



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ
ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ**

ΕΙΡΗΝΗ ΛΟΥΓΚΑ & ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΙΜΙΛΙΟΣ ΠΕΤΡΑΚΗΣ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2025

© 2025 Ειρήνη Λούγκα και Γεώργιος Αιμίλιος Πετράκης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Αθανάσιος Θεοφιλάτος Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Παντελεήμων Κοπελιάς Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Απόστολος Αναγνωστόπουλος Συμβασιούχος Διδάσκων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμές μας ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μας, κ. Αθανάσιο Θεοφιλάτο, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές. Ξεχωριστή αναφορά αξίζει και ο υποψήφιος διδάκτορας κ. Σπύρος Μπάρκας, ο οποίος συνέβαλε καθοριστικά με τις ουσιαστικές του παρατηρήσεις, διευκολύνοντας σημαντικά την πορεία της έρευνας. Ευχαριστούμε επίσης το AIMSUN Support Team για την άμεση και πολύτιμη υποστήριξη που μας παρείχε σε δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε σε σχέση με το λογισμικό. Τέλος, ευχαριστούμε θερμά τις οικογένειες και τους φίλους μας για την αδιάκοπη στήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνση που μας πρόσφεραν σε όλη την διάρκεια των σπουδών μας.

Ειρήνη Λούγκα και Γεώργιος Αιμίλιος Πετράκης

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ

Ειρήνη Λούγκα και Γεώργιος Αιμίλιος Πετράκης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2025

Επιβλέπων Καθηγητής: Αθανάσιος Θεοφιλάτος, Επίκουρος Καθηγητής

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τις κυκλοφοριακές και περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας της περιφερειακής οδού της Κατερίνης μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης με τη χρήση του λογισμικού AIMSUN, με έμφαση στην επίδραση των βαρέων οχημάτων στην απόδοση του δικτύου. Αναπτύχθηκε ένα λεπτομερές μικροσκοπικό κυκλοφοριακό μοντέλο της υπό μελέτη περιοχής και υλοποιήθηκαν τρία σενάρια προσομοίωσης: η υφιστάμενη κυκλοφοριακή κατάσταση, ένα σενάριο χωρίς βαρέα οχήματα (0%) και, τέλος, ένα σενάριο στο οποίο το ποσοστό των βαρέων οχημάτων τριπλασιάστηκε (300%). Τα αποτελέσματα ανέδειξαν τις επιπτώσεις των διαφορετικών ποσοστών βαρέων οχημάτων σε βασικούς δείκτες απόδοσης, όπως η μέση ταχύτητα, η καθυστέρηση ταξιδιού, η κυκλοφοριακή πυκνότητα και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Τα ευρήματα της εργασίας αυτής παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τον ρόλο των εμπορευματικών μεταφορών στη δυναμική της κυκλοφορίας και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ παράλληλα αναδεικνύουν τη χρησιμότητα των εργαλείων προσομοίωσης στην ανάλυση και βελτίωση των οδικών υποδομών.

Λέξεις Κλειδιά: Προσομοίωση κυκλοφορίας, Κυκλοφοριακός φόρτος, Κυκλοφοριακές Επεμβάσεις, Βαρέα οχήματα

ANALYSIS OF TRAFFIC AND ENVIRONMENTAL CONDITIONS AT URBAN NODES

Eirini Lougka and Giorgos Aimilios Petrakis

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2025

Supervisor: Athanasios Theofilatos, Assistant Professor

Abstract

This thesis investigates the traffic and environmental conditions of the Katerini ring road through microsimulation using the AIMSUN software, with a focus on the impact of heavy vehicles on network performance. A detailed microscopic traffic model of the study area was developed, and three simulation scenarios were implemented: the current traffic condition, a scenario with no heavy vehicles (0%), and lastly a scenario where the proportion of heavy vehicles was tripled (300%). The results revealed the effects of varying proportions of heavy vehicles on key performance indicators, including average speed, travel delay, traffic density, and carbon dioxide emissions. These findings of this thesis offer valuable insights into the role of freight transportation in traffic dynamics and environmental impact, and also highlight the usefulness of simulation tools in analyzing and improving road infrastructure.

Keywords: *Traffic Simulation, Traffic Flow, Traffic Intervention, Heavy Vehicles*

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο	1
1.2 Βαρέα οχήματα στην Ελλάδα	1
1.2.1 Νομοθετικό πλαίσιο για την Λειτουργία και Κυκλοφορία Βαρέων Οχημάτων	3
1.2.2 Ευρωπαϊκή Πολιτική για Μεταφορές	3
1.3 Περιοχής Μελέτης	4
1.4 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	7
1.5 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	8
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	9
2.1 Ορισμοί	9
2.2 Συστήματα και Σχεδιασμός Μεταφορών	12
Κεφάλαιο 3 Λογισμικό Προσομοίωσης AIMSUN	15
3.1 Μεθοδολογία Ανάπτυξης & Προσομοίωσης στο AIMSUN	16
3.1.1 Διαμόρφωση Γεωμετρίας Οδικού Δικτύου	16
3.1.2 Διαμόρφωση Δομής Οδικού Δικτύου	26
3.1.3 Σενάρια Προσομοίωσης Κυκλοφορίας	35
Κεφάλαιο 4 Ανάλυση & Σύγκριση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης	36
4.1 Κυκλοφοριακά Μεγέθη και Μεταβλητές Αξιολόγησης	36
4.1.1 Αποτελέσματα & Συγκριτική Αξιολόγηση Μέσης Χρονικής Καθυστέρησης (delay time)	38
4.1.2 Αποτελέσματα & Συγκριτική Αξιολόγηση Μέσης Ταχύτητας (speed)	45
4.1.3 Αποτελέσματα & Συγκριτική Αξιολόγηση Εκπομπών του Διοξειδίου του Άνθρακα (CO ₂)	52
4.1.4 Αποτελέσματα & Συγκριτική Αξιολόγηση Πυκνότητας (density)	57
4.1.5 Λόγος Όγκου προς Χωρητικότητα (V/C ratio)	57
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα & Προτάσεις	65
5.1 Συμπεράσματα	65
5.2 Προτάσεις για περεταίρω Έρευνα	67
Κεφάλαιο 6 Βιβλιογραφία	68

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Μεγέθη κυκλοφοριακής ροής σε μικροσκοπικό και μακροσκοπικό επίπεδο...	9
Πίνακας 2.2: Σύγκριση Μακροσκοπικού-Μικροσκοπικού Μοντέλου.....	10
Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικός Πίνακας Μεταβλητών.....	37
Πίνακας 4.2: Πίνακας Μεταβλητών Λογισμικού AIMSUN.....	37
Πίνακας 4.3: Προσδιορισμός LOS με βάση το λόγο V/C	58
Πίνακας 4.4: Συγκεντρωτικός Πίνακας Τελικών Αποτελεσμάτων.....	64
Πίνακας 5.1: Τελικός Πίνακας Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης.....	65

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Περιφερειακή οδός Κατερίνης.....	5
Εικόνα 1.2: Περιοχή μελέτης του Περιφερειακού δρόμου της Κατερίνας.....	5
Εικόνα 1.3: Κόμβος 1.....	6
Εικόνα 1.4: Κόμβος 2.....	6
Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας σχεδιασμού 4-βημάτων.....	14
Εικόνα 3.1: Create a section.....	17
Εικόνα 3.2: Generate Opposite Direction.....	17
Εικόνα 3.3: Generated.....	17
Εικόνα 3.4: Choose Sections.....	18
Εικόνα 3.5: Create a Node.....	18
Εικόνα 3.6: Node Created.....	18
Εικόνα 3.7: Setting Origin and Destination.....	19
Εικόνα 3.8: Create a Roundabout.....	19
Εικόνα 3.9: Roundabout Created.....	19
Εικόνα 3.10: Option 1: Yield Sign.....	19
Εικόνα 3.11: Option 2: Yield Sign.....	20
Εικόνα 3.12: Stop Line.....	20
Εικόνα 3.13: Created Stop Line.....	20
Εικόνα 3.14: Road Type.....	21
Εικόνα 3.15: Create a Solid Line.....	21
Εικόνα 3.16: Created Solid Line.....	21
Εικόνα 3.17: Create a Centroid	22
Εικόνα 3.18: Created Centroids.....	22
Εικόνα 3.19: Centroid Origin-Destination.....	23
Εικόνα 3.20: Ζώνες.....	24
Εικόνα 3.21: Create a Detector.....	25
Εικόνα 3.22: Detectors.....	25
Εικόνα 3.23: Τελικό Μοντέλο Μελέτης στο Aimsun.....	26
Εικόνα 3.24: Διαμόρφωση Κεντροειδών.....	27

Εικόνα 3.25: Δημιουργία OD Matrix.....	27
Εικόνα 3.26: Δημιουργία OD Matrix για IX.....	28
Εικόνα 3.27: Πίνακας Προέλευσης-Προορισμού για IX.....	28
Εικόνα 3.28: Δημιουργία OD Matrix για βαρέα οχήματα.....	29
Εικόνα 3.29: Πίνακας Προέλευσης-Προορισμού για βαρέα οχήματα.....	29
Εικόνα 3.30: Διαδικασία δημιουργίας Traffic Demand.....	30
Εικόνα 3.31: Ρύθμιση ποσοστού βαρέων οχημάτων Σενάριο 1 ^ο	31
Εικόνα 3.32: Ρύθμιση ποσοστού βαρέων οχημάτων Σενάριο 2 ^ο	31
Εικόνα 3.33: Ρύθμιση ποσοστού βαρέων οχημάτων Σενάριο 3 ^ο	32
Εικόνα 3.34: Διαδικασία Δημιουργίας Δυναμικών Σεναρίων.....	33
Εικόνα 3.35: Διαδικασία Δημιουργίας Δυναμικών Σεναρίων.....	33
Εικόνα 3.36: Δημιουργία Replications.....	34
Εικόνα 3.37: Δυναμικό Σενάριο	34
Εικόνα 4.1: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 1 (ολικό).....	38
Εικόνα 4.2: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 1 (Κόμβος K1).....	38
Εικόνα 4.3: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 1 (Κόμβος K2).....	39
Εικόνα 4.4: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 2 (ολικό).....	40
Εικόνα 4.5: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 2 (Κόμβος 1).....	40
Εικόνα 4.6: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 2 (Κόμβος 2).....	41
Εικόνα 4.7: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 3 (ολικό).....	42
Εικόνα 4.8: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 3 (Κόμβος 1).....	42
Εικόνα 4.9: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 3 (Κόμβος 2).....	43
Εικόνα 4.10: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 1 (ολικό).....	45
Εικόνα 4.11: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 1 (Κόμβος 1).....	46
Εικόνα 4.12: Μέση ταχύτητα Σενάριο 1 (Κόμβος K2).....	47
Εικόνα 4.13: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 2 (ολικό).....	47
Εικόνα 4.14: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 2 (Κόμβος K1).....	48
Εικόνα 4.15: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 2 (Κόμβος K2).....	49
Εικόνα 4.16: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 3 (ολικό).....	49
Εικόνα 4.17: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 3 (Κόμβος K1).....	50

Εικόνα 4.18: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 3 (Κόμβος K2).....	50
Εικόνα 4.19: Όρια εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO ₂ (g/km).....	52
Εικόνα 4.20: Εκπομπές CO ₂ σενάριο 1 (Κόμβος K2).....	53
Εικόνα 4.21: Εκπομπές CO ₂ σενάριο 1 (Κόμβος K1).....	53
Εικόνα 4.22: Εκπομπές CO ₂ σενάριο 2 (Κόμβος K2).....	54
Εικόνα 4.23: Εκπομπές CO ₂ σενάριο 2 (Κόμβος K1).....	54
Εικόνα 4.24: Εκπομπές CO ₂ σενάριο 3 (Κόμβος K2).....	55
Εικόνα 4.25: Εκπομπές CO ₂ σενάριο 3 (Κόμβος K1).....	55
Εικόνα 4.26: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 1 (ολικό δίκτυο).....	58
Εικόνα 4.27: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 1 (κόμβος K1).....	59
Εικόνα 4.28: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 1 (κόμβος K2).....	59
Εικόνα 4.29: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 2 (ολικό δίκτυο).....	60
Εικόνα 4.30: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 2 (κόμβος K1).....	61
Εικόνα 4.31: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 2 (κόμβος K2).....	61
Εικόνα 4.32: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 3 (ολικό δίκτυο).....	62
Εικόνα 4.33: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 3 (κόμβος K1).....	63
Εικόνα 4.34: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 3 (κόμβος K2).....	63

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 4.1: Μέση Χρονική Καθυστέρηση ανά ποσοστό Β.Ο.	44
Γράφημα 4.2: Μέση Ταχύτητα ανά ποσοστό Β.Ο.	51
Γράφημα 4.3: Μέση τιμή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂) ανά ποσοστό Β.Ο.	56
Γράφημα 4.4: Μέση τιμή πυκνότητας ανά ποσοστό Β.Ο.	57

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Η περιφερειακή οδός της Κατερίνης αποτελεί έναν από τους βασικούς οδικούς άξονες της περιοχής της Πιερίας καθώς συνδέει την πόλη με τον κύριο κορμό του εθνικού δικτύου και διευκολύνει τη διασύνδεση με γειτονικές πόλεις, όπως η Θεσσαλονίκη προς βορρά και η Λάρισα και η Αθήνα προς νότο. Η γεωγραφική της θέση την καθιστά «κρίκο» τόσο για την τοπική κινητικότητα όσο και για τις διερχόμενες μετακινήσεις καθώς εξυπηρετεί μεγάλο όγκο οχημάτων, μεταξύ των οποίων και σημαντικό ποσοστό βαρέων οχημάτων που σχετίζονται με τις εμπορευματικές μεταφορές.

Η σημασία της περιφερειακής οδού έγκειται στο γεγονός ότι αποφορτίζει το εσωτερικό οδικό δίκτυο της πόλης της Κατερίνης από μεγάλο μέρος της κυκλοφορίας. Ωστόσο, η αυξανόμενη παρουσία βαρέων οχημάτων δημιουργεί προκλήσεις τόσο για την ομαλή ροή όσο και για την ασφάλεια, ενώ εντείνει τον κυκλοφοριακό φόρτο σε κρίσιμα σημεία. Οι εμπορευματικές μεταφορές, αν και απαραίτητες για την τοπική και εθνική οικονομία, έχουν άμεση επίδραση στη λειτουργικότητα του δικτύου, καθώς τα βαρέα οχήματα χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες ταχύτητες και διαφορετικά πρότυπα κίνησης σε σχέση με τα ελαφρά οχήματα.

Το κίνητρο για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης πηγάζει από την ανάγκη καλύτερης κατανόησης των επιπτώσεων που έχουν τα βαρέα οχήματα στην αστική κυκλοφορία της περιφερειακής οδού της Κατερίνης και από την προοπτική αξιοποίησης των αποτελεσμάτων για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του δικτύου. Η ανάλυση σεναρίων με διαφορετικά ποσοστά βαρέων οχημάτων επιτρέπει την αποτύπωση πιθανών μελλοντικών εξελίξεων, αλλά και την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του οδικού άξονα υπό συνθήκες φόρτου.

1.2 Βαρέα οχήματα στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα τα βαρέα οχήματα χαρακτηρίζονται από υψηλό μέσο όρο ηλικίας, γεγονός που συνδέεται τόσο με μειωμένη ασφάλεια όσο και αυξημένες περιβαλλοντικές επιβραδύνσεις. Σύμφωνα με στοιχεία του Συνδέσμου Αντιπροσώπων Αυτοκινήτων (ΣΕΑΑ), ο μέσος όρος ηλικίας βαρέων οχημάτων ανέρχεται σε περίπου 18,8 έτη, σε σύγκριση με τον ευρωπαϊκό μέσο όρο που κυμαίνεται περίπου στα 12 έτη. Αυτή η διαφορά στην ηλικία συνεπάγεται μεγαλύτερα

επίπεδα φθοράς, πιθανές βλάβες στο μηχανολογικό σύστημα και αυξημένο κίνδυνο τροχαίων συμβάντων. Πιο συγκεκριμένα, τα βαρέα οχήματα ηλικίας 16-20 ετών φαίνεται να είναι 33,5 φορές πιο πιθανό να εμπλακούν σε ατυχήματα σε σχέση με αντίστοιχα οχήματα ηλικίας 0-5 ετών, ενώ ο αριθμός θυμάτων είναι δωδεκάμισι φορές μεγαλύτερος από τα νεότερα οχήματα. Αυτές οι στατιστικές δείχνουν ότι η ηλικία του οχήματος σχετίζεται άμεσα με την επικινδυνότητα για οδηγούς, συνεπιβάτες και άλλους χρήστες του οδικού δικτύου.

Ένα από τα βασικά προβλήματα που προκύπτουν από την παλαιότητα των οχημάτων είναι η μειωμένη απόδοση τους, δηλαδή η επιβράδυνση σε επιτάχυνση, ο μεγαλύτερος χρόνος πορείας, οι αυξημένες καθυστερήσεις σε ανηφορικά τμήματα ή επιφορτισμένα οδικά δίκτυα. Επιπλέον, τα παλιά οχήματα συνήθως διαθέτουν λιγότερο αποτελεσματικά συστήματα εκπομπών και φιλτραρίσματος καυσαερίων, με αποτέλεσμα υψηλότερα ποσοστά εκπομπών CO₂ και άλλων ρυπογόνων ουσιών. Αυτό οφείλεται σε ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό των βαρέων οχημάτων που είναι η εξάρτηση τους από συμβατικά καύσιμα (κυρίως πετρέλαιο). Στην Ελλάδα, καταγράφονται λίγες περιπτώσεις βαρέων οχημάτων με εναλλακτικά καύσιμα ή τεχνολογίες μειωμένων εκπομπών. Αυτό σημαίνει ότι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των βαρέων οχημάτων παραμένει υψηλό, ιδίως σε κατοικημένες περιοχές και αστικά κέντρα.

Αναλυτικότερα, παρά τη γενική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου την τελευταία δεκαετία, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τα βαρέα οχήματα ακολουθούν ανοδική πορεία από το 2014, με μοναδική εξαίρεση το έτος 2020 λόγω των περιορισμών της πανδημίας. Συνολικά, την περίοδο 1990-2019, οι εκπομπές από την κατηγορία αυτή αυξήθηκαν κατά 29%. Το μεγαλύτερο μέρος, περίπου το 85% προέρχεται από τα βαρέα οχήματα, ενώ το υπόλοιπο 15% αποδίδεται στα λεωφορεία και τα ρυμουλκούμενα. Παρότι η ενεργειακή αποδοτικότητα των βαρέων οχημάτων βελτιώθηκε σημαντικά, η εξέλιξη αυτή δεν ήταν αρκετή ώστε να ανακοπεί η αύξηση των εκπομπών. Ο κύριος λόγος είναι η ολοένα και μεγαλύτερη ζήτηση για οδικές εμπορευματικές μεταφορές. Ενδεικτικά, την περίοδο 2000-2019 οι μεταφορές με φορτηγά κατέγραψαν 31% αύξηση. Ως αποτέλεσμα, το μερίδιο των φορτίων που διακινήθηκαν μέσω βαρέων οχημάτων ανήλθε από 72% το 2000 σε 76,4% το 2019. Η έντονη αυτή αύξηση στην οδική μεταφορά αντιστάθμισε τα οφέλη από την βελτίωση της αποδοτικότητας τους.

Παράλληλα, η ηλικία των οχημάτων επηρεάζει όχι μόνο τις εκπομπές και την ασφάλεια αλλά και το κόστος συντήρησης. Τα γερασμένα οχήματα έχουν αυξημένες απαιτήσεις σε εργασίες επισκευής, συχνότερους τεχνικούς ελέγχους, μεγαλύτερες φθορές, ενώ ταυτόχρονα η ανταπόκριση στις τεχνολογίες εκπομπών (π.χ. φίλτρα, SCR, EGR) είναι πιο δύσκολη και λιγότερο αποδοτική.

Τα προβλήματα αυτά συνθέτουν ένα πλέγμα προκλήσεων που απαιτεί ολοκληρωμένες πολιτικές και στρατηγικές. Μεταξύ αυτών είναι η ανανέωση του στόλου με νεότερα, πιο αποδοτικά και καθαρότερα οχήματα, η εφαρμογή νομοθετικών περιορισμών στις εκπομπές και στην ηλικία των οχημάτων, η προώθηση χρήσης εναλλακτικών καυσίμων και τεχνολογιών χαμηλού αποτυπώματος, καθώς και η ενίσχυση των ελέγχων και της συντήρησης τους. Η επίγνωση των προβλημάτων αυτών αποτελεί σημαντικό κίνητρο για μελέτες όπως η παρούσα, όπου η προσομοίωση μπορεί να συμβάλει στον χαρακτηρισμό των επιπτώσεων και στην εκτίμηση λύσεων.

1.2.1 Νομοθετικό πλαίσιο για την Λειτουργία και Κυκλοφορία Βαρέων Οχημάτων

Το θεσμικό πλαίσιο που διέπει τη χρήση και κυκλοφορία βαρέων οχημάτων στην Ελλάδα καθορίζει συγκεκριμένα όρια ως προς τις διαστάσεις, τα βάρη και τις επιβραδύνσεις ανά άξονα. Τα όρια αυτά ορίζονται με προεδρικά διατάγματα, τα οποία εκδίδονται έπειτα από πρόταση των αρμόδιων υπουργείων, ανάλογα με την κατηγορία του οχήματος (αυτοκίνητα, αγροτικά μηχανήματα, μηχανήματα έργων κτλ.). Σε περιπτώσεις που τα οχήματα υπερβαίνουν τα καθορισμένα ανώτατα όρια, η κυκλοφορία τους επιτρέπεται μόνο με την έκδοση ειδικής άδειας. Η άδεια αυτή συνοδεύεται από περιορισμούς που αφορούν τις οδούς διέλευσης, το χρονικό διάστημα κυκλοφορίας, τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα, καθώς και πρόσθετα μέτρα για την εξασφάλιση της οδικής ασφάλειας.

Παράλληλα, το νομοθετικό πλαίσιο προβλέπει ρυθμίσεις σχετικά με την ασφάλεια κατασκευής των οχημάτων. Ειδικότερα, απαγορεύεται η προεξοχή αξόνων ή πλημνών τροχών πέρα από το εξωτερικό περίγραμμα του οχήματος, με εξαίρεση ορισμένες κατηγορίες (μηχανήματα έργων, αγροτικά οχήματα), όπου επιτρέπεται προεξοχή έως 0,25 μέτρα. Στην περίπτωση που διαπιστωθεί παραβίαση των παραπάνω διατάξεων, το όχημα ακινητοποιείται άμεσα από τις αρμόδιες αστυνομικές αρχές. Επιπλέον, οι παραβάτες τιμωρούνται με διοικητικό πρόστιμο και αφαίρεση της άδειας ικανότητας οδήγησης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η συγκεκριμένη νομοθεσία συμβάλλει στη ρύθμιση της ασφαλούς κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων, περιορίζοντας τους κινδύνους που σχετίζονται με την υπερφόρτωση, τις μη επιτρεπτές διαστάσεις και της κατασκευαστικές παρεκκλίσεις και ενισχύει την προστασία τόσο του οδικού δικτύου όσο και των χρηστών του.

1.2.2 Ευρωπαϊκή Πολιτική για Μεταφορές

Σήμερα οι εκπομπές από τις μεταφορές αντιπροσωπεύουν περίπου το 25% των συνολικών εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σκοπός της ΕΕ είναι να γίνει κλιματικά ουδέτερη έως το 2050, γεγονός που απαιτεί αλλαγές στον τομέα των μεταφορών. Με βάση αυτό τον στόχο η Ευρωπαϊκή Ένωση ενέκρινε μια σειρά προτάσεων με σκοπό να προσαρμοστούν οι πολιτικές της για το κλίμα, την ενέργεια, την φορολογία και τις μεταφορές. Οι προτάσεις αυτές γνωστές ως Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία δέσμευσε και τα 27 κράτη-μέλη να μειώσουν κατά τουλάχιστον 55% τις εκπομπές αερίων έως το 2030.

Συγκεκριμένα για τις μεταφορές στόχος είναι η μετάβαση σε μια πιο πράσινη κινητικότητα, με σκοπό την προσφορά καθαρών, προσβάσιμων και οικονομικά προσιτών μεταφορών ακόμα και στις πιο απομακρυσμένες περιοχές. Επιπλέον, καθίσταται αναγκαία η μείωση εκπομπών άνθρακα από τα ιδιωτικά αυτοκίνητα κατά 55% και από τα ημιφορτηγά κατά 50% έως το 2030, καθώς και μηδενικές εκπομπές από τα καινούργια αυτοκίνητα έως το 2035. Πιο συγκεκριμένα τα βαρέα οχήματα θα πρέπει να μειώσουν τις εκπομπές ρύπων 30% έως το 2030 σε σχέση με το 2019.

1.3 Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης όπως αναφέρθηκε παραπάνω επικεντρώνεται στην περιφερειακή οδό της Κατερίνης, η οποία αποτελεί ένα έργο στρατηγικής σημασίας για την πόλη και τη γύρω περιοχή. Η κατασκευή της ξεκίνησε το 2013 ενώ παραδόθηκε και έγινε η δημόσια παρουσία του έργου τον Μάρτιο του 2024. Συνιστά μια προσπάθεια αποφόρτισης του αστικού ιστού καθώς περιβάλλει την πόλη από όλες τις πλευρές, μειώνοντας την κυκλοφοριακή πίεση στο κέντρο της Κατερίνης.

Το έργο έχει συνολικό μήκος 10,3 χιλιόμετρα και πλάτος περίπου 29 μέτρα και περιλαμβάνει δύο λωρίδες κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση, διαχωριστική νησίδα, λωρίδα έκτακτης ανάγκης και κόμβους σύνδεσης για την βελτίωση της προσβασιμότητας των γειτονικών περιοχών. Έχει ενταχθεί στο εθνικό οδικό δίκτυο και χαρακτηρίζεται ως δευτερεύουσα εθνική οδός.

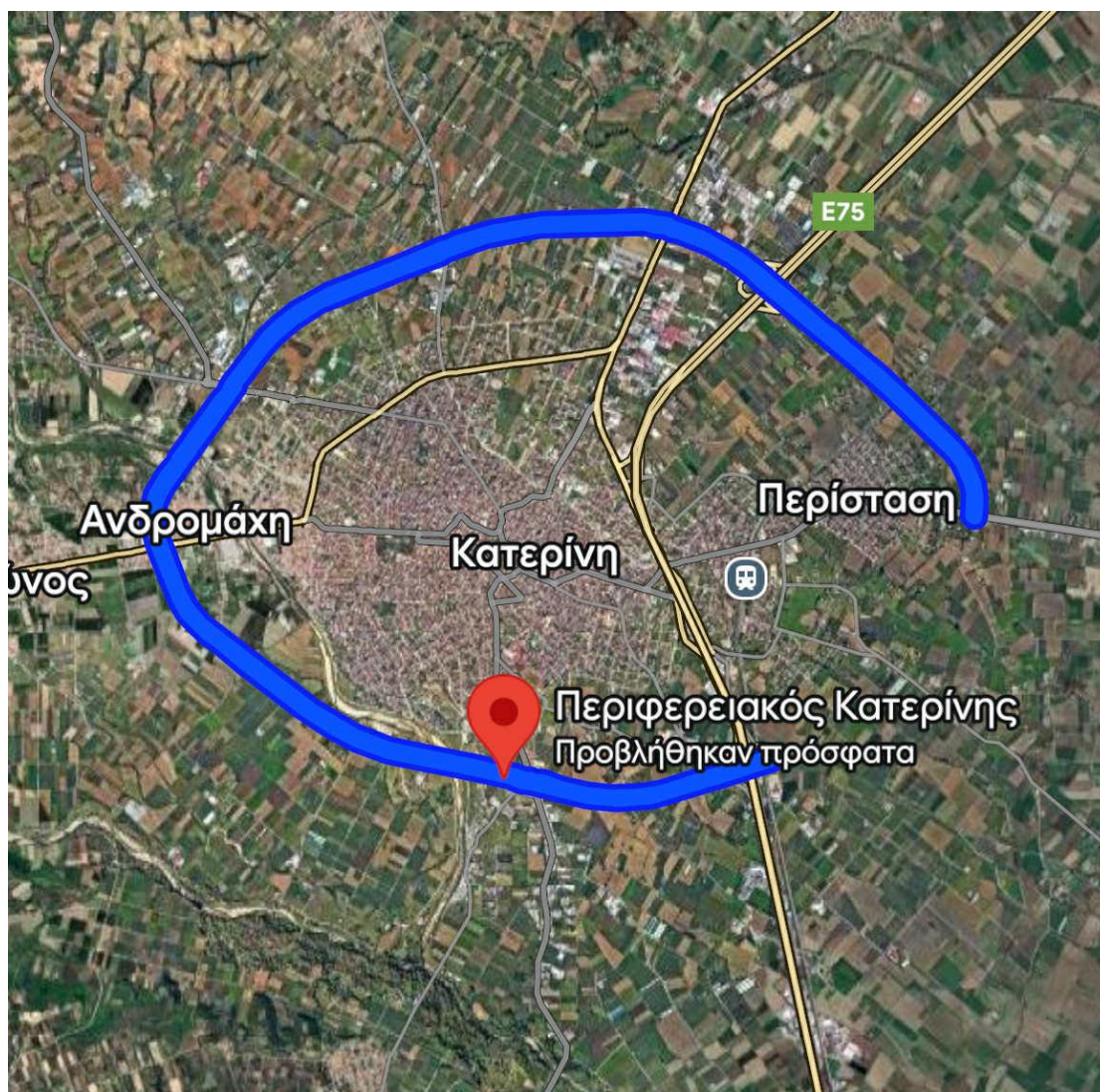
Πιο συγκεκριμένα, η κατασκευή του περιλαμβάνει τεχνικά έργα όπως πέντε ισόπεδους κυκλοφοριακούς κόμβους (Νέας Εφέσου, Αγίου Δημητρίου, Νοσοκομείου, Γανόχωρας και κόμβος με την Παλιά Εθνική Οδό Θεσσαλονίκης-Κατερίνης), δύο μεγάλες γέφυρες στον χείμαρρο Πέλεκα και τρεις κάτω διαβάσεις για τοπικές οδούς. Επιπρόσθετα, έχει δημιουργηθεί παράπλευρο οδικό δίκτυο για την εξυπηρέτηση των κατοίκων και την πρόσβαση σε ιδιοκτησίες, καθώς και εκτεταμένο αποστραγγιστικό και αποχετευτικό δίκτυο για την υδραυλική ασφάλεια της περιοχής.

Η περιφερειακή οδός έχει επίσης κρίσιμο ρόλο στη διασύνδεση με τον κύριο οδικό άξονα της χώρας, τον αυτοκινητόδρομο ΠΑΘΕ (Α1) αφού συμβάλει στην αποσυμφόρηση του άξονα που συνδέει την Αθήνα με την Θεσσαλονίκη και τις βόρειες περιοχές. Η ολοκλήρωση του ήταν σημαντική για την ασφαλέστερη κυκλοφορία, τη βελτίωση των χρόνων μετακίνησης και τη μείωση των ατυχημάτων, δεδομένου ότι παρέχει δυνατότητα ασφαλέστερων προσπεράσεων και αποκλειστικής λωρίδας έκτακτης ανάγκης όπως προαναφέρθηκε.

Επιπλέον το έργο έχει και περιβαλλοντικά οφέλη καθώς η ανακατανομή των ροών κυκλοφορίας εκτός του αστικού κέντρου οδήγησε στην μείωση της έκθεσης των κατοίκων σε ρύπους και θόρυβο.

Επομένως, η περιοχή μελέτης είναι ένα σύγχρονο τεχνικό έργο με πολλαπλές λειτουργίες, από κυκλοφοριακή αποσυμφόρηση και βελτίωση της οδικής ασφάλειας, έως περιβαλλοντική ανακούφιση και ενίσχυση της τοπικής ανάπτυξης.

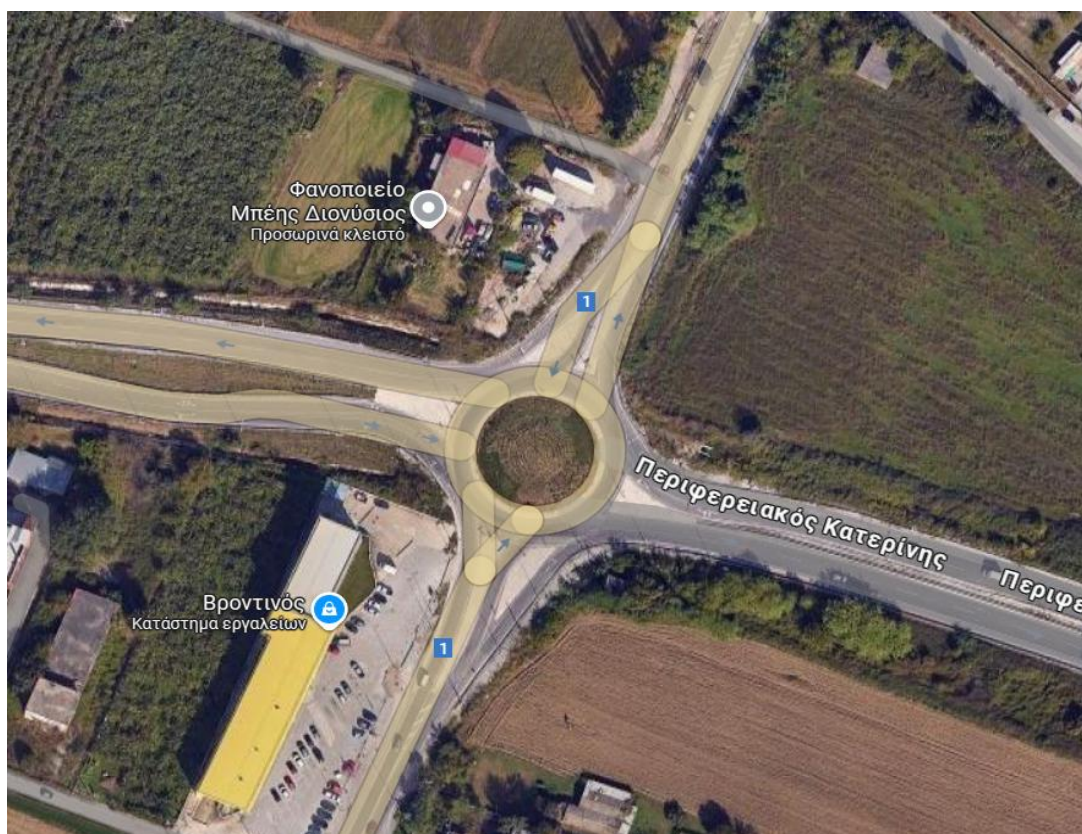
Η μελέτη δεν επικεντρώνεται σε όλη την περιφερειακή οδό της Κατερίνης αλλά σε ένα συγκεκριμένο τμήμα της. Περιέχει δύο από τους πέντε κόμβους της, οι οποίοι ονομάστηκαν Κόμβος 1 (Κ1) γνωστός και ως κόμβος Γανοχώρας και Κόμβος 2 (Κ2), ο κόμβος με την Παλιά Εθνική οδό Θεσσαλονίκης-Κατερίνης, για την εκπόνηση της εργασίας.



Εικόνα 1.1: Περιφερειακή οδός Κατερίνης



Εικόνα 1.2: Περιοχή μελέτης του Περιφερειακού δρόμου της Κατερίνας



Εικόνα 1.3: Κόμβος 1



Εικόνα 1.4: Κόμβος 2

1.4 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη και ανάλυση των κυκλοφοριακών και περιβαλλοντικών συνθηκών στην περιφερειακή οδό της Κατερίνης, με την χρήση του λογισμικού προσομοίωσης AIMSUN. Κύριος σκοπός είναι η αποτύπωση της επίδρασης που έχουν τα βαρέα οχήματα στη λειτουργία του οδικού δικτύου και κατ' επέκταση στην οδική ασφάλεια, τη ροή της κυκλοφορίας και την αποδοτικότητα των μεταφορών. Η επιλογή εστίασης στα βαρέα οχήματα δεν είναι τυχαία, καθώς αποτελούν τη ραχοκοκαλιά των εμπορευματικών μεταφορών και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη συνολική κινητικότητα σε αστικά και περιαστικά δίκτυα.

Η μεθοδολογία βασίστηκε στη δημιουργία κυκλοφοριακού μοντέλου στο λογισμικό AIMSUN, το οποίο αναπαριστά με ακρίβεια τη γεωμετρία και τις λειτουργικές παραμέτρους της περιφερειακής οδού της Κατερίνης. Πραγματοποιήθηκαν τρία σενάρια προσομοίωσης, η υφιστάμενη κατάσταση με τα πραγματικά ποσοστά βαρέων οχημάτων, ένα υποθετικό σενάριο μηδενικής παρουσίας βαρέων οχημάτων (0%) και ένα σενάριο αυξημένου φόρτου κατά 300% που προσομοιώνει συνθήκες έντονης πίεσης στο δίκτυο λόγω αυξημένων εμπορευματικών ροών.

Οι στόχοι της εργασίας διαμορφώνονται ως εξής:

- 1) Αποτύπωση της κυκλοφοριακής συμπεριφοράς στην περιφερειακή οδό της Κατερίνης, με έμφαση στον ρόλο των βαρέων οχημάτων.
- 2) Αξιολόγηση των επιπτώσεων που έχει η διαφοροποίηση του ποσοστού βαρέων οχημάτων σε κρίσιμα μεγέθη, όπως η ταχύτητα, η χρονική καθυστέρηση, η πυκνότητα και οι εκπομπές ρύπων (CO₂).
- 3) Διερεύνηση της συμβολής των εμπορευματικών μεταφορών στην κυκλοφοριακή απόδοση του δικτύου, ώστε να εντοπιστούν πιθανές προκλήσεις και ανάγκες για μελλοντικές παρεμβάσεις.
- 4) Συγκριτική ανάλυση σεναρίων, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για στρατηγικό σχεδιασμό των μεταφορών και την αποτελεσματικότερη διαχείριση της κυκλοφορίας.

Συνολικά, η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα βαρέα οχήματα και κατ' επέκταση οι εμπορευματικές μεταφορές επηρεάζουν τη λειτουργία ενός περιφερειακού άξονα. Τα αποτελέσματα μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για φορείς της τοπικής αυτοδιοίκησης αλλά και υπεύθυνους συγκοινωνιακού σχεδιασμού, στο πλαίσιο λήψης αποφάσεων για βελτίωση της κυκλοφορικής απόδοσης και ενίσχυση της βιώσιμης κινητικότητας.

1.5 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια, καθένα από τα οποία πραγματεύεται διαφορετικές πτυχές της μελέτης και οδηγεί σταδιακά από το θεωρητικό υπόβαθρο στην ανάλυση και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται το κίνητρο και το υπόβαθρο της μελέτης, καθώς και ο σκοπός και οι στόχοι που τίθενται. Το κεφάλαιο αυτό παρέχει το πλαίσιο μέσα στο οποίο εντάσσεται η εργασία και αναδεικνύει τη σημασία της ερευνητικής προσέγγισης.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει μια γενική εισαγωγή στα συστήματα μεταφορών και στον τρόπο σχεδιασμού τους. Αναλύονται οι βασικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία και τον σχεδιασμό των μεταφορών, καθώς και η συμβολή τους στην πολιτική, οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του λογισμικού AIMSUN, των βασικών χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων του στην κυκλοφοριακή προσομοίωση. Επισημαίνεται η χρησιμότητα του στην αποτύπωση και ανάλυση πραγματικών κυκλοφοριακών συνθηκών. Επίσης, περιγράφεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη του κυκλοφοριακού μοντέλου. Αναλύονται τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν στο AIMSUN, από τη δημιουργία του δικτύου έως την διαμόρφωση των σεναρίων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των σεναρίων προσομοίωσης. Αναλύονται τα κυκλοφοριακά μεγέθη και η απόδοση τους με έμφαση στις διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με τα βαρέα οχήματα. Ταυτόχρονα, πραγματοποιούνται συγκρίσεις ανάμεσα στα διαφορετικά σενάρια, ώστε να αναδειχθούν οι επιπτώσεις της μεταβολής του ποσοστού βαρέων οχημάτων και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία του οδικού δικτύου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα της εργασίας. Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση και διατυπώνονται προτάσεις για πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις της μελέτης.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρατίθεται η βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε για τη σύνταξη της εργασίας, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε μεθοδολογικό επίπεδο.

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας, ακολουθήθηκε μια μεθοδική διαδικασία που διασφαλίζει την ολοκληρωμένη κατανόηση του αντικειμένου και την ορθή τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση, αντλώντας πληροφορίες τόσο από ελληνικές όσο και από ξενόγλωσσες πηγές. Η αναζήτηση περιέλαβε επιστημονικά άρθρα, έρευνες, βιβλία και λοιπό υλικό σχετικό με το υπό μελέτη ζήτημα, ώστε να διαμορφωθεί ένα ισχυρό θεωρητικό υπόβαθρο που θα στηρίξει την ανάλυση και τα συμπεράσματα της μελέτης.

2.1 Ορισμοί

Θα πραγματοποιηθεί περιγραφή ορισμένων ορισμών και κάποιων βασικών εννοιών που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια της ανάλυσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σύμφωνα με τον Ι. Μ Φραντζεσκάκη, et al στο βιβλίο «Κυκλοφορική Τεχνική» (2009), η **Κυκλοφοριακή ροή** (traffic flow) αφορά την κίνηση οχημάτων ή πεζών σε ένα οδικό τμήμα και περιγράφεται μέσα από συγκεκριμένα μεγέθη που μπορούν να μετρηθούν και να αναλυθούν. Τα βασικότερα από αυτά είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος, η ταχύτητα και η πυκνότητα.

Η μελέτη της κυκλοφορίας μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δύο επίπεδα στο μικροσκοπικό όπου αναλύεται η κίνηση κάθε οχήματος μεμονωμένα και στο μακροσκοπικό, όπου εξετάζεται η συνολική εικόνα της ροής σε ένα τμήμα του οδικού δικτύου.

Πίνακας 2.1 Μεγέθη κυκλοφοριακής ροής σε μικροσκοπικό και μακροσκοπικό επίπεδο

Μικροσκοπικά	Μακροσκοπικά
Χρονικός διαχωρισμός	Φόρτος
Ταχύτητα σημείου	Μέση ταχύτητα
Χωρικός διαχωρισμός	Πυκνότητα

Υπάρχουν αρκετά εξειδικευμένα λογισμικά για τα παραπάνω επίπεδα, όπως είναι το AIMSUN με το οποίο θα ασχοληθεί η παρούσα διπλωματική, το VISSIM, το SUMO, το TransModeler, το CUBE και το DYNAMIQ. Κάθε λογισμικό προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα, άλλα εστιάζουν στην μικροκλίμακα και τη ρεαλιστική αναπαράσταση της συμπεριφοράς των οδηγών, ενώ άλλα είναι προσανατολισμένα στη μακροσκοπική ανάλυση και στον στρατηγικό σχεδιασμό. Επομένως, είναι διαθέσιμες διάφορες μέθοδοι από τις οποίες ο χρήστης μπορεί να διαλέξει ανάλογα με τους στόχους της εκάστοτε μελέτης.

Στην πλατφόρμα του AIMSUN, διατίθενται πολλαπλά επίπεδα μοντελοποίησης της κυκλοφορίας, ανάλογα με τον σκοπό, την κλίμακα και την αναλυτικότητα που απαιτεί η μελέτη. Δύο από τα βασικά όπως αναφέρθηκαν είναι το μακροσκοπικό και το μικροσκοπικό.

Το μακροσκοπικό μοντέλο (Macroscopic) λειτουργεί σε επίπεδο μεγάλης κλίμακας καθώς εξετάζει τη ροή της κυκλοφορίας, την κατανομή της ζήτησης και γενικές καθυστερήσεις

χωρίς να εισέρχεται σε λεπτομέρειες οδηγών ή οχημάτων. Η κυκλοφορία αποτυπώνεται με στατικούς ή δυναμικούς υπολογισμούς ανά τμήματα δρόμου και ο χρόνος ταξιδιού υπολογίζεται χρησιμοποιώντας συναρτήσεις καθυστέρησης που βασίζονται στον όγκο και την χωρητικότητα. Είναι πιο απλό, απαιτεί λιγότερο λεπτομερή δεδομένα και υπολογισμούς και είναι κατάλληλο όταν στην έρευνα δεν χρειάζονται να εξεταστούν καθορισμένες συμπεριφορές οχημάτων, αλλαγή λωρίδων, επίδραση στους σηματοδότες κ.ο.κ.

Το μικροσκοπικό μοντέλο (Microscopic) αναπαριστά κάθε όχημα ξεχωριστά, με λεπτομερή συμπεριφορά όπως αλλαγή λωρίδων, καθυστερήσεις στις στροφές, επιτάχυνση/επιβράδυνση, αλληλεπίδραση μεταξύ οχημάτων αλλά και με το δίκτυο (συστήματα ελέγχου, περιστατικά που έχουν πραγματοποιηθεί στην προσομοίωση). Διαφορετικοί τύποι οχημάτων και οδηγών είναι μοντελοποιημένοι από μικρά αυτοκίνητα μέχρι και μεγάλα οχήματα φορτίου με διαφορετική δυναμική οδήγησης και με αλλαγές σε χαρακτηριστικά οδηγών όπως χρόνοι αντίδρασης και επιθετικότητα, αντίστοιχα. Επίσης μπορεί να προσομοιώσει αλληλεπιδράσεις μεταξύ οχημάτων και πεζών. Ο χρόνος προσομοίωσης χωρίζεται σε μικρά σταθερά διαστήματα στα οποία ενημερώνονται οι θέσεις, οι ταχύτητες και οι ενέργειες κάθε οχήματος. Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο όταν η μελέτη απαιτεί λεπτομέρειες όπως η επίδραση των βαρέων οχημάτων σε σημεία συμφόρησης, οι εκπομπές καυσαερίων.

Πίνακας 2.2: Σύγκριση Μακροσκοπικού-Μικροσκοπικού Μοντέλου

<u>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</u>	<u>ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ</u>	<u>ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ</u>
<i>Κλίμακα/Λεπτομέρεια</i>	Μεγάλης κλίμακας, μικρότερη λεπτομέρεια. Εστιάζει σε ροές, μέσες ταχύτητες και καθυστερήσεις.	Μεμονωμένα οχήματα, λεπτομερείς συμπεριφορές όπως αλλαγές λωρίδας, επιβράδυνση/ επιτάχυνση, αλληλεπιδράσεις οχημάτων.
<i>Υπολογιστική απαίτηση</i>	Χαμηλότερη απαίτηση. Λιγότεροι υπολογισμοί, πιο γρήγοροι χρόνοι προσομοίωσης.	Υψηλότερη απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ, δεδομένα και χρόνο λόγω λεπτομερειών

<i>Δεδομένα εισόδου</i>	Απαιτούνται γενικά δεδομένα όπως ροές κυκλοφορίας, φόρτος πίνακες προέλευσης προορισμούς.	Απαιτούνται πιο εξειδικευμένα δεδομένα όπως συμπεριφορά οδηγού, χαρακτηριστικά οχημάτων, στοιχεία σηματοδότησης, γεωμετρία με ακρίβεια.
<i>Παράμετροι συμπεριφοράς</i>	Χρησιμοποιούνται συναρτήσεις καθυστέρησης, στατικές/δυναμικές εκτιμήσεις χρόνων.	Εφαρμόζονται αλλαγή λωρίδων, car-following, μοντέλα gap-acceptance, επιτάχυνση/επιβράδυνση
<i>Ευελιξία σε σενάρια</i>	Ιδανικό για γενικές εκτιμήσεις, μεγάλα δίκτυα, πρώιμα στάδια σχεδιασμού .	Κατάλληλο για λεπτομερή ανάλυση συμφόρησης, μελέτη συμπεριφοράς και πιο ακριβείς προβλέψεις.
<i>Χρήση στο AIMSUN</i>	Υπολογίζεται ως macro simulator	Υπολογίζεται ως micro simulation

Αξίζει να σημειωθεί και το μεσοσκοπικό μοντέλο στο AIMSUN πρόκειται για έναν ενδιάμεσο τρόπο προσομοίωσης, που συνδυάζει στοιχεία από την μακροσκοπική και την μικροσκοπική ανάλυση. Σε αντίθεση με το μικροσκοπικό μοντέλο, όπου παρακολουθείται η συμπεριφορά κάθε οχήματος ξεχωριστά και το μικροσκοπικό που βασίζεται σε ροές και συγκεντρωτικά μεγέθη, το μεσοσκοπικό προσομοιώνει την κίνηση των οχημάτων σε ομάδες. Στην ουσία μπορεί να προσομοιώσει τη λειτουργία του δικτύου με μικρότερες απαιτήσεις σε χρόνο και υπολογιστικούς πόρους σε σχέση με την μικροσκοπική ανάλυση αλλά με μεγαλύτερη ακρίβεια από το μακροσκοπικό επίπεδο. Αυτό καθιστά το μοντέλο ιδιαίτερα χρήσιμο σε μελέτες μεγάλης κλίμακας, όπου χρειάζεται ισορροπία ανάμεσα στη λεπτομέρεια και στην αποδοτικότητα της προσομοίωσης.

Η θεμελιώδης σχέση που συνδέει τα τρία μακροσκοπικά μεγέθη της κυκλοφορίας και επιτρέπει την κατανόηση της δυναμικής μεταβίβασης από τη ροή σε κατάσταση συμφόρησης είναι:

$$q=k \times u$$

Ο **Κυκλοφοριακός φόρτος** (traffic volume) είναι ο συνολικός αριθμός οχημάτων που περνούν από ένα σημείο ή μια διατομή οδού στη μονάδα του χρόνου. Εκφράζεται σε «οχήματα ανά μονάδα χρόνου».

Η **Ταχύτητα** (speed) με την οποία κινούνται τα οχήματα είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας. Στην κυκλοφοριακή ροή χρησιμοποιούνται διάφορα είδη ταχυτήτων ανάλογα με την κοινωνιακή ροή. Αυτές είναι: Ταχύτητα σημείου (spot speed), Ταχύτητα διαδρομής (travel speed), Ταχύτητα λειτουργίας (operating speed), Μέση ταχύτητα χρόνου (time mean speed), Μέση ταχύτητα χώρου (space mean speed), Μέση ταχύτητα

(average highway speed), Ταχύτητα περιοχής (area speed), Ταχύτητα ελεύθερης ροής (free flow speed), Ταχύτητα πορείας (running speed) και Γραμμική ταχύτητα κίνησης (linear speed).

Η **πυκνότητα κυκλοφορίας** (traffic density) ορίζεται ως ο αριθμός των οχημάτων που κινούνται σε μια δεδομένη στιγμή στη μονάδα μήκος της οδού (συνήθως οχήματα/χιλιόμετρο). Μπορεί να αναφέρεται και στις δύο ή σε κάθε μια από τις κατευθύνσεις κίνησης της κυκλοφορίας, καθώς επίσης και σε μια ή περισσότερες λωρίδες κυκλοφορίας. Η πυκνότητα της κυκλοφορίας είναι σημαντικό μακροσκοπικό μέγεθος, γιατί χαρακτηρίζει την ένταση της κυκλοφορίας στην μια διακοπτόμενη ροή. Η πυκνότητα μπορεί να θεωρηθεί ως έκφραση της έντασης στον χώρο, δηλαδή σε ένα τμήμα οδού συγκεκριμένου μήκους.

Το μέγεθος το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι εκφράζει την ένταση της κυκλοφορίας στον χρόνο, δηλαδή σε μια διατομή της οδού σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, είναι η **κατάληψη** (occupancy). Η κατάληψη ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που μια διατομή καταλαμβάνεται από όχημα.

Ο **ρυθμός ροής** (flow rate) είναι ο συνολικός αριθμός των οχημάτων που περνούν από ένα σημείο ή μια διατομή οδού κατά την διάρκεια μιας χρονικής περιόδου μικρότερης της ώρας, ανοιγμένος στην ώρα. Εκφράζεται πάντοτε σε οχήματα/ώρα. Η περίοδος μέτρησης στην οποία αναφέρεται συνήθως ο ρυθμός ροής έχει διάρκεια δεκαπέντε λεπτά.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η σύνθεση της κυκλοφορίας (traffic composition), η οποία περιγράφει την ποσοστιαία κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου ανά κατηγορία οχήματος (επιβατικά, φορτηγά, λεωφορεία, δίκυκλα κ.λπ.) Η γνώση της σύνθεσης είναι καθοριστική σε μια σειρά από εφαρμογές όπως: Ο υπολογισμός της ικανότητας των οδών, η διαχείριση της κυκλοφορίας, η ανάλυση των οδικών ατυχημάτων, η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθώς και ο σχεδιασμός και η διαχείριση του οδοστρώματος.

Η **Μεταφορά** ορίζεται ως η διαδικασία με την οποία ένα αγαθό μετακινείται από ένα σημείο i σε ένα σημείο j, με συγκεκριμένο σκοπό, όπως για παράδειγμα η μεταφορά της πρώτης ύλης από τον τόπο παραγωγής στη βιομηχανική μονάδα επεξεργασίας.

2.2 Συστήματα και Σχεδιασμός Μεταφορών

Σε κοινωνικό, πολιτικό, οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο, οι μεταφορές έχουν καθοριστική σημασία διεθνώς. Συχνά αποτελούν αντικείμενο δημόσιας πολιτικής καθώς ο δημόσιος τομέας λαμβάνει στρατηγικές αποφάσεις για το κοινό συμφέρον μέσω επενδύσεων στον τομέα αυτό. Παράλληλα, ο ιδιωτικός τομέας συμβάλλει ουσιαστικά με σημαντικές επενδύσεις στις μεταφορές. Ενδεικτικά, σε πολλές χώρες η βιομηχανική ανάπτυξη έχει βασιστεί σε μεγάλο βαθμό γύρω από την αυτοκινητοβιομηχανία. Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, στη Γερμανία, την Ιαπωνία, την Κορέα και σε άλλες χώρες μάλιστα, οι αυτοκινητοβιομηχανίες αποτελούν έναν από τους βασικούς πυλώνες της εθνικής τους οικονομίας.

Ο σχεδιασμός των μεταφορικών συστημάτων περιλαμβάνει τόσο τα υλικά στοιχεία δηλαδή τις υποδομές που χρειάζονται λεπτομερή μελέτη και προγραμματισμό, όσο και τους μηχανισμούς που καθορίζουν τη λειτουργία και την αποδοτικότητά τους. Οι μηχανισμοί αυτοί σχετίζονται με άυλα στοιχεία, όπως η ζήτηση και η συμπεριφορά χρηστών. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από υποσυστήματα που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, άλλοτε με άμεσες και γραμμικές σχέσεις και άλλοτε με πιο σύνθετες, μη γραμμικές αλληλεξαρτήσεις. Η βασική δυσκολία, αλλά και πρόκληση, βρίσκεται στην πολυπλοκότητά τους, η οποία γίνεται ακόμη μεγαλύτερη επειδή ο σχεδιασμός των υποδομών καλύπτει μεγάλο χρονικό ορίζοντα, που φτάνει μέχρι και πολλές δεκαετίες στο μέλλον.

Σημαντικό πρώτο βήμα στον σχεδιασμό είναι να οριστεί η περιοχή μελέτης, δηλαδή το πλαίσιο μέσα στο οποίο κάθε έργο (κατασκευή, εγκατάσταση, τροποποίηση ή λειτουργία) θα επηρεάσει τόσο το φυσικό όσο και το οικονομικό περιβάλλον. Η διερεύνηση των επιπτώσεων αυτών είναι εξίσου κρίσιμη με την ίδια τη μελέτη του έργου. Από τη σκοπιά της θεωρίας συστημάτων, οι μεταβολές αυτές εκφράζουν τους περιορισμούς του προβλήματος που πρέπει να λυθεί, καθορίζοντας έτσι τη μορφή της λύσης και τελικά την αποδοχή ή την απόρριψη της.

Οι μεταφορικές υποδομές μιας χώρας ή μιας περιοχής υπάρχουν για να εξυπηρετούν τις κοινωνικές και οικονομικές δραστηριότητες των κατοίκων ή όσων δραστηριοποιούνται εκεί. Αυτές οι δραστηριότητες καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες, όπως η μετακίνηση προς την εργασία, τα καταστήματα, την εκπαίδευση, την υγεία ή την ψυχαγωγία. Το ίδιο ισχύει και για τα εμπορεύματα, των οποίων η μεταφορά από ένα σημείο σε άλλο εξυπηρετεί την οικονομική δραστηριότητα της περιοχής, αλλά και άλλων γειτονικών ή πιο απομακρυσμένων περιοχών που επηρεάζουν ή επηρεάζονται από αυτήν. Συνεπώς, για να μπορέσει κανείς να εκτιμήσει σωστά τις ανάγκες σε υποδομές, είναι απαραίτητο να κατανοήσει πρώτα το σύστημα δραστηριοτήτων που γεννά τη ζήτηση για μεταφορές, δηλαδή την ανάγκη για μεταφορική εξυπηρέτηση.

Οι εμπορικές μεταφορές απασχολούν εκατομμύρια άτομα στον κόσμο, καθώς το σύστημα μεταφορών είναι ζωτικής σημασίας για τις επιχειρήσεις και τις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού. Δυστυχώς όμως οι μεταφορές έχουν πολλές αρνητικές επιπτώσεις στην κοινωνία μας, που σχετίζονται με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και διάφορων άλλων ρύπων, τον θόρυβο, τα τροχαία ατυχήματα και την κυκλοφορική συμφόρηση. Τα προβλήματα που αφορούν τη ροή της κυκλοφορίας, καθώς και τα περιβαλλοντικά ζητήματα, αυξάνονται συνεχώς στις αστικές περιοχές καθώς το ηλεκτρονικό εμπόριο κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος.

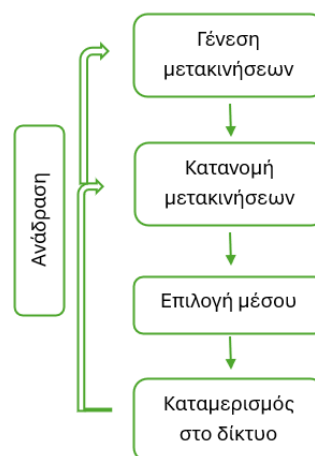
Η στοχαστική φύση της ζήτησης και των λειτουργιών στις επιβατικές μεταφορές είναι εξίσου κρίσιμη με εκείνη που συναντάται στα συστήματα εμπορευματικών μεταφορών. Η λογική της δικτυακής δομής και ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται οι κόμβοι μεταξύ τους ισχύει τόσο για τις μεταφορές επιβατών όσο και για τις μεταφορές εμπορευμάτων. Όσον αφορά το επίπεδο εξυπηρέτησης, πολλές από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στα επιβατικά συστήματα είναι παρόμοιες ή ακόμα και ταυτόσημες με αυτές που ισχύουν για τα εμπορευματικά. Στις μεταφορές εμπορευμάτων, ο βασικός στόχος των πελατών είναι η έγκαιρη και αξιόπιστη παράδοση του φορτίου, σε κατάσταση που να μπορεί να υποστηρίξει άμεσα το επόμενο στάδιο είτε της παραγωγικής διαδικασίας είτε της διαδικασίας πώλησης.

Για τη μέθοδο ανάλυσης της κυκλοφοριακής μελέτης, έγινε χρήση της ευρέως γνωστής μεθόδου των τεσσάρων βημάτων, η οποία εστιάζει στην έννοια της μετακίνησης, του χρόνου, του χώρου και στη μαθηματική αναπαράσταση του μεταφορικού δικτύου.

Η μέθοδος των τεσσάρων βημάτων πήρε την ονομασία της επειδή διασπά το πρόβλημα της προσομοίωσης των μετακινήσεων-μεταφορών σε τέσσερα διαδοχικά στάδια, καθένα από τα οποία αναλύει μια βασική διάσταση της ζήτησης για μετακινήσεις:

- 1) **Γένεση μετακινήσεων:** σε αυτό το στάδιο εκτιμάται ο αριθμός των μετακινήσεων που παράγονται ή προσελκύονται από τις διάφορες ζώνες της περιοχής μελέτης. Η γένεση των μετακινήσεων περιλαμβάνει δύο διαδικασίες, την παραγωγή μετακινήσεων από τις ζώνες που τις δημιουργούν και την έλξη μετακινήσεων στις ζώνες που τις δέχονται.
- 2) **Κατανομή μετακινήσεων:** εδώ συνδέονται οι αρχικές και τελικές ζώνες των μετακινήσεων με « γραμμές επιθυμίας », δηλαδή ροές μετακινήσεων μεταξύ ζωνών. Οι ροές αυτές εξαρτώνται από τη διαθέσιμη συγκοινωνιακή υποδομή και τα χαρακτηριστικά της (π.χ. ταχύτητες, δυνατότητες σύνδεσης, επίπεδο εξυπηρέτησης). Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται αριθμητικά στα μητρώα Προέλευσης-Προορισμού, δίνοντας χωρική διάσταση στη ζήτηση των μετακινήσεων.
- 3) **Επιλογή μέσου:** σε αυτό το βήμα γίνεται καταμερισμός των μετακινήσεων του μητρώου Π-Π στα διαθέσιμα μέσα μεταφοράς (π.χ. Ι.Χ., δημόσια συγκοινωνία, φορτηγά).
- 4) **Καταμερισμός ζήτησης στο δίκτυο:** στο τελευταίο στάδιο, η εκτιμώμενη ζήτηση «φορτίζει» το δίκτυο, δηλαδή κατανέμεται στους συνδέσμους και στους κόμβους του, με βάση μια διαδικασία βραχυπρόθεσμης εξισορρόπησης της ζήτησης με την υπάρχουσα υποδομή. Αυτή η διαδικασία, γνωστή ως φόρτιση του δικτύου, υπολογίζει τον όγκο κυκλοφορίας που δέχεται κάθε στοιχείο του συστήματος. Συνήθως, η εξισορρόπηση επιτυγχάνεται μέσω διαδοχικών προσεγγίσεων και ανατροφοδότησης, που συχνά επηρεάζουν και τα δύο στάδια της διαδικασίας.

Συνολικά, η ζήτηση μετακίνησης-μεταφοράς εκφράζει την ανάγκη ή την τάση των ατόμων και των αγαθών να κινηθούν προς κάποιο προορισμό, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα μέσα μεταφοράς, υπό δεδομένες συνθήκες.



Εικόνα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας σχεδιασμού 4-βημάτων

Κεφάλαιο 3 Λογισμικό Προσομοίωσης AIMSUN

Στην παρούσα μελέτη έγινε χρήση του λογισμικού AIMSUN Next (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks), το οποίο δημιουργήθηκε το 1994 από τους ερευνητές J. Barcelo και J.L. Ferrer του Πολυτεχνείου της Βαρκελώνης. Το AIMSUN αποτελεί ένα από τα πλέον αξιόπιστα εργαλεία για την προσομοίωση κυκλοφορίας σε οδικά δίκτυα, βασιζόμενο σε πρότυπα συμπεριφοράς οχημάτων. Το πρόγραμμα μπορεί να εφαρμοστεί σε έργα τόσο μικρής όσο και μεγάλης κλίμακας, επιτρέποντας στον χρήστη να προσομοιώνει διαφορετικά είδη οδικών δικτύων, όπως αστικά δίκτυα, αυτοκινητόδρομους, περιφερειακές οδούς, οδικές αρτηρίες είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό.

Το λογισμικό AIMSUN προσφέρει λεπτομερή και ρεαλιστική απεικόνιση της κυκλοφορίας, ενσωματώνοντας στοιχεία που συναντώνται στα πραγματικά δίκτυα, όπως ράμπες, πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων (VMS), διαβάσεις, φωτεινούς σηματοδότες και στάσεις λεωφορείων. Έχει σχεδιαστεί με στόχο την ακριβή αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης του οδικού δικτύου, αξιοποιώντας πραγματικά δεδομένα κυκλοφορίας για τη βέλτιστη αναπαράσταση των κυκλοφοριακών συνθηκών.

Η προσομοίωση στο AIMSUN μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μικροσκοπικό επίπεδο, εξετάζοντας τη συμπεριφορά μεμονωμένων οχημάτων και τον τρόπο με τον οποίο αυτή επηρεάζει τη συνολική λειτουργία του δικτύου, μέσα από την εφαρμογή διαφορετικών μοντέλων συμπεριφοράς. Η ενσωμάτωση της πραγματικής κυκλοφοριακής κατάστασης και της υποδομής στο περιβάλλον προσομοίωσης επιτυγχάνεται μέσω εξειδικευμένων εργαλείων. Ενδεικτικά, οι φωρατές (detectors) καταγράφουν δεδομένα φόρτου σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, ενώ οι φωτεινοί σηματοδότες και τα σημεία εισόδου μπορούν να τροποποιούνται δυναμικά στη διάρκεια της προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό, το AIMSUN υποστηρίζει τόσο διακριτές όσο και συνεχείς καταστάσεις, καθιστώντας το ευέλικτο και προσαρμόσιμο στις ανάγκες της εκάστοτε μελέτης.

Επιπλέον, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του προγράμματος είναι η δυνατότητα δημιουργίας σεναρίων προσομοίωσης, τα οποία καθορίζονται από ένα πλήθος παραμέτρων που σχετίζονται με τα πραγματικά δεδομένα φόρτου, τη χρονική διάρκεια και το βήμα της προσομοίωσης. Η ανάπτυξη αυτών των σεναρίων επιτρέπει στον χρήστη να κατανοήσει καλύτερα τις απαιτήσεις και τις ιδιαιτερότητες του υπό μελέτη οδικού δικτύου, μέσα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων. Παράλληλα, το AIMSUN αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση κυκλοφοριακών συστημάτων και στρατηγικών, δίνοντας τη δυνατότητα να εξεταστούν τόσο υφιστάμενες όσο και καινοτόμες τεχνολογίες διαχείρισης της κυκλοφορίας.

Εκτός από τη γραφική αναπαράσταση του δικτύου, το λογισμικό παρέχει και στατιστικά αποτελέσματα προσομοίωσης, τα οποία περιλαμβάνουν τη ροή οχημάτων, τις μέσες ταχύτητες, τις καθυστερήσεις, τις εκπομπές αερίων CO₂ καθώς και τα δεδομένα που συλλέγονται από τα detectors, όπως ο αριθμός των οχημάτων ή το ποσοστό κατάληψης. Τα δεδομένα αυτά μπορούν

να επεξεργαστούν και να αξιοποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες και τους στόχους της εκάστοτε έρευνας, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την αξιολόγηση της λειτουργίας του δικτύου. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να σχεδιάσει τη γεωμετρία και την πολυπλοκότητα του οδικού δικτύου βάσει των δικών του κριτηρίων, καθορίζοντας τμήματα δρόμων, κατευθύνσεις και λοιπές ιδιότητες που επηρεάζουν την κίνηση των οχημάτων, συνθέτοντας έτσι ένα ολοκληρωμένο και ρεαλιστικό μοντέλο προσομοίωσης (Hughes, 1998).

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της προσομοίωσης με το AIMSUN Next είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης αλληλεπίδρασης οχημάτων και πεζών. Επιπρόσθετα, το πρόγραμμα παρέχει στον μελετητή ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων, όπως η κατανάλωση καυσίμου, οι διαστάσεις των οχημάτων (μήκος και πλάτος) και το ποσοστό προσπέρασης. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα με τους στόχους και τις ανάγκες της εκάστοτε έρευνας, επιτρέποντας εξατομικευμένη και ακριβή ανάλυση της κυκλοφοριακής συμπεριφοράς.

3.1 Μεθοδολογία Ανάπτυξης & Προσομοίωσης στο AIMSUN

3.1.1 Διαμόρφωση Γεωμετρίας Οδικού Δικτύου

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη του κυκλοφοριακού μοντέλου, του περιφερειακού οδικού δικτύου της Κατερίνης ώστε να αποδίδει με λεπτομέρεια τη γεωμετρία και τη λειτουργία του οδικού συστήματος και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την ανάλυση της υφιστάμενης κυκλοφοριακής κατάστασης όσο και για την διερεύνηση πιθανών μελλοντικών παρεμβάσεων είναι η εξής:

1. Καταγραφή και αποτύπωση του οδικού δικτύου

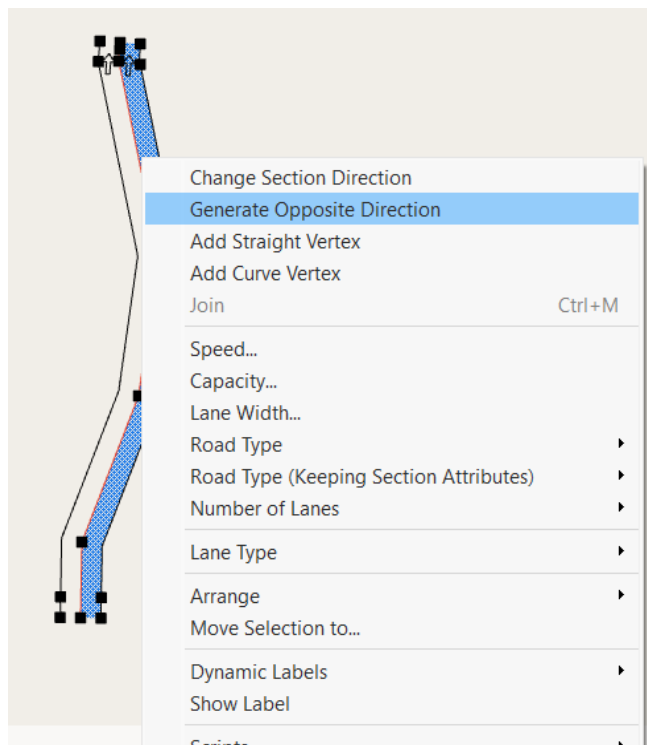
Στο πρώτο στάδιο έγινε η χαρτογράφηση της περιοχής μελέτης και η αποτύπωση της γεωμετρίας των οδικών τμημάτων. Καταγράφηκαν χαρακτηριστικά όπως το μήκος των δρόμων, ο αριθμός των λωρίδων και η φορά της κυκλοφορίας.

ΒΗΜΑΤΑ ΣΤΟ AIMSUN :

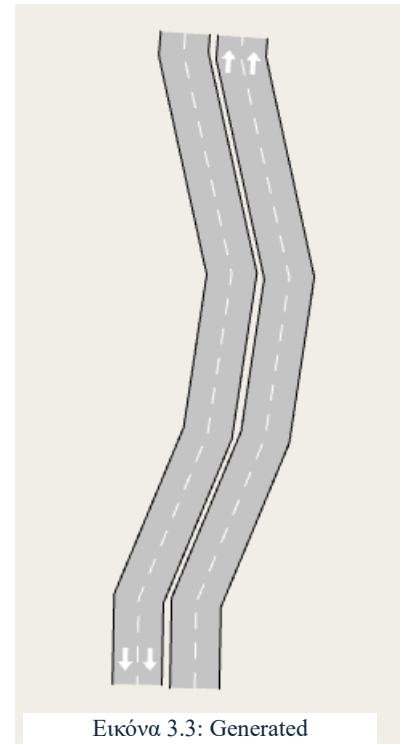
Δημιουργία δρόμων (Section): Εικονίδιο Create a section → right click → Generate Opposite Direction. Έτσι, έχουν δημιουργηθεί 2 λωρίδες αντίθετης κατεύθυνσης.



Εικόνα 3.1: Create a section



Εικόνα 3.2: Generate Opposite Direction



Εικόνα 3.3: Generated

Πιο συγκεκριμένα, στο αρχικό στάδιο ενός νέου κυκλοφορικού μοντέλου, το λογισμικό προσφέρει στον χρήστη τη δυνατότητα να αξιοποιήσει ως υπόβαθρο τα γεωμετρικά και γεωδαιτικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, τα οποία αντλούνται από την πλατφόρμα OpenStreetMap. Η χρήση αυτών των δεδομένων συμβάλει στην δημιουργία ενός ακριβούς και ρεαλιστικού ψηφιακού υπόβαθρου, πάνω στο οποίο στηρίζεται η περαιτέρω διαμόρφωση του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι η αποτύπωση του οδικού δικτύου προσεγγίζει την πραγματική του μορφή, γεγονός που καθιστά το μοντέλο πιο αξιόπιστο και κατάλληλο για ανάλυση ή μελλοντικές προσομοιώσεις.

2. Ορισμός κόμβων και διασταυρώσεων

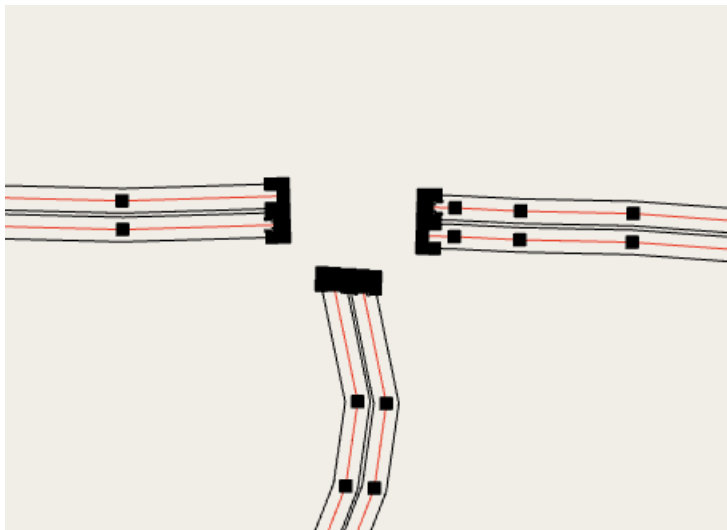
Καθορίστηκαν οι θέσεις των κόμβων, δηλαδή τα σημεία συμβολής των οδών, όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα της κυκλοφορίας. Σε κάθε κόμβο ενσωματώθηκαν τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά, όπως ο τύπος διασταύρωσης, οι προτεραιότητες ή η ύπαρξη σηματοδότησης.

ΒΗΜΑΤΑ ΣΤΟ AIMSUN :

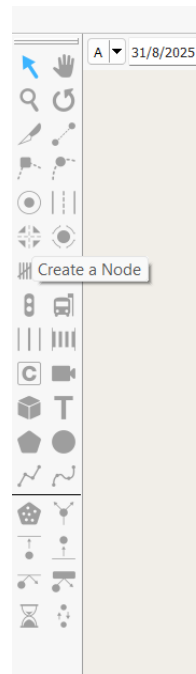
- 1) Δημιουργία δεσμών (Nodes): Επιλογή των δρόμων προς ένωση → Εικονίδιο Create a Node

Προέλευση/Προορισμός των λωρίδων μεταξύ τους: αριστερό διπλό click στο node → ορισμός προέλευσης/ προορισμού → ok

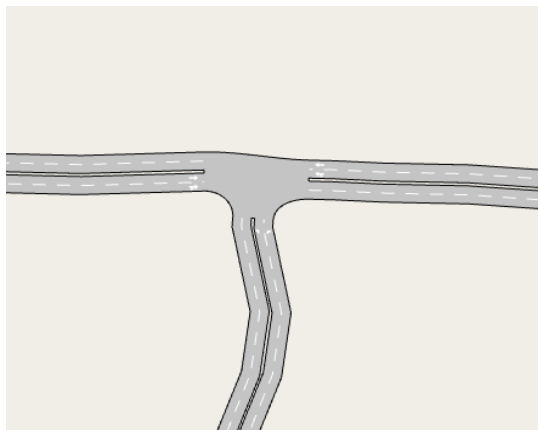
- Η εικονίδιο Create a Node → New → χειροκίνητη ένωση των δρόμων και ταυτόχρονος ορισμός προέλευσης και προορισμού.
- 2) Δημιουργία κόμβων (Roundabouts): Επιλογή δρόμων εισόδου και εξόδου του κόμβου → Εικονίδιο Create a Roundabout
 - 3) Προτεραιότητα με Yield sign: Επιλογή node → επιλογή στροφής → δεξί click → warning → Yield
 Η επιλογή node με αριστερό διπλό click → επιλογή στροφής για Yield sign → περιοχή warning → Yield
 - 4) Προτεραιότητα με Stop line: αριστερό click στην στροφή → Stop line → New
 - 5) Προτεραιότητα με Road type: Επιλογή δρόμων → δεξί click → Road type → Primary/Secondary/Tertiary
 - 6) Απαγόρευση αλλαγή λωρίδας (Solid lines) → Εικονίδιο Create a Solid line → click στην διακεκομμένη άσπρη γραμμή του δρόμου που καθορίζει τις λωρίδες και προσαρμογή της θέσης και του μήκους της Solid line



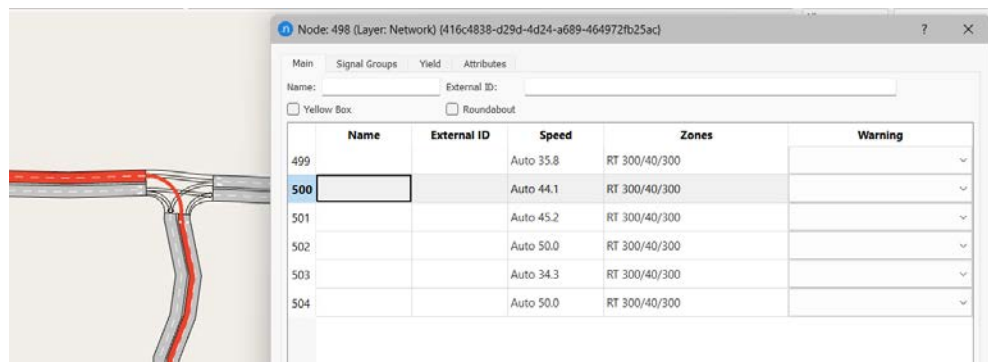
Εικόνα 3.4: Choose Sections



Εικόνα 3.5: Create a Node



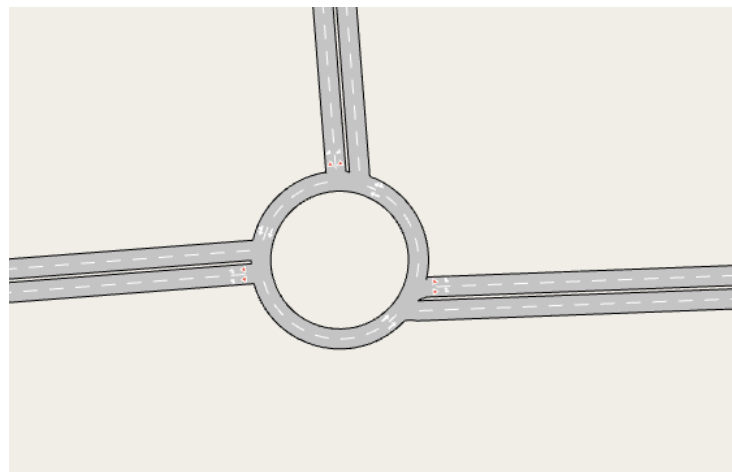
Εικόνα 3.6: Node Created



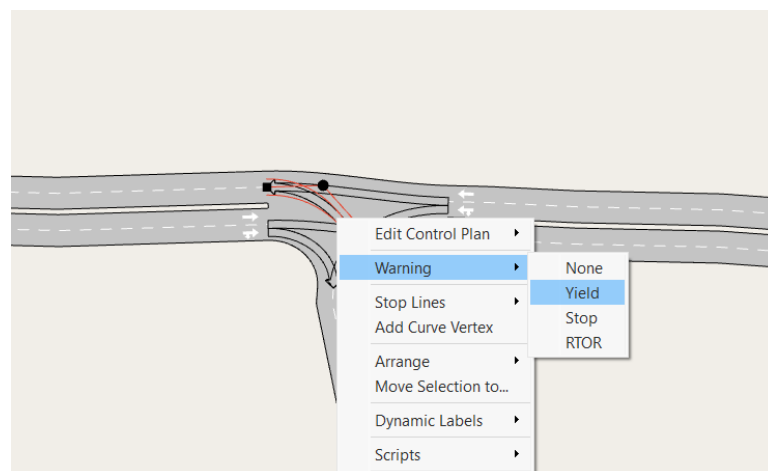
Εικόνα 3.7: Setting Origin and Destination



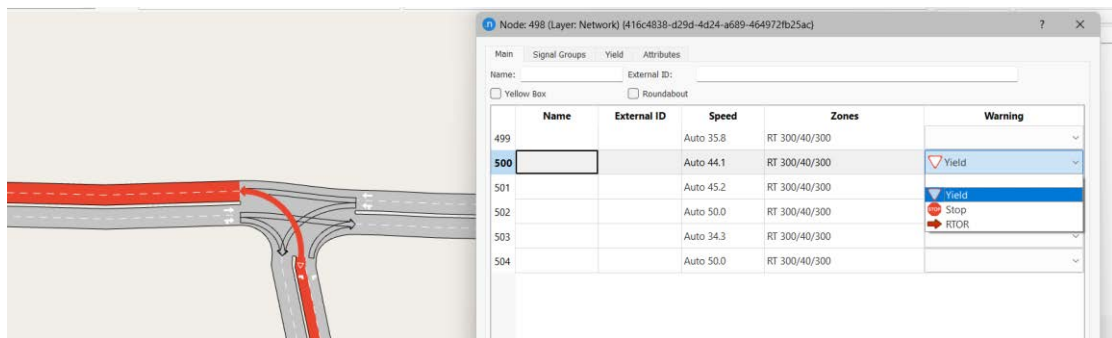
Εικόνα 3.8: Create a Roundabout



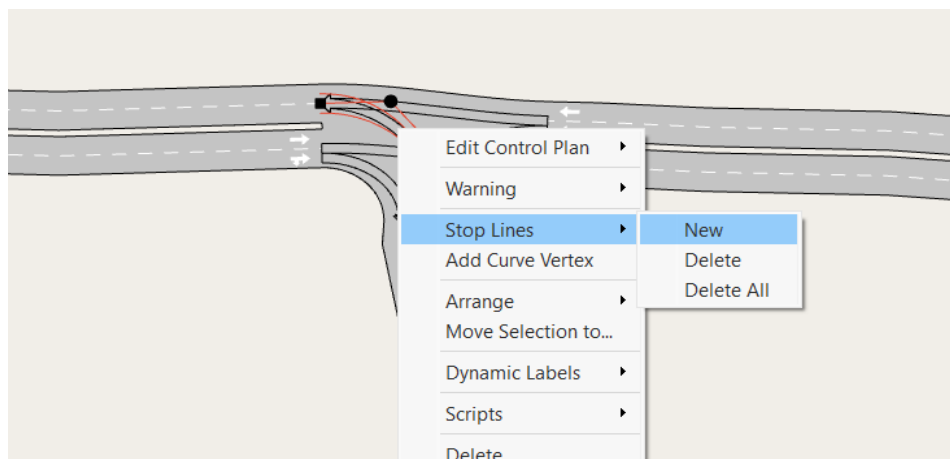
Εικόνα 3.9: Roundabout Created



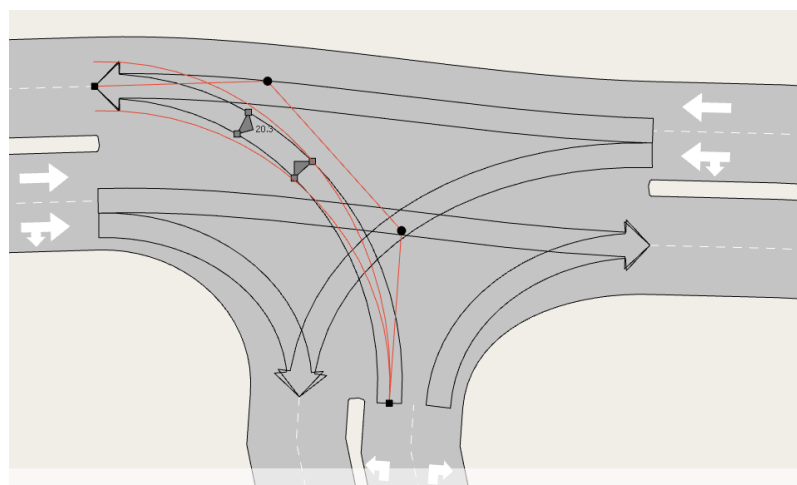
Εικόνα 3.10: Option 1: Yield Sign



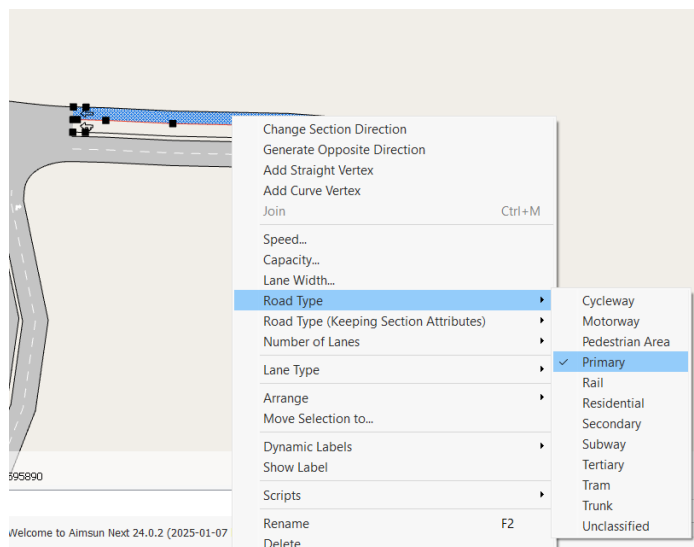
Εικόνα 3.11: Option 2: Yield Sign



Εικόνα 3.12: Stop Line



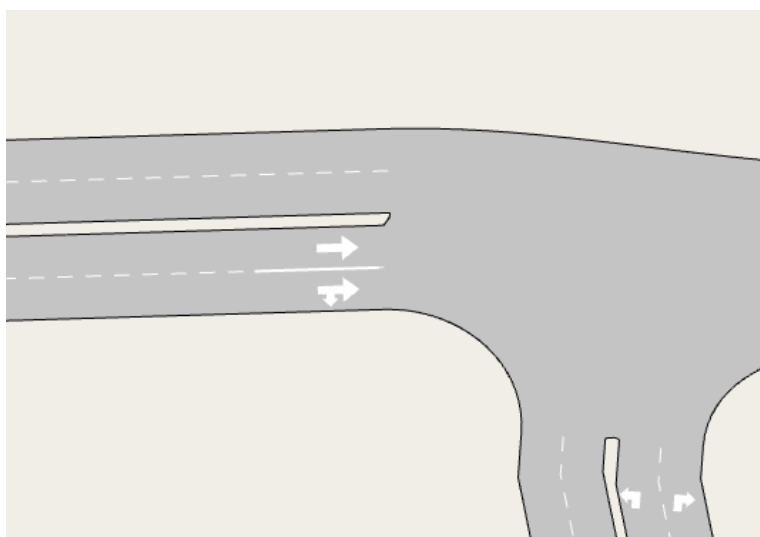
Εικόνα 3.13: Created Stop Line



Εικόνα 3.14: Road Type



Εικόνα 3.15: Create a Solid Line



Εικόνα 3.16: Created Solid Line

3. Ενσωμάτωση συστημάτων σηματοδότησης

Το λογισμικό δίνει την δυνατότητα ενσωμάτωσης φωτεινών σηματοδοτών, όπου οι κύκλοι λειτουργίας τους και οι ρυθμίσεις προτεραιότητας τους εντάσσονται στο δίκτυο, ώστε να αναπαρίσταται με ακρίβεια η υφιστάμενη λειτουργία.

4. Καθορισμός σημείων εισόδου και εξόδου

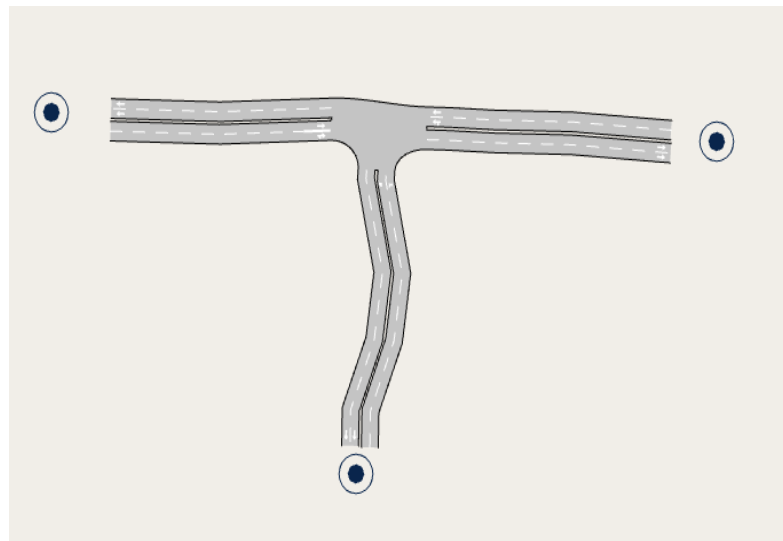
Ορίστηκαν οι θέσεις από τις οποίες τα οχήματα εισέρχονται και εξέρχονται από το δίκτυο. Τα σημεία αυτά αντιστοιχούν στην ζήτηση της κυκλοφορίας της περιοχής και αποτελούν κρίσιμη παράμετρο για την αληθοφάνεια του μοντέλου.

ΒΗΜΑΤΑ ΣΤΟ AIMSUN :

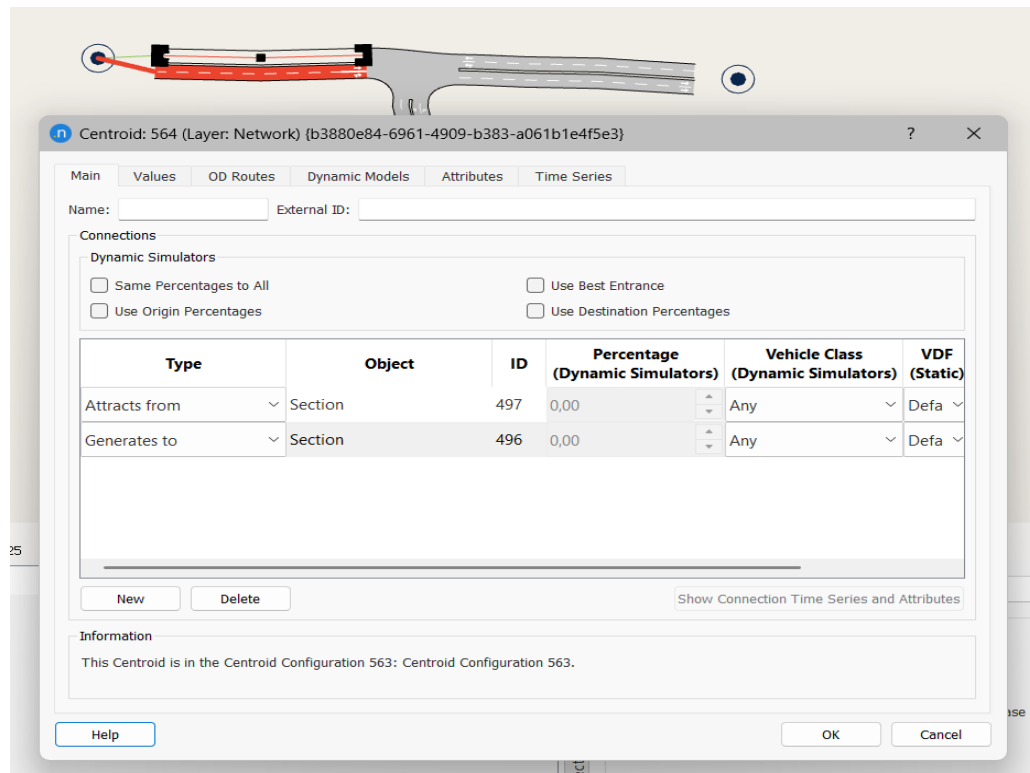
Κεντροειδές Προέλευσης/Προορισμού (Centroids): Εικονίδιο Create a Centroid → τοποθέτηση στις εισόδους και εξόδους του οδικού δικτύου → διπλό αριστερό click στα Centroid → Ορισμό ονόματος (Name) → New → σύνδεση των λωρίδων εισόδου και εξόδου



Εικόνα 3.17: Create a Centroid



Εικόνα 3.18: Created Centroids



Εικόνα 3.19: Centroid Origin-Destination

Έτσι ακολούθησε η κατανομή σε ζώνες του δικτύου. Επιλέχθηκαν 6 περιοχές σύμφωνα με τα κεντροειδή.

Ζώνη 1 → Προς Θεσσαλονίκη (Ευζώνων)

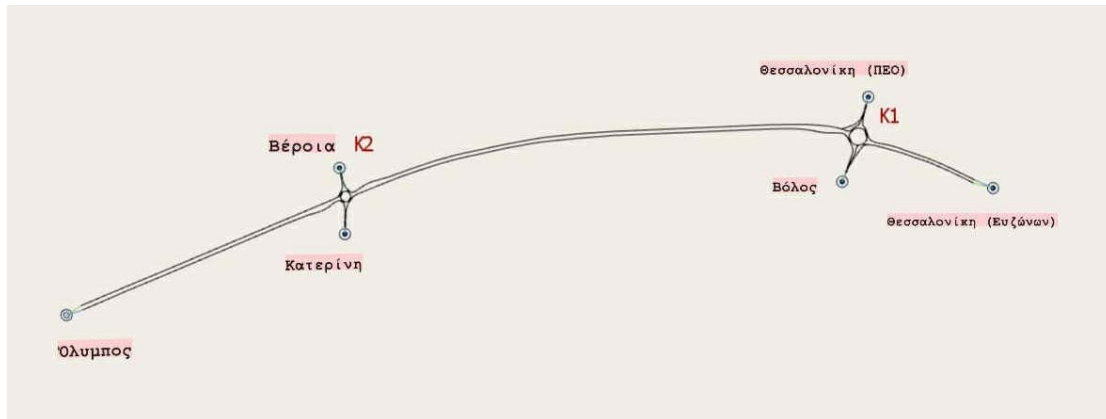
Ζώνη 2 → Προς Θεσσαλονίκη (ΠΕΟ)

Ζώνη 3 → Προς Βόλος

Ζώνη 4 → Προς Βέροια

Ζώνη 5 → Προς Κατερίνη

Ζώνη 6 → Προς Όλυμπος



Εικόνα 3.20: Ζώνες

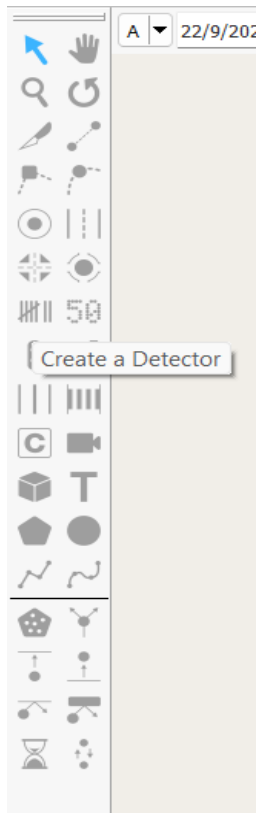
5. Ενσωμάτωση ανιχνευτών (Detectors)

Τοποθετήθηκαν 16 Detectors, σε κάθε είσοδο και έξοδο των δύο κόμβων. Στο λογισμικό AIMSUN, οι ανιχνευτές (detectors) αποτελούν βασικό εργαλείο συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Η λειτουργία τους μοιάζει με εκείνη των πραγματικών ανιχνευτών που τοποθετούνται στο οδικό δίκτυο, όπως κάμερες και αισθητήρες. Μέσω αυτών καταγράφονται σημαντικά μεγέθη όπως ο αριθμός διερχόμενων οχημάτων, οι ταχύτητες, ο χρόνος κατάληψης καθώς και οι ροές σε συγκεκριμένα τμήματα του δικτύου.

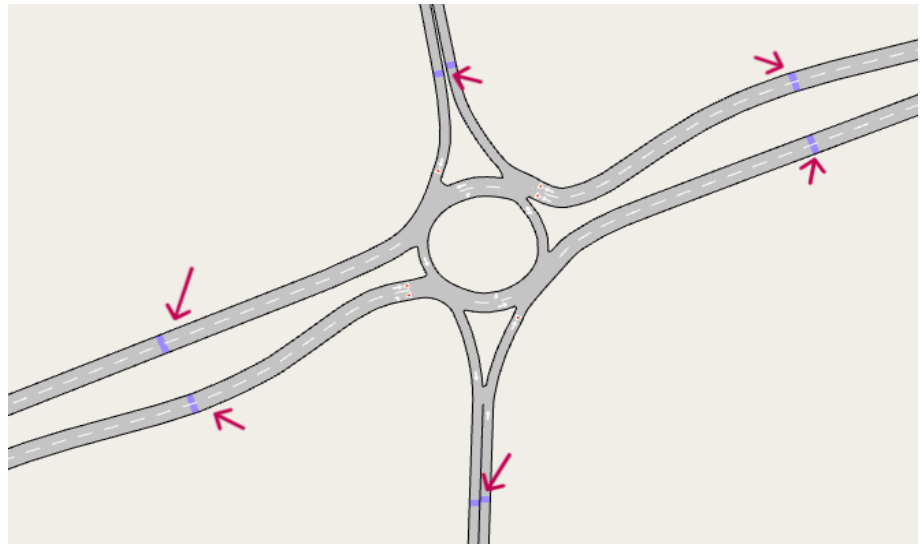
Οι ανιχνευτές μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορα σημεία του μοντέλου, ανάλογα με τις ανάγκες της μελέτης και να παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο μέσα στην προσομοίωση. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο για την παρακολούθηση και αξιολόγηση της κυκλοφορίας. Επιπλέον τα στοιχεία που συλλέγονται από τους detectors δίνουν τη δυνατότητα ανάλυσης διαφορετικών σεναρίων, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες για την κατανόηση της συμπεριφοράς του δικτύου και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την κυκλοφοριακή διαχείριση.

ΒΗΜΑΤΑ ΣΤΟ AIMSUN :

Ανιχνευτές (Detectors): Εικονίδιο Detector → τοποθέτηση στα αναγκαία σημεία → διπλό αριστερό click στα Detector → Ονομασία Detector



Εικόνα 3.21: Create a Detector



Εικόνα 3.22: Detectors

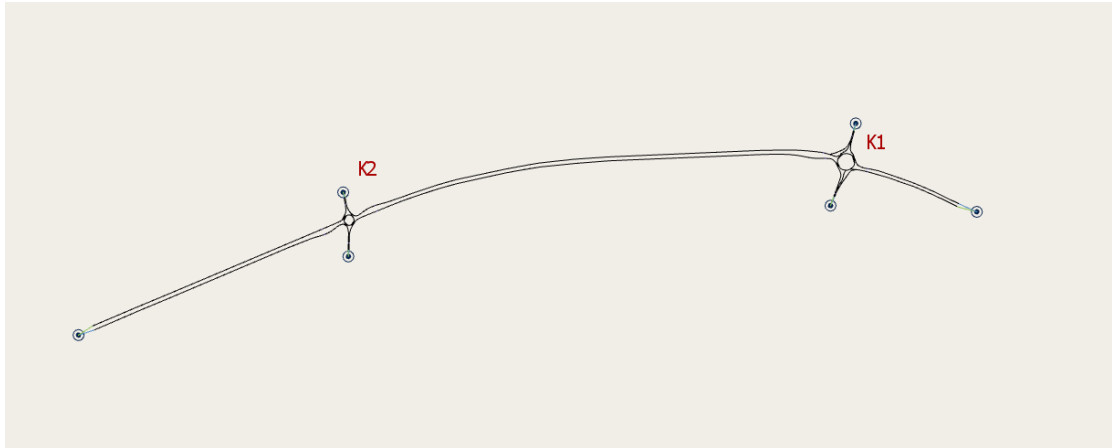
6. Εισαγωγή κυκλοφοριακών δεδομένων

Το μοντέλο τροφοδοτήθηκε με πραγματικά στοιχεία κίνησης, όπως φόρτοι οχημάτων, μέσες ταχύτητες και καθυστερήσεις. Τα δεδομένα αυτά προήλθαν από μετρήσεις πεδίου προϋπάρχουσας μελέτης στην ίδια περιοχή και τροποποιήθηκαν καταλλήλως σύμφωνα με τις ανάγκες της εργασίας.

7. Σύνθεση του τελικού δικτύου

Όλα τα παραπάνω στοιχεία συνδυάζονται ώστε να δημιουργηθεί το πλήρες κυκλοφορικό μοντέλο, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης, αλλά και για τη δοκιμή διαφορετικών σεναρίων και προτεινόμενων παρεμβάσεων.

Με τον τρόπο αυτό διαμορφώνεται ένα λειτουργικό και αξιόπιστο μοντέλο, το οποίο συνδυάζει τη γεωμετρική αποτύπωση, τα συστήματα ελέγχου και τα πραγματικά δεδομένα, προσφέροντας τη δυνατότητα ολοκληρωμένης αξιολόγησης της κυκλοφοριακής λειτουργίας της περιοχής μελέτης.



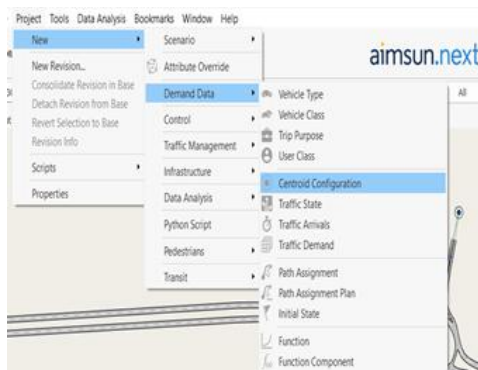
Εικόνα 3.23: Τελικό μοντέλο μελέτης στο Aimsun

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κυκλοφοριακοί φόρτοι για τα οχήματα που κινούνται στο υπό μελέτη δίκτυο της περιφερειακής οδού της Κατερίνης, πάρθηκαν από προϋπάρχουσα μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο αντίστοιχο οδικό δίκτυο και με το ίδιο λογισμικό. Τα δεδομένα αυτά, τροποποιήθηκαν καταλλήλως με σκοπό να ανταπεξέρχονται στις ανάγκες και στα ζητούμενα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

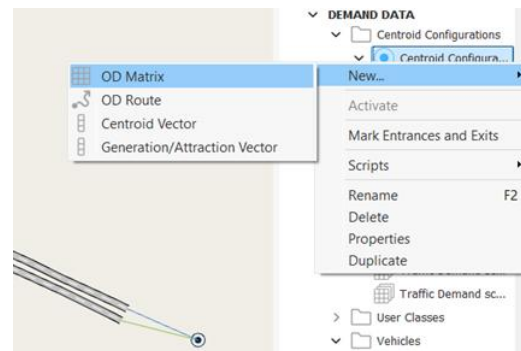
3.1.2 Διαμόρφωση Δομής Οδικού Δικτύου

Αρχικά, για να προκύψουν οι τελικοί Πίνακες Προέλευσης-Προορισμού για κάθε τύπο οχήματος, είναι απαραίτητο πριν την μικροσκοπική προσομοίωση να πραγματοποιηθεί μακροσκοπική. Στην παρούσα εργασία οι τελικοί πίνακες Π-Π ήταν γνωστοί από προϋπάρχουσα μελέτη. Η διαδικασία όμως που πρέπει να ακολουθηθεί για να προκύψουν οι τελικοί πίνακες Προέλευσης-Προορισμού είναι να δημιουργηθεί ένα πρώτο στατικό σενάριο το οποίο θα στηριχθεί σε πίνακες Π-Π των κεντροειδών σημείων με μηδενικό φόρτο κυκλοφορίας για κάθε τύπο οχήματος. Μέσω αυτών δημιουργείτε έπειτα μια ψευδή κυκλοφοριακή ζήτηση (Traffic Demand). Στην συνέχεια για να πραγματοποιηθεί η έναρξη του πρώτου στατικού σεναρίου είναι απαραίτητο να οριστεί η ημερομηνία έναρξης των μετρήσεων κυκλοφοριακού φόρτου καθώς και να εισαχθεί η ψευδή κυκλοφοριακή ζήτηση που δημιουργήθηκε παραπάνω. Μέσω της αναπαράστασης του σεναρίου αυτού δημιουργούνται οι τελικοί πίνακες Προέλευσης-Προορισμού στους οποίους έχει πραγματοποιηθεί προσαρμογή των πραγματικών μετρήσεων κυκλοφοριακού φόρτου (Static OD Adjustment Experiment).

Οπότε για να εισαχθούν οι δύο αυτοί έτοιμοι πίνακες Προέλευσης-Προορισμού πρέπει να πραγματοποιηθεί πρώτα η διαμόρφωση των κεντροειδών όπου μέσω αυτής δημιουργείται ένας αρχικός πίνακας Π-Π (OD Matrices).



Εικόνα 3.24: Διαμόρφωση Κεντροειδών



Εικόνα 3.25: Δημιουργία OD Matrix

Έπειτα, εισήχθησαν οι κυκλοφοριακοί φόρτοι για τα οχήματα και κατανεμήθηκαν στα έξι κεντροειδή που έχουν δημιουργηθεί. Οι παραδοχές που ακολουθήθηκαν για την διαδικασία αυτή ήταν ότι στον κύριο άξονα κυκλοφορίας κινούνται χίλια οχήματα ανά κατεύθυνση (1000οχ./κατ.) και ότι τα βαρέα οχήματα κινούνται αποκλειστικά και μόνο στον κύριο άξονα χωρίς να εισέρχονται ή να εξέρχονται από τους δευτερεύοντες άξονες κυκλοφορίας. Δηλαδή, τα βαρέα οχήματα δεν εξέρχονται από κανέναν κυκλικό κόμβο (K1,K2). Επίσης, η σύνθεση της κυκλοφορίας για τα οχήματα που ακολουθήθηκε, ήταν 95% για τα ΙΧ και 5% για τα φορτηγά (βαρέα οχήματα). Σε αυτό το βήμα, ρυθμίστηκε η ώρα (10π.μ.) και η διάρκεια (1ώρα) των μετρήσεων. Με την ολοκλήρωση των παραπάνω δημιουργήθηκαν τελικά οι δύο τελικοί Πίνακες Προέλευσης – Προορισμού (OD Matrices), ένας για τα ΙΧ και ένας για τα βαρέα οχήματα.

OD Matrix: 46131, Name: Cars {3cdab9fe-f812-41c2-81ae-86a9200d54c7} (Centroid Configuration: 45369: Centroid Configuration 45369)

Main | Cells | Histogram | Path Assignment | Parameters | Attributes

Name: Cars External ID:
 Contents: Trips Component: None
 Initial Time: 10:00:00 PM Duration: 01:00:00
 Unit: Vehicles Car Availability: No Distinction
 Vehicle Type: 154: Car Trip Purpose: None
 Store Location:
 Where: Aimsun Document

Summary

Origins: 6	Destinations: 6	Empty Cells: 6	Non-Empty Cells: 30
Total: 2000	Minimum Value (≠0): 4,74	Maximum Value: 395,15	Diagonal Total: 0

Help Duplicate OK Cancel

Εικόνα 3.26: Δημιουργία OD Matrix για IX

OD Matrix: 46131, Name: Cars {3cdab9fe-f812-41c2-81ae-86a9200d54c7} (Centroid Configuration: 45369: Centroid Configuration 45369)

Main | Cells | Histogram | Path Assignment | Parameters | Attributes

Headers: ID: Name Grouping Category: None
☐ Show All Centroids ☐ Hide Empty Rows ☐ Hide Empty Columns ☐ Draw Desire Lines Width: 100%

	45370: 2	45373: 3	45376: 4	45379: 5	46044: 6	46045: 1	Total
45370: 2		137,55	10,27	25,98	77,99	27,49	279,27
45373: 3	142,39		8,09	7,63	37,76	23,28	219,15
45376: 4	4,74	11,11		8,8	28,77	20,76	74,18
45379: 5	7,62	28,69	7,21		21,59	26,23	91,34
46044: 6	83,5	86,26	75,13	51,69		348,81	645,39
46045: 1	76,42	93,05	55,95	70,09	395,15		690,66
Total	314,67	356,65	156,64	164,2	561,26	446,57	2000

Εικόνα 3.27: Πίνακας Προέλευσης-Προορισμού για IX

OD Matrix: 46132, Name: Trucks {82dee9c2-4a62-4ca9-8f77-f4adcdadb56} (Centroid Configuration: 45369: Centroid Configuration 45369)

Main Cells Histogram Path Assignment Parameters Attributes

Name: Trucks External ID:
 Contents: Trips Component: None
 Initial Time: 10:00:00 ΠΜ Duration: 01:00:00
 Unit: Vehicles Car Availability: No Distinction
 Vehicle Type: 159: Truck Trip Purpose: None
 Store Location
 Where: Aimsun Document

Summary

Origins: 6	Destinations: 6	Empty Cells: 34	Non-Empty Cells: 2
Total: 200	Minimum Value (≠0): 100	Maximum Value: 100	Diagonal Total: 0

Help Duplicate OK Cancel

Εικόνα 3.28: Δημιουργία OD Matrix για βαρέα οχήματα

OD Matrix: 46132, Name: Trucks {82dee9c2-4a62-4ca9-8f77-f4adcdadb56} (Centroid Configuration: 45369: Centroid Configuration 45369)

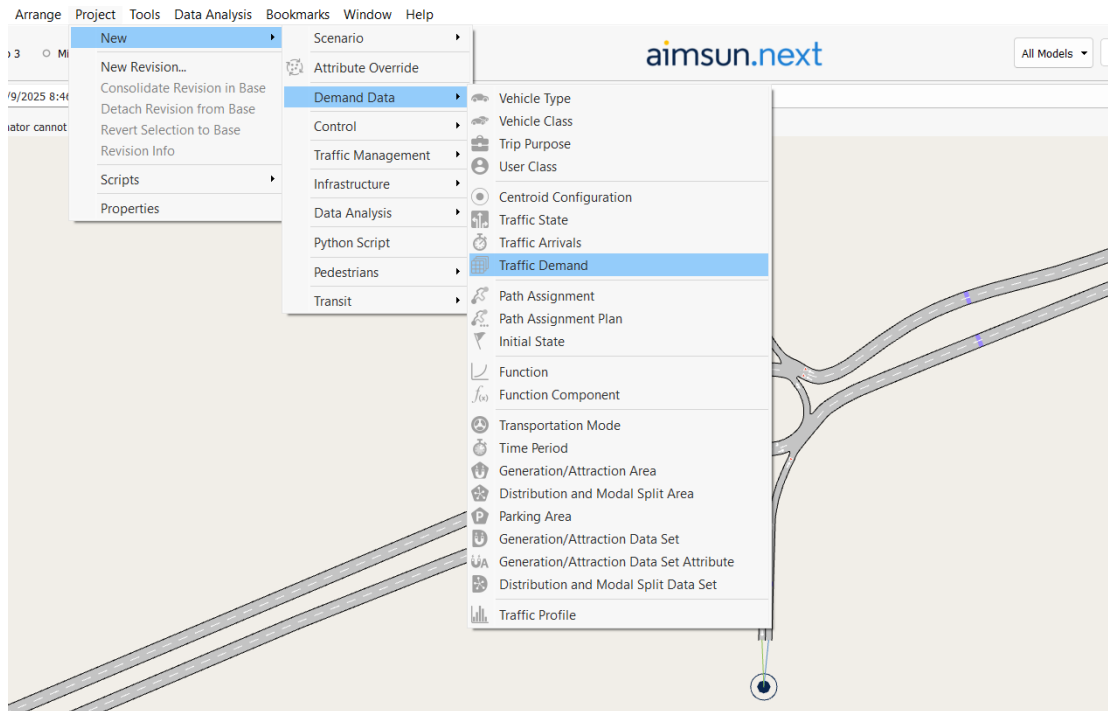
Main Cells Histogram Path Assignment Parameters Attributes

Headers: ID: Name Grouping Category: None
☐ Show All Centroids ☐ Hide Empty Rows ☐ Hide Empty Columns ☐ Draw Desire Lines Width: 100%

	45370: 2	45373: 3	45376: 4	45379: 5	46044: 6	46045: 1	Total
45370: 2							
45373: 3							
45376: 4							
45379: 5							
46044: 6						100	100
46045: 1					100		100
Total					100	100	200

Εικόνα 3.29: Πίνακας Προέλευσης-Προορισμού για βαρέα οχήματα

Με βάση τους Πίνακες Προέλευσης-Προορισμού (OD Matrices) δημιουργήθηκε η κυκλοφοριακή ζήτηση (Traffic Demand) για κάθε τύπο οχήματος.



Εικόνα 3.30: Διαδικασία δημιουργίας Traffic Demand

Στη συνέχεια, ρυθμίστηκε το ποσοστό του αρχικού φόρτου των βαρέων οχημάτων χωρίς να επηρεάζονται τα στοιχεία φόρτου των υπόλοιπων κατηγοριών, δηλαδή, των αυτοκινήτων. Αυτό, πραγματοποιήθηκε στον πίνακα της κυκλοφοριακής ζήτησης των οχημάτων (Traffic Demand) επιλέγοντας τα φορτηγά (Trucks) και ρυθμίζοντας έπειτα το ποσοστό κυκλοφοριακού φόρτου. Τα ποσοστά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για τα βαρέα οχήματα που κινούνται στο οδικό δίκτυο της Κατερίνης ήταν 100%, 0% και 300%. Οπότε, ουσιαστικά δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια για τον κυκλοφοριακό φόρτο των βαρέων οχημάτων.

Traffic Demand: 46135, Name: Traffic Demand scen1 {603909f6-1567-4a69-b95f-337b402d5eef} ? X

Main Summary Histogram Profile

Name: Traffic Demand scen1 External ID:

Initial Time: 10:00:00 PM Duration: 01:00:00 Type: Matrice Factor: 100 % Total: 2200 veh

	10:00 πμ	10:15 πμ	10:30 πμ	10:45 πμ	11:00 πμ
Car Total: 2000 veh	01:00:00 Cars (100%)				
Truck Total: 200 veh	01:00:00 Trucks (100%)				

Add Demand Item Remove Demand Item

Current Demand Item

Initial Time: 10:00:00 PM Duration: 01:00:00 Factor: 100 % Total: 200 veh

Traffic Arrivals: None

Εικόνα 3.31: Ρύθμιση ποσοστού βαρέων οχημάτων Σενάριο 1^ο

Traffic Demand: 46136, Name: Traffic Demand scen2 {626dcc68-08a3-401b-8f3f-0c1dc443700e} ? X

Main Summary Histogram Profile

Name: Traffic Demand scen2 External ID:

Initial Time: 10:00:00 PM Duration: 01:00:00 Type: Matrice Factor: 100 % Total: 2000 veh

	10:00 πμ	10:15 πμ	10:30 πμ	10:45 πμ	11:00 πμ
Car Total: 2000 veh	01:00:00 Cars (100%)				
Truck Total: 0 veh	01:00:00 Trucks (0%)				

Add Demand Item Remove Demand Item

Current Demand Item

Initial Time: 10:00:00 PM Duration: 01:00:00 Factor: 0 % Total: 0 veh

Traffic Arrivals: None

Εικόνα 3.32: Ρύθμιση ποσοστού βαρέων οχημάτων Σενάριο 2^ο

Traffic Demand: 46138, Name: Traffic Demand scen3 {b815c79a-ad8b-4ea9-9481-1c86c4883dbe}

Main Summary Histogram Profile

Name: Traffic Demand scen3 External ID:

Initial Time: 10:00:00 PM Duration: 01:00:00 Type: Matrice Factor: 100 % Total: 2600 veh

	10:00 ημ	10:15 ημ	10:30 ημ	10:45 ημ	11:00 ημ
Car Total: 2000 veh	01:00:00				
	Cars (100%)				
Truck Total: 600 veh	01:00:00				
	Trucks (300%)				

Current Demand Item

Initial Time: 10:00:00 PM Duration: 01:00:00

Factor: 300 % Total: 600 veh

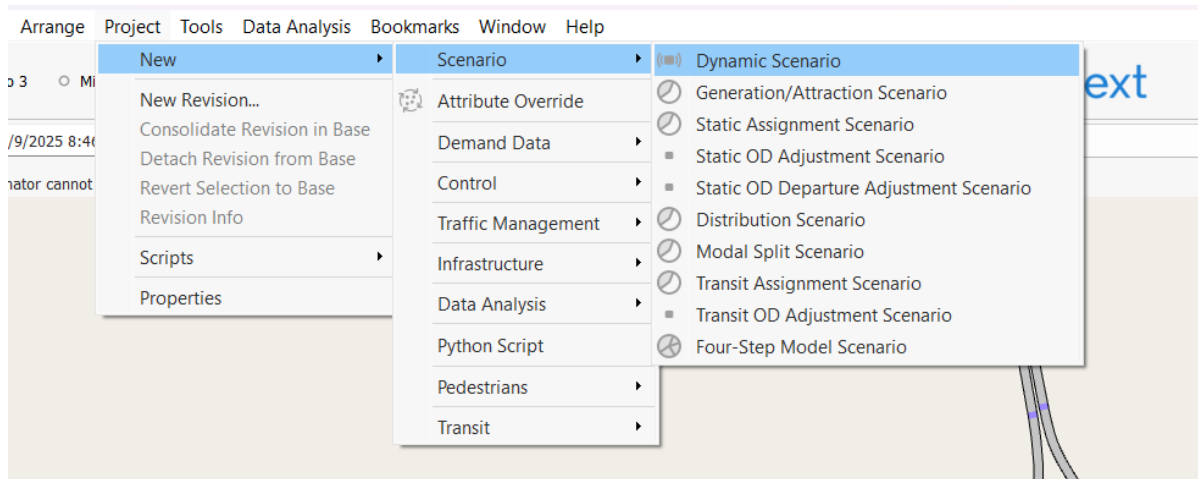
Traffic Arrivals

Traffic Arrivals: None

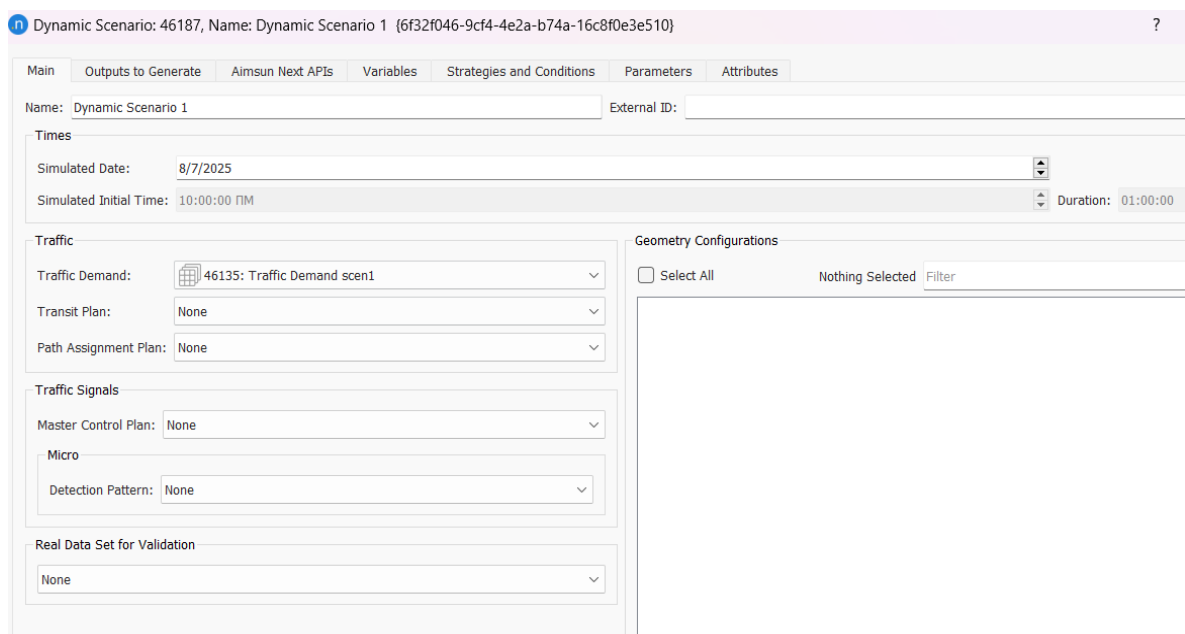
Εικόνα 3.33: Ρύθμιση ποσοστού βαρέων οχημάτων Σενάριο 3^ο

Με την ολοκλήρωση της τελικής πραγματικής κυκλοφοριακής ζήτησης για κάθε ένα από τα σενάρια πραγματοποιήθηκε μικροσκοπική προσομοίωση έτσι ώστε να εντοπιστούν τα στατιστικά στοιχεία επιρροής των βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο. Αυτό προϋποθέτει τη δημιουργία δυναμικών σεναρίων με σκοπό τη διερεύνηση τόσο των κυκλοφοριακών όσο και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούν τα βαρέα οχήματα στη λειτουργία του περιφερειακού της Κατερίνης.

Η διαδικασία δημιουργίας των δυναμικών σεναρίων για κάθε ένα από τα ποσοστά κυκλοφοριακού φόρτου βαρέων οχημάτων παρατίθεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 3.34: Διαδικασία Δημιουργίας Δυναμικών Σεναρίων

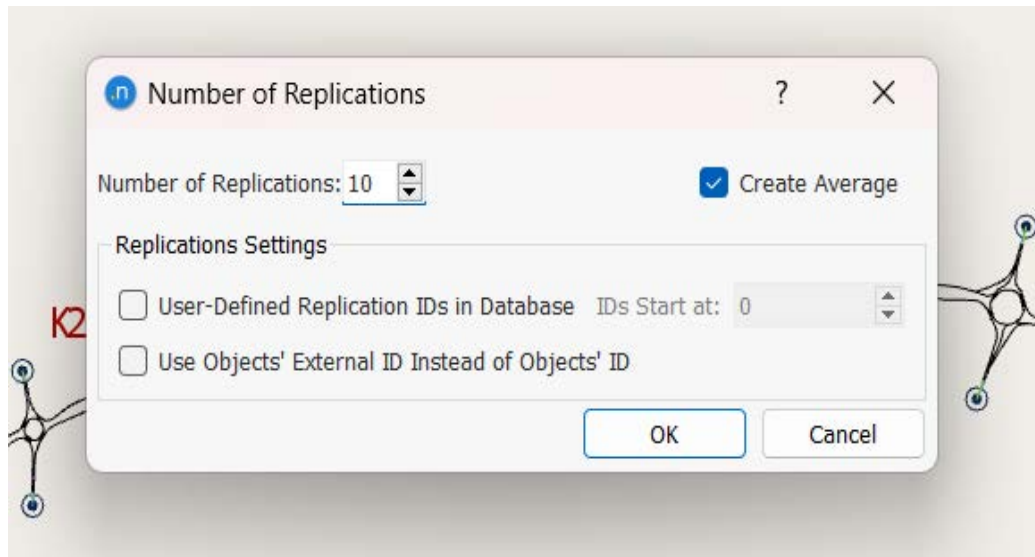


Εικόνα 3.35: Διαδικασία Δημιουργίας Δυναμικών Σεναρίων

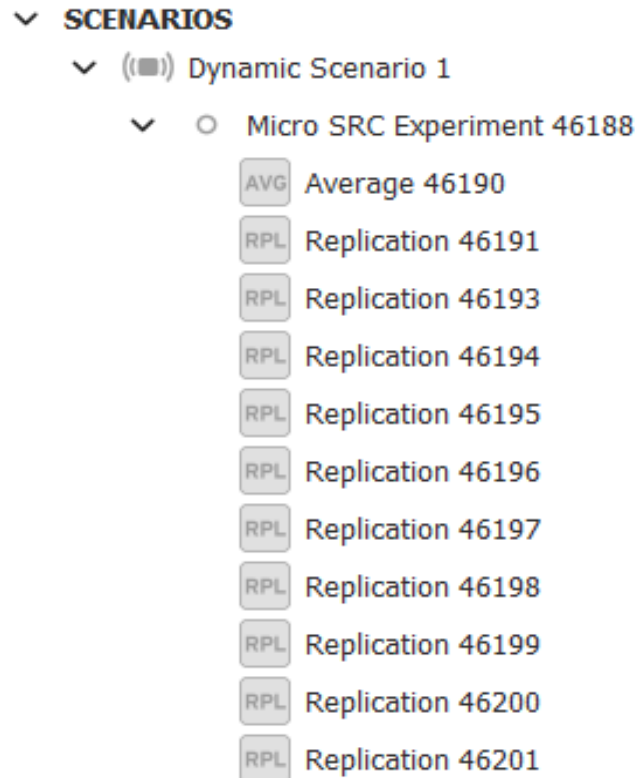
Όπως γίνεται αντιληπτό και από την παραπάνω εικόνα, σε κάθε ένα δυναμικό σενάριο τοποθετήθηκε και η κατάλληλη κυκλοφοριακή ζήτηση (Traffic Demand) που περιέχει τα κατάλληλα ποσοστά βαρέων οχημάτων. Επίσης, κατά την διαδικασία αυτή ρυθμίστηκε και η ημερομηνία καταγραφής (8/7/2025) καθώς και η ώρα (10:00πμ) και η διάρκεια (01:00:00).

Στη συνέχεια, για κάθε ένα δυναμικό σενάριο δημιουργήθηκαν 10 αναπαραστάσεις (Replications) καθώς και ο μέσος όρος τους (Average). Με τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση τυχόν σφαλμάτων στις μετρήσεις. Έπειτα, με την ολοκλήρωση της

προσομοίωσης για κάθε μία από τις αναπαραστάσεις και με τον υπολογισμό του μέσου όρου αυτών, υπολογίστηκαν οι μεταβλητές που θα χρειαστούν για την εύρεση των επιπτώσεων των βαρέων οχημάτων.



Εικόνα 3.36: Δημιουργία Replications



Εικόνα 3.37: Δυναμικό Σενάριο

3.1.3 Σενάρια Προσομοίωσης Κυκλοφορίας

Σενάριο 1^ο

Το πρώτο σενάριο αποτελεί το σενάριο της υφιστάμενης κατάστασης δηλαδή, το σενάριο πραγματικού φόρτου βαρέων οχημάτων στον περιφερειακό της Κατερίνης. Πιο συγκεκριμένα, αποτελείται από ποσοστό 100% για τα Ι.Χ. και 100% για τα βαρέα οχήματα.

Σενάριο 2^ο

Το δεύτερο σενάριο αποτελεί το σενάριο της παντελούς έλλειψης βαρέων οχημάτων σε ολόκληρο το οδικό δίκτυο. Συγκεκριμένα, το σενάριο αυτό μελετά την κατά 100% μείωση των βαρέων οχημάτων σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση στον περιφερειακό της Κατερίνης. Αποτελείται από ποσοστό 100% για τα Ι.Χ. και 0% για τα βαρέα οχήματα.

Σενάριο 3^ο

Το τρίτο σενάριο συνιστά το σενάριο της κατά 200% αύξησης του πλήθους των βαρέων οχημάτων στον περιφερειακό της Κατερίνης σε σύγκριση με το σενάριο της υφιστάμενης κατάστασης, δηλαδή, την ύπαρξη 300% βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο. Συγκεκριμένα, αποτελείται από ποσοστό 100% για τα Ι.Χ. και 300% για τα βαρέα οχήματα.

Κεφάλαιο 4 Ανάλυση & Σύγκριση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την διεξαγωγή της μικροσκοπικής προσομοίωσης για τον περιφερειακό της Κατερίνης. Η εύρεση τόσο των κυκλοφοριακών όσο και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο πραγματοποιείται με τη βοήθεια ορισμένων μεταβλητών. Συνεπώς, οι μεταβλητές αυτές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο για την λεπτομερή ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

4.1 Κυκλοφοριακά Μεγέθη και Μεταβλητές Αξιολόγησης

Χρονική Καθυστέρηση (Delay Time)

Η χρονική καθυστέρηση αποτελεί ένα από τα μεγέθη το οποίο αποτυπώνει τη σχέση προσφοράς και ζήτησης με γνώμονα τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, η μέση χρονική καθυστέρηση είναι ο επιπλέον χρόνος τον οποίο θα χρειαστεί κάποιο όχημα για να διανύσει ένα οδικό τμήμα στις επικρατούσες οδικές συνθήκες όταν η κίνηση του δεν γίνεται απρόσκοπτα. (Αντωνίου & Σπυροπούλου, 2015)

Ταχύτητα (Speed)

Αποτελεί την μέση τιμή των ταχυτήτων όλων των οχημάτων τα οποία διήλθαν από το οδικό δίκτυο μελέτης. Μετριέται σε χιλιόμετρα ανά ώρα (km/h) και εκφράζεται ως τον λόγο του χρόνου διαδρομής του οχήματος, προς το μήκος του δικτύου που διένυσε.

Εκπομπές Ατμοσφαιρικών Ρύπων

Οι εκπομπές των ατμοσφαιρικών ρύπων βασίστηκαν στις μετρήσεις των ρύπων του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μετρήθηκαν σε γραμμάρια (g).

Πυκνότητα (Density)

Ως πυκνότητα ορίζεται ο αριθμός των οχημάτων στην μονάδα μήκους και εκφράζεται σε οχήματα ανά χιλιόμετρο (veh/km). Ουσιαστικά εκφράζει την συγκέντρωση στη διάσταση του χώρου. Ο τρόπος μέτρησής της αφορά την μέτρηση του αριθμού των οχημάτων που

βρίσκονται σε ένα οδικό τμήμα για δεδομένη χρονική στιγμή. (Αντωνίου & Σπυροπούλου, 2015).

Παρακάτω παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της παρούσας εργασίας :

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικός Πίνακας Μεταβλητών

Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα Μέτρησης
Delay Time	Μέση Χρονική Καθυστέρηση	sec/km
Speed	Μέση Ταχύτητα	km/h
CO2	Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα	g
Density	Πυκνότητα	veh/km

Επίσης, για την περαιτέρω εξέταση και ανάλυση των αποτελεσμάτων για κάθε ένα από τα σενάρια έγινε και ανάλυση του λόγου όγκου προς χωρητικότητα (V/C ratio), δηλαδή, της κυκλοφοριακής συμφόρησης.

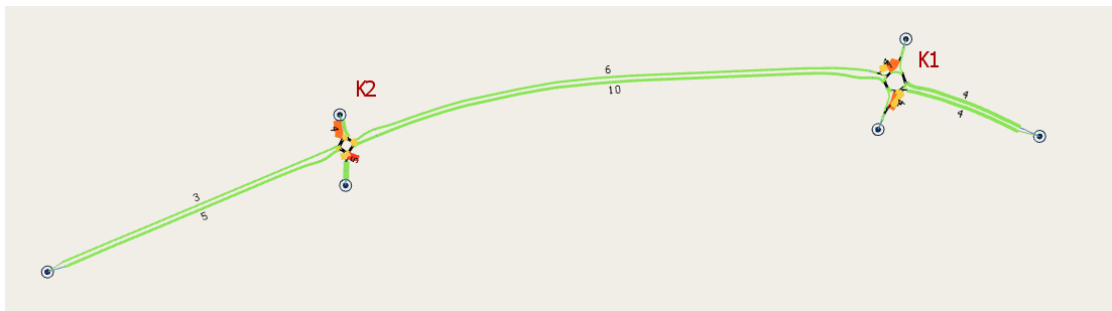
Το λογισμικό του AIMSUN έχει την δυνατότητα να προσφέρει πληθώρα μεταβλητών οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των αποτελεσμάτων ανάλογα με τα ζητούμενα της κάθε μελέτης. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες από τις μεταβλητές που διατίθενται στο λογισμικό AIMSUN.

Πίνακας 4.2: Πίνακας Μεταβλητών Λογισμικού AIMSUN

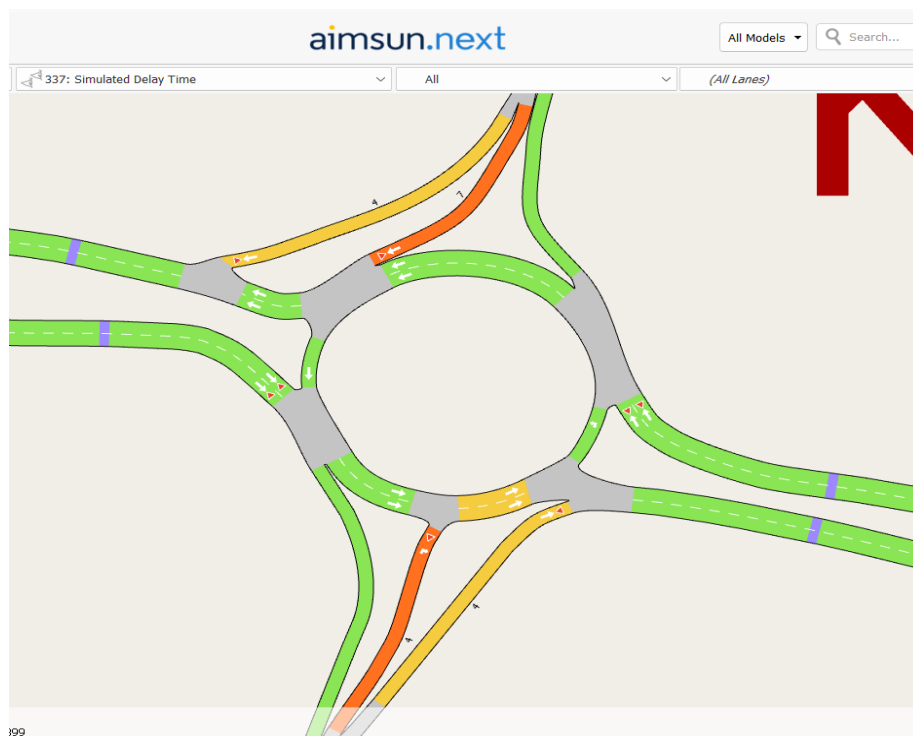
Μεταβλητή	Περιγραφή	Μονάδα Μέτρησης
Battery Consumption	Μέση Κατανάλωση Μπαταρίας	kWh
Fuel Consumption	Μέση Κατανάλωση Καυσίμου	L
Delay Time	Μέση Χρονική Καθυστέρηση	sec/km
Density	Πυκνότητα	veh/km
Flow	Μέση τιμή Κυκλοφοριακού Φόρτου	veh/h
Missed Turns	Πλήθος οχημάτων που έχασαν την έξοδο	-
IEM Emission CO2	Εκπομπή Ατμοσφαιρικού Ρύπου CO2	g
IEM Emission NOx	Εκπομπή Ατμοσφαιρικού Ρύπου NOx	g
IEM Emission PM	Εκπομπή Ατμοσφαιρικού Ρύπου PM	g
IEM Emission VOC	Εκπομπή Ατμοσφαιρικού Ρύπου VOC	g
Max Virtual Queue	Μέγιστο Εικονικό Μήκος Ουράς	veh
Mean Queue	Μέση Τιμή Μήκους Ουράς	veh
Number of Lane Changes	Πλήθος Αλλαγών Λωρίδας	/km
Number of Stops	Αριθμός Στάσεων	/veh/km
Speed	Μέση Ταχύτητα	km/h
Stop Time	Μέσος Χρόνος Στάσης	sec/km
Total Distance Travel	Συνολικό Μήκος Διαδρομής	km
Total Travel Time	Συνολικός Χρόνος Ταξιδιού	h

4.1.1 Αποτελέσματα & Συγκριτική Αξιολόγηση Μέσης Χρονικής Καθυστερήσης (delay time)

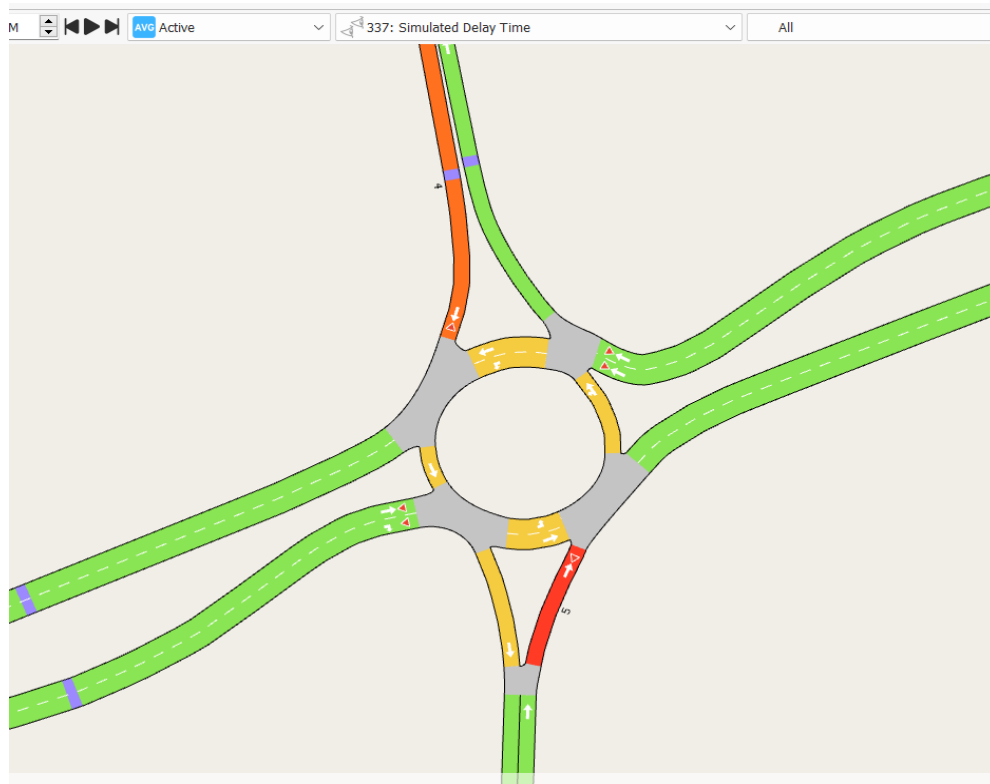
Σενάριο 1 (100% B.O.) :



Εικόνα 4.1: Μέση Χρονική Καθυστερήση Σενάριο 1 (ολικό)



Εικόνα 4.2: Μέση Χρονική Καθυστερήση Σενάριο 1 (Κόμβος K1)

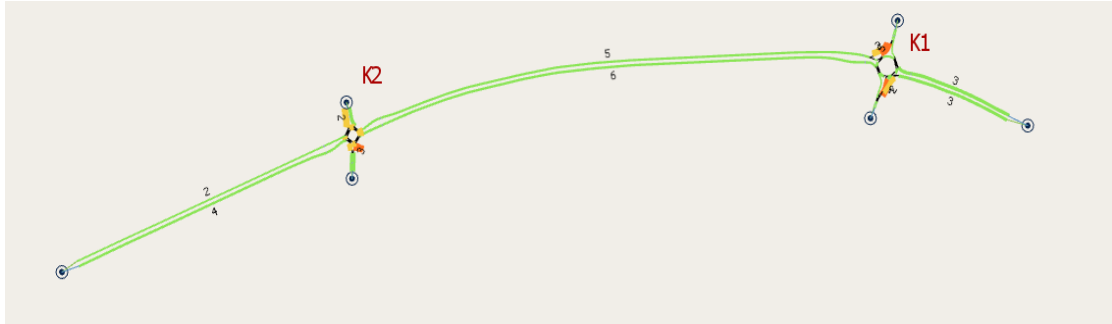


Εικόνα 4.3: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 1 (Κόμβος K2)

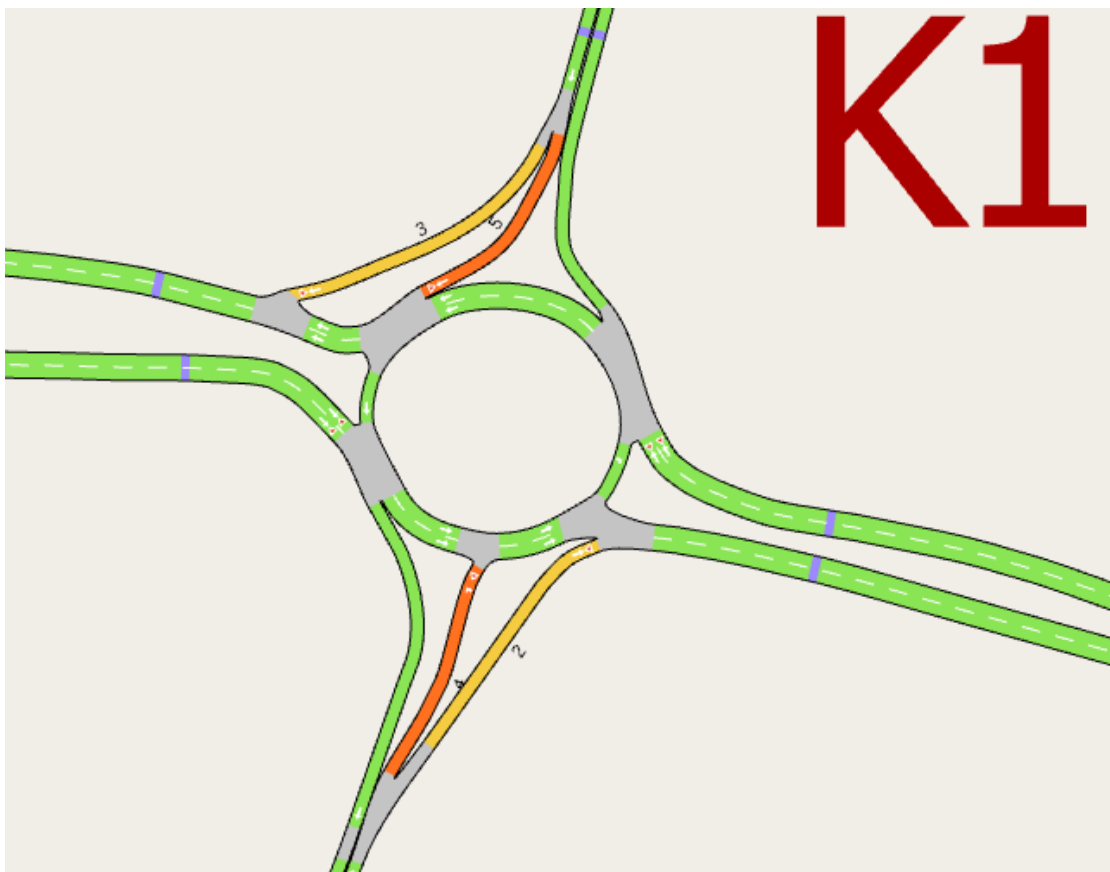
Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση για το πρώτο σενάριο (100% B.O.). Οι αριθμοί που απεικονίζονται δίπλα από κάθε οδικό τμήμα, το οποίο έχει και συγκεκριμένο χρώμα με βάση τη χρονική καθυστέρηση, είναι τα πόσα δευτερόλεπτα καθυστέρησης υπάρχουν στο οδικό τμήμα σε σύγκριση με την ελεύθερη ροή κυκλοφορίας (free flow traffic). Για παράδειγμα, στην Εικόνα 4.2 στο οδικό τμήμα που απεικονίζεται με πορτοκαλί χρώμα (Κόμβος K1) υπάρχει 7 δευτερόλεπτα καθυστέρηση για το σενάριο αυτό σε σύγκριση με την ελεύθερη ροή κυκλοφορίας. Αυτή η καθυστέρηση αποτελεί και τη μεγαλύτερη που παρατηρείται στην είσοδο του κόμβου K1 ενώ, στον κόμβο K2 η υψηλότερη είναι τα 5 δευτερόλεπτα. Γενικά και στους δύο κόμβους της οδού γίνονται αντιληπτές αρκετές καθυστερήσεις τόσο κατά την διάρκεια της κίνησης των οχημάτων μέσα σε αυτούς, όσο και κατά την είσοδο και έξοδο τους από αυτούς.

Ως ελεύθερη ροή κυκλοφορίας (free flow traffic) ορίζεται, η κατάσταση όπου τα οχήματα κινούνται διαρκώς χωρίς διακοπές, καθυστερήσεις ή σημαντική μείωση ταχύτητας, δίνοντας την δυνατότητα στους χρήστες της οδού να διατηρούν σταθερό ρυθμό, βελτιώνοντας παράλληλα την αποδοτικότητα και την ασφάλεια του οδικού δικτύου. Οι συνθήκες ελεύθερης ροής είναι απαραίτητες για την βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας και την ελαχιστοποίηση των χρόνων διαδρομής.

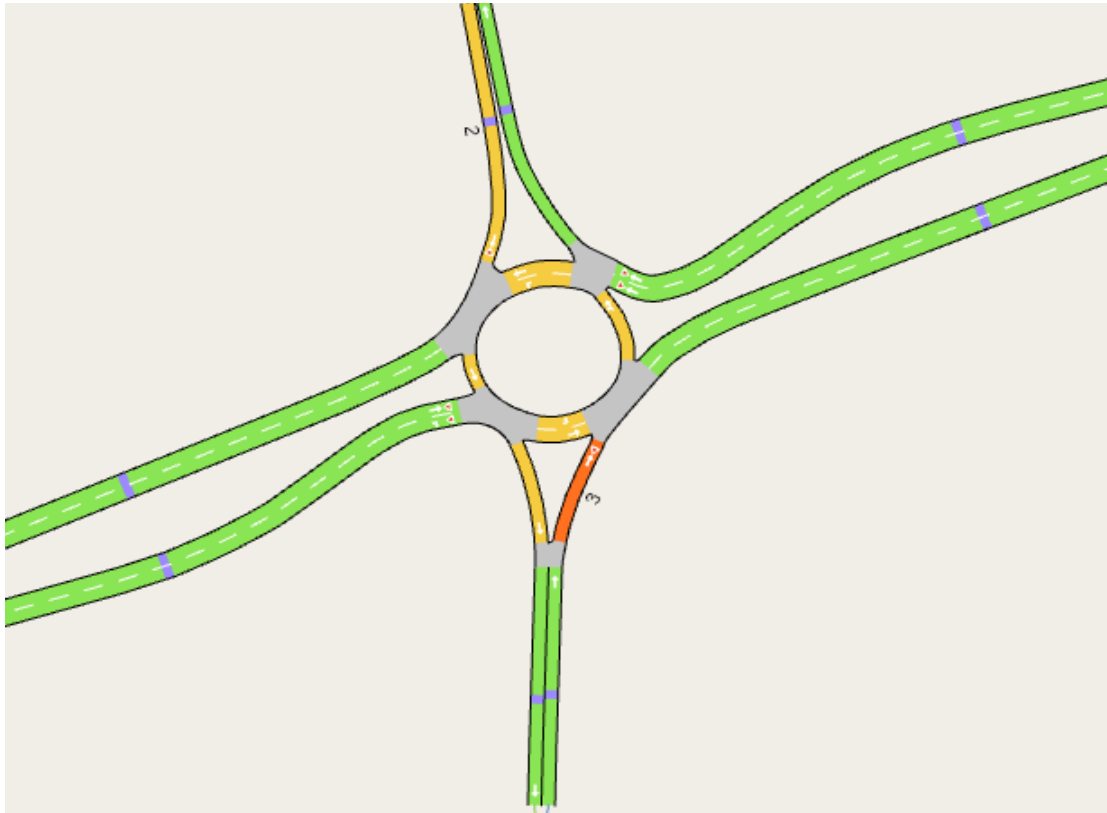
Σενάριο 2 (0% Β.Ο.) :



Εικόνα 4.4: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 2 (ολικό)



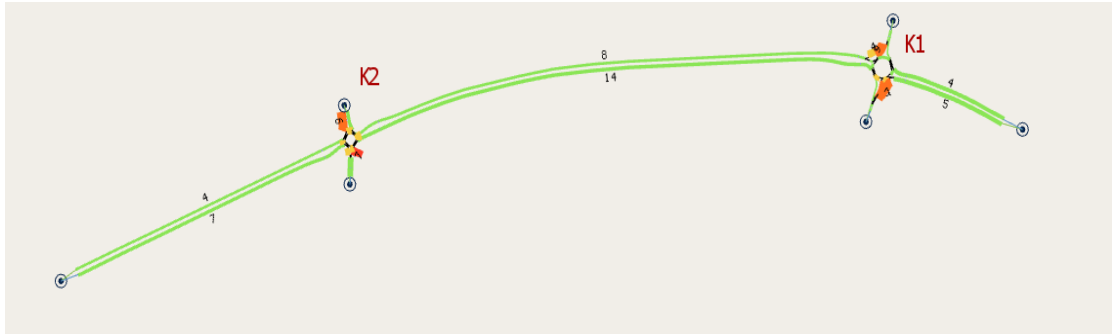
Εικόνα 4.5: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 2 (Κόμβος 1)



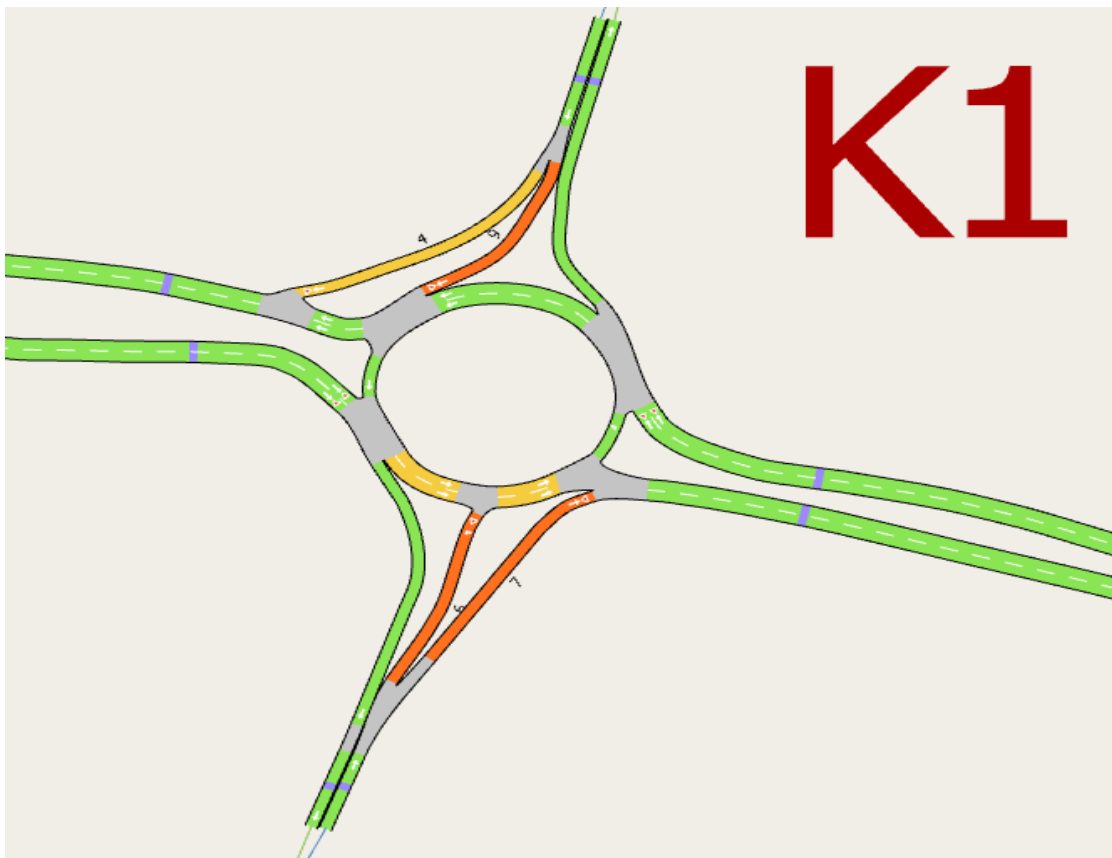
Εικόνα 4.6: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 2 (Κόμβος 2)

Διαπιστώνεται από τις παραπάνω εικόνες, ότι στο σενάριο αυτό υπάρχουν οι μικρότερες καθυστερήσεις τόσο στον κύριο άξονα του περιφερειακού της Κατερίνης όσο και στους κόμβους του. Αυτό είναι λογικό διότι δεν κινούνται καθόλου βαρέα οχήματα στο σύνολο του οδικού δικτύου. Η μεγαλύτερη τιμή χρονικής καθυστέρησης παρατηρείται στον κύριο άξονα της οδού και είναι τα 6 δευτερόλεπτα καθυστέρησης σε σχέση με την ελεύθερη ροή κυκλοφορίας (free flow). Επίσης, στον κόμβο K1 δημιουργούνται καθυστερήσεις λίγο πριν την είσοδο των οχημάτων μέσα στον κυκλικό κόμβο καθώς και στον κύριο άξονα. Οι καθυστερήσεις αυτές κυμαίνονται από 2 έως 5 δευτερόλεπτα σε σχέση με τις συνθήκες ελεύθερης ροής κυκλοφορίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι μέσα στον κυκλικό κόμβο K1 οι καθυστερήσεις είναι αισθητά μικρές. Αντίθετα, οι καθυστερήσεις που δημιουργούνται στον κόμβο K2 είναι μικρότερες σε σύγκριση με τον K1, με τιμές που κυμαίνονται από 2 έως 3 δευτερόλεπτα. Πάντως κατά την κίνηση των οχημάτων μέσα στον κόμβο K2 παρατηρούνται μεγαλύτερες καθυστερήσεις από ότι στον κόμβο K1.

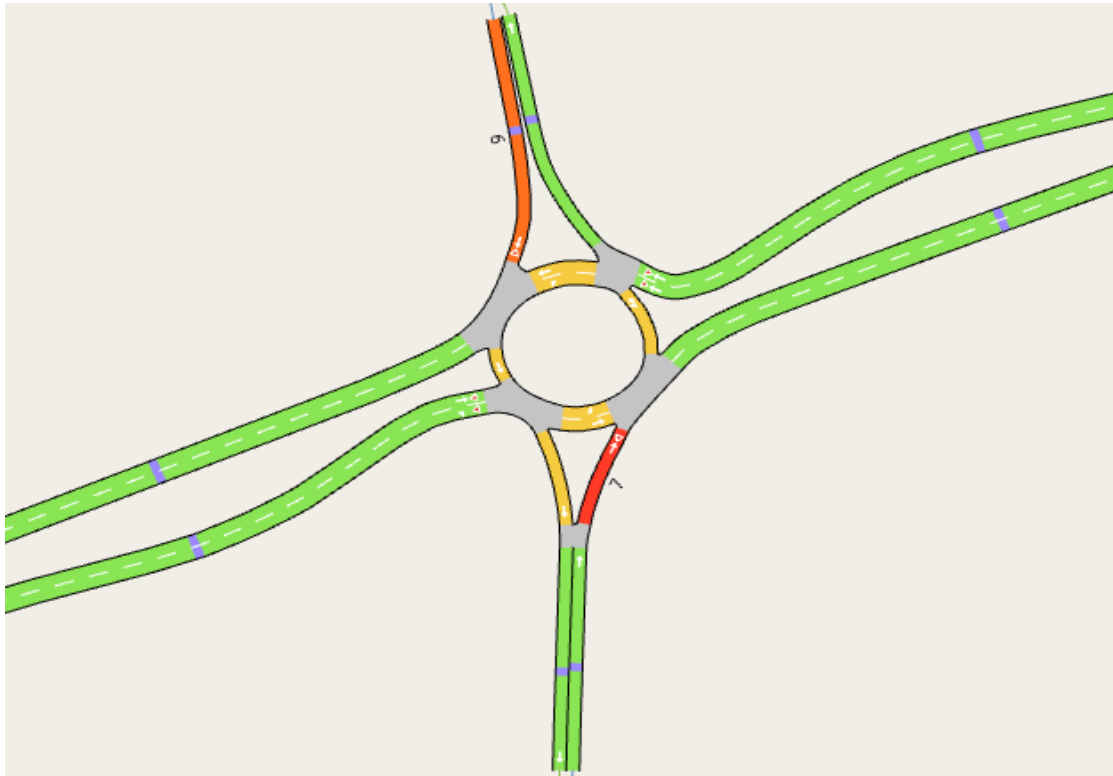
Σενάριο 3 (300% Β.Ο.) :



Εικόνα 4.7: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 3 (ολικό)



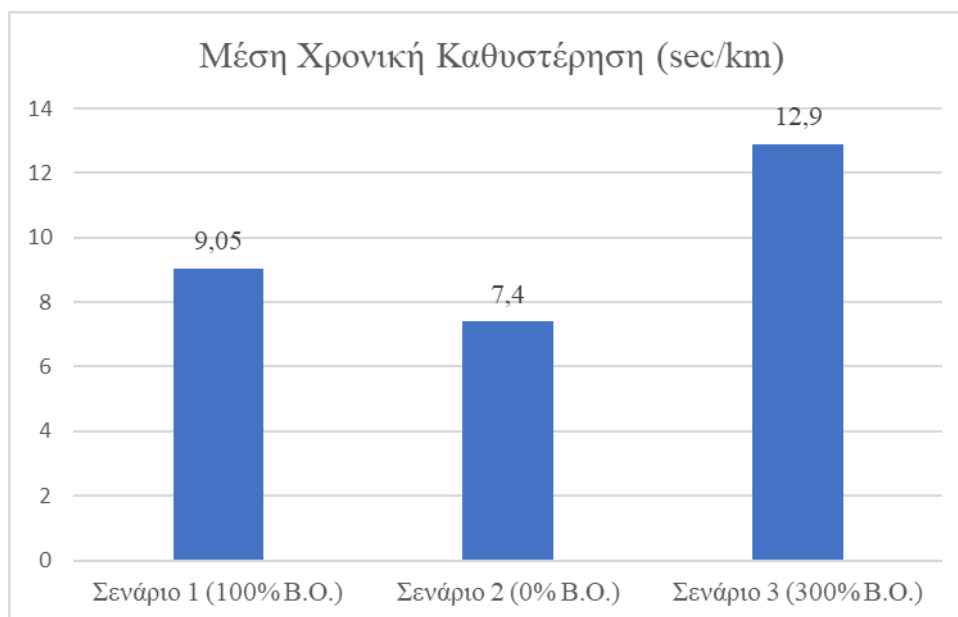
Εικόνα 4.8: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 3 (Κόμβος 1)



Εικόνα 4.9: Μέση Χρονική Καθυστέρηση Σενάριο 3 (Κόμβος 2)

Σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σενάρια, το σενάριο αυτό παρουσιάζει τις μεγαλύτερες χρονικές καθυστερήσεις κάτι που επιτυγχάνεται λόγω της μεγάλης κίνησης βαρέων οχημάτων στο δίκτυο (300% Β.Ο.). Τόσο στον κύριο άξονα όσο και στους κόμβους παρατηρούνται αρκετά υψηλές καθυστερήσεις. Πιο συγκεκριμένα, στον κύριο άξονα η μέγιστη χρονική καθυστέρηση που υπάρχει είναι τα 14 δευτερόλεπτα σε σχέση με τις συνθήκες ελεύθερης ροής κυκλοφορίας. Ενώ, στους κόμβους η μέγιστη καθυστέρηση παρατηρείται στον κόμβο Κ1 και είναι τα 9 δευτερόλεπτα. Ακόμα, και στους δύο κόμβους σε σχέση με τα άλλα δύο σενάρια οι καθυστερήσεις είναι αισθητά μεγαλύτερες με τιμές που κυμαίνονται από τα 4 έως τα 9 δευτερόλεπτα σε σύγκριση με την ελεύθερη ροή κυκλοφορίας.

Για την περεταίρω κατανόηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων για την μέση χρονική καθυστέρηση για κάθε ένα από τα σενάρια, η μέση τιμή των αποτελεσμάτων αποτυπώνεται και σε μορφή διαγράμματος.

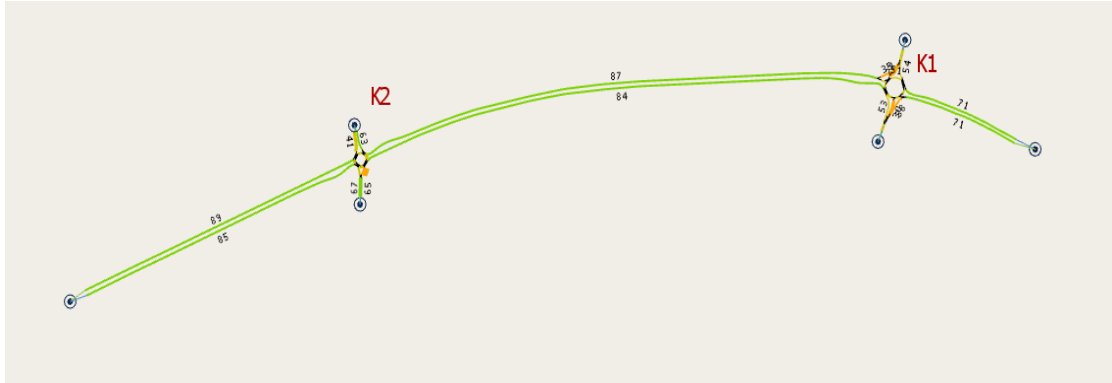


Γράφημα 4.5: Μέση Χρονική Καθυστέρηση ανά ποσοστό Β.Ο.

Στο Γράφημα 4.1 παρουσιάζονται οι μεταβολές της μέσης χρονικής καθυστέρησης για τα τρία σενάρια βαρέων οχημάτων. Με βάση το γράφημα γίνεται αντιληπτό ότι το σενάριο τρία με ποσοστό 300% βαρέα οχήματα παρουσιάζει τις μεγαλύτερες καθυστερήσεις, οι οποίες είναι αισθητά μεγαλύτερες από τα υπόλοιπα σενάρια (12,9 δευτερόλεπτα/χιλιόμετρο). Παράλληλα, το σενάριο δύο με την παντελή έλλειψη βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο παρατηρείται ότι πλησιάζει σε καθυστερήσεις το σενάριο 1 (υφιστάμενη κατάσταση) δηλαδή το σενάριο πραγματικού φόρτου βαρέων οχημάτων. Άρα, διαπιστώνεται ότι με την αύξηση του ποσοστού βαρέων οχημάτων γίνεται ταυτόχρονα και αύξηση της μέσης χρονικής καθυστέρησης των οχημάτων.

4.1.2 Αποτελέσματα & Συγκριτική Αξιολόγηση Μέσης Ταχύτητας (Speed)

Σενάριο 1 (100% Β.Ο.) :



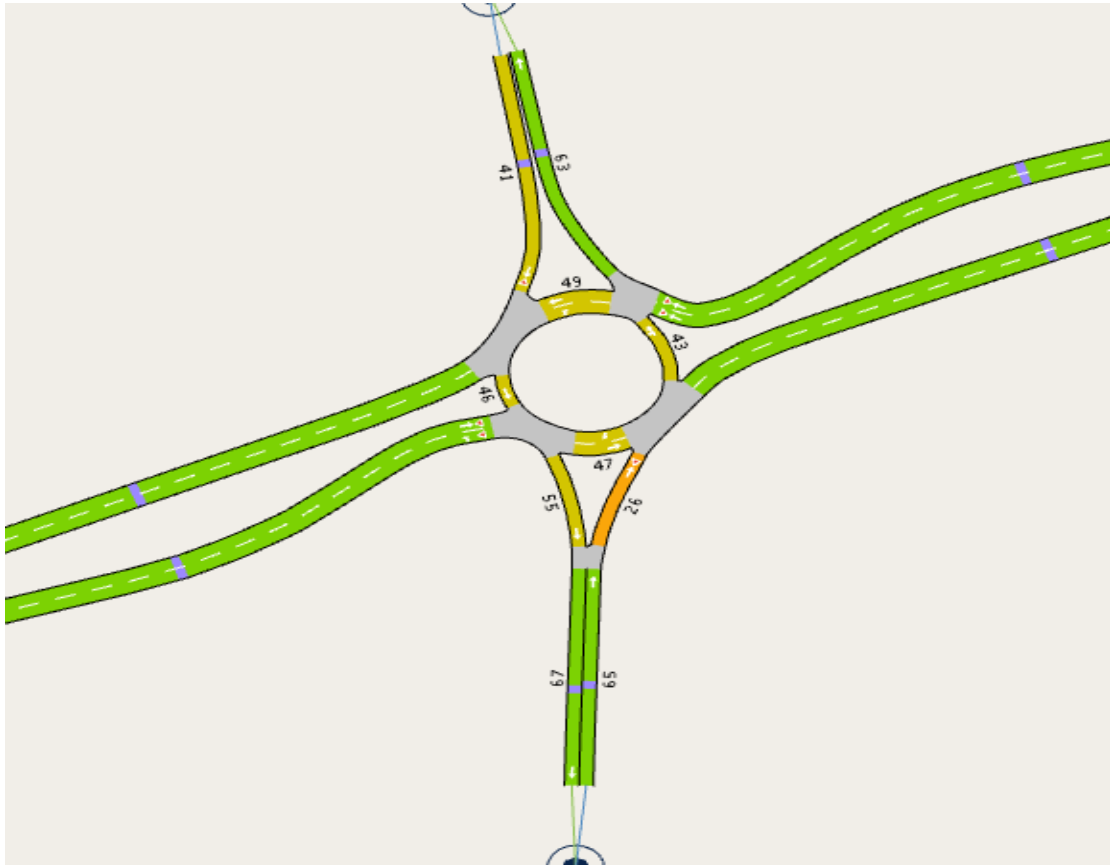
Εικόνα 4.10: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 1 (ολικό)

Διακρίνεται ότι στον κύριο άξονα του περιφερειακού της Κατερίνης για το σενάριο αυτό (100% Β.Ο.) τα οχήματα αναπτύσσουν μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με την είσοδο και έξοδο τους από τους κόμβους, κάτι το οποίο είναι λογικό διότι στους κόμβους υπάρχει μεγαλύτερη καθυστέρηση λόγω προτεραιότητας. Η μέγιστη ταχύτητα που αναπτύσσεται στο δίκτυο είναι τα 89 χιλιόμετρα ανά ώρα (km/h) και παρατηρείται στον κύριο άξονα δεξιά του κόμβου δύο.



Εικόνα 4.11: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 1 (Κόμβος 1)

Σύμφωνα με την Εικόνα 4.11 σε ολόκληρο τον κόμβο K1 επικρατούν αρκετά χαμηλές ταχύτητες τόσο κατά την είσοδο και έξοδο των οχημάτων από αυτόν, όσο και κατά την κίνησή τους μέσα σε αυτόν. Επίσης, διαπιστώνεται ότι κατά την είσοδο από τους δευτερεύοντες άξονες κυκλοφορίας οι ταχύτητες είναι κατά πολύ μικρότερες (27-38 km/h) σε σχέση με την έξοδο από τους κόμβους (53-55 km/h). Μέσα στον κόμβο K1 οι ταχύτητες που επικρατούν κυμαίνονται από 43-51 χιλιόμετρα/ώρα. Η μικρότερη ταχύτητα που παρατηρείται στον κόμβο αυτόν είναι τα 27 χιλιόμετρα/ώρα.



Εικόνα 4.12: Μέση ταχύτητα Σενάριο 1 (Κόμβος K2)

Από την Εικόνα 4.12 γίνεται αισθητό ότι στον κόμβο K2 οι ταχύτητες είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τον K1. Λίγο πριν την είσοδο από τις δευτερεύουσες οδούς στον κόμβο οι ταχύτητες κυμαίνονται από τα 26 έως τα 41 χιλιόμετρο ανά ώρα ενώ κατά την έξοδο από τον κόμβο K2 προς τις δευτερεύουσες οδούς από τα 55 έως τα 63 χιλιόμετρα ανά ώρα. Κατά την κίνηση των οχημάτων εντός του κόμβου οι ταχύτητες που επικρατούν είναι από 43 έως 49 km/h.

Σενάριο 2 (0% B.O.) :



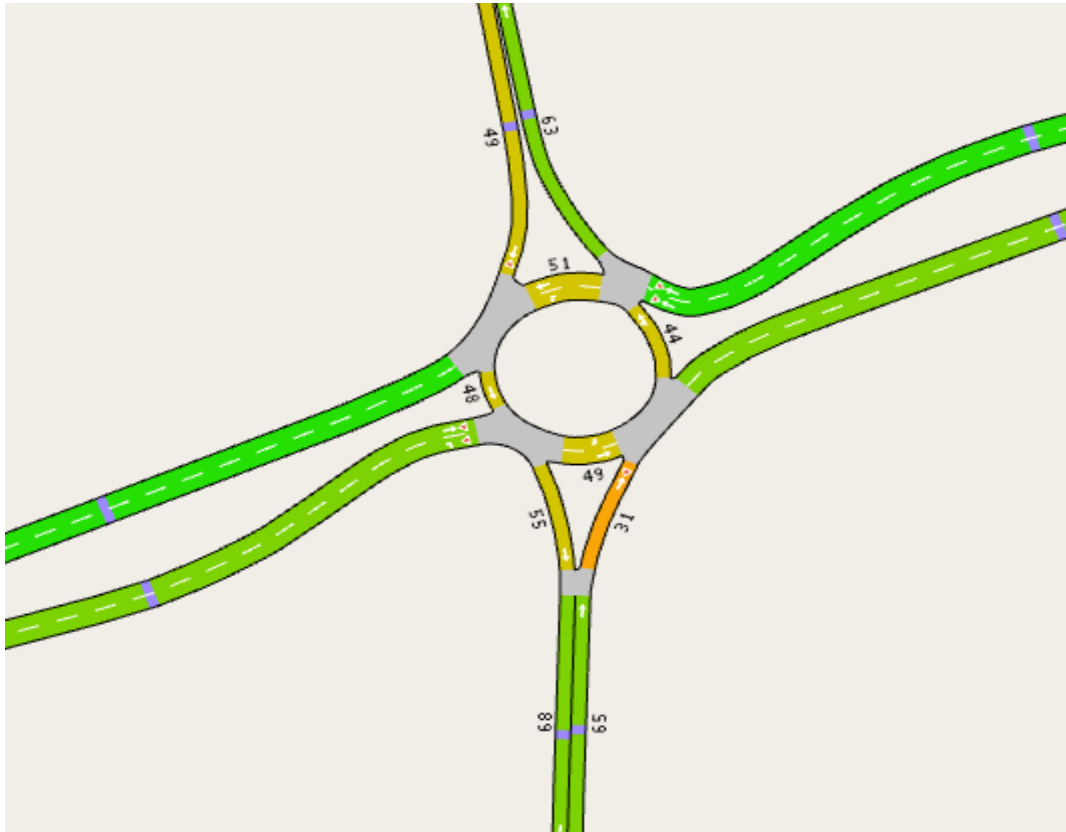
Εικόνα 4.13: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 2 (ολικό)

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο έτσι και σε αυτό, μεγαλύτερες ταχύτητες αναπτύσσονται στον κύριο άξονα της οδού. Στο σενάριο αυτό (0% B.O.) παρατηρείται ότι οι ταχύτητες είναι πολύ κοντά σε αυτές του σεναρίου της υφιστάμενης κατάστασης (100% B.O.) τόσο στον κύριο άξονα κίνησης όσο και στους δευτερεύοντες. Η μέγιστη ταχύτητα που υπάρχει για αυτό το σενάριο στο δίκτυο είναι τα 93 km/h ενώ η ελάχιστη 31 km/h.



Εικόνα 4.14: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 2 (Κόμβος Κ1)

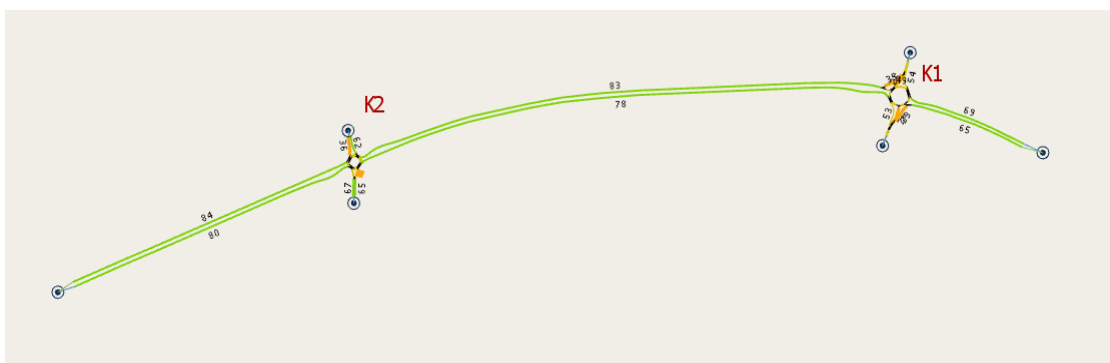
Κατά την κίνηση εντός του κόμβου K1 οι ταχύτητες κυμαίνονται από 44 έως 52 χιλιόμετρα ανά ώρα. Σε σύγκριση με το σενάριο 1 οι ταχύτητες που επικρατούν είναι πολύ λίγο μεγαλύτερες αλλά κατά βάση πάρα πολύ κοντινές.



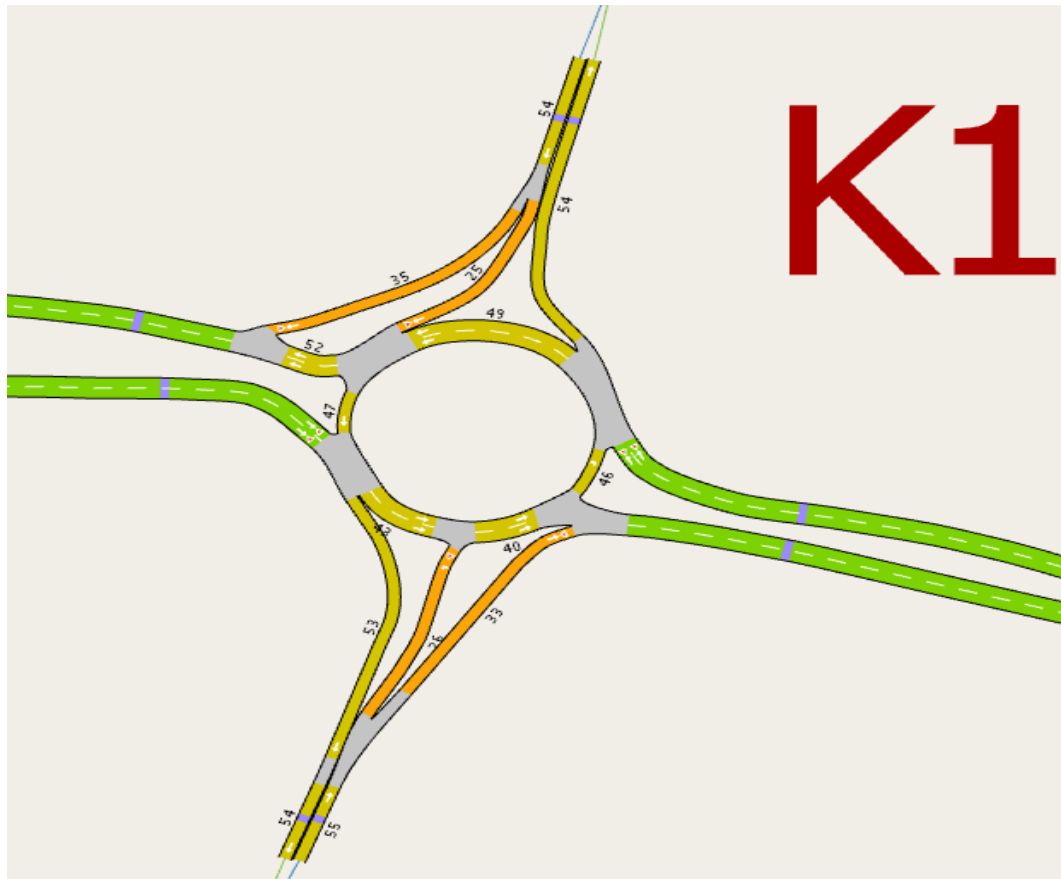
Εικόνα 4.15: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 2 (Κόμβος Κ2)

Η ίδια κατάσταση επικρατεί και στον Κόμβο 2 με τις ταχύτητες μέσα στον κόμβο να κυμαίνονται από 44 έως 51 χιλιόμετρα ανά ώρα.

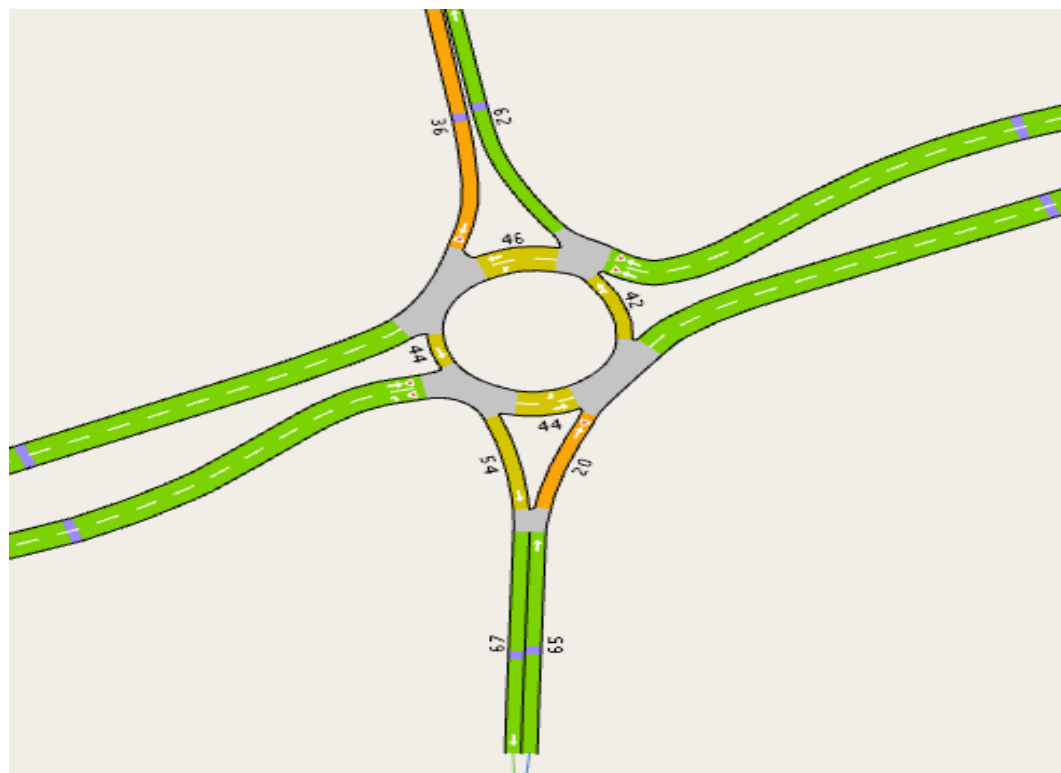
Σενάριο 3 (300% Β.Ο.) :



Εικόνα 4.16: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 3 (ολικό)



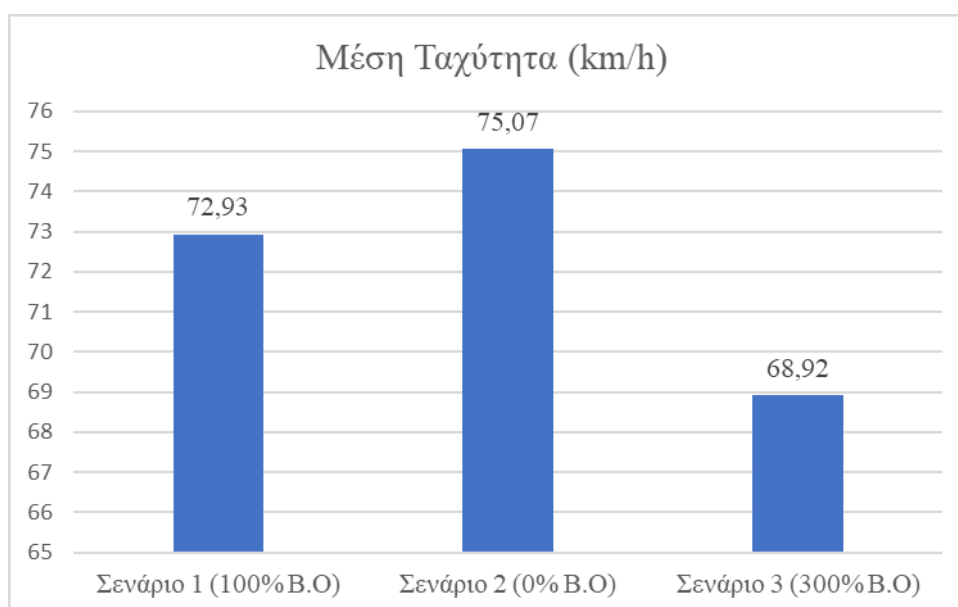
Εικόνα 4.17: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 3 (Κόμβος Κ1)



Εικόνα 4.18: Μέση Ταχύτητα Σενάριο 3 (Κόμβος Κ2)

Όπως και στα υπόλοιπα σενάρια έτσι και σε αυτό οι μεγαλύτερες ταχύτητες παρατηρούνται στον κύριο άξονα κυκλοφορίας και οι ελάχιστες στους κόμβους. Σε σύγκριση με τα άλλα δύο σενάρια οι ταχύτητες είναι μικρότερες κάτι που το επηρεάζει φυσικά η κατά πολύ αύξηση των βαρέων οχημάτων στην οδό (300% B.O.). Η μέγιστη ταχύτητα που εμφανίζεται σε αυτό το σενάριο είναι τα 84 km/h και εμφανίζεται στον κύριο άξονα της οδού, ενώ η ελάχιστη τα 20 km/h και παρατηρείται στον κόμβο Κ2. Μέσα στον κόμβο Κ1 οι ταχύτητες που επικρατούν είναι από 40 έως 49 χιλιόμετρα ανά ώρα ενώ στον κόμβο Κ2 από 42 έως 46 χιλιόμετρα ανά ώρα.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για την μέση ταχύτητα των βαρέων οχημάτων και σε μορφή διαγράμματος.



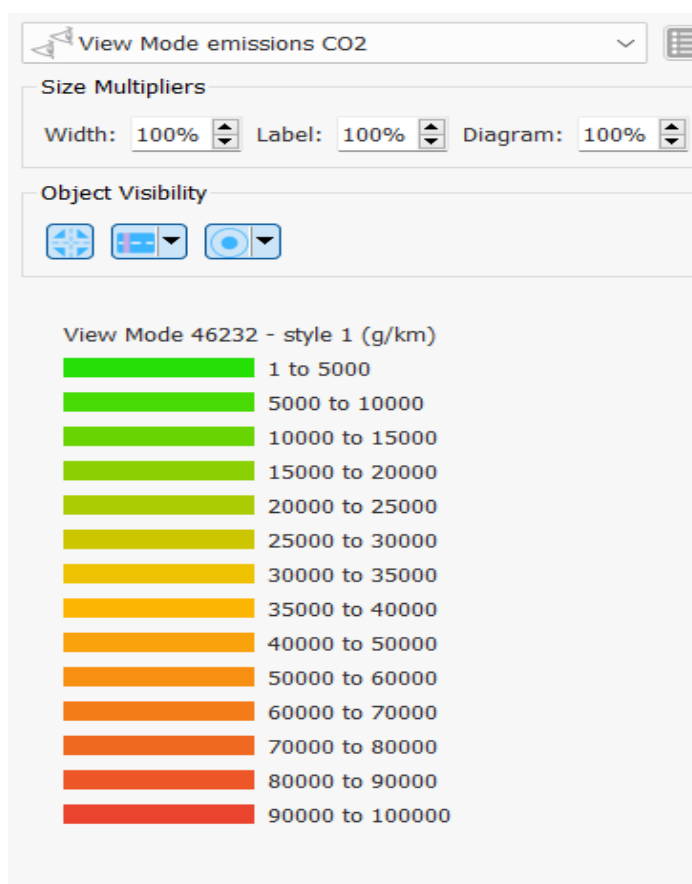
Γράφημα 4.6: Μέση Ταχύτητα ανά ποσοστό B.O.

Στο παραπάνω γράφημα παρουσιάζονται οι μεταβολές της μέσης ταχύτητας για το κάθε σενάριο βαρέων οχημάτων. Γίνεται αντιληπτό, ότι το σενάριο της υφιστάμενης κατάστασης (σενάριο 1) έχει μέση ταχύτητα πολύ κοντά στην τιμή του σεναρίου της παντελούς έλλειψης βαρέων οχημάτων (σενάριο 2), με τιμές 72,93 km/h και 75,07 km/h αντίστοιχα. Το σενάριο με ποσοστό 300% εμφανίζει αισθητά μικρότερη μέση ταχύτητα (68,92 km/h) σε σχέση και με τα άλλα δύο σενάρια. Επομένως, διαπιστώνεται ότι με την αύξηση του ποσοστού βαρέων οχημάτων στην οδό, πραγματοποιείται παράλληλα μείωση της μέσης ταχύτητας των οχημάτων στο δίκτυο.

4.1.3 Αποτελέσματα & Συγκριτική Αξιολόγηση Εκπομπών Διοξειδίου Του Άνθρακα (CO₂)

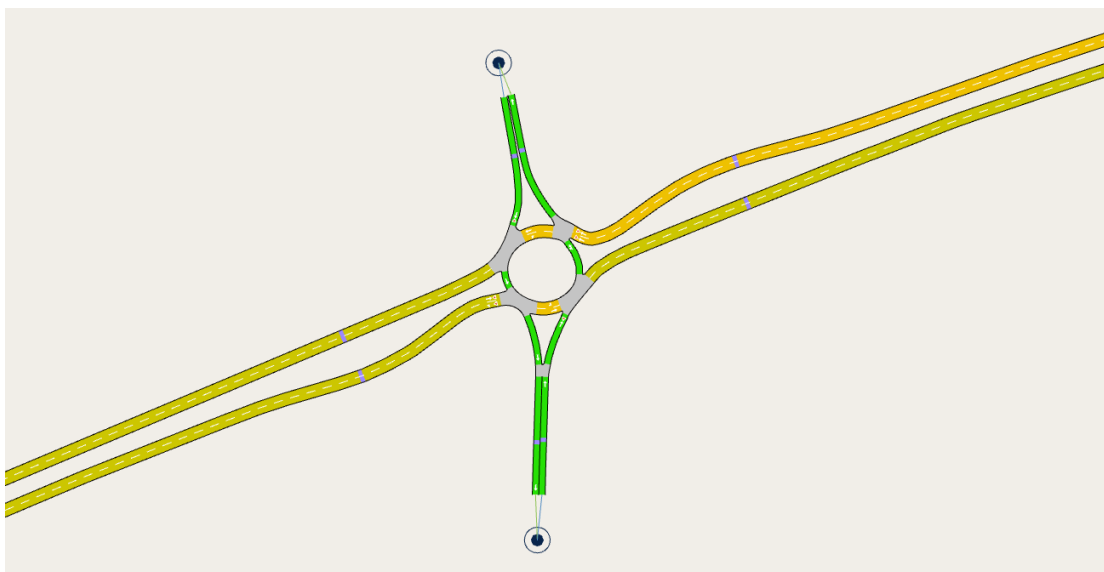
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα αποδεκτά όρια που χρησιμοποιήθηκαν για τα αποτελέσματα των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) για κάθε σενάριο. Πιο συγκεκριμένη η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα του κάθε οδικού τμήματος αντιστοιχεί σε ένα χρώμα :

- **Πράσινο χρώμα** : Αποδεκτά όρια εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).
- **Κίτρινο χρώμα** : Μερικώς αποδεκτά όρια εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).
- **Πορτοκαλί χρώμα** : Οριακά αποδεκτά όρια εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).
- **Κόκκινο χρώμα** : Μη αποδεκτά όρια εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

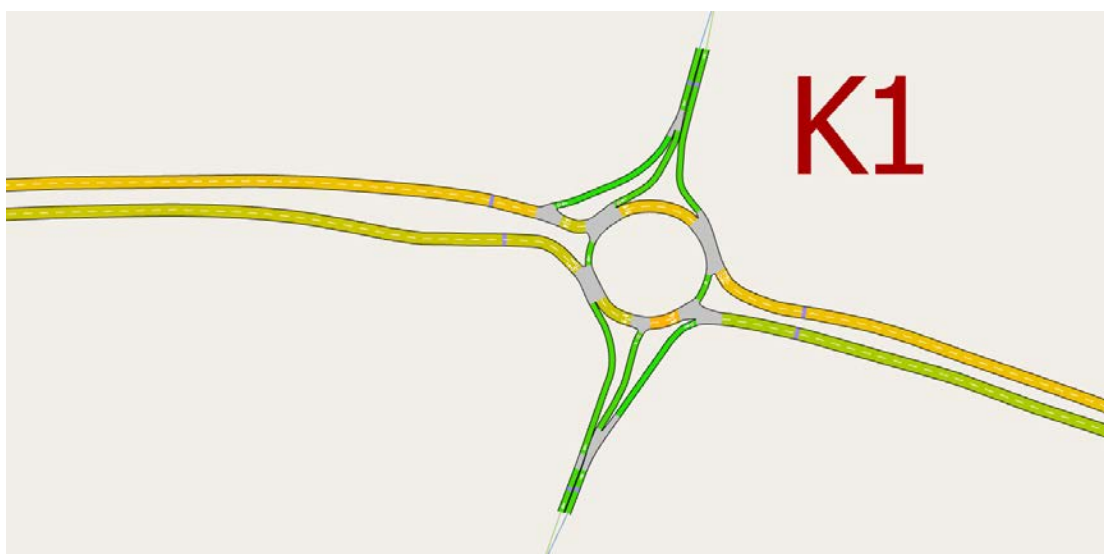


Εικόνα 4.19: Όρια εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO₂ (g/km)

Σενάριο 1 (100% Β.Ο.) :



Εικόνα 4.20: Εκπομπές CO₂ σενάριο 1 (Κόμβος K2)

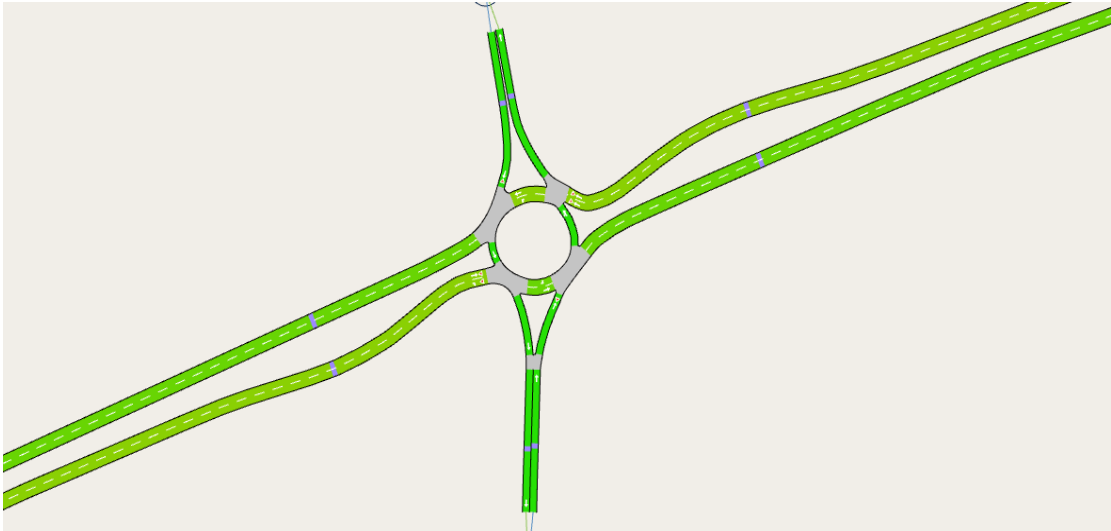


Εικόνα 4.21: Εκπομπές CO₂ σενάριο 1 (Κόμβος K1)

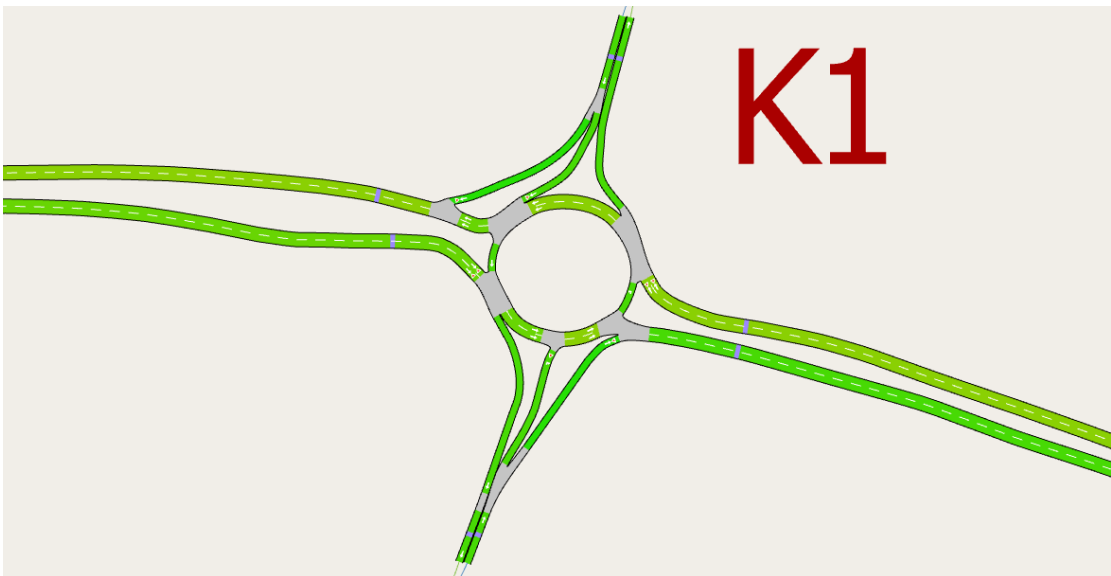
Από τις παραπάνω εικόνες γίνεται αντιληπτό ότι για το σενάριο πραγματικού φόρτου βαρέων οχημάτων (σενάριο 1) τόσο στην κύρια οδό όσο και στους κόμβους οι εκπομπές ρύπων διοξειδίου του άνθρακα είναι σχετικά υψηλές αλλά μέσα στα αποδεκτά όρια καθώς δεν ξεφεύγουν από το κίτρινο χρώμα. Πιο συγκεκριμένα σε όλο το τμήμα της οδού οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κυμαίνονται από 25000 έως 30000 και από 30000 έως 35000 γραμμάρια ανά χιλιόμετρο (g/km). Να σημειωθεί ότι τα τμήματα της οδού που απεικονίζονται με πράσινο χρώμα είναι διότι έχει απαγορευτεί η είσοδος και έξοδος των βαρέων οχημάτων

από και προς τις δευτερεύουσες οδούς, δηλαδή τα βαρέα οχήματα κινούνται μόνο στον κύριο άξονα της οδού.

Σενάριο 2 (0% Β.Ο.) :



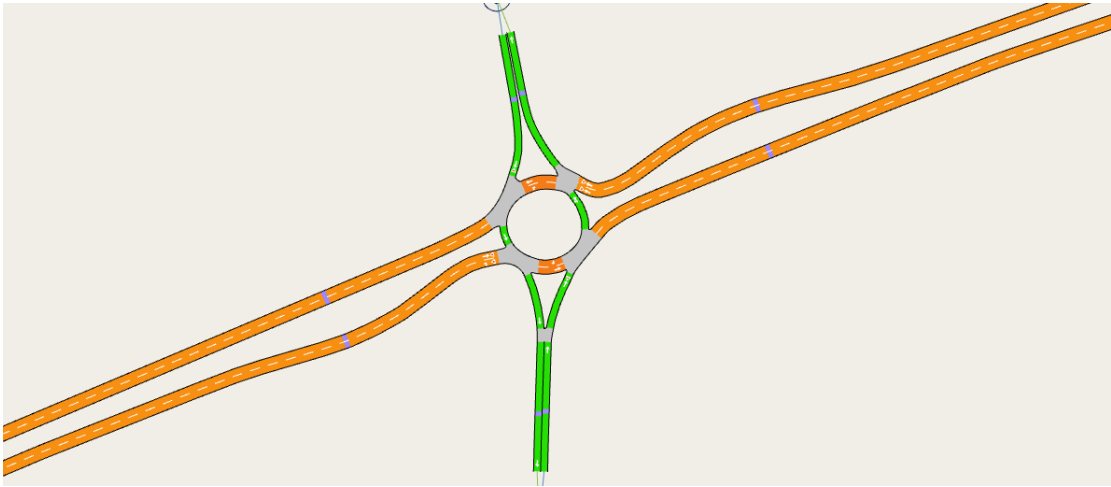
Εικόνα 4.22: Εκπομπές CO₂ σενάριο 2 (Κόμβος K2)



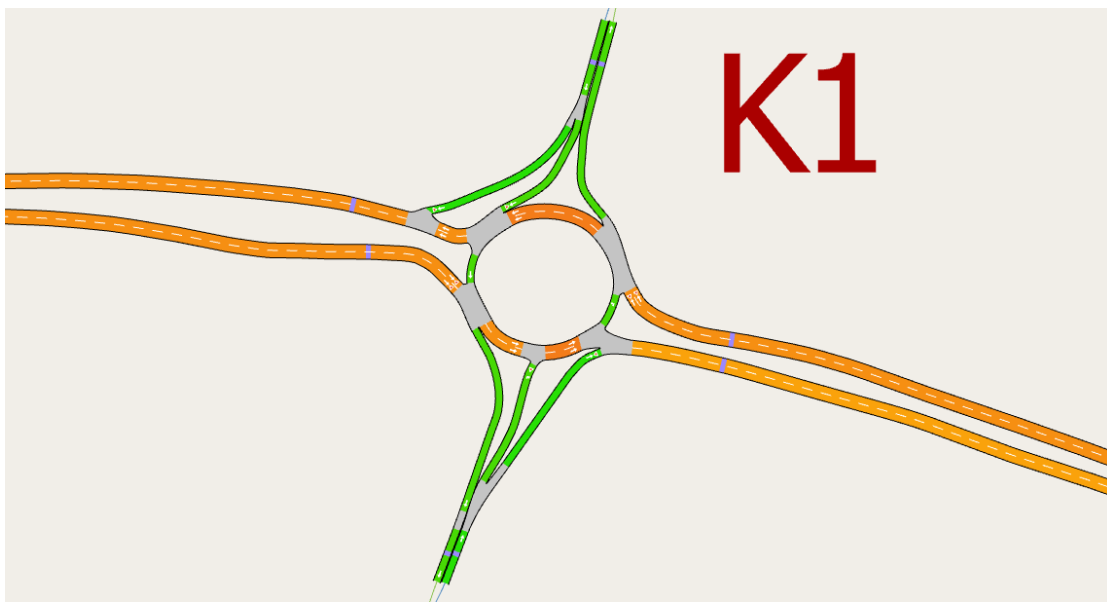
Εικόνα 4.23: Εκπομπές CO₂ σενάριο 2 (Κόμβος K1)

Παρατηρείται ότι στο σενάριο με την απουσία των βαρέων οχημάτων από την οδό, σε όλο το οδικό τμήμα κυριαρχεί το πράσινο χρώμα δηλαδή, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) είναι μέσα στα αποδεκτά όρια και παρουσιάζουν αρκετά χαμηλές τιμές CO₂. Συγκεκριμένα, οι τιμές των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κυμαίνονται από 15000 έως 20000 και 20000 έως 25000 γραμμάρια ανά χιλιόμετρο. Διαπιστώνεται έτσι, ότι η παντελής απουσία βαρέων οχημάτων από το οδικό δίκτυο της Κατερίνης μειώνει αισθητά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Σενάριο 3 (300% Β.Ο.) :



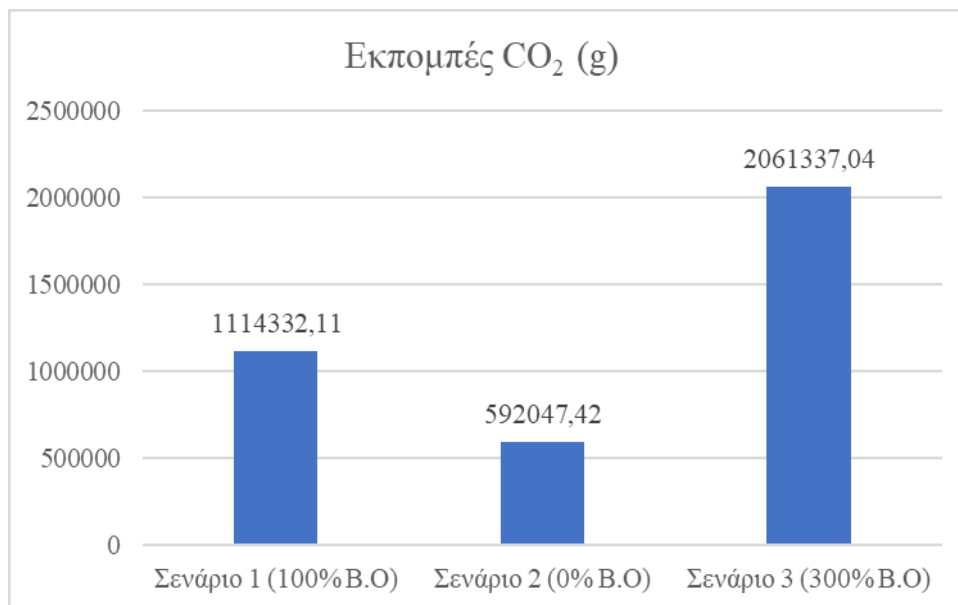
Εικόνα 4.24: Εκπομπές CO₂ σενάριο 3 (Κόμβος K2)



Εικόνα 4.25: Εκπομπές CO₂ σενάριο 3 (Κόμβος K1)

Είναι φανερό από τις παραπάνω εικόνες, ότι στο σενάριο 3 με ποσοστό βαρέων οχημάτων στο 300%, σε ολόκληρη την οδό επικρατεί το πορτοκαλί χρώμα κάτι που σημαίνει ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για αυτό το σενάριο είναι οριακά μέσα στα αποδεκτά όρια και είναι αρκετά υψηλές. Σε σχέση με τα άλλα σενάρια παρατηρούνται ότι οι μεγαλύτερες τιμές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα βρίσκονται σε αυτό το σενάριο. Πιο συγκεκριμένα κυμαίνονται από 40000 έως 50000 και 50000 έως 60000 γραμμάρια αν χιλιόμετρο (g/km). Οπότε, γίνεται αντιληπτό ότι με την κατά πολύ αύξηση των βαρέων οχημάτων στην οδό γίνεται και ταυτόχρονη αύξηση των ρύπων διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον.

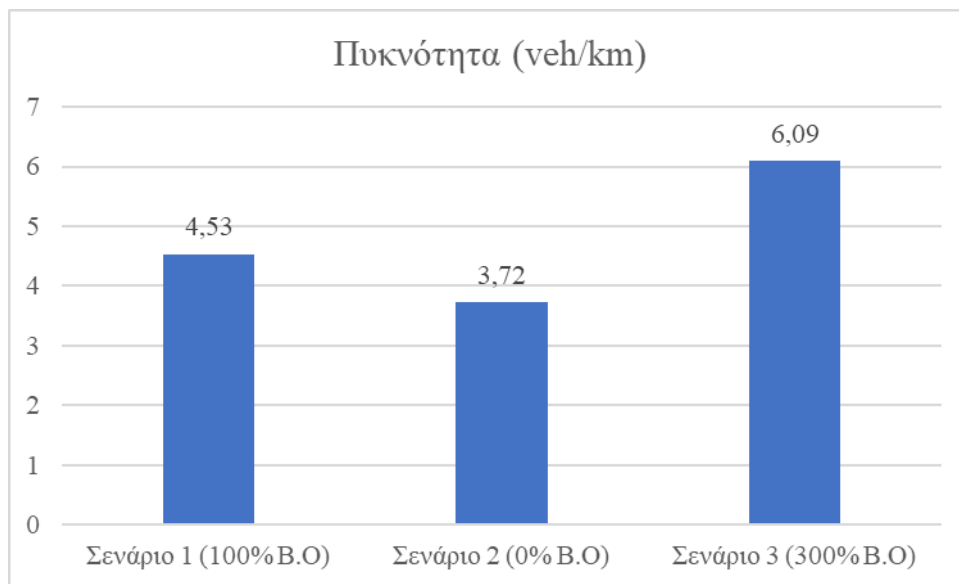
Ακολουθούν τα αποτελέσματα για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) των βαρέων οχημάτων και σε μορφή διαγράμματος.



Γράφημα 4.7: Μέση τιμή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ανά ποσοστό Β.Ο.

Στο Γράφημα 4.3 παρουσιάζονται οι μεταβολές της μέσης τιμής των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) για κάθε ένα από τα σενάρια των ποσοστών βαρέων οχημάτων. Τη μικρότερη τιμή εκπομπών CO₂ (592047,42g) φαίνεται να έχει το σενάριο με το ποσοστό 0% βαρέων οχημάτων στην οδό. Το σενάριο 1 (100% Β.Ο.) έχει σχεδόν διπλάσια τιμή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (1114332,11g) σε σχέση με το σενάριο της παντελώς έλλειψης βαρέων οχημάτων. Επιπλέον, το σενάριο 3 το οποίο έχει και το μεγαλύτερο ποσοστό βαρέων οχημάτων παρουσιάζει σχεδόν διπλάσια τιμή εκπομπών CO₂ (2061337,04g) σε σύγκριση με το σενάριο 1 και τρεισήμισι φορές μεγαλύτερη τιμή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από το σενάριο με την παντελή έλλειψη βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο. Οπότε, διαπιστώνεται ότι με την αύξηση των εμπορικών οχημάτων στην οδό μελέτης πραγματοποιείται παράλληλη αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στο οδικό τμήμα.

4.1.4 Αποτελέσματα & Συγκριτική Αξιολόγηση Πυκνότητας (Density)



Γράφημα 4.8: Μέση τιμή πυκνότητας ανά ποσοστό B.O.

Στο Γράφημα 4.4 απεικονίζονται οι μεταβολές της μέσης πυκνότητας για κάθε ένα από τα σενάρια για τα βαρέα οχήματα. Παρατηρείται ότι το σενάριο με ποσοστό 300% έχει την μεγαλύτερη τιμή πυκνότητας (6,09 veh/km) σε σχέση με τα άλλα δύο. Το σενάριο 1 και το σενάριο 2 έχουν πολύ μικρή διαφορά πυκνότητας μεταξύ τους 4,53 (οχήματα ανά χιλιόμετρο) και 3,72 (οχήματα ανά χιλιόμετρο) αντίστοιχα. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι με την αύξηση του ποσοστού των βαρέων οχημάτων στην οδό γίνεται ταυτόχρονη αύξηση και της πυκνότητας των οχημάτων.

4.1.5 Λόγος Όγκου προς Χωρητικότητα (V/C ratio)

Ο λόγος V/C, ή λόγος Όγκου προς Χωρητικότητα, είναι μια μέτρηση της μηχανικής μεταφορών που συγκρίνει τον πραγματικό όγκο κυκλοφορίας σε έναν δρόμο ή μια διασταύρωση με τη θεωρητική μέγιστη χωρητικότητά του. Ένας υψηλός λόγος όγκου προς χωρητικότητα (V/C) υποδηλώνει μεγαλύτερη ζήτηση σε σχέση με την προσφορά, με τιμές 1,0 ή μεγαλύτερες να σηματοδοτούν συμφόρηση.

Αυτός ο λόγος είναι ένα βασικό στοιχείο για τον προσδιορισμό του Επιπέδου Εξυπηρέτησης (LOS) ενός δρόμου, μια τυποποιημένη κλίμακα που κυμαίνεται από "Α" (ελεύθερη ροή) έως "F" (σοβαρή συμφόρηση).

Πίνακας 4.3: Προσδιορισμός LOS με βάση το λόγο V/C

LoS Class	Traffic State and Condition	V/C Ratio
A	Free flow	0–0.60
B	Stable flow with unaffected speed	0.61–0.70
C	Stable flow but speed is affected	0.71–0.80
D	High-density but the stable flow	0.81–0.90
E	Traffic volume near or at capacity level with low speed	0.91–1.00
F	Breakdown flow	>1.00

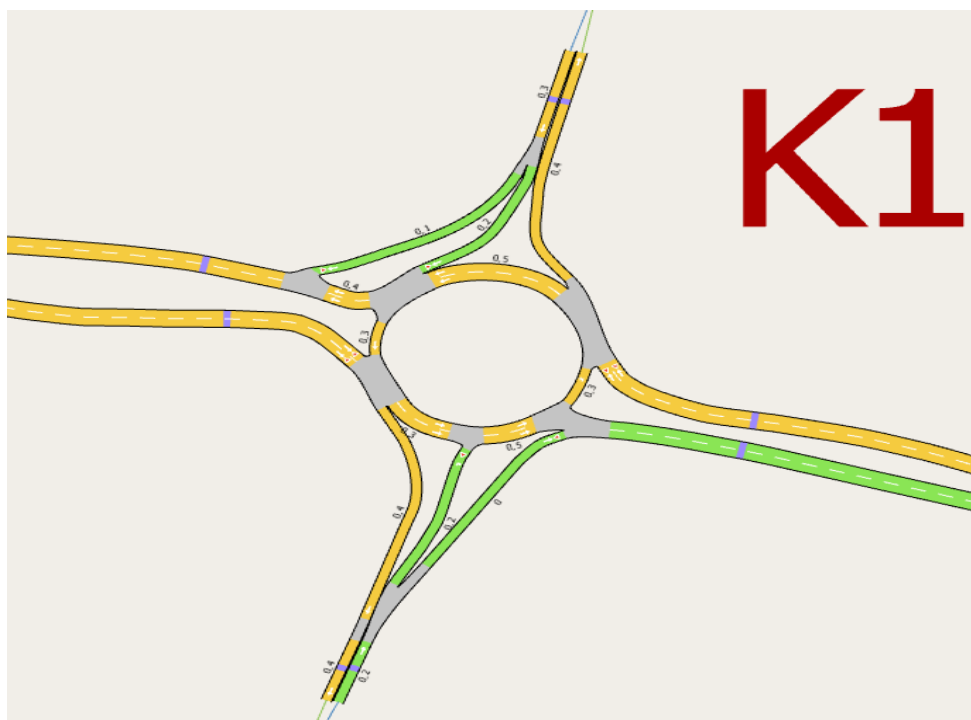
Στις εικόνες που θα ακολουθήσουν για κάθε ένα σενάριο ξεχωριστά, απεικονίζεται η κυκλοφοριακή επιβάρυνση για κάθε οδικό τμήμα του περιφερειακού της Κατερίνης. Πιο συγκεκριμένα, η κυκλοφοριακή επιβάρυνση αντιστοιχεί σε ένα χρώμα :

- **Πράσινο χρώμα** : Χαμηλή κυκλοφοριακή επιβάρυνση, μικρός λόγος φόρτου προς κυκλοφοριακή ικανότητα ανά οδικό τμήμα (0-0,25).
- **Κίτρινο χρώμα** : Χαμηλή προς μέση κυκλοφοριακή επιβάρυνση, μέσος λόγος φόρτου προς κυκλοφοριακή ικανότητα ανά οδικό τμήμα (0,25-0,5).
- **Πορτοκαλί χρώμα** : Μέση προς σχετικά υψηλή κυκλοφοριακή επιβάρυνση, μέσος προς σχετικά υψηλός λόγος φόρτου προς κυκλοφοριακή ικανότητα ανά οδικό τμήμα (0,5-0,75).
- **Κόκκινο χρώμα** : Υψηλή κυκλοφοριακή επιβάρυνση, υψηλός λόγος φόρτου προς κυκλοφοριακή ικανότητα ανά οδικό τμήμα και κοντά πιθανώς στην κυκλοφοριακή συμφόρηση (0,75-1).

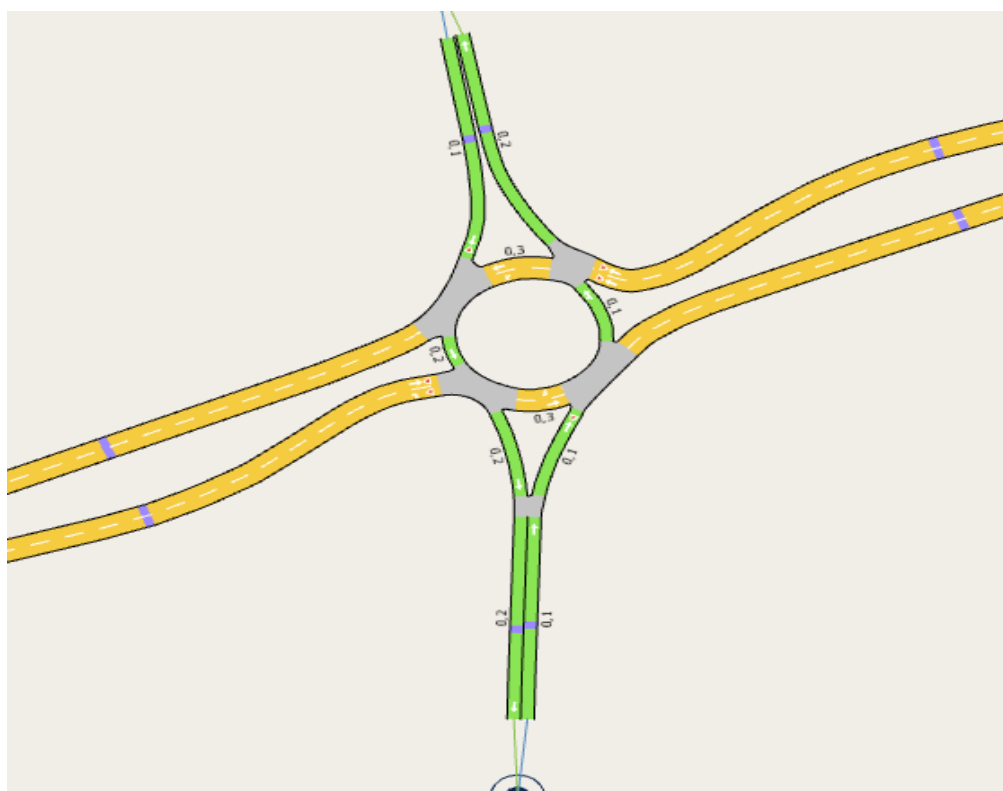
Σενάριο 1 (100% Β.Ο.) :



Εικόνα 4.26: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 1 (ολικό δίκτυο)



Εικόνα 4.27: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 1 (κόμβος K1)



Εικόνα 4.28: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 1 (κόμβος K2)

Σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες γίνεται αντιληπτό, ότι για το σενάριο πραγματικού φόρτου βαρέων οχημάτων η κυκλοφοριακή επιβάρυνση κυμαίνεται σε χαμηλό και χαμηλό προς μεσαίο επίπεδο για όλο το οδικό τμήμα. Πιο συγκεκριμένα, κατά την κίνηση μέσα στον κόμβο K1 παρατηρείται ότι η επιβάρυνση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τον κόμβο K2 καθώς ο λόγος φόρτου προς κυκλοφοριακή ικανότητα κυμαίνεται από 0,3-0,5 και από 0,1-0,3 αντίστοιχα. Στον κόμβο K2 στις δευτερεύουσες οδούς το χρώμα που επικρατεί παντού είναι το πράσινο δηλαδή, χαμηλή κυκλοφοριακή επιβάρυνση ενώ, στις δευτερεύουσες οδούς του κόμβου K1 επικρατούν τόσο το πράσινο όσο και το κίτρινο χρώμα δηλαδή, τόσο χαμηλή όσο και χαμηλή προς μέση, κυκλοφοριακή επιβάρυνση.

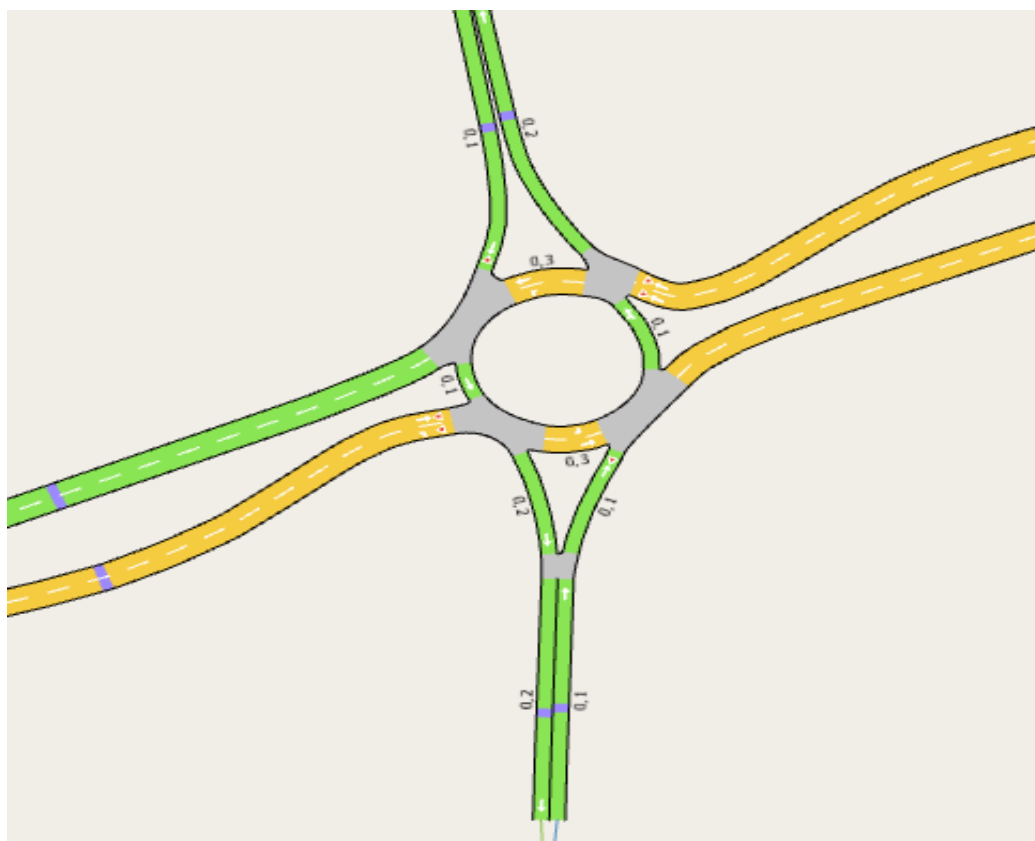
Σενάριο 2 (0% Β.Ο.) :



Εικόνα 4.29: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 2 (ολικό δίκτυο)



Εικόνα 4.30: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 2 (κόμβος K1)



Εικόνα 4.31: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 2 (κόμβος K2)

Όπως διαπιστώνεται και από τις παραπάνω εικόνες, και στο σενάριο της παντελούς έλλειψης βαρέων οχημάτων από το οδικό δίκτυο, η κυκλοφοριακή επιβάρυνση κυμαίνεται σε χαμηλό και χαμηλό προς μεσαίο επίπεδο, σε όλο το οδικό δίκτυο. Σε σύγκριση με το σενάριο της υφιστάμενης κατάστασης (σενάριο 1) παρατηρείται ότι η κυκλοφοριακή επιβάρυνση παραμένει σχεδόν ίδια με πολύ μικρές διαφορές. Στον κόμβο K1 οι τιμές της κυκλοφοριακής επιβάρυνσης είναι από 0,3 έως 0,4 ενώ στον κόμβο K2 από 0,1 έως 0,3. Επίσης, τόσο στους δύο κυκλικούς κόμβους όσο και στις δευτερεύουσες οδούς τους επικρατεί το πράσινο και το κίτρινο χρώμα δηλαδή, χαμηλή και χαμηλή προς υψηλή επιβάρυνση.

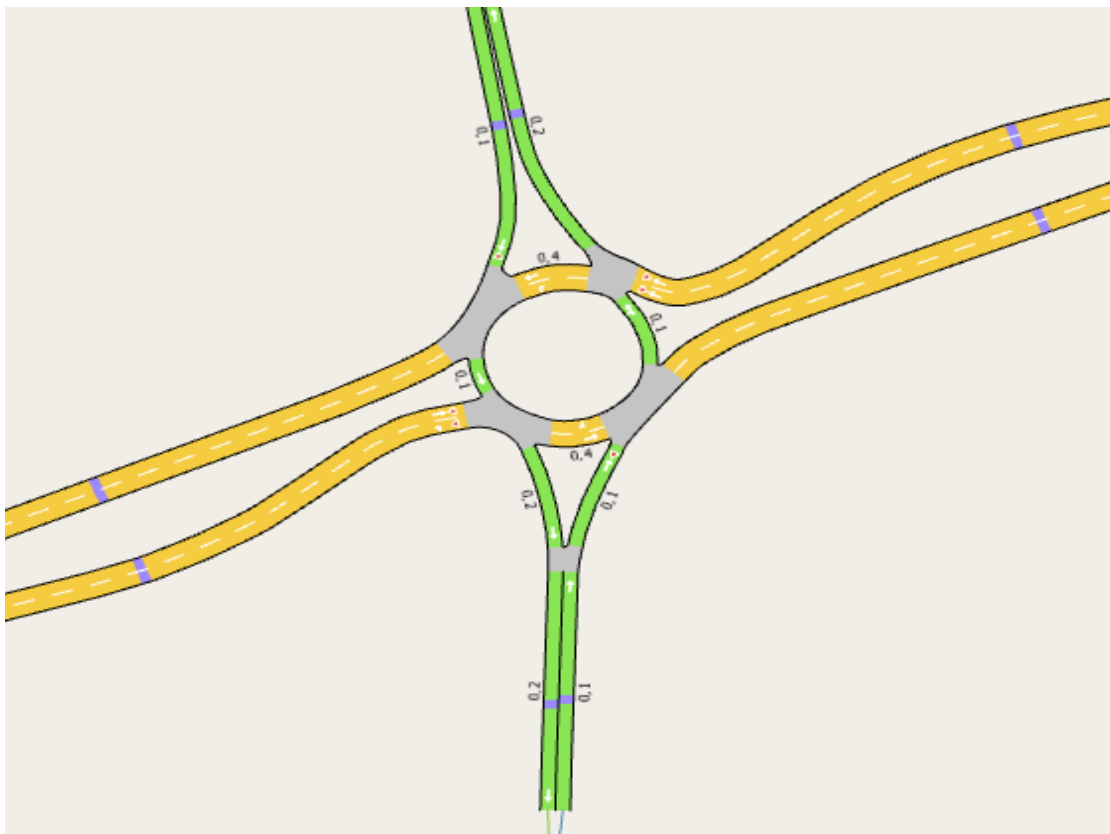
Σενάριο 3 (300% Β.Ο.) :



Εικόνα 4.32: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 3 (ολικό δίκτυο)



Εικόνα 4.33: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 3 (κόμβος K1)



Εικόνα 4.34: Κυκλοφοριακή επιβάρυνση σενάριο 3 (κόμβος K2)

Σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες παρατηρείται, ότι στο σενάριο με το μεγαλύτερο πλήθος βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο (300%) επικρατούν τρία χρώματα, το πράσινο, το κίτρινο και το πορτοκαλί κάτι που σημαίνει χαμηλή, χαμηλή προς μέση και μέση προς σχετική υψηλή κυκλοφοριακή επιβάρυνση αντίστοιχα. Σε σύγκριση με τα άλλα δύο σενάρια, το σενάριο αυτό παρουσιάζει την μεγαλύτερη κυκλοφοριακή επιβάρυνση. Κατά την κίνηση μέσα στον κόμβο Κ1 οι τιμές της κυμαίνονται από 0,3 έως 0,6 ενώ για τον κόμβο Κ2 από 0,1 έως 0,4. Επομένως, διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνεται το πλήθος των βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο τόσο αυξάνεται και η κυκλοφοριακή επιβάρυνση.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα για το κάθε ένα σενάριο και την κάθε μεταβλητή που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση τους.

Πίνακας 4.4: Συγκεντρωτικός Πίνακας Τελικών Αποτελεσμάτων

Μεταβλητές-Σενάρια	Σενάριο 1 (100% Β.Ο.)	Σενάριο 2 (0% Β.Ο.)	Σενάριο 3 (300% Β.Ο.)	Μονάδες Μέτρησης
Μέση Ταχύτητα (Speed)	72,93	75,07	68,92	km/h
Μέση Χρονική Καθυστέρηση (Delay Time)	9,05	7,4	12,9	sec/km
Πυκνότητα (Density)	4,53	3,72	6,09	veh/km
Εκπομπές CO2	1114332,11	592047,42	2061337,04	g

Όπως διακρίνεται από τον συγκεντρωτικό πίνακα αποτελεσμάτων, για όλες τις μεταβλητές εκτός της μέσης ταχύτητας, όσο αυξάνεται το πλήθος των βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο τόσο αυξάνεται η μέση χρονική καθυστέρηση, η πυκνότητα και η εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Αντίθετα, ως αναφορά την μέση ταχύτητα όσο αυξάνεται το ποσοστό των βαρέων οχημάτων στον περιφερειακό της Κατερίνης τόσο μειώνεται η μέση ταχύτητα των οχημάτων.

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα & Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στην ανάλυση των κυκλοφοριακών και περιβαλλοντικών συνθηκών σε αστικούς κόμβους και πιο συγκεκριμένα στην επίδραση των βαρέων οχημάτων σε αυτούς. Η μελέτη βασίστηκε σε ένα τμήμα της περιφερειακής οδού της Κατερίνης, της οποίας τα δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου ήταν γνωστά από προϋπάρχουσα μελέτη στην ίδια περιοχή και τροποποιήθηκαν καταλλήλως σύμφωνα με τις ανάγκες της εργασίας.

Για την ανάλυση και την διερεύνηση τόσο των κυκλοφοριακών όσο και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο του περιφερειακού της Κατερίνης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης Aimsun Next.

Η ανάλυση και διερεύνηση των επιπτώσεων αυτών, επιτεύχθηκε αρχικά με την δημιουργία Πινάκων Προέλευσης Προορισμού για τους κυκλοφοριακούς φόρτους των οχημάτων, οι οποίοι στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της κυκλοφοριακής ζήτησης (Traffic Demand) για κάθε ένα σενάριο κυκλοφοριακού φόρτου για τα βαρέα οχήματα.

Για τον εντοπισμό των στατιστικών στοιχείων επιρροής των βαρέων οχημάτων στην εξεταζόμενη περιοχή μελέτης διεξήχθη μικροσκοπική προσομοίωση. Αυτή, απαιτούσε τη δημιουργία δυναμικών σεναρίων για κάθε ένα από τα σενάρια κυκλοφοριακού φόρτου βαρέων οχημάτων. Μέσω του μέσου όρου αποτελεσμάτων από τις αναπαραστάσεις των δυναμικών σεναρίων και τη βοήθεια ορισμένων μεταβλητών, πραγματοποιήθηκε λεπτομερής ανάλυση και αξιολόγηση των τελικών αποτελεσμάτων για την επίδραση των βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο.

Παρακάτω ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων ο οποίος προέκυψε από την ανάλυση των τριών σεναρίων προσομοίωσης.

Πίνακας 5.1: Τελικός Πίνακας Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

Μεταβλητές-Σενάρια	Σενάριο 1 (100% B.O.)	Σενάριο 2 (0% B.O.)	Σενάριο 3 (300% B.O.)	Μονάδες Μέτρησης
Μέση Ταχύτητα (Speed)	72,93	75,07	68,92	km/h
Μέση Χρονική Καθυστέρηση (Delay Time)	9,05	7,4	12,9	sec/km
Πυκνότητα (Density)	4,53	3,72	6,09	veh/km
Εκπομπές CO2	1114332,11	592047,42	2061337,04	g

Από τον παραπάνω πίνακα αποτελεσμάτων γίνεται αντιληπτό, ότι τόσο οι κυκλοφοριακές όσο και οι περιβαλλοντικές συνθήκες εμφανίζουν αρκετές αλλαγές ανάλογα με τη σύνθεση της κυκλοφορίας των οχημάτων. Επίσης, παρατηρείται ότι οι μεταβλητές και τα σενάρια κυκλοφοριακού φόρτου βαρέων οχημάτων έχουν σχέση απόλυτης εξάρτησης.

Ειδικότερα, με βάση τις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των αποτελεσμάτων και σε σύγκριση με το σενάριο ένα (1) δηλαδή το σενάριο πραγματικού φόρτου βαρέων οχημάτων, διαπιστώνεται :

1) Σενάριο 2 (0% Βαρέα Οχήματα)

- Η μέση ταχύτητα παρουσιάζει αύξηση κατά 2,9% κάτι που καταδεικνύει, ότι η έλλειψη βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο δεν επηρέασε σχεδόν καθόλου την ταχύτητα των οχημάτων.
- Η μέση χρονική καθυστέρηση μειώθηκε κατά 18,2%, γεγονός που υποδηλώνει βελτίωση των συνθηκών κυκλοφορίας και μεγαλύτερη ομαλότητα στη ροή της κίνησης στο οδικό δίκτυο της Κατερίνης.
- Η πυκνότητα των οχημάτων μειώθηκε κατά 17,8%, εξέλιξη που οδηγεί στη βελτίωση της κυκλοφοριακής ροής των οχημάτων στο οδικό τμήμα μελέτης.
- Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) μειώθηκαν σχεδόν στη μέση και πιο συγκεκριμένα κατά 47% κάτι που συνεπάγεται αποφόρτιση του οδικού δικτύου της Κατερίνης και παράλληλα και του οικοσυστήματος από ατμοσφαιρικούς ρύπους.

2) Σενάριο 3 (300% Βαρέα Οχήματα)

- Η μέση ταχύτητα μειώνεται αισθητά και πιο συγκεκριμένα κατά 5,5%, γεγονός που συνδέεται άμεσα με την αυξημένη παρουσία βαρέων οχημάτων, τα οποία επηρεάζουν δυσμενώς τις συνθήκες ροής στο εξεταζόμενο τμήμα του οδικού δικτύου της Κατερίνης.
- Η μέση χρονική καθυστέρηση καταγράφει αύξηση κατά 42,5%, εξέλιξη η οποία τεκμηριώνει την επιδείνωση των συνθηκών κυκλοφοριακής ροής και την ενίσχυση της συμφόρησης στο εξεταζόμενο οδικό τμήμα.
- Η πυκνότητα των οχημάτων αυξάνεται κατά 34,4%, γεγονός που συνεπάγεται επιδείνωση των συνθηκών κυκλοφοριακής ροής και μείωση του επιπέδου εξυπηρέτησης στο υπό μελέτη οδικό τμήμα.
- Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) παρουσιάζουν σημαντική αύξηση σε σχέση με το σενάριο υφιστάμενης κατάστασης και πιο συγκεκριμένα κατά 85%, κάτι που οδηγεί στην επιδείνωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και στην ενίσχυση των συνθηκών ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιφερειακή οδό της Κατερίνης.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί αφετηρία για περαιτέρω μελλοντική έρευνα, και για τον λόγο αυτό ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η διερεύνηση των προτεινόμενων κατευθύνσεων που ακολουθούν :

- Η ανάλυση με βάση τις ίδιες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν, επεκτεινόμενη όμως στο σύνολο της περιφερειακής οδού της Κατερίνης, με σκοπό να δημιουργηθεί μια πιο ολοκληρωμένη και αξιόπιστη εικόνα.
- Η εφαρμογή μέτρων όπως ο χρονικός περιορισμός της διέλευσης των βαρέων οχημάτων έτσι ώστε να μειωθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση και να βελτιωθεί η ροή της κυκλοφορίας.
- Η ανάλυση των περιπτώσεων ταυτόχρονης αύξησης ή μείωσης του πλήθους των οχημάτων κατηγορίας Ι.Χ. και βαρέων οχημάτων καθώς και η επιρροή που ασκούν στο οδικό δίκτυο που μελετάται.
- Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση εναλλακτικών διαδρομών για τη διέλευση των βαρέων οχημάτων, με στόχο τη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης στο οδικό δίκτυο και κατά επέκταση την ενίσχυση της οδικής ασφάλειας.

Κεφάλαιο 6 Βιβλιογραφία

Aimsun Next Users Manual (2024). Ανάκτηση από [Aimsun Next Users Manual](#)

Aimsun Youtube Tutorial by Dimitris triantafyllos (2020, November). Ανάκτηση από [Aimsun Next Tutorials - Introduction](#)

Appendix K. Level of Service Standard and Measurement, What Moves You (2020, June)

Erbach G & Members' Research Service (2023, May), CO2 emission standards for new cars and vans by European Parliamentary Research Service

European Commission, Katerini ring road: Reducing traffic and saving lives (December 2014).

Jaume Barcelo, & et. al. (2005), Dynamic network simulation with AIMSUN. Operations Research/ Computer Science Interfaces Series.

Sussman J (2003), Εισαγωγή στα Συστήματα Μεταφορών. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλη

Ypodomes.com, Παραδόθηκε στην κυκλοφορία η νέα Περιφερειακή Οδός της Κατερίνης (22/03/2024). Ανάκτηση από [Παραδόθηκε στην κυκλοφορία η Περιφερειακή Οδός Κατερίνης](#)

Αντωνίου Κ. & Σπυροπούλου Ι. (2015), Αρχές Κυκλοφοριακής Τεχνικής και Προσομοίωσης. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις

Δημήτριος Χ, Καραγιάννης, δικηγόρος (Θεσσαλονίκη-Αθήνα), Αστικό Δίκαιο, Διαστάσεις βάρη και έλξη οχημάτων

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Μεταφορές και Πράσινη Συμφωνία (Απρίλιος 2021). Ανάκτηση από [Μεταφορές και Πράσινη Συμφωνία - Ευρωπαϊκή Επιτροπή](#)

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Υλοποίηση της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (Ιούλιος 2021). Ανάκτηση από [Υλοποίηση της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας - Ευρωπαϊκή Επιτροπή](#)

Ζούγκλα, «Γερασμένος» ο στόλος των βαρέων οχημάτων στην Ελλάδα (03/04/2019)

Κασσίμη Α. (26/09/2018), Αυξάνεται η ηλικία των βαρέων οχημάτων στην Ελλάδα, Η Καθημερινή

Λιάλος Γ. (14/09/2022), Περιβάλλον: «Ενοχα» τα βαρέα φορτηγά, Η Καθημερινή

Σταθόπουλος Α. & Καρλαύτης Μ. (2016), Σχεδιασμός Μεταφορικών Συστημάτων. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου

Φραντζεσκάκης Ι. Μ., Γκόλιας Ι. Κ. & Πιτσιάβα-Λατινοπούλου (2009), Κυκλοφοριακή Τεχνική. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου