολής της μέσης καθυστέρησης να είναι υψηλές και οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, στο μεγάλο διάστημα τιμών του κυκλοφοριακού φόρτου.

Στους επόμενους πίνακες αναλύεται η διαφοροποίηση των ποσοστών δεξιάς στροφής, έχοντας ως σταθερά τον κυκλοφοριακό φόρτο και την παράμετρο ευαισθησίας.

Πίνακας 4.14: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 20% με 30% για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	20% - 30%	0.50	-15.31%	-0.99%	-7.06%	-13.73%
		0.75	-16.46%	-3.78%	-10.30%	-15.34%
		1.00	-16.71%	-5.40%	-8.37%	-13.06%
		1.25	-14.96%	-6.22%	-6.95%	-12.98%
		1.50	-14.02%	-4.21%	-6.10%	-11.27%

Πίνακας 4.15: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 30% με 40% για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	30% - 40%	0.50	-17.91%	-17.91%	-7.76%	-5.61%
		0.75	-17.72%	-17.02%	-7.12%	-6.62%
		1.00	-18.14%	-17.75%	-7.72%	-7.01%
		1.25	-20.42%	-15.74%	-8.99%	-6.07%
		1.50	-18.04%	-15.98%	-9.75%	-6.74%

Πίνακας 4.16: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 40% με 50% για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	40% - 50%	0.50	-2.26%	-13.74%	-19.86%	-8.24%
		0.75	-2.21%	-12.62%	-18.64%	-7.46%
		1.00	-1.76%	-10.21%	-15.70%	-9.69%
		1.25	-1.87%	-9.34%	-14.91%	-9.25%
		1.50	-3.52%	-10.82%	-13.91%	-9.58%

Πίνακας 4.17: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των ποσοστών δεξιάς στροφής 50% με 60% για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	50% - 60%	0.50	-9.68%	-0.94%	-7.81%	-14.41%
		0.75	-6.79%	-0.90%	-7.28%	-12.50%
		1.00	-5.99%	-1.72%	-9.11%	-8.95%
		1.25	-4.96%	-2.83%	-6.89%	-7.88%
		1.50	-6.39%	-1.96%	-5.70%	-7.25%

Από τους παραπάνω πίνακες, διαπιστώνεται ότι η ποσοστιαία μεταβολή της μέσης καθυστέρησης έχει αρνητικό πρόσημο, που σημαίνει πως οι τιμές της καθυστέρησης για τα μικρότερα ποσοστά δεξιάς στροφής είναι μικρότερες απ' ό τι των μεγαλύτερων ποσοστών. Αυτό συμβαίνει διότι όσο αυξάνεται το ποσοστό φόρτου της δεξιάς κίνησης και ο κυκλοφοριακός φόρτος το δίκτυο συμφορίζεται, με συνέπεια οι τιμές της μέσης καθυστέρησης να μειώνονται. Επίσης, εντοπίζεται μικρή διακύμανση των τιμών της μεταβολής.

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα αναλύεται η ποσοστιαία μεταβολή της παραμέτρου ευαισθησίας, κρατώντας σταθερά τον κυκλοφοριακό φόρτο και το ποσοστό δεξιάς στροφής.

Πίνακας 4.18: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των παραμέτρων ευαισθησίας για τον κυκλικό κόμβο δύο λωρίδων κυκλοφορίας

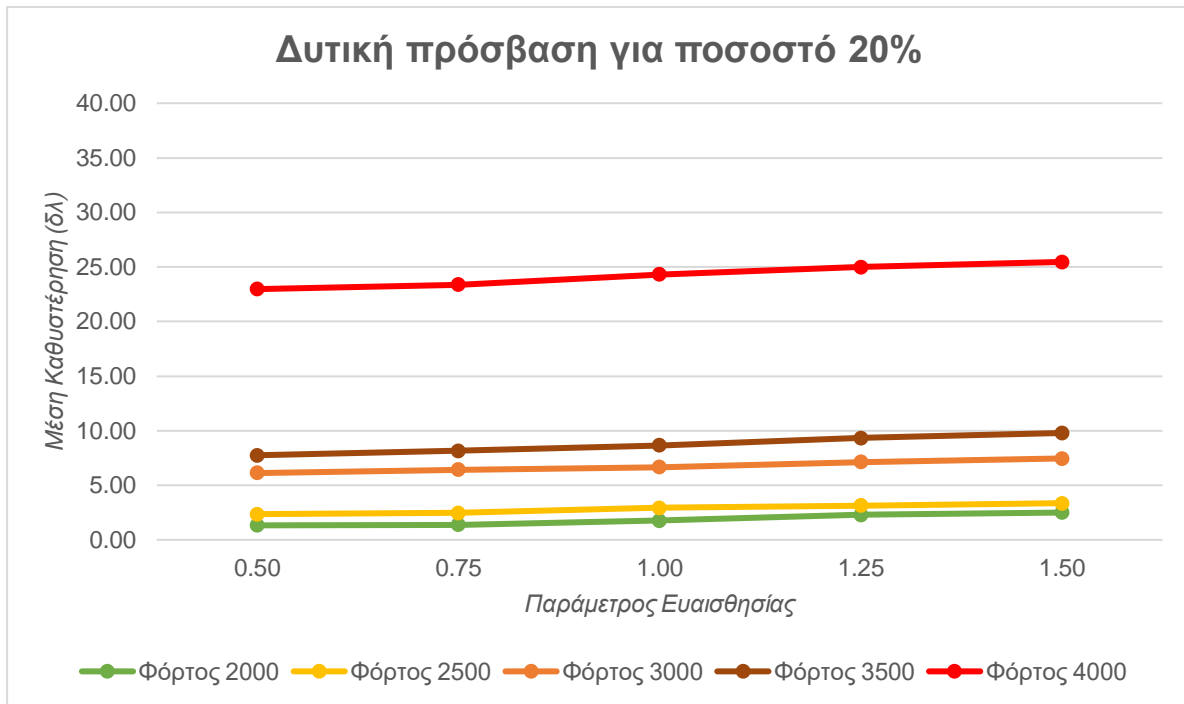
Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	20%	0.50 - 0.75	3.43%	4.27%	5.67%	5.77%
		0.75 - 1.00	3.46%	5.04%	0.58%	1.62%
		1.00 - 1.25	5.48%	3.60%	1.73%	1.74%
		1.25 - 1.50	2.15%	3.04%	2.27%	2.57%
2500	30%	0.50 - 0.75	3.51%	3.36%	4.26%	2.97%
		0.75 - 1.00	3.13%	2.34%	1.79%	2.36%
		1.00 - 1.25	2.28%	1.65%	2.01%	2.94%
		1.25 - 1.50	1.85%	2.00%	1.72%	1.74%
3000	40%	0.50 - 0.75	3.68%	4.04%	5.16%	3.71%
		0.75 - 1.00	3.55%	2.13%	5.58%	3.00%
		1.00 - 1.25	2.15%	2.57%	3.91%	3.25%
		1.25 - 1.50	4.22%	4.66%	8.14%	5.86%
3500	50%	0.50 - 0.75	3.27%	3.03%	2.05%	1.85%
		0.75 - 1.00	3.76%	2.94%	3.06%	1.01%
		1.00 - 1.25	3.72%	-8.15%	2.04%	2.09%
		1.25 - 1.50	1.47%	3.33%	2.37%	4.30%
4000	60%	0.50 - 0.75	6.39%	4.56%	0.80%	5.19%
		0.75 - 1.00	7.13%	1.98%	1.49%	3.95%
		1.00 - 1.25	3.44%	2.72%	4.71%	4.96%
		1.25 - 1.50	3.90%	3.60%	3.66%	4.02%

Διαπιστώνεται ότι η διακύμανση των τιμών της ποσοστιαίας μεταβολής της μέσης καθυστέρησης είναι χαμηλές για όλες τις περιπτώσεις των σεναρίων.

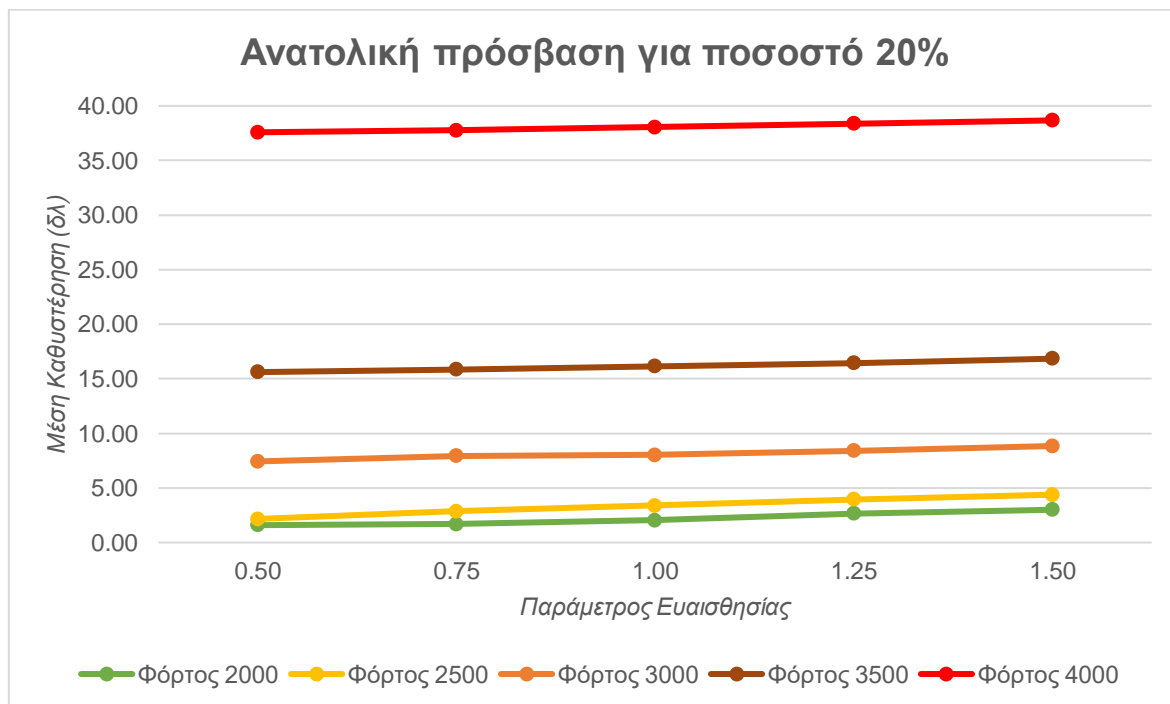
4.4 Ανάλυση σπειροειδούς κυκλικού κόμβου (Turbo roundabout)

Ο σπειροειδής κυκλικός κόμβος έχει την ιδιαιτερότητα της επιπλέον λωρίδας κυκλοφορίας, ώστε όταν ο οδηγός επιλέξει να βγει στην πρώτη έξοδο, δηλαδή στα δεξιά, να μπαίνει σε

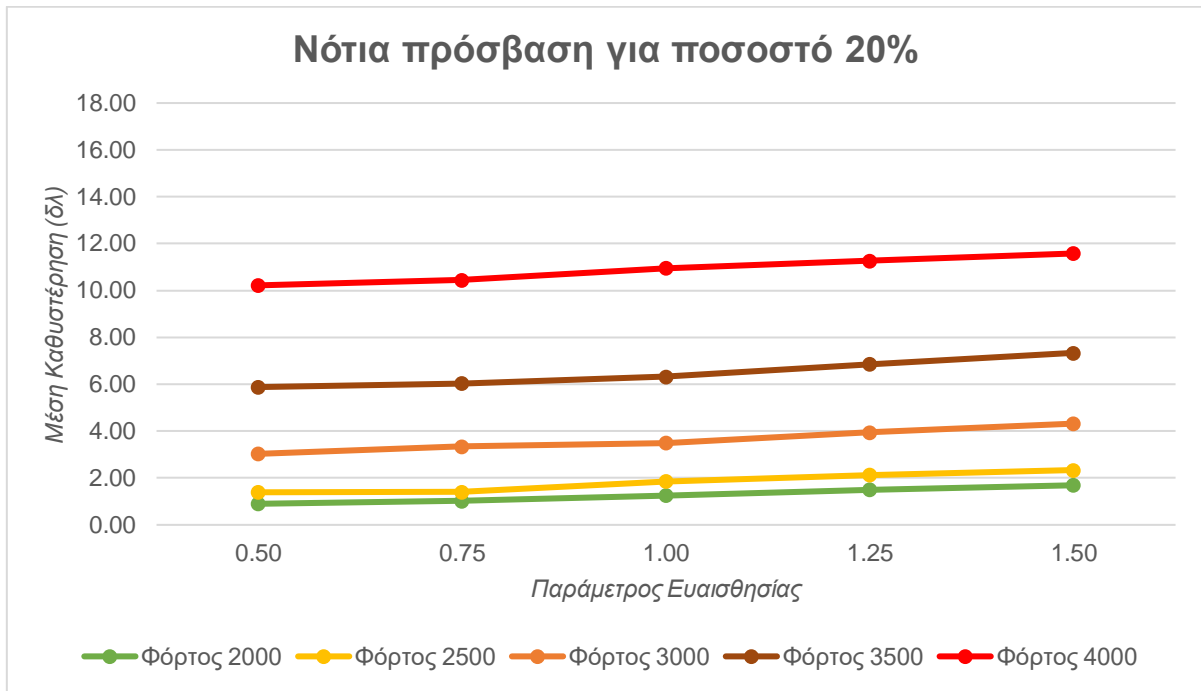
εκείνη την λωρίδα. Με αυτό δεν φορτίζεται ιδιαίτερα το δίκτυο εντός του κυκλικού κόμβου. Γι'αυτό στην παρούσα εργασία ερευνάται πως θα αντιδράσει ο συγκεκριμένος κυκλικός κόμβος στις αλλαγές των ποσοστών δεξιάς στροφής και της παραμέτρου ευαισθησίας.



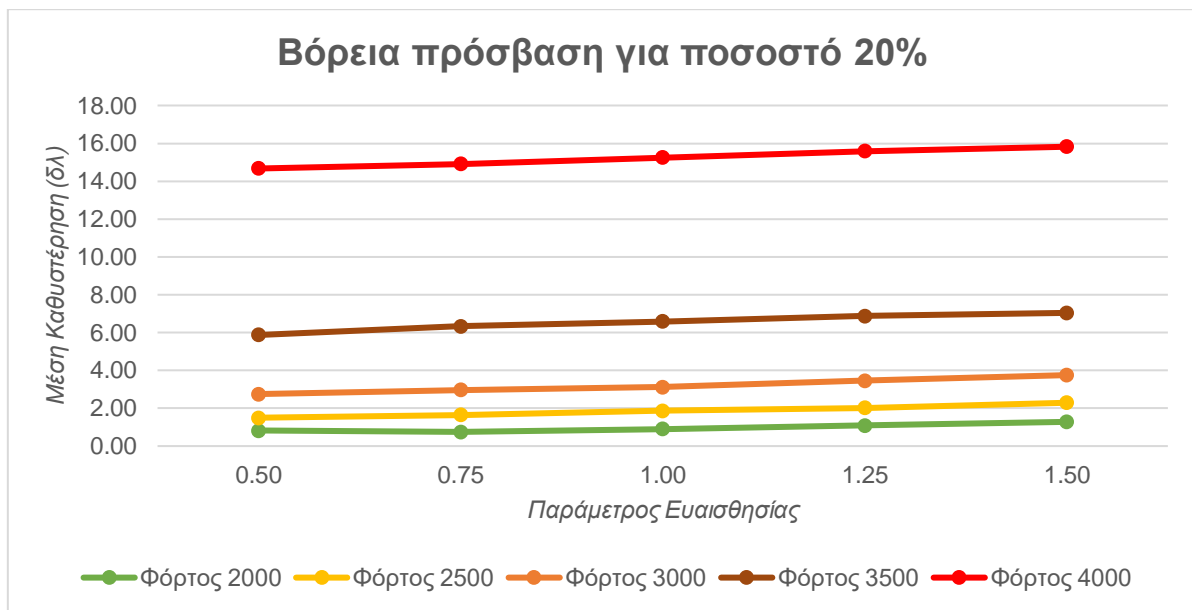
Διάγραμμα 4-26: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%



Διάγραμμα 4-27: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%



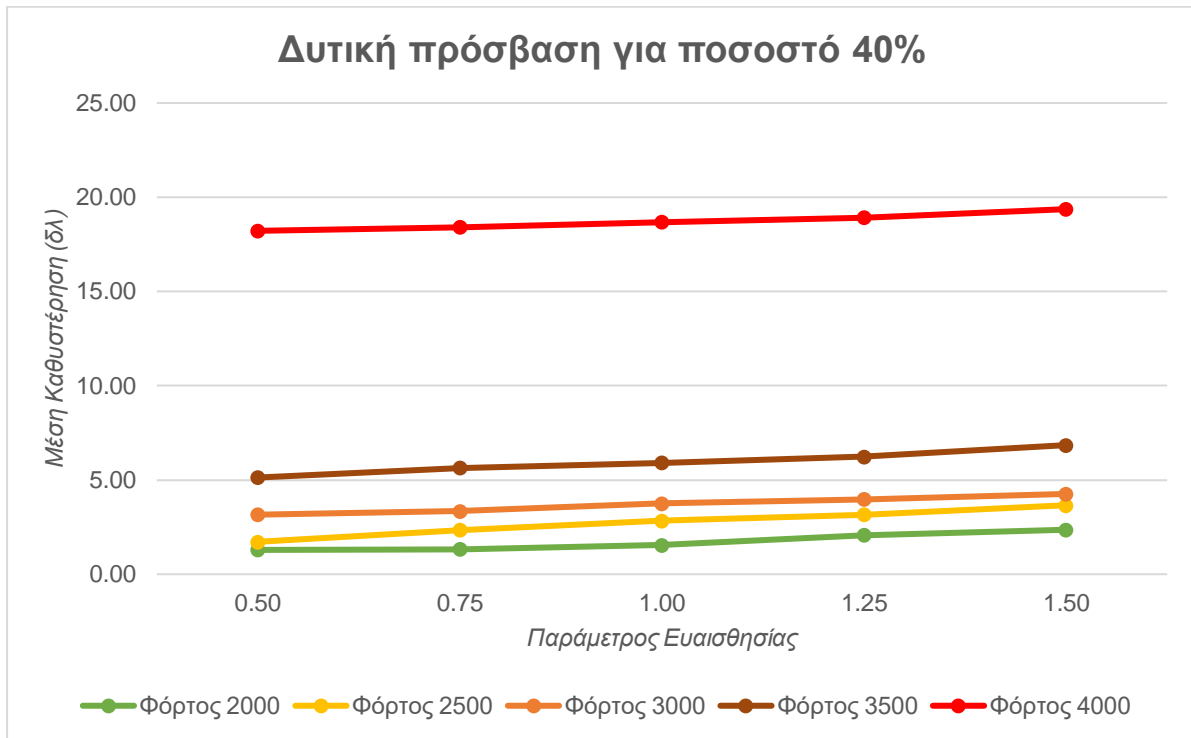
Διάγραμμα 4-28: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%



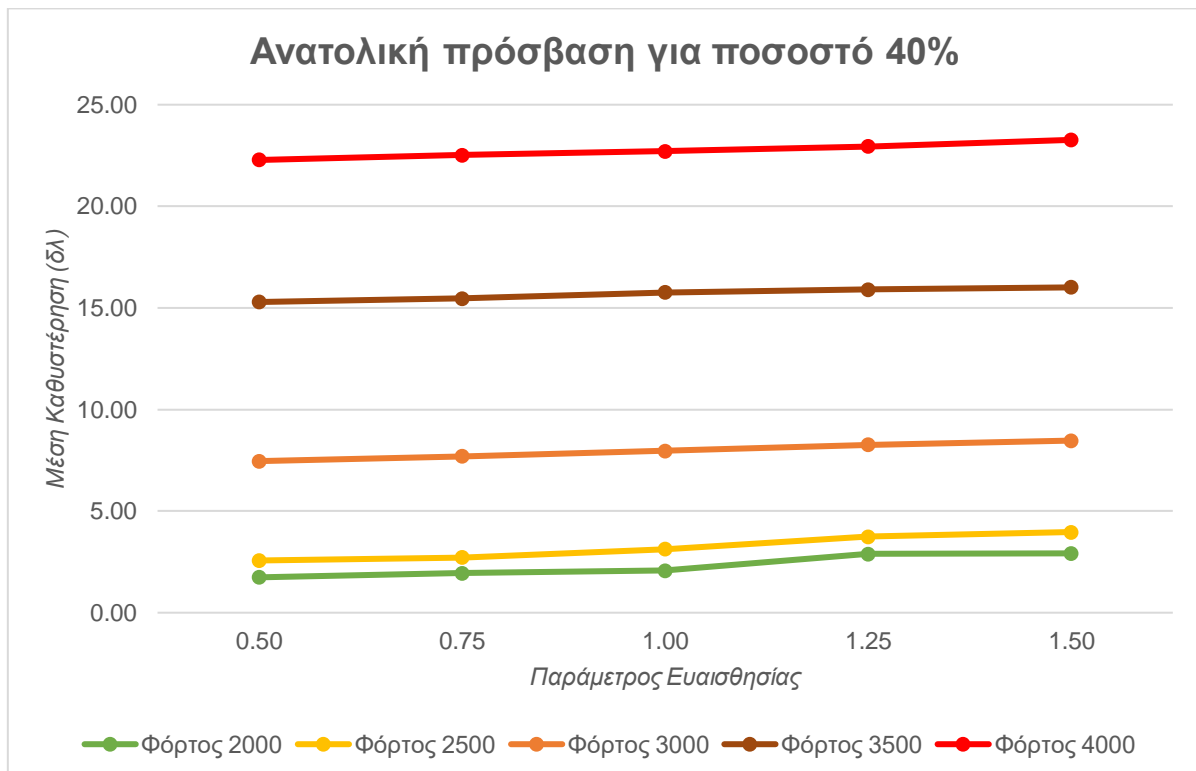
Διάγραμμα 4-29: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 20%

Αυτό που συμπεραίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι στον πολύ υψηλό φόρτο εντοπίζεται απότομη μεταβολή της μέσης καθυστέρησης, καθώς όσο περισσότερη ζήτηση έχει το δίκτυο τόσο περισσότερο καταπονείται.

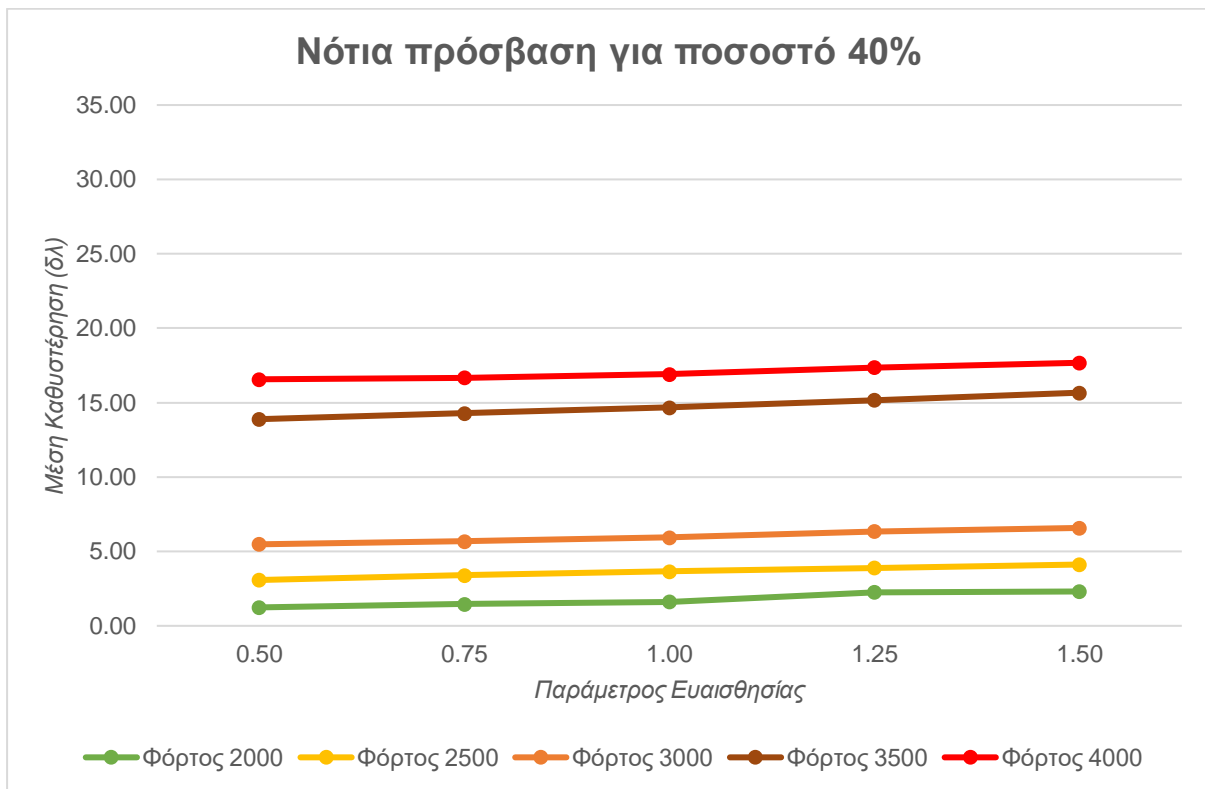
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα με ποσοστό δεξιάς στροφής 40%. Γίνεται αντιληπτό πως για τον πολύ υψηλό φόρτο η μέση καθυστέρηση συνεχίζει να μεταβάλλεται απότομα και να «ξεχωρίζει» από τις υπόλοιπες γραφικές παραστάσεις των φόρτων.



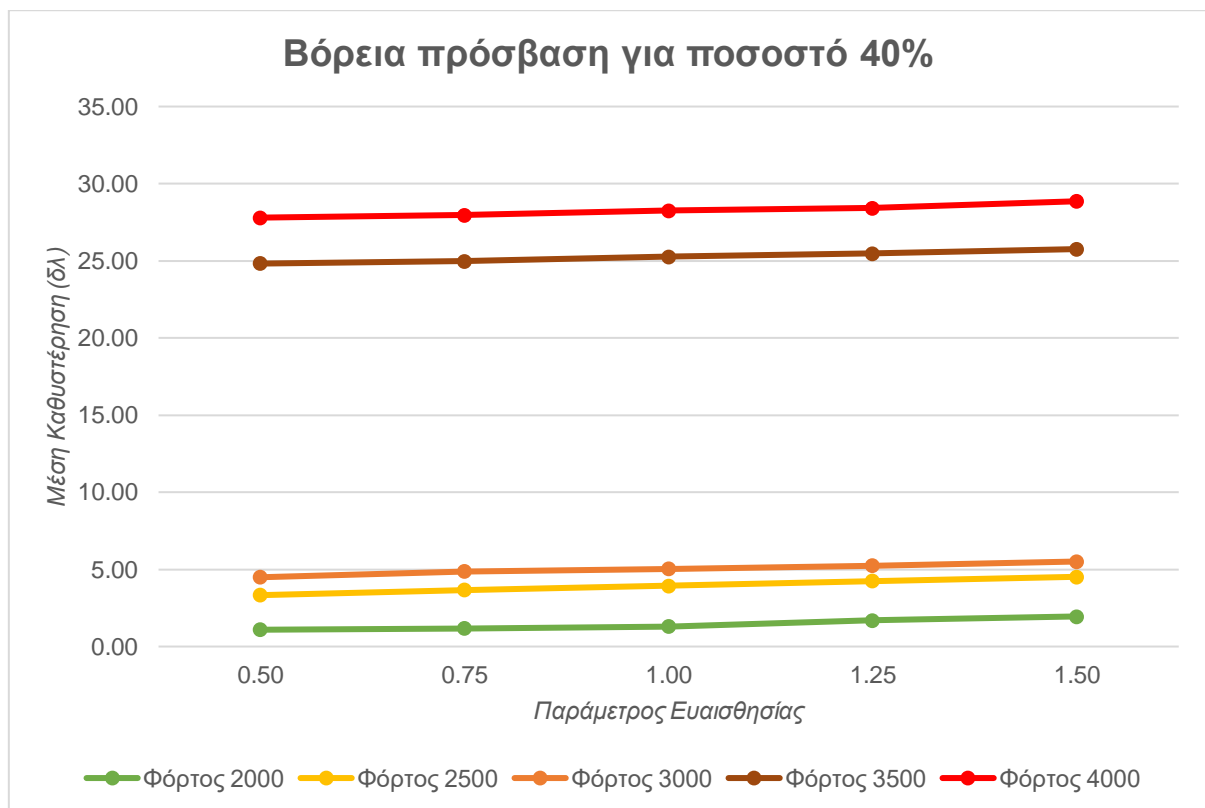
Διάγραμμα 4-30: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%



Διάγραμμα 4-31: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%

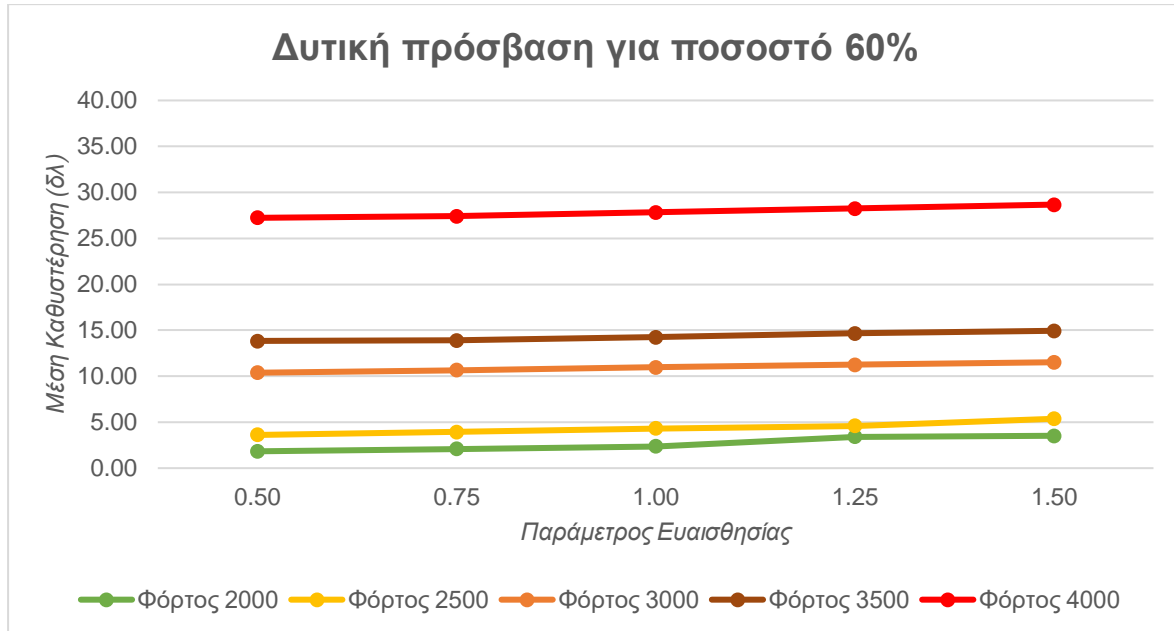


Διάγραμμα 4-32: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%

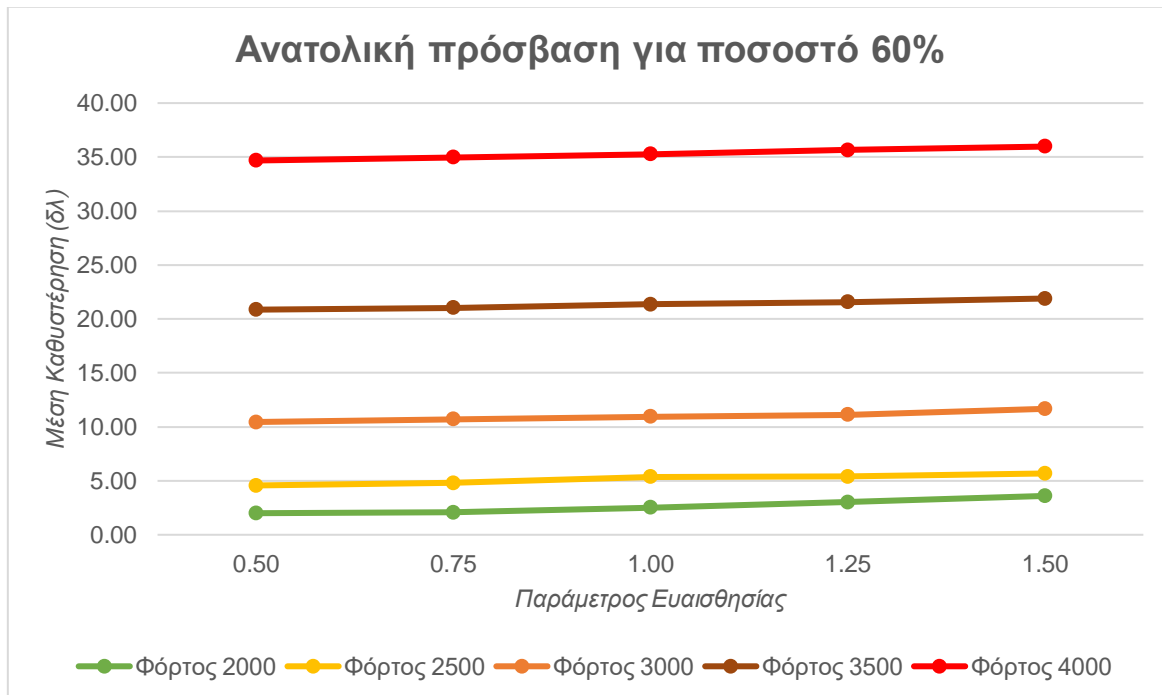


Διάγραμμα 4-33: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 40%

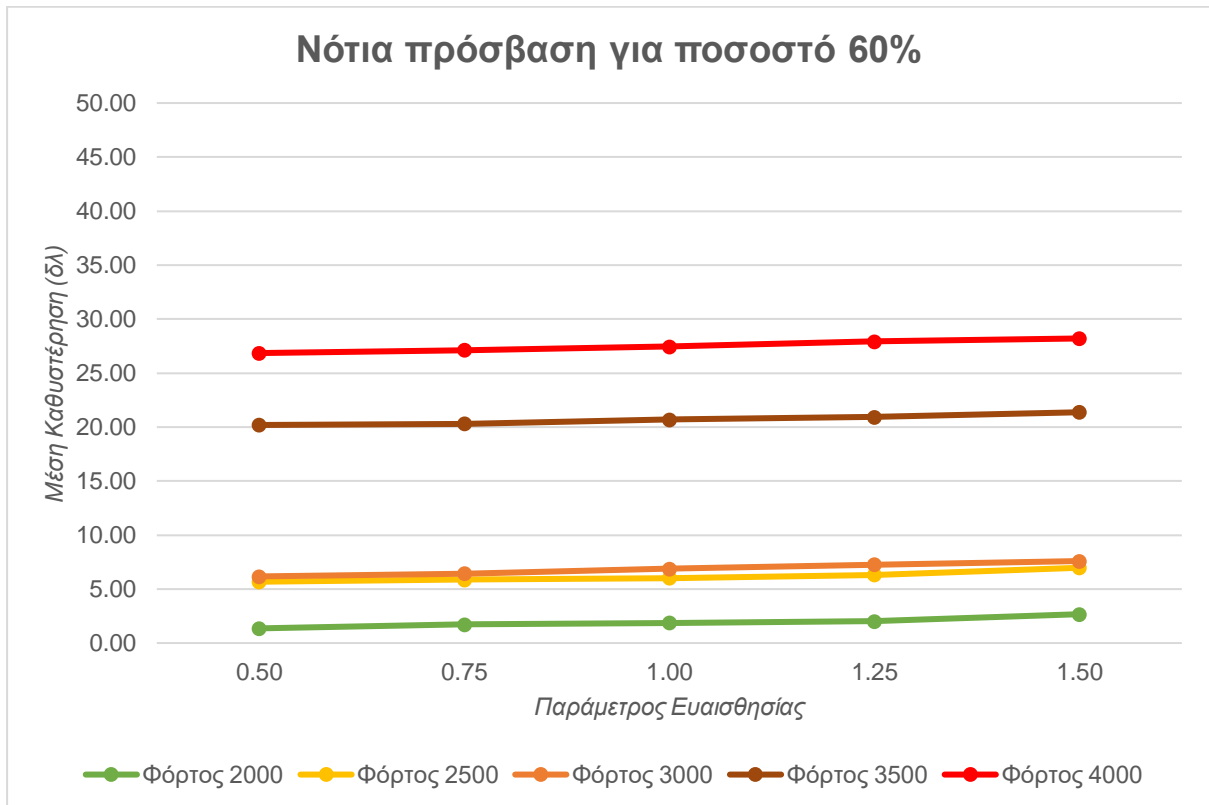
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι τέσσερις προσβάσεις για ποσοστό δεξιάς στροφής 60%, το μέγιστο δηλαδή ποσοστό που ορίστηκε για την διπλωματική εργασία. Η απότομη μεταβολή στον πολύ υψηλό φόρτο εξακολουθεί να παρατηρείται και στα επόμενα διαγράμματα. Ακόμη, εντοπίζεται πως για μεγάλο ποσοστό δεξιάς στροφής αυξάνεται η τιμή της μέσης καθυστέρησης, σε σχέση με τα προηγούμενα ποσοστά.



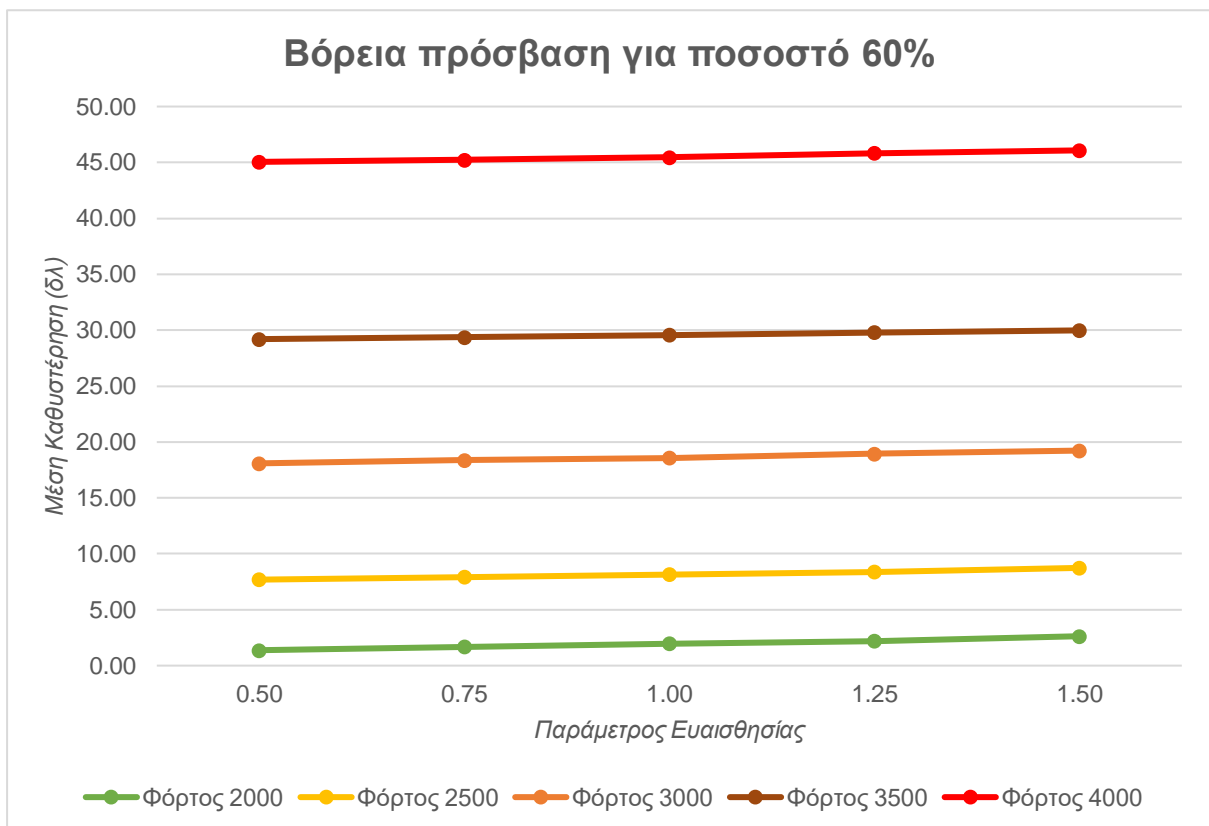
Διάγραμμα 4-34: Ανάλυση δυτικής πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%



Διάγραμμα 4-35: Ανάλυση ανατολικής πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%



Διάγραμμα 4-36: Ανάλυση νότιας πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%



Διάγραμμα 4-37: Ανάλυση βόρειας πρόσβασης στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο με ποσοστό δεξιάς λωρίδας 60%

Η διαδικασία με τα αποτελέσματα των ποσοστιαίων μεταβολών της μέσης καθυστέρησης πραγματοποιείται και σε αυτόν τον κυκλικό κόμβο. Αναλύεται η διαφοροποίηση του κυκλοφοριακού φόρτου, του ποσοστού δεξιάς στροφής και της παραμέτρου ευαισθησίας για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο, που θα παρουσιαστούν στους επόμενους πίνακες.

Οι παρακάτω πίνακες αναφέρονται στην ποσοστιαία μεταβολή της μέσης καθυστέρησης από τις αυξήσεις του κυκλοφοριακού φόρτου, κρατώντας το ποσοστό δεξιάς στροφής και την παράμετρο ευαισθησίας σταθερά.

Πίνακας 4.19: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 2000 και 2500 για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000 - 2500	20%	0.50	77.44%	54.44%	35.85%	82.93%
		0.75	78.99%	38.24%	69.82%	118.67%
		1.00	67.05%	47.62%	64.88%	106.67%
		1.25	37.55%	42.00%	48.68%	86.11%
		1.50	34.40%	38.46%	46.00%	78.91%

Πίνακας 4.20: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 2500 και 3000 για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2500 - 3000	20%	0.50	159.32%	117.99%	243.98%	83.33%
		0.75	160.32%	137.59%	176.66%	80.49%
		1.00	126.87%	87.63%	137.57%	67.74%
		1.25	126.35%	85.45%	113.71%	71.64%
		1.50	122.02%	84.62%	101.83%	63.76%

Πίνακας 4.21: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 3000 και 3500 για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
3000 - 3500	20%	0.50	26.63%	94.06%	110.09%	113.45%
		0.75	27.06%	80.00%	99.50%	114.19%
		1.00	29.54%	81.09%	101.25%	110.90%
		1.25	31.00%	73.42%	95.13%	99.42%
		1.50	31.23%	69.91%	90.50%	87.73%

Πίνακας 4.22: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των κυκλοφοριακών φόρτων 3500 και 4000 για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
3500 - 4000	20%	0.50	196.39%	73.81%	140.74%	149.91%
		0.75	186.05%	73.30%	138.38%	135.17%
		1.00	181.25%	73.42%	135.52%	131.61%
		1.25	167.45%	64.53%	133.54%	126.60%
		1.50	160.06%	57.77%	129.63%	124.72%

Για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο παρατηρείται έντονα πως η ποσοστιαία μεταβολή της μέσης καθυστέρησης είναι υψηλότερη από τους άλλους δύο κυκλικούς κόμβους, που αναλύθηκαν στις προηγούμενες υποενότητες. Αυτό υποδεικνύει ότι όσο αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος τόσο περισσότερο καταπονείται το οδικό δίκτυο και προκαλεί συμφόρηση.

Στη συνέχεια αναλύεται η ποσοστιαία μεταβολή της μέσης καθυστέρησης από τις αυξήσεις του ποσοστού δεξιάς στροφής, κρατώντας σταθερά τον κυκλοφοριακό φόρτο και την παράμετρο ευαισθησίας.

Πίνακας 4.23: Ποσοστά μεταβολής της μέσης καθυστέρησης μεταξύ των παραμέτρων ευαισθησίας για τον σπειροειδή κυκλικό κόμβο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	20%	0.50 - 0.75	3.76%	13.33%	6.29%	-8.54%
		0.75 - 1.00	27.54%	23.53%	21.30%	20.00%
		1.00 - 1.25	30.11%	19.05%	29.27%	20.00%
		1.25 - 1.50	9.17%	12.67%	13.21%	18.52%
2500	30%	0.50 - 0.75	7.98%	13.58%	24.00%	13.48%
		0.75 - 1.00	54.55%	19.57%	15.41%	25.29%
		1.00 - 1.25	9.56%	15.45%	9.01%	9.48%
		1.25 - 1.50	6.04%	13.39%	13.68%	11.73%
3000	40%	0.50 - 0.75	5.70%	3.83%	3.08%	8.46%
		0.75 - 1.00	12.28%	4.39%	3.64%	3.29%
		1.00 - 1.25	5.87%	6.73%	3.64%	4.37%
		1.25 - 1.50	7.30%	3.79%	2.54%	4.95%
3500	50%	0.50 - 0.75	2.95%	1.97%	1.99%	1.08%
		0.75 - 1.00	2.86%	2.42%	2.92%	1.44%
		1.00 - 1.25	5.44%	2.09%	2.47%	1.42%
		1.25 - 1.50	3.24%	1.85%	3.20%	1.94%
4000	60%	0.50 - 0.75	0.62%	1.01%	0.81%	0.38%
		0.75 - 1.00	1.57%	1.25%	0.86%	0.53%
		1.00 - 1.25	1.47%	1.64%	1.08%	0.81%
		1.25 - 1.50	1.52%	1.04%	0.93%	0.55%

Σύμφωνα με τον πίνακα 4.23, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος και όσο μεγαλώνει το ποσοστό δεξιάς στροφής, η ποσοστιαία μεταβολή της παραμέτρου ευαισθησίας ελαττώνεται, δηλαδή δεν εντοπίζεται μεγάλη μεταβολή της μέσης καθυστέρησης.

4.5 Σύγκριση κυκλικών κόμβων

Σε αυτή την υποενότητα πραγματοποιείται η σύγκριση ανά δύο των κυκλικών κόμβων. Συγκεκριμένα, γίνεται εντοπισμός των σημαντικών διαφορών ή των ομοιοτήτων για τους τρεις κυκλικούς κόμβους.

Η ομοιότητα που παρατηρείται και στους τρεις κυκλικούς κόμβους είναι η μείωση της μέσης ταχύτητας κατά την συνεχόμενη αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς εισέρχονται πολλά οχήματα, συμφορίζεται το οδικό δίκτυο και, κατά συνέπεια, αυξάνεται και ο χρόνος μετακίνησης. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι συγκρίσεις που υλοποιήθηκαν για τους ανά δύο κυκλικούς κόμβους, για χαμηλές και οι υψηλές τιμές κυκλοφορικών φόρτων, καθώς και για χαμηλά και υψηλά ποσοστά δεξιάς στροφής.

Πίνακας 4.24: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης καθυστέρησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και δύο λωρίδων για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	20%	0.50	-74.09%	-69.15%	-76.94%	-68.69%
		0.75	-73.58%	-70.94%	-75.33%	-69.22%
		1.00	-76.11%	-72.17%	-79.50%	-72.22%
		1.25	-77.39%	-74.56%	-80.63%	-72.71%
		1.50	-78.37%	-73.35%	-81.45%	-71.84%
	60%	0.50	-72.25%	-69.79%	-72.67%	-69.27%
		0.75	-71.88%	-70.66%	-73.07%	-69.67%
		1.00	-72.28%	-69.57%	-73.23%	-69.26%
		1.25	-71.54%	-69.48%	-72.66%	-68.67%
		1.50	-72.33%	-68.07%	-72.63%	-69.04%

Πίνακας 4.25: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης καθυστέρησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και δύο λωρίδων για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
3000	20%	0.50	-82.63%	-79.71%	-83.08%	-72.24%
		0.75	-82.44%	-78.71%	-83.71%	-72.91%
		1.00	-81.48%	-79.29%	-84.05%	-76.21%
		1.25	-82.76%	-79.76%	-84.53%	-76.88%
		1.50	-82.69%	-78.14%	-84.63%	-75.16%
	60%	0.50	-76.50%	-82.22%	-81.67%	-76.87%
		0.75	-79.08%	-82.18%	-82.01%	-78.47%
		1.00	-78.97%	-79.80%	-84.08%	-77.90%
		1.25	-79.82%	-79.31%	-83.31%	-77.31%
		1.50	-80.29%	-79.41%	-84.29%	-76.87%

Πίνακας 4.26: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης ταχύτητας μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και δύο λωρίδων για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	20%	0.50	13.46%	8.49%	15.35%	9.62%
		0.75	13.60%	9.73%	15.16%	10.23%
		1.00	15.77%	10.60%	18.62%	11.43%
		1.25	16.83%	12.49%	19.70%	12.01%
		1.50	17.97%	11.39%	20.83%	11.37%
	60%	0.50	7.79%	6.47%	7.98%	6.89%
		0.75	8.47%	7.06%	8.78%	7.35%
		1.00	8.60%	6.98%	8.83%	7.68%
		1.25	8.62%	7.38%	9.14%	7.34%
		1.50	8.78%	6.87%	9.44%	7.67%

Πίνακας 4.27: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης ταχύτητας μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και δύο λωρίδων για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
3000	20%	0.50	37.03%	22.85%	38.85%	16.86%
		0.75	37.82%	22.42%	39.83%	17.88%
		1.00	35.55%	23.14%	46.96%	20.00%
		1.25	39.10%	23.56%	49.64%	20.91%
		1.50	37.96%	21.92%	49.05%	19.70%
	60%	0.50	16.09%	18.03%	18.42%	13.82%
		0.75	19.02%	19.60%	19.78%	15.64%
		1.00	19.99%	18.43%	22.16%	15.74%
		1.25	20.89%	18.13%	21.46%	15.29%
		1.50	21.78%	18.78%	23.19%	14.83%

Πίνακας 4.28: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσου χρόνου μετακίνησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και δύο λωρίδων για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	20%	0.50	-12.49%	-8.16%	-14.00%	-9.23%
		0.75	-12.69%	-9.39%	-13.81%	-10.21%
		1.00	-14.81%	-10.40%	-16.61%	-11.37%
		1.25	-16.41%	-12.14%	-17.72%	-12.36%
		1.50	-17.48%	-11.77%	-18.80%	-12.04%
	60%	0.50	-7.35%	-6.12%	-7.52%	-6.71%
		0.75	-7.81%	-6.65%	-8.05%	-7.26%
		1.00	-8.30%	-6.74%	-8.51%	-7.63%
		1.25	-8.60%	-7.20%	-8.73%	-7.68%
		1.50	-9.05%	-6.96%	-9.08%	-8.13%

Πίνακας 4.29: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσου χρόνου μετακίνησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και δύο λωρίδων για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
3000	20%	0.50	-30.32%	-20.70%	-30.67%	-15.96%
		0.75	-30.79%	-20.34%	-31.86%	-16.96%
		1.00	-30.23%	-21.63%	-33.15%	-19.95%
		1.25	-32.46%	-22.34%	-34.43%	-20.92%
		1.50	-32.55%	-21.34%	-34.90%	-20.11%
	60%	0.50	-14.63%	-16.44%	-16.62%	-13.16%
		0.75	-16.92%	-17.56%	-17.41%	-14.50%
		1.00	-17.53%	-16.82%	-20.04%	-14.89%
		1.25	-18.89%	-16.97%	-19.62%	-14.69%
		1.50	-19.88%	-17.93%	-21.24%	-14.84%

Πίνακας 4.30: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης καθυστέρησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και σπειροειδή για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	20%	0.50	-95.07%	-95.44%	-94.38%	-95.99%
		0.75	-94.96%	-95.33%	-93.95%	-96.60%
		1.00	-94.38%	-94.74%	-93.94%	-96.37%
		1.25	-93.44%	-94.48%	-92.72%	-95.80%
		1.50	-93.29%	-93.68%	-92.28%	-94.99%
	60%	0.50	-88.16%	-90.29%	-86.76%	-89.66%
		0.75	-87.09%	-88.44%	-87.06%	-88.19%
		1.00	-86.17%	-87.51%	-85.03%	-86.71%
		1.25	-80.51%	-87.18%	-82.60%	-85.61%
		1.50	-81.01%	-82.98%	-80.13%	-83.68%

Πίνακας 4.31: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης καθυστέρησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και σπειροειδή για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
3000	20%	0.50	-92.02%	-93.51%	-90.28%	-92.63%
		0.75	-91.79%	-92.67%	-90.11%	-92.46%
		1.00	-91.34%	-92.91%	-90.54%	-93.21%
		1.25	-91.59%	-92.27%	-90.59%	-92.90%
		1.50	-91.29%	-91.23%	-90.36%	-92.02%
	60%	0.50	-66.31%	-80.69%	-68.29%	-33.47%
		0.75	-69.82%	-81.42%	-69.28%	-38.48%
		1.00	-70.53%	-79.44%	-73.27%	-39.92%
		1.25	-72.21%	-78.63%	-72.57%	-38.86%
		1.50	-73.22%	-79.13%	-73.85%	-39.72%

Πίνακας 4.32: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης ταχύτητας μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και σπειροειδή για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	20%	0.50	18.33%	12.97%	19.69%	14.54%
		0.75	19.04%	14.56%	19.88%	15.73%
		1.00	21.39%	15.59%	23.36%	17.31%
		1.25	23.12%	17.73%	24.23%	18.20%
		1.50	24.64%	16.95%	25.70%	17.70%
	60%	0.50	10.09%	8.88%	9.96%	8.84%
		0.75	10.75%	9.43%	10.97%	9.48%
		1.00	11.19%	9.54%	11.19%	9.78%
		1.25	10.85%	9.96%	11.28%	9.67%
		1.50	11.37%	9.44%	11.43%	9.95%

Πίνακας 4.33: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης ταχύτητας μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και σπειροειδή για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
3000	20%	0.50	44.47%	28.22%	44.41%	23.14%
		0.75	44.98%	27.61%	45.29%	24.07%
		1.00	43.17%	28.51%	47.47%	27.14%
		1.25	47.17%	29.24%	50.19%	28.57%
		1.50	46.32%	27.56%	49.96%	27.60%
	60%	0.50	15.16%	17.14%	15.93%	7.19%
		0.75	17.99%	18.31%	17.41%	8.98%
		1.00	18.53%	17.08%	20.36%	9.38%
		1.25	19.43%	17.50%	19.32%	8.66%
		1.50	20.01%	17.89%	20.87%	8.49%

Πίνακας 4.34: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσου χρόνου μετακίνησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και σπειροειδή για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	20%	0.50	-17.27%	-12.91%	-19.61%	-13.15%
		0.75	-17.53%	-14.12%	-17.60%	-16.15%
		1.00	-19.39%	-15.16%	-20.22%	-17.32%
		1.25	-20.79%	-16.72%	-21.04%	-17.86%
		1.50	-21.74%	-16.32%	-21.93%	-17.57%
	60%	0.50	-10.26%	-9.35%	-9.75%	-10.41%
		0.75	-10.62%	-9.74%	-10.39%	-10.80%
		1.00	-10.99%	-9.79%	-10.59%	-11.04%
		1.25	-10.65%	-10.19%	-10.64%	-11.02%
		1.50	-11.14%	-9.70%	-10.74%	-11.25%

Πίνακας 4.35: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσου χρόνου μετακίνησης μεταξύ κυκλικού κόμβου μιας λωρίδας και σπειροειδή για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
3000	20%	0.50	-34.50%	-24.98%	-33.59%	-22.12%
		0.75	-34.92%	-24.62%	-34.65%	-22.95%
		1.00	-34.46%	-26.01%	-35.97%	-25.82%
		1.25	-36.63%	-26.72%	-37.20%	-26.75%
		1.50	-36.66%	-25.90%	-37.68%	-25.94%
	60%	0.50	-13.61%	-16.49%	-14.44%	-7.66%
		0.75	-16.26%	-18.01%	-15.59%	-9.54%
		1.00	-16.93%	-17.26%	-18.34%	-9.98%
		1.25	-18.32%	-17.51%	-17.87%	-9.82%
		1.50	-19.11%	-18.44%	-19.33%	-9.96%

Πίνακας 4.36: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης καθυστέρησης μεταξύ κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και σπειροειδή για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	20%	0.50	-80.97%	-85.22%	-75.61%	-87.21%
		0.75	-80.91%	-83.94%	-75.47%	-88.94%
		1.00	-76.47%	-81.11%	-70.42%	-86.94%
		1.25	-70.98%	-78.29%	-62.41%	-84.59%
		1.50	-68.98%	-76.26%	-58.39%	-82.20%
	60%	0.50	-57.34%	-67.85%	-51.57%	-66.34%
		0.75	-54.08%	-60.59%	-51.96%	-61.06%
		1.00	-50.11%	-58.95%	-44.10%	-56.77%
		1.25	-31.53%	-58.00%	-36.36%	-54.07%
		1.50	-31.38%	-46.71%	-27.42%	-47.29%

Πίνακας 4.37: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης καθυστέρησης μεταξύ κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και σπειροειδή για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
4000	20%	0.50	-20.13%	-38.51%	24.19%	-8.66%
		0.75	-22.72%	-42.90%	19.42%	-12.24%
		1.00	-21.94%	-46.87%	15.90%	-12.91%
		1.25	-21.59%	-47.36%	9.75%	-13.96%
		1.50	-24.14%	-48.92%	0.13%	-16.69%
	60%	0.50	131.94%	178.53%	248.19%	419.61%
		0.75	119.38%	169.05%	248.21%	395.83%
		1.00	108.00%	167.12%	246.03%	379.54%
		1.25	104.05%	164.30%	234.02%	360.60%
		1.50	99.37%	157.77%	225.23%	345.22%

Πίνακας 4.38: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης ταχύτητας μεταξύ κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και σπειροειδή για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	20%	0.50	4.30%	4.13%	3.77%	4.49%
		0.75	4.78%	4.40%	4.09%	4.99%
		1.00	4.86%	4.51%	3.99%	5.28%
		1.25	5.39%	4.66%	3.79%	5.53%
		1.50	5.65%	4.99%	4.02%	5.68%
	60%	0.50	2.14%	2.27%	1.83%	1.83%
		0.75	2.11%	2.22%	2.01%	1.99%
		1.00	2.38%	2.39%	2.17%	1.96%
		1.25	2.05%	2.40%	1.97%	2.17%
		1.50	2.38%	2.41%	1.82%	2.12%

Πίνακας 4.39: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσης ταχύτητας μεταξύ κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και σπειροειδή για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
4000	20%	0.50	5.04%	5.17%	-0.72%	2.39%
		0.75	6.57%	4.90%	0.20%	3.41%
		1.00	8.70%	5.32%	1.61%	3.95%
		1.25	11.09%	5.26%	2.23%	3.51%
		1.50	11.15%	5.27%	4.06%	3.52%
	60%	0.50	-6.03%	-8.74%	-10.74%	-16.01%
		0.75	-9.86%	-8.65%	-11.09%	-15.52%
		1.00	-5.91%	-9.49%	-11.21%	-15.63%
		1.25	-4.77%	-8.81%	-10.24%	-14.41%
		1.50	-5.12%	-9.25%	-10.83%	-15.34%

Πίνακας 4.40: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσου χρόνου μετακίνησης μεταξύ κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και σπειροειδή για χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
2000	20%	0.50	-5.47%	-5.17%	-6.52%	-4.32%
		0.75	-5.55%	-5.22%	-4.40%	-6.62%
		1.00	-5.37%	-5.31%	-4.32%	-6.71%
		1.25	-5.25%	-5.21%	-4.04%	-6.28%
		1.50	-5.17%	-5.16%	-3.86%	-6.29%
	60%	0.50	-3.14%	-3.44%	-2.41%	-3.97%
		0.75	-3.05%	-3.31%	-2.54%	-3.81%
		1.00	-2.93%	-3.27%	-2.27%	-3.68%
		1.25	-2.24%	-3.23%	-2.09%	-3.62%
		1.50	-2.30%	-2.94%	-1.82%	-3.40%

Πίνακας 4.41: Σύγκριση ποσοστιαίας μεταβολής μέσου χρόνου μετακίνησης μεταξύ κυκλικού κόμβου δύο λωρίδων και σπειροειδή για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ποσοστό Στρεφουσών	Παράμετρος Ευαισθησίας	Δυτική	Νότια	Ανατολική	Βόρεια
4000	20%	0.50	-4.51%	-5.50%	4.03%	-2.83%
		0.75	-5.34%	-6.11%	2.25%	-3.18%
		1.00	-8.04%	-7.39%	2.17%	-3.25%
		1.25	-10.83%	-7.17%	2.26%	-3.48%
		1.50	-11.43%	-7.33%	1.36%	-3.96%
	60%	0.50	9.76%	11.07%	16.85%	24.20%
		0.75	9.13%	10.71%	16.81%	23.98%
		1.00	8.16%	10.83%	16.80%	23.94%
		1.25	8.11%	11.18%	16.78%	23.72%
		1.50	8.21%	11.18%	16.82%	23.48%

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύνοψη των αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις των σεναρίων προσομοίωσης, καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές. Στο τέλος του κεφαλαίου παραθέτονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

5.1 Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της λειτουργίας ισόπεδων κυκλικών κόμβων με χρήση μικροσκοπικής προσομοίωσης. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις είναι το AIMSUN.

Για την διερεύνηση χρησιμοποιήθηκαν τρεις κυκλικοί κόμβοι, ο απλός κυκλικός κόμβος με μία λωρίδα κυκλοφορίας, ο απλός κυκλικός κόμβος με δύο λωρίδες κυκλοφορίας και ο σπειροειδής κυκλικός κόμβος. Για να ερευνηθεί το επίπεδο λειτουργίας των τριών κυκλικών κόμβων πραγματοποιήθηκε η μεταβολή κάποιων παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι ήταν ο κυκλοφοριακός φόρτος, το ποσοστό δεξιάς στροφής και η παράμετρος ευαισθησίας. Για κάθε έναν από αυτούς δημιουργήθηκαν τα σενάρια προσομοίωσης ώστε να μελετηθούν οι κυκλικοί κόμβοι. Για να αξιολογηθούν, χρησιμοποιήθηκαν τρία μεγέθη, η μέση καθυστέρηση, η μέση ταχύτητα και ο μέσος χρόνος μετακίνησης.

Με βάση τα αποτελέσματα, που προηγήθηκαν στο κεφάλαιο 4^ο, προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα από την ανάλυση των σεναρίων προσομοίωσης.

Αρχικά, συμπεραίνεται ότι κατά την αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου η μέση καθυστέρηση αυξάνεται και στους τρεις κυκλικούς κόμβους. Στους χαμηλούς φόρτους οι καθυστερήσεις δεν επηρεάζουν σημαντικά καμία από τις άλλες δύο παραμέτρους. Το γεγονός αυτό καθίσταται ως προσδοκώμενο, καθώς στους χαμηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους δεν έχουν δημιουργηθεί ουρές στις προσβάσεις και οι τιμές της μέσης καθυστέρησης είναι χαμηλές. Κάτι που γίνεται αντιληπτό και στους τρεις κλάδους είναι ότι οι κύριοι κλάδοι, ο δυτικός και ο ανατολικός κλάδος, που φορτίζονται με τον υψηλότερο κυκλοφοριακό φόρτο σε σχέση με τους δευτερεύοντες, είναι ότι καταπονούνται περισσότερο, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγαλύτερη συμφόρηση.

Όσον αφορά το ποσοστό δεξιάς στροφής για τον κυκλικό κόμβο μιας λωρίδας κυκλοφορίας συμπεραίνεται πως όσο αυξάνεται το ποσοστό, τόσο στους χαμηλούς όσο και στους υψηλούς φόρτους κυκλοφορίας, διαπιστώνεται μείωση της μέσης καθυστέρησης. Αυτό δικαιολογείται

με το ότι όσα οχήματα εισέρχονται στον κυκλικό κόμβο εξέρχεται ένα μεγάλο ποσοστό οχημάτων και έτσι δεν υπάρχει συμφόρηση του οδικού δικτύου. Η ίδια διαπίστωση εντοπίζεται και στον κυκλικό κόμβο με δύο λωρίδες κυκλοφορίας, μόνο που σε αυτόν οι τιμές της μέσης καθυστέρησης είναι πολύ χαμηλότερες σε αντίθεση με τον πρώτο. Αντίθετα, στον σπειροειδή κυκλικό κόμβο, όσο αυξάνεται το ποσοστό δεξιάς στροφής συμπεραίνεται μεγάλη αύξηση της μέσης καθυστέρησης. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς στον σπειροειδή υπάρχει μια λωρίδα αποκλειστικής δεξιάς στροφής και όσο αυξάνεται το ποσοστό φόρτου σε εκείνη την λωρίδα δημιουργείται μεγάλη συμφόρηση.

Ακόμη, η παράμετρος ευαισθησίας συναντάται στο μοντέλο ακολουθίας οχημάτων, ένα μαθηματικό πρότυπο που υιοθετεί το λογισμό AIMSUN. Η παράμετρος αυτή συσχετίζει τις επιβραδύνσεις, μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων και τη συμπεριφορά του ακολουθούστος οχήματος σε σχέση με το προπορευόμενο. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της παραμέτρου πάνω στους κυκλικούς κόμβους. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι πως κατά την αύξηση της παραμέτρου ευαισθησίας η μέση καθυστέρηση και στους τρεις κυκλικούς κόμβους αυξάνεται σημαντικά. Αυτό εξηγείται καθώς όσο περισσότερη απόσταση υπάρχει μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων σε συνδυασμό με την αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου, δημιουργείται συμφόρηση στο οδικό δίκτυο.

Συνοψίζοντας, κατά την αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου σε όλους τους κυκλικούς κόμβους παρατηρείται αύξηση της μέσης καθυστέρησης, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνει το οδικό δίκτυο και να επηρεάζεται το επίπεδο εξυπηρέτησης. Πιο συγκεκριμένα, με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων, ο απλό κυκλικός κόμβος μιας λωρίδας λειτουργεί καλύτερα μέχρι 2000 ΜΕΑ/ώρα κυκλοφοριακό φόρτο, ο απλός κυκλοφοριακός φόρτος με δύο λωρίδες και ο σπειροειδής αποδίδουν με 3500 ΜΕΑ/ώρα κυκλοφοριακό φόρτο. Ακόμη, το ποσοστό δεξιάς στροφής που δίνει καλύτερες αποδόσεις και στους τρεις κυκλικούς κόμβους είναι 50%, ενώ στις υπόλοιπες κινήσεις 30% στην ευθεία κίνηση και 20% στην αριστερή κίνηση. Τέλος, η παράμετρος ευαισθησίας αποτελεί καθοριστικό ρόλο στην προσομοίωση των κυκλικών κόμβων. Παρατηρήθηκε πως και για τους τρεις κυκλικούς κόμβους η τιμή της παραμέτρου ευαισθησίας που αποδίδει λειτουργικότερες αποδόσεις είναι 1.00 διότι είναι η μέση τιμή και η ασφαλέστερη για την απόσταση διαδοχικών οχημάτων με την αποφυγή των ατυχημάτων.

Τέλος, όσον αφορά τη σύγκριση των κόμβων μεταξύ τους διαπιστώνεται ότι οι σπειροειδείς κυκλικοί κόμβοι έχουν καλύτερη λειτουργική αποδοτικότητα υπό μεγάλους φόρτους κυκλοφορίας. Οι απλοί κυκλικοί κόμβοι μιας λωρίδας κυκλοφορίας εξυπηρετούν καλύτερα περιοχές με μικρή ζήτηση σε αντίθεση με τους απλούς κυκλικούς κόμβους με δύο λωρίδες, διότι όταν αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος φορτίζεται το δίκτυο σημαντικά.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Έχοντας φτάσει στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, γίνεται επισήμανση για περαιτέρω διερεύνηση της λειτουργίας των κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται να ληφθεί γνώση για τους συγκεκριμένους φόρτους μικρότερο βήμα του κυκλοφοριακού φόρτου, ώστε να ερευνηθεί καλύτερα η μέση καθυστέρηση. Ακόμη, θα μπορούσε ερευνηθεί η λειτουργία ενός σπειροειδή και ενός dutch κυκλικού κόμβου με σκοπό να εξεταστεί πως θα επιδράσουν οι πεζοί και οι ποδηλάτες στο επίπεδο λειτουργικότητας των κόμβων. Τέλος, προτείνεται να διερευνηθούν και άλλοι τύποι κυκλικών κόμβων, όπως οι “flower” κυκλικοί κόμβοι που ερεύνησαν οι Ciampa et al. (2020), οι οποίοι είναι ευρέως διαδεδομένοι στην Ευρώπη σε σύγκριση με τους συμβατικούς κυκλικούς κόμβους με δύο λωρίδες κυκλοφορίας.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

6.1 Διεθνής Βιβλιογραφία

Aimsun Users' Manual v8, *TSS-Transport Simulation Systems*, 2015.

Alsaleh, N. M., and Shbeeb, L. I., Turbo, Flower and Conventional Roundabouts in Jordan. *6th Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering*, 2018.

Barceló, J., Ferrer, J. L., García, D., and Grau, R., Microscopic Traffic Simulation for ATT Systems Analysis A Parallel Computing Version, 1998.

Ciampa, D., Diomedi, M., Giglio, F., and Olita, S. 2020. Effectiveness of unconventional roundabouts in the design of suburban intersections. *European Transport*, Issue 80, ISSN:1825-3997.

Dabiri, A. R., Aghayan, I., and Hadadi, F. 2020. A comparative analysis of the performance of turbo roundabouts based on geometric characteristics and traffic scenarios. *Transportation Letters*, ISSN: 1942-7867.

Elhassy, Z., Senna, H. A., Shaaban. K., and Radwan. E. 2020. The Implications of Converting a High-Volume Multilane Roundabout into a Turbo Roundabout. *Journal of Advanced Transportation*. pp. 12.

Engelsman, J. C., and Uken, M., Turbo roundabouts as an alternative to two lane roundabouts. *26th Southern African Transport Conference*, Pretoria, South Africa, 9-12 July 2007.

Gallelli, V., Iuele, T., Vaiana, R., and Vitale, A. 2017. Investigating the Transferability of Calibrated Microsimulation Parameters for Operational Performance Analysis in Roundabouts. *Journal of Advanced Transportation*, pp. 10.

Giuffrè, O., Granà, A., and Marino, S. 2012. Comparing Performances of Turbo-roundabouts and Double-lane Roundabouts. *Modern Applied Science*, Vol. 6, No. 10.

Giuffrè, O., Granà, A., Tumminello, M. L., Giuffrè, T., Trubia, S., Sferlazza, A., and Rencelj, M. 2018. Evaluation of Roundabout Safety Performance through Surrogate Safety Measures from Microsimulation. *Journal of Advanced Transportation*, pp. 14.

Highway Capacity Manual 2010, *Transportation Research Board*.

P. G. Gipps, A Behavioural Car-following Model for Computer Simulation, *Transp. Res.* 15 B, pp. 105-111, 1981.

P. G. Gipps, A Model for the Structure of Lane-Changing Decisions, *Transp. Res.* 20 B, pp. 403-414, 1986.

Rashed, O., and Imam, R. 2020. A functional and operational comparison between signalized and unsignalized roundabouts. *International Journal of Engineering Research and Technology*, Vol. 13, Number 6, pp. 1448-1454.

Spyropoulou, I., Simulation using Gipps' car-following model – An in-depth analysis. *Transportmetrica*, Vol. 3, No. 3, 2007.

Zhang, Y., Liu, H., Wang, J., and Wang, G. The SIDRA Based Analysis on Operations of Three-Leg Modern Roundabout with Single-Lane Approaches. *5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering*, 2020.

6.2 Ελληνική Βιβλιογραφία

Αντωνίου, Κ., και Σπυροπούλου, Ι., 2015. *Αρχές Κυκλοφοριακής Τεχνικής και Προσομοίωσης*. Αθήνα: Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.

Σπυροπούλου, Ι., Σημειώσεις Μαθήματος Οδοποιία III, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, 2020.

Φραντζεσκάκης, Ι. Μ., Γκόλιας, Ι. Κ., και Πιτσιάβα-Λατινοπούλου, Μ. Χ., 2009. Μεγέθη Κυκλοφοριακής Ροής **In**: Παπασωτηρίου.2000. *Κυκλοφοριακή Τεχνική*, Αθήνα, σελ. 5-27.