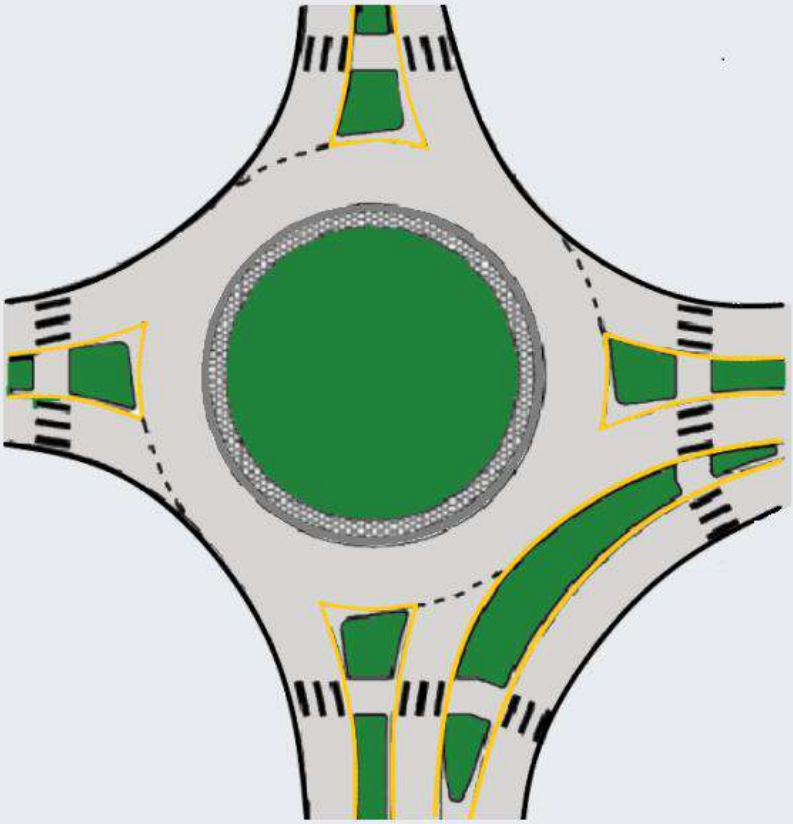
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Διερεύνηση της Αναγκαιότητας Χωροθέτησης Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας Ελεύθερης Ροής σε «Τυπικούς» Κυκλικούς Κόμβους



Δημητριάδου Ανδρονίκη

Επιβλέπων: Στέργιος Μαυρομάτης, Επικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Οκτώβριος 2022, ΑΘΗΝΑ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διερεύνηση της Αναγκαιότητας Χωροθέτησης Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας Ελεύθερης Ροής σε «Τυπικούς» Κυκλικούς Κόμβους

ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΟΥ ΑΝΔΡΟΝΙΚΗ

Επιβλέπων: Στέργιος Μαυρομάτης, Επικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Οκτώβριος 2022, ΑΘΗΝΑ

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPT. OF TRANSPORTATION PLANNING AND ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

Necessity Analysis of the Free-Flow Right-Turn Bypass Lane at Single-Lane Roundabouts

DIMITRIADOU ANDRONIKI

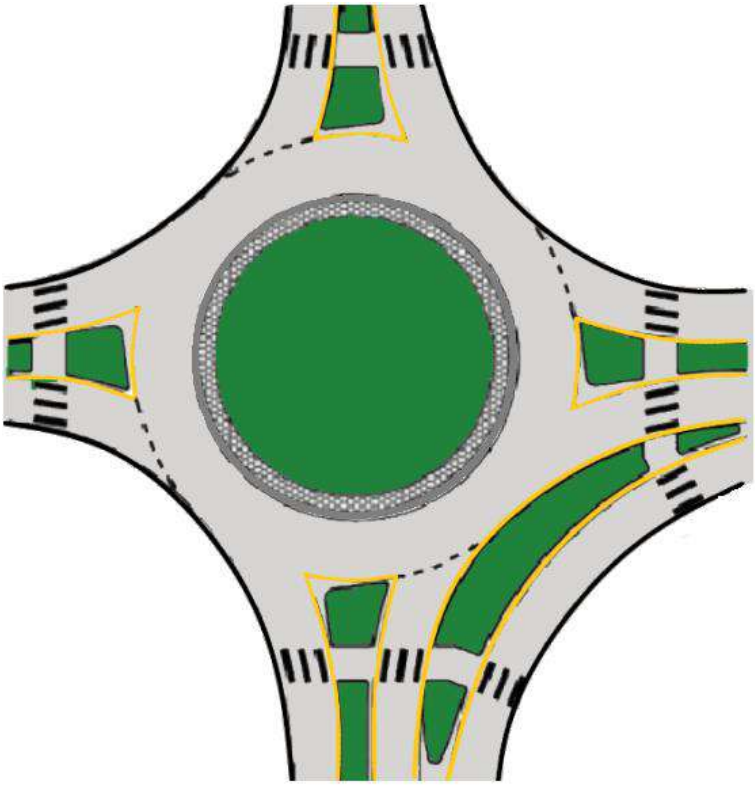
Supervisor: Stergios Mavromatis, A.Professor N.T.U.A.

October 2022, ATHENS

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Διερεύνηση της Αναγκαιότητας Χωροθέτησης Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας Ελεύθερης Ροής σε «Τυπικούς» Κυκλικούς Κόμβους



ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΟΥ ΑΝΔΡΟΝΙΚΗ

Επιβλέπων: Στέργιος Μαυρομάτης, Επικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Οκτώβριος 2022, ΑΘΗΝΑ

Copyright © Δημητριάδου Ανδρονίκη, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Dimitriadou Androniki, 2022

All Rights Reserved

All Rights Reserved Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing, and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization (L. 5343/1932, art. 202).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Στέργιο Μαυρομάτη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, την καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια εκπόνησής της, καθώς και την εξαιρετική επικοινωνία μας. Βρισκόταν πάντα εκεί, για να απαντήσει σε οποιαδήποτε απορία και να προσφέρει τις χρήσιμες γνώσεις του, συνεπώς οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για όλη του τη στήριξη.

Παράλληλα, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής: τον κ. Λοΐζο, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και τον κ. Γ. Γιαννή, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για τις γνώσεις που μου προσέφεραν σε όλη την ακαδημαϊκή μου πορεία στη σχολή.

Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω και τον κ. Βασίλειο Ματράγκο, Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, για τη συνεχή του βοήθεια, την επιμονή του να επιλυθεί οποιαδήποτε δυσκολία και γενικά για τις χρήσιμες και εύστοχες συμβουλές του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και όλους όσους ήταν κοντά μου σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

Δημητριάδου Ανδρονίκη

Περίληψη

Διερεύνηση της Αναγκαιότητας Χωροθέτησης Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας Ελεύθερης Ροής σε «Τυπικούς» Κυκλικούς Κόμβους

Δημητριάδου Ανδρονίκη

Επιβλέπων: Μαυρομάτης Στέργιος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Κύριος στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι **η διερεύνηση της αναγκαιότητας χωροθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής σε κλάδο τετρασκελών «τυπικών» κυκλικών κόμβων**. Για τη διερεύνηση αυτή δημιουργήθηκαν σενάρια σε υπολογιστικά φύλλα του **Microsoft Excel**, σε καθένα από τα οποία πραγματοποιούταν λειτουργική ανάλυση του εξεταζόμενου «τυπικού» κυκλικού κόμβου με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα βάσει των Αμερικάνικων Οδηγιών για τους κυκλικούς κόμβους **(NCHRP 2010)**. Βασικός στόχος ήταν να υπολογιστεί η διαφορά της συνολικής αναμενόμενης καθυστέρησής του πριν και μετά την τοποθέτηση παρακαμπτήριας λωρίδας **($\Delta d_{\text{κόμβου}}$)**, όπου με αυτό το μέγεθος εντοπιζόταν πρακτικά η επιρροή της στη συνολική απόδοση του κυκλικού κόμβου. Συνολικά, εξετάστηκαν **8.883 σενάρια**, καθώς μελετήθηκαν 47 διαφορετικές περιπτώσεις συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον κάθε κλάδο και 189 διαφορετικά ποσοστά κατανομής τους σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση για την κάθε περίπτωση (189x47). Ύστερα, συλλέγοντας τα 29 βασικότερα μεγέθη του κάθε σεναρίου, δηλαδή το $\Delta d_{\text{κόμβου}}$ του, τους τέσσερις συνολικούς εισερχόμενους φόρτους στον κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο, τα δώδεκα ποσοστά κατανομής τους στις τρεις επιμέρους κινήσεις και τους δώδεκα αντίστοιχους φόρτους από τα ποσοστά αυτά, προέκυψε η βάση δεδομένων της εργασίας, η οποία εισήχθη στο πρόγραμμα του **R-Studio**. Στο περιβάλλον του προγράμματος αυτού έγινε μία προσπάθεια μοντελοποίησης της εξεταζόμενης αναγκαιότητας με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης και την εκτέλεση γραμμικών μοντέλων. Από αυτά τα μοντέλα προέκυψε το στατιστικά και λειτουργικά βέλτιστο, μέσω του οποίου διερευνάται κατά πόσο η τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής σε κλάδο τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου συμβάλλει στη βελτίωση της αναμενόμενης καθυστέρησής του και γενικότερα στη συνολική του απόδοση. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας απλά τους υφιστάμενους ή τους μελλοντικούς επιθυμητούς εξυπηρετούμενους φόρτους του κόμβου στο μοντέλο.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ: Διερεύνηση, Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα Ελεύθερης Ροής, Τετρασκελής «Τυπικός» Κυκλικός Κόμβος, Κλάδος, Σενάρια, Λειτουργική Ανάλυση, $\Delta d_{\text{κόμβου}}$, Μοντελοποίηση, Γραμμική Παλινδρόμηση, Γραμμικά Μοντέλα

Abstract

Necessity Analysis of the Free-Flow Right-Turn Bypass Lane at Single-Lane Roundabouts

Dimitriadou Androniki

Supervisor: Mavromatis Stergios, Assistant Professor NTUA

The main objective of this Diploma Thesis is **to investigate the necessity of the free-flow right-turn bypass lane at a four-legged single-lane roundabouts' bound**. For this necessity analysis, scenarios in **Microsoft Excel** spreadsheets were developed, where the functional analysis of the single-lane roundabout with and without right-turn bypass lane took place according to the American guidelines for the roundabouts **(NCHRP 2010)**. Each one of the functional analysis aimed to the calculation of roundabout's total expected delay change before and after the installation of right-turn bypass lane **(Ddkombou)**, through which the effect of this lane on roundabout's total performance was practically observed. In total, the scope of the analysis reached the **8.883 scenarios**. This number occurred from the study of 47 different cases of total entry volume from each approach and 189 different distribution percentages of these entry volumes in right-turn, straight and left-turn flow for each case (189x47). Afterwards, the 29 most valuable variables of each scenario, more particularly its Ddkombou, the four roundabout's total entry volumes from each approach, the twelve distribution percentages of these volumes in the tree individual flows and the twelve respective volumes from these percentages, composed the project's main database. Then, the database was inserted in the **R-Studio platform**, where the modelling of the examined necessity was attempted, by using the linear regression method and by running linear models. From these models, emerged the statistically and functionally optimal, which can identify if the installation of a free-flow right-turn bypass lane at a four-legged single-lane roundabout's bound contributes to the improvement of its expected delay and generally of its total performance. This can be achieved by just applying the existing or the future desirable served roundabout's volumes in this model.

KEY-WORDS: Analysis, Free-flow Right-turn Bypass Lane, Four-legged Single-lane Roundabout, Bound, Scenarios, Functional Analysis, Ddkombou, Modelling, Linear Regression, Linear Models

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευρετήριο Εικόνων xi

Ευρετήριο Γραφημάτων xiv

Ευρετήριο Πινάκων xv

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1. Γενική Ανασκόπηση 1

1.2. Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας 2

1.3. Μεθοδολογία της Διπλωματικής Εργασίας 3

1.4. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας 5

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ 8

2.1. Εισαγωγή 8

2.2. Βασικά Μέρη ενός Κυκλικού Κόμβου 8

2.3. Αμερικάνικες & Γερμανικές Οδηγίες για τους Κυκλικούς Κόμβους 9

2.3.1. Τύποι Κυκλικών Κόμβων 9

2.3.2. Βασικά Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού Κυκλικών Κόμβων 11

2.3.3. Ιεράρχηση των Κυκλικών Κόμβων 13

2.4. Οδηγίες για τις παρακαμπτήριες λωρίδες 14

2.4.1. Αμερικάνικες Οδηγίες 14

2.4.2. Γερμανικές Οδηγίες 19

2.5. Σχετικές έρευνες 19

2.5.1. Right-turn Bypass Lanes at Roundabouts: Geometric Schemes and Functional Analysis [9] 20

2.5.2. Roundabout Slip Lanes: Performance and Safety Analysis [1] 25

2.5.3. Capacity analysis of a bypass of roundabouts [14] 31

2.6. Σύνοψη Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης 36

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΡΑΘΡΟ 37

3.1. Εισαγωγή 37

3.2. Λειτουργική Ανάλυση 37

3.2.1. Εκτιμώμενοι Κυκλοφοριακοί Φόρτοι 37

3.2.2. Κυκλοφοριακή Ικανότητα 39

3.2.3. Λόγος Εξυπηρετούμενου Φόρτου προς Χωρητικότητα 43

3.2.4. Εκτίμηση Καθυστερήσεων 43

3.2.5. Επίπεδο Εξυπηρέτησης 45

3.2.6. Εκτίμηση Μήκους Ουρών 45

3.3. Εισαγωγή στη Στατιστική Ανάλυση 46

3.3.1. Είδη Μεταβλητών 47
3.3.2. Συσχέτιση Μεταβλητών 48
3.3.3. Γραφική Απεικόνιση Δεδομένων στο R-Studio – Boxplot 50
3.4. Ανάλυση Παλινδρόμησης 51
3.4.1. Μέθοδος Γραμμικής Παλινδρόμησης 51
3.4.2. Λογαριθμοκανονική Γραμμική Παλινδρόμηση 52
3.5. Κριτήρια Αποδοχής Μοντέλου 53
3.5.1. Κριτήριο Καλής Προσαρμογής R^2 – Adjusted R^2 53
3.5.2. Κριτήριο BIC 55
3.5.3. Student's t-test 56
3.5.4. Τιμή Σημαντικότητας p-value 57
3.5.5. Συντελεστής Διογκωμένης Διακύμανσης της Παλινδρόμησης – VIF 57
3.5.6. Standard Error & F-Statistic 58
3.5.7. Μέσο Απόλυτο Εκατοστιαίο Σφάλμα – MAPE 59
3.5.8. Συντελεστές βi 59
4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 60
4.1. Αντικείμενο Μελέτης 60
4.2. Παρουσίαση της Εξεταζόμενης Διάταξης Κυκλικού Κόμβου 61
4.2.1. Αντιστοίχιση των Στρεφουσών Κινήσεων «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου με και χωρίς Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα στον Νότιο κλάδο ως προς τον αντίστοιχο Ισόπεδο Κόμβο (ΙΚ) 63
4.2.2. «Κρίσιμες» Κινήσεις για την Τοποθέτηση Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας στον Νότιο κλάδο ενός «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου 66
4.3. Παραδοχές 66
4.4. Περιορισμοί 67
4.5. Μεθοδολογία Δημιουργίας των Σεναρίων 68
4.6. Λειτουργική Ανάλυση Σεναρίων 72
4.6.1. Λειτουργική Ανάλυση κάθε Σεναρίου χωρίς Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα στον Νότιο κλάδο του «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου 72
4.6.2. Λειτουργική Ανάλυση κάθε Σεναρίου με Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα στον Νότιο κλάδο του «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου 73
4.6.3. Δομή των Υπολογιστικών Φύλλων στο Microsoft Excel 76
4.7. Παρουσίαση του Λογισμικού Σχεδίασης Κυκλικών Κόμβων TORUS 77
4.7.1. Εισαγωγή στο Λογισμικό TORUS 77
4.7.2. Σχεδιαστικές Παράμετροι 79
5. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ 84

5.1. Περιγραφή των Μεταβλητών της Βάσης Δεδομένων 84
5.2. Ο Κώδικας στο R-Studio 86
5.2.1. Εισαγωγή των Δεδομένων 86
5.2.2. Γραμμική Συσχέτιση των Μεταβλητών 87
5.2.3. Γραφική Απεικόνιση των Μεταβλητών – Boxplot 88
5.2.4. Γραμμική Παλινδρόμηση 91
5.2.5. Ανάπτυξη Γραμμικών Μοντέλων 93
5.3. Στατιστικός Έλεγχος Μοντέλων 96
5.4. Τελικό Μοντέλο 97
5.5. Λειτουργική Αξιολόγηση του Τελικού Μοντέλου 98
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ 100
6.1. Σύνοψη Αποτελεσμάτων 100
6.2. Συμπεράσματα 102
6.3. Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα 107
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 109
ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ 111
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α 113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β 115
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ 116
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ 118

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1-1: Ohio, USA (1893) [Πηγή: Μαυρομάτης 2020] 1
Εικόνα 1-2: Place Etoile, Paris, France (1907) [Πηγή: Μαυρομάτης 2020]..... 1
Εικόνα 1-3: Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας 2
Εικόνα 1-4: Μεθοδολογία της Διπλωματικής Εργασίας 3
Εικόνα 1-5: Βήματα για τη Μεθοδολογία της Διπλωματικής Εργασίας 4
Εικόνα 1-6: Δομή της Διπλωματικής Εργασίας 5
Εικόνα 2-1 (Αριστερά) & Εικόνα 2-2 (Δεξιά): Τα Βασικά Στοιχεία Διαμόρφωσης ενός Κυκλικού Κόμβου (Αριστερά) και τα Βασικά Γεωμετρικά Στοιχεία ενός «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου (Δεξιά) [Πηγή: Μαυρομάτης 2020] 8
Εικόνα 2-3: Γεωμετρική Διάταξη Σπειροειδών Κυκλικών Κόμβων (Turbo Roundabouts) [Πηγή: Silva 2013] 10
Εικόνα 2-4: Κυκλικός Κόμβος Τύπου «Λουλούδι» (Flower Roundabout) [Πηγή: Tollazi 2011] 10
Εικόνα 2-5: Τρισκελής Υπεραστικός Κυκλικός Κόμβος με τρεις Παρακαμπτήριες Λωρίδες (δύο Δεξιόστροφες και μία Ευθεία) [Πηγή: Μαυρομάτης 2020]..... 14
Εικόνα 2-6: Τυπική Διάταξη Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας Ελεύθερης Ροής (Free Flow Right-Turn Bypass Lane) [Πηγή: NCHRP 2010] 15
Εικόνα 2-7: Τυπική Διάταξη Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας με Σήμανση Παραχώρησης Προτεραιότητας (Yield Slip Lane) [Πηγή: NCHRP 2010] 16
Εικόνα 2-8 & Εικόνα 2-9: Ροές Εισόδου, Εξόδου & Επερχόμενης Κυκλοφορίας ενός Κυκλικού Κόμβου με Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα Ελεύθερης Ροής (Free-Flow Bypass Lane) και με «Μερική» Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα (Partial Bypass Lane) στον Νότιο Κλάδο του [Πηγή: NCHRP 2010]..... 17
Εικόνα 2-10: Απαραίτητες Σχεδιαστικές Συναρμογές για τις Δεξιόστροφες Παρακαμπτήριες Λωρίδες [Πηγή: FGSV 2006] 19
Εικόνα 2-11: Διαβάσεις των Πεζών στην Περιοχή της Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας [Πηγή: Mauro & Guerrieri 2012] 22
Εικόνα 2-12: Διανύσματα Φόρτων Οχημάτων (Qi), Πίνακες Προέλευσης-Προορισμού (pi) & Διανύσματα Πεζών (Qpi) της Έρευνας [Πηγή: Mauro & Guerrieri 2012] 23
Εικόνα 2-13: Ζώνες Εμπλοκών σε «Τυπικό» Κυκλικό Κόμβο χωρίς Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα [Πηγή: Al-Ghandour 2011] 26
Εικόνα 2-14: Ζώνες Εμπλοκών σε «Τυπικούς» Κυκλικούς Κόμβους με Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα στον Νότιο Κλάδο [Πηγή: Al-Ghandour 2011] 27
Εικόνα 2-15: Βασικοί Φόρτοι για την Τοποθέτηση Παρακαμπτήριας Λωρίδας [Πηγή: Slabý 2017]..... 31
Εικόνα 2-16: Εντάσεις των Φόρτων (I_i) ενός «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου με Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα στον Νότιο Κλάδο και η Γεωμετρική της Διάταξη [Πηγή: Slabý 2017] 32
Εικόνα 3-1: Περιβάλλον του R-Studio 46
Εικόνα 3-2: Βασικά Τμήματα ενός Boxplot [Πηγή: https://builtin.com/data-science/boxplot] 50
Εικόνα 3-3: Τιμή Σημαντικότητας p-value κάθε Μεταβλητής στο R-Studio 57

Εικόνα 4-1: Η Εξεταζόμενη Διάταξη Τετρασκελούς «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου (Single-Lane Roundabout) (Δεξιά) και οι Εισερχόμενες Κινήσεις σε έναν Αντίστοιχο Τετρασκελή Ισόπεδο Κόμβο (ΙΚ) (Αριστερά) 61
Εικόνα 4-2: Οι 3 Βασικές Στρέφουσες Κινήσεις του Νότιου Κλάδου..... 62
Εικόνα 4-3: Αντιστοίχιση της Συνολικής Εισερχόμενης Ροής στον «Τυπικό» Κυκλικό Κόμβο από τον κάθε Κλάδο ($v_{e,pce}$) με τον κατάλληλο συνδυασμό αριθμών των Εισερχόμενων Κινήσεων του αντίστοιχου Τετρασκελούς Ισόπεδου Κόμβου (ΙΚ) 63
Εικόνα 4-4: Αντιστοίχιση της Επερχόμενης Κυκλοφορίας του «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου ανάντη του κάθε Κλάδου ($v_{c,pce}$) με τον κατάλληλο συνδυασμό αριθμών των Εισερχόμενων Κινήσεων του αντίστοιχου Τετρασκελούς Ισόπεδου Κόμβου (ΙΚ)..... 64
Εικόνα 4-5: Αντιστοίχιση της Συνολικής Εξερχόμενης Ροής του «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου από τον κάθε Κλάδο ($v_{ex,pce}$) με τον κατάλληλο συνδυασμό αριθμών των Εισερχόμενων Κινήσεων του αντίστοιχου Τετρασκελούς Ισόπεδου Κόμβου (ΙΚ)..... 65
Εικόνα 4-6: Οι 2 Επιμέρους Κλάδοι της Νότιας Πρόσβασης κατά της Ύπαρξη Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας Ελεύθερης Ροής σε αυτήν..... 74
Εικόνα 4-7: Υπολογιστικό Φύλλο της κάθε Εξεταζόμενης Περίπτωσης στο Microsoft Excel. 76
Εικόνα 4-8: Περιεχόμενο του κάθε Υπολογιστικού Φύλλου στο Microsoft Excel..... 76
Εικόνα 4-9: Ανάλυση «ταχύτερης διαδρομής» (Αριστερά) και επικάλυψης μονοπατιού για τους κυκλικούς κόμβους πολλαπλών λωρίδων (Δεξιά) στο TORUS [Πηγή: https://www.issd.com.tr/en/44841/TORUS]..... 77
Εικόνα 4-10: Έλεγχος όλων των πεδίων ορατότητας στο TORUS [Πηγή: https://www.issd.com.tr/en/44841/TORUS] 77
Εικόνα 4-11: Εφαρμογή Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών Μείωσης της Ταχύτητας στην Είσοδο του Κυκλικού Κόμβου στο TORUS [Πηγή: https://www.issd.com.tr/en/44841/TORUS] 78
Εικόνα 4-12: Έλεγχος των Κινήσεων των Οχημάτων στο TORUS [Πηγή: https://www.issd.com.tr/en/44841/TORUS]..... 78
Εικόνα 4-13: Σχεδίαση Κυκλικών Κόμβων με μη Κυκλική Κεντρική Νησίδα (Non-Circular Roundabouts) στο TORUS [Πηγή: https://www.transoftsolutions.com/road-design/torus-roundabouts/] 79
Εικόνα 4-14: Τρισδιάστατη (3D) Αναπαράσταση Κυκλικού Κόμβου στο TORUS [Πηγή: https://www.transoftsolutions.com/road-design/torus-roundabouts/]..... 79
Εικόνα 4-15: Το Σχέδιο του Τετρασκελούς «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου του Σεναρίου με τη Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα Ελεύθερης Ροής στον Νότιο Κλάδο από το Λογισμικό TORUS 6.0..... 82
Εικόνα 4-16: Διαστασιολόγηση της Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας Ελεύθερης Ροής του Τετρασκελούς «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου του Σεναρίου (m)..... 83
Εικόνα 4-17: Οι Συνολικοί Φόρτοι Εισόδου, Εξόδου & Επερχόμενης Κυκλοφορίας του κάθε Κλάδου Πρόσβασης του Τετρασκελούς «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου του Σεναρίου (ΜΕΑ/h) 83
Εικόνα 5-1: Απόσπασμα του Πίνακα της Βάσης Δεδομένων στο Περιβάλλον του R-Studio . 87
Εικόνα 5-2: Κώδικας για τον Υπολογισμό των Συντελεστών Συσχέτισης Pearson στο R-Studio 87
Εικόνα 5-3: Boxplot της Εξαρτημένης Μεταβλητής Ddkombou και ο Κώδικας για τη Δημιουργία του στο R-Studio..... 89
Εικόνα 5-4: Boxplots των Συνολικών Εισερχόμενων Φόρτων στον «Τυπικό» Κυκλικό Κόμβο από τον κάθε Κλάδο και ο Κώδικας για τη Δημιουργία τους στο R-Studio..... 90

Εικόνα 5-5: Boxplots της Επιμέρους Δεξιόστροφης, Ευθείας και Αριστερόστροφης Ροής του Συνολικού Εισερχόμενου Φόρτου από τον κάθε Κλάδο 90
Εικόνα 5-6: Κώδικας για την Εκτέλεση της πρώτης Γραμμικής Παλινδρόμησης (reg0) στο R-Studio..... 92
Εικόνα 5-7: Κώδικας για τη Δημιουργία των Training και Test sets στο R-Studio..... 94
Εικόνα 5-8: Κώδικας για την Ανάπτυξη του πρώτου Γραμμικού Μοντέλου (Reg1) στο R-Studio 94
Εικόνα 5-9: Στατιστικά Χαρακτηριστικά του πρώτου Γραμμικού Μοντέλου (Reg1)..... 95
Εικόνα 5-10: Στατιστικά Χαρακτηριστικά του καλύτερου Γραμμικού Μοντέλου (Reg7)..... 97

Ευρετήριο Γραφημάτων

Γράφημα 2-1: Σύγκριση της Κυκλοφοριακής Ικανότητας όλων των Τύπων των Δεξιόστροφων Παρακαμπτήριων Λωρίδων ($c_{E,R}$ (veh/h) συναρτήσει της Ανταγωνιστικής τους Ροής (Q_U^{Tot} (veh/h)) [Πηγή: Mauro & Guerrieri 2012] 24
Γράφημα 2-2: Χωρητικότητα της Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας (C_b (veh/h)) συναρτήσει της Έντασης του Φόρτου Εξόδου του ακριβώς Επόμενού της Κλάδου (I_e (veh/h)) [Πηγή: Slabý 2017] 34
Γράφημα 2-3: Χωρητικότητα του Κλάδου με την Παρακαμπτήρια Λωρίδα (C_V (veh/h)) συναρτήσει της Χωρητικότητας στην Είσοδο στον Κυκλικό Δακτύλιο (C_i (veh/h)) και της Έντασης του Φόρτου της Επερχόμενης Κυκλοφορίας (I_k (veh/h)) [Πηγή: Slabý 2017] 34
Γράφημα 3-1: Σύγκριση Κυκλοφοριακής Ικανότητας (ΜΕΑ/h) των Λωρίδων Πρόσβασης σε έναν Κυκλικό Κόμβο [Πηγή: Μαυρομάτης 2020] 42
Γράφημα 3-2: Συντελεστής Προσαρμογής της Χωρητικότητας μίας και δύο Λωρίδων Πρόσβασης ως προς τους Φόρτους των Πεζών (πεζοί/h) και της Επερχόμενης Κυκλοφορίας (ΜΕΑ/h) [Πηγή: Μαυρομάτης 2020]..... 42
Γράφημα 3-3: Αναμενόμενες Καθυστερήσεις (sec/οχ) ανά Λωρίδα Πρόσβασης συναρτήσει της Χωρητικότητας (οχ/h) και του Εισερχόμενου Φόρτου της (οχ/h) [Πηγή: NCHRP 2010].. 44
Γράφημα 3-4: Αναμενόμενο Μήκος Ουράς (οχ) συναρτήσει της Χωρητικότητας (οχ/h) και του Λόγου v/c ενός Κυκλικού Κόμβου [Πηγή: NCHRP 2010] 46
Γράφημα 3-5: Μορφή Γραμμικού Μοντέλου [Πηγή: Βλαχογιάννη 2021]..... 52
Γράφημα 3-6: Μορφή Κύμανσης Γραμμικής Παλινδρόμησης [Πηγή: Βλαχογιάννη 2021].... 54
Γράφημα 5-1: Τιμές του Adjusted R^2 και του BIC της πρώτης Γραμμικής Παλινδρόμησης (reg0) 92

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2-1: Βασικά Στοιχεία Σχεδιασμού όλων των Τύπων Κυκλικών Κόμβων 11
Πίνακας 2-2: Εύρος Οδοστρώματος (m) & Ακτίνες Εισόδου (m) των Κυκλικών Κόμβων 12
Πίνακας 2-3: Εύρος Οδοστρώματος (m) & Ακτίνες Εξόδου (m) των Κυκλικών Κόμβων 12
Πίνακας 2-4: Κατευθυντήριες – Διαχωριστικές Νησίδες των Κυκλικών Κόμβων 13
Πίνακας 2-5: Στοιχεία Σχεδιασμού Παρακαμπτήριων Λωρίδων 18
Πίνακας 3-1: Συσχέτιση Φόρτου Διασταυρωνόμενων Κινήσεων (οχ/h) και του Απαιτούμενου Αριθμού Λωρίδων Εισόδου σε κάθε Πρόσβαση σε έναν Κυκλικό Κόμβο [Πηγή: Μαυρομάτης 2020] 39
Πίνακας 3-2: Αντιστοίχιση Καθυστερήσεων (sec/οχ) του Κυκλικού Κόμβου με τα Επίπεδα Εξυπηρέτησής του (LOS) [Πηγή: NCHRP 2010] 45
Πίνακας 3-3: Πίνακας Κατανομής Student 56
Πίνακας 4-1: Οι 47 Εξεταζόμενες Περιπτώσεις των Συνολικών Εισερχόμενων Φόρτων στον «Τυπικό» Κυκλικό Κόμβο από τον κάθε Κλάδο 69
Πίνακας 4-2: Ποσοστά Κατανομής σε Δεξιόστροφη, Ευθεία & Αριστερόστροφη Κίνηση του Εισερχόμενου στον «Τυπικό» Κυκλικό Κόμβο Φόρτου ανά Κλάδο 70
Πίνακας 4-3: Οι 27 Συνδυασμοί των Ποσοστών Κατανομής σε Δεξιόστροφη, Ευθεία & Αριστερόστροφη Κίνηση των Εισερχόμενων στον «Τυπικό» Κυκλικό Κόμβο Φόρτων από τον Βόρειο, τον Ανατολικό και τον Δυτικό Κλάδο 71
Πίνακας 6-1: Βασικά Στατιστικά Χαρακτηριστικά του τελικού Στατιστικά και Λειτουργικά Βέλτιστου Γραμμικού Μοντέλου 102

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενική Ανασκόπηση

Οι συγκοινωνιολόγοι στην προσπάθειά τους να εξασφαλίσουν τη μέγιστη δυνατή ασφάλεια σε σημεία διασταύρωσης και συμβολής των οδών, εισήγαγαν και εφάρμοσαν την έννοια των κυκλικών κόμβων (roundabouts). Στην αρχή βέβαια οι κυκλικοί κόμβοι είχαν ρόλο ανάδειξης του οδικού περιβάλλοντος, γεγονός το οποίο παρατηρείται ακόμα και σήμερα. Οι κυκλικοί κόμβοι αποτελούν μία μορφή ισόπεδου κόμβου κυκλικής μορφής, εντός του οποίου τα οχήματα κινούνται γύρω από μία κυκλική κατά βάση νησίδα αντίστροφα από τη φορά την δεικτών του ρολογιού, πέρα των χωρών στις οποίες προηγούνται τα οχήματα από αριστερά. [22]

Οι κυκλικοί κόμβοι είναι ευρέως διαδεδομένοι και ιστορικά εμφανίζονται από τα μέσα του 19^{ου} και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, οι παλαιότεροι από τους οποίους εντοπίζονται στο Ohio στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ) (1893) και στο Παρίσι, της Γαλλίας (1907).

Εικόνα 1-1: Ohio, USA (1893) [Πηγή: Μαυρομάτης 2020]

Εικόνα 1-2: Place Etoile, Paris, France (1907) [Πηγή: Μαυρομάτης 2020]

Η επιλογή των κυκλικών κόμβων δεν ήταν τυχαία, καθώς όπως έχει αποδειχθεί με τον χρόνο, αυτού του είδους οι κόμβοι παρέχουν μεγαλύτερη ασφάλεια συγκριτικά με τους αντίστοιχους συμβατικούς Ισόπεδους Κόμβους (ΙΚ), γεγονός στο οποίο οφείλεται η εφαρμογή τους σε διεθνές επίπεδο. Η μεγαλύτερη ασφάλεια προέρχεται από το ότι ευνοείται η μείωση της ταχύτητας των οχημάτων λόγω της γεωμετρίας τους και επαγωγικά των ατυχημάτων, που δύνανται να σημειωθούν, τα οποία είναι κατά βάση ατυχήματα υλικών ζημιών.

Ωστόσο, ένα αρνητικό των κυκλικών κόμβων είναι ότι έχουν ένα άνω όριο ως προς την κυκλοφοριακή ικανότητα, που μπορούν να εξυπηρετήσουν. Λόγω αυτού, εισάγεται μία καινούργια έννοια, η οποία δεν είναι τόσο ευρέως διαδεδομένη στην Ελλάδα όσο στο εξωτερικό και είναι εκείνη **των παρακαμπτήριων λωρίδων (bypass/slip lanes)**. Οι παρακαμπτήριες λωρίδες, οι οποίες αποτελούν το κύριο θέμα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, εξυπηρετούν την απευθείας **δεξιόστροφη (ή ευθεία) κίνηση** του οχήματος χωρίς την είσοδό του στον κυκλικό κόμβο. Οι λωρίδες αυτές τοποθετούνται όταν η χωρητικότητα του κυκλικού κόμβου δεν του επιτρέπει να εξυπηρετήσει υψηλές κυκλοφοριακές απαιτήσεις δεξιόστροφων (ή ευθείων αντίστοιχα) κινήσεων. [22]

Όπως, λοιπόν, γίνεται αντιληπτό, οι παρακαμπτήριες λωρίδες αποτελούν μία πολύ επωφελή προσθήκη για έναν κυκλικό κόμβο, όπου μεταξύ άλλων εφαρμόζονται και σε περιπτώσεις

κατά τις οποίες δεν είναι επιθυμητή (η δεν είναι εφικτή) η αναβάθμισή τους με σχεδιασμό περισσότερων λωρίδων πρόσβασης ή/και επερχόμενης κυκλοφορίας.

1.2. Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Οι παρακαμπτήριες λωρίδες έχουν μελετηθεί από επίσημες διεθνείς οδηγίες και έχουν αποτελέσει τον βασικό πυρήνα πολλών ερευνών. Όλα αυτά αναφέρονται αναλυτικά στο κομμάτι της Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης (Κεφάλαιο 2.). Ωστόσο, παρόλη την μέχρι τώρα έρευνα, δεν έχει δημιουργηθεί ακόμα κάποιου είδους μαθηματική σχέση, η οποία να ποσοτικοποιεί τα οφέλη από τη χωροθέτηση παρακαμπτήριας λωρίδας σε κυκλικό κόμβο.

Συνεπώς, κεντρικός στόχος της εν λόγω Διπλωματικής αποτέλεσε **η διερεύνηση** ενός μέρους αυτού του ερευνητικού «κενού» και πιο συγκεκριμένα **τη διερεύνηση της αναγκαιότητας χωροθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής σε κλάδο τετρασκελών «τυπικών» κυκλικών κόμβων** βάσει των υφιστάμενων ή των αντίστοιχων μελλοντικών τους φόρτων.

Εικόνα 1-3: Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Ο λόγος, που εξετάστηκε ένα μέρος του «κενού» αυτού, είναι διότι, υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί ως προς τον τύπο των παρακαμπτήριων λωρίδων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, τον αριθμό και τη θέση τους στον κυκλικό κόμβο, αλλά ακόμα και ως προς τον τύπο του ίδιου του κυκλικού κόμβου. Όλα αυτά δε θα ήταν εφικτό να διερευνηθούν σε μία μόνο εργασία, ούτε να συμπεριληφθούν σε μία μόνο εξίσωση.

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία μελετήθηκε **η αναγκαιότητα τοποθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο των «τυπικών» κυκλικών κόμβων**. Η συγκεκριμένη διάταξη παρακαμπτήριας λωρίδας αποτελεί την πιο συχνά εφαρμοζόμενη, εφόσον προκύπτει τέτοια ανάγκη, δεδομένου ότι έχει ευρεία εφαρμογή κυρίως στις χώρες του εξωτερικού. Επιπλέον, η διάταξη κυκλικού κόμβου με παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο του έχει διερευνηθεί και σε αρκετές αντίστοιχες έρευνες.

Ωστόσο, όπως θα αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2., η εφαρμογή των συγκεκριμένων παρακαμπτήριων λωρίδων προτείνεται κυρίως σε υπεραστικό οδικό περιβάλλον, ενώ οι «τυπικοί» κυκλικοί κόμβοι κυρίως σε αστικό. Συνεπώς, η παρούσα μελέτη απευθύνεται ως επί το πλείστον σε εισόδους οικισμών, χωρίς ωστόσο να περιορίζεται εκεί.

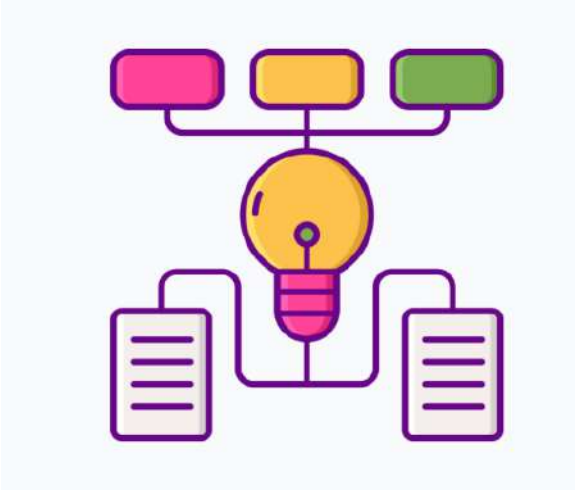
1.3. Μεθοδολογία της Διπλωματικής Εργασίας

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί μία συνοπτική περιγραφή της μεθόδου, στην οποία στηρίχτηκε η εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Σε πρώτο στάδιο προσδιορίστηκε προσεγγιστικά το ερευνητικό πεδίο, στο οποίο θα εστίαζε η Διπλωματική Εργασία, που είναι οι δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες (right-turn bypass lanes) σε τετρασκελείς κυκλικούς κόμβους.

Σε δεύτερο στάδιο διεξήχθη μία εκτενής έρευνα στην ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία για το εξεταζόμενο αντικείμενο. Στόχος της έρευνας αυτής ήταν να συλλεχθούν όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν μετέπειτα στη σύγκριση με τα αποτελέσματα της Διπλωματικής και για να υπάρξει μία βαθύτερη εξοικείωση με το συγκεκριμένο θέμα. Στο εν λόγω στάδιο μελετήθηκαν επίσημες διεθνείς οδηγίες τόσο για τις παρακαμπτήριες λωρίδες όσο και γενικά για τους κυκλικούς κόμβους, καθώς και μελέτες αντίστοιχου περιεχομένου, από τις οποίες καταγράφηκε η μεθοδολογία εκπόνησής τους και τα κύρια συμπεράσματά τους. Μέσω αυτής της ανασκόπησης βρέθηκαν και όσα ζητήματα απαιτούσαν έρευνα περί των παρακαμπτήριων λωρίδων, με τη βοήθεια των οποίων έγινε πιο σαφής ο στόχος και η δομή της εργασίας.

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε η μέθοδος προσέγγισης του κύριου στόχου της εργασίας και βάσει της οποίας δημιουργήθηκαν τα δεδομένα της. Για την εκπόνηση της μελέτης πρακτικά δημιουργήθηκαν σενάρια σε 47 υπολογιστικά φύλλα του Microsoft Excel, όπου ένα μέρος από αυτά φαίνεται ενδεικτικά στο παράρτημα Α [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α]. Λόγω του ότι σε καθένα από τα σενάρια πραγματοποιήθηκε λειτουργική ανάλυση, επιλέχθηκαν κατά κύριο λόγο οι Αμερικάνικες Οδηγίες (NCHRP 2010) ως πιο ολοκληρωμένες στο υπόψη αντικείμενο των κυκλικών κόμβων. Από αυτά τα σενάρια ερευνήθηκε η χρησιμότητας της τοποθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο για τη συνολική απόδοση του τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου βάσει της μεταβολής της συνολικής αναμενόμενης καθυστέρησής του ($\Delta d_{\text{κόμβου}}$) πριν και μετά την τοποθέτησής της και αναλόγως των εξεταζόμενων κάθε φορά συνθηκών.



Εικόνα 1-4: Μεθοδολογία της Διπλωματικής Εργασίας

Σε κάθε σενάριο επιλέχθηκε να αλλάζει ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο και ταυτόχρονα τα ποσοστά κατανομής των φόρτων αυτών σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργήθηκαν 8.883 σενάρια και έτσι, μελετήθηκε ο κόμβος κάτω 8.883 διαφορετικές συνθήκες. Ύστερα, συλλέχθηκαν τα βασικότερα μεγέθη του κάθε σεναρίου για τη δημιουργίας της βάσης δεδομένων της εργασίας, ένα μέρος της οποίας φαίνεται στο παράρτημα Β [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β]. Αναλυτικότερα, τα μεγέθη αυτά από το κάθε σενάριο, που στο σύνολό τους ήταν 29, ήταν η τιμή $\Delta d_{\text{κόμβου}}$ του, οι τέσσερις συνολικοί εισερχόμενοι φόρτοι από τον κάθε κλάδο, τα δώδεκα

ποσοστά κατανομής των φόρτων αυτών σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση και οι δώδεκα επιμέρους φόρτοι, που προήλθαν από τα ποσοστά.

Αφού ολοκληρώθηκε η παραγωγή των σεναρίων και της βάσης δεδομένων, ακολούθησε η στατιστική της επεξεργασία στο περιβάλλον του R-Studio. Τα στοιχεία της βάσης δεδομένων κωδικοποιήθηκαν με τρόπο τέτοιο, ώστε να υπάρχει συμφωνία με τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου προγράμματος [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ]. Στόχος του κώδικά ήταν να μοντελοποιηθεί η εξεταζόμενη αναγκαιότητα χωροθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο «τυπικών» κυκλικών κόμβων. Αυτό επετεύχθη μέσω της εκτέλεσης γραμμικών μοντέλων με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης.

Στα γραμμικά μοντέλα ως εξαρτημένη μεταβλητή χρησιμοποιήθηκε το $\Delta d_{\text{κόμβου}}$ και ως ανεξάρτητες οι υπόλοιπες 28 μεταβλητές της βάσης δεδομένων, από τις οποίες μεγαλύτερη έμφαση δόθηκε στους τέσσερις συνολικούς εισερχόμενους φόρτους από τον κάθε κλάδο και στις δώδεκα επιμέρους δεξιόστροφες, ευθείες και αριστερόστροφες ροές των φόρτων αυτών. Από αυτή τη διαδικασία εξήχθη ένα γραμμικό μοντέλο, το οποίο ήταν στατιστικά και λειτουργικά το βέλτιστο, όπου μέσω του υπολογιζόμενου $\Delta d_{\text{κόμβου}}$ του αναγνωρίστηκε η αναγκαιότητα τοποθέτησης του συγκεκριμένου τύπου παρακαμπτήριας λωρίδας βάσει των υφιστάμενων ή των μελλοντικών επιθυμητών εξυπηρετούμενων φόρτων του κυκλικού κόμβου.

Από όλα τα παραπάνω προέκυψαν γενικά συμπεράσματα για το εξεταζόμενο θέμα και άλλα ειδικότερα για τον βαθμό και τον τύπο της επιρροής της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής στην εξαρτημένη. Κατά αυτόν τον τρόπο, βρέθηκαν σημαντικές πληροφορίες για το υπό διερεύνηση ζητούμενο και διατυπώθηκαν αξιόλογες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Στην Εικόνα 1-5 φαίνονται σχηματικά όλα τα βήματα της μεθοδολογίας για την πραγματοποίηση της Διπλωματικής Εργασίας, που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Εικόνα 1-5: Βήματα για τη Μεθοδολογία της Διπλωματικής Εργασίας

1.4. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Εικόνα 1-6: Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Μετά τον καθορισμό της μεθοδολογίας της Διπλωματικής Εργασίας, σημαντικό ήταν να οριστεί και η δομή της, προκειμένου η παρουσίασή της να χαρακτηρίζεται από ομαλότητα, σαφήνεια και περιεκτικότητα. Παρακάτω ακολουθεί μία σύνοψη των κεφαλαίων, από τα οποία απαρτίζεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί το πρώτο κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας, στόχος του οποίου είναι να καταστήσει σαφές το γενικότερο πλαίσιο του αντικειμένου μελέτης της στον αναγνώστη. Αρχικά, γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση του εξεταζόμενου θέματος και προσδιορίζεται ο ακριβής στόχος της μελέτης, που είναι η διερεύνηση της αναγκαιότητας χωροθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής σε κλάδο τετρασκελών «τυπικών» κυκλικών κόμβων και πιο συγκεκριμένα στον Νότιο. Έπειτα, ακολουθεί η αναφορά των μεθόδων, που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνησή της, οι οποίες συνοπτικά είναι οι εξής:

- Επιλογή των συνθηκών μελέτης του κυκλικού κόμβου σε κάθε σενάριο.
- Πραγματοποίηση λειτουργικής ανάλυσης σε κάθε σενάριο βάσει των ανωτέρω κάθε φορά συνθηκών σύμφωνα με τις Αμερικάνικες κατά κύριο λόγο Οδηγίες (NCHRP 2010) σε υπολογιστικά φύλλα του Microsoft Excel.
- Συλλογή των βασικότερων μεγεθών του κάθε σεναρίου και δημιουργία της βάσης δεδομένων.
- Χρήση της γλώσσας προγραμματισμού R-Studio για τη στατιστική ανάλυση της βάσης δεδομένων και τη μοντελοποίηση της εξεταζόμενης αναγκαιότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο κεφάλαιο της Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης πραγματοποιείται μία ανασκόπηση στην επιστημονική βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μία πρώτη εξοικείωση γενικά με τους κυκλικούς κόμβους και ύστερα με τις παρακαμπτήριες λωρίδες βάσει των δύο επίσημων οδηγιών για τους κυκλικούς κόμβους, δηλαδή τις Γερμανικές (FGSV 2006) και τις Αμερικάνικες Οδηγίες (NCHRP 2010). Ύστερα, αναλύονται συναφείς έρευνες καθώς και οι μεθοδολογίες τους, προκειμένου να βρεθεί το ερευνητικό «κενό» και διευκρινίζεται ο ακριβής στόχος της Διπλωματικής Εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά το Θεωρητικό Υπόβαθρο, επί του οποίου στηρίχτηκε τόσο η εξ ολοκλήρου δημιουργία των δεδομένων της εργασίας όσο και η επεξεργασία τους. Πρώτα, γίνεται αναφορά σε θεωρητικές έννοιες για τη λειτουργική ανάλυση όλων των τύπων των κυκλικών κόμβων με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα σύμφωνα με τις Αμερικάνικες κυρίως Οδηγίες (NCHRP 2010). Έπειτα, γίνεται αναφορά σε κρίσιμες έννοιες στατιστικού περιεχομένου, οι περισσότερες από τις οποίες θα

χρειαστούν στη στατιστική ανάλυση στην πλατφόρμα του R-Studio και στην επιλογή του τελικού γραμμικού μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η μεθοδολογία βάσει της οποίας δημιουργήθηκαν τα σενάρια και όλη η προμελέτη, που θα χρειαστεί για τη δημιουργία τους. Στο πρώτο μέρος γίνεται μία αναφορά ξανά στον κεντρικό πυρήνα της Διπλωματικής Εργασίας και παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι παραδοχές και οι περιορισμοί, που λήφθηκαν κατά την πραγματοποίηση των σεναρίων. Ύστερα, περιγράφονται σε εικόνες και αναλυτικούς πίνακες όλες οι συνθήκες, που θα εξεταστούν και στα 8.883 σενάρια, καθώς και η λειτουργική τους ανάλυση, που θα υλοποιηθεί σε 47 συνολικά υπολογιστικά φύλλα του Microsoft Excel. Το βασικό μέγεθος κάθε σεναρίου θα αποτελέσει η διαφορά της συνολικής αναμενόμενης καθυστέρησης του τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου ($\Delta d_{\text{κόμβου}}$) πριν και μετά την τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο του, όπου μέσω αυτού του μεγέθους θα προσεγγισθεί πρακτικά το ζητούμενο της εργασίας.

Τέλος, παρουσιάζεται ενδεικτικά η δομή του κάθε υπολογιστικού φύλλου στο Microsoft Excel και το σχέδιο του τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου ενός από των σεναρίων με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο του, το οποίο σχεδιάστηκε στο λογισμικό TORUS 6.0. Πριν την παράθεση του σχεδίου, γίνεται και μία σύντομη παρουσίαση των γενικών λειτουργιών του σχεδιαστικού αυτού λογισμικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Στην αρχή του πέμπτου κεφαλαίου περιγράφονται αναλυτικά τα μεγέθη, που επιλέχθηκαν από τα σενάρια, ως μεταβλητές της βάσης δεδομένων της εργασίας. Στη συνέχεια, αναλύεται βήμα προς βήμα ο κώδικας, που συντάχθηκε στο πρόγραμμα του R-Studio, καθώς και οι εντολές, που χρησιμοποιούνταν κάθε φορά για τη στατιστική επεξεργασία της βάσης αυτής και για τη μοντελοποίηση της εξεταζόμενης αναγκαιότητας χωροθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο τετρασκελών «τυπικών» κυκλικών κόμβων. Στο κομμάτι της μοντελοποίησης περιγράφεται η λογική, που ακολουθήθηκε τόσο στη γραμμική παλινδρόμηση όσο και για την πραγματοποίηση των γραμμικών μοντέλων, για να προκύψει ο καλύτερος συνδυασμός μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών με την εξαρτημένη μεταβλητή $\Delta d_{\text{κόμβου}}$. Τέλος, αξιολογείται στατιστικά και λειτουργικά το μοντέλο εκείνο, το οποίο κρίθηκε βέλτιστο και ότι εκφράζει αποτελεσματικότερα τον κεντρικό στόχο της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στο κεφάλαιο αυτό, το οποίο αποτελεί το τελευταίο της εργασίας, γίνεται μία σύνοψη και ταυτόχρονα μία επεξήγηση όλων των αποτελεσμάτων της εργασίας, ώστε να προκύψουν τα τελικά συμπεράσματά της. Στην αρχή του κεφαλαίου, γίνεται μία σύντομη υπενθύμιση του βασικού σκοπού της εργασίας, της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την επίτευξή του και παρατίθεται το τελικό γραμμικό μοντέλο, στο οποίο συγκεντρώνεται πρακτικά όλη η ουσία της μελέτης. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρουσιάζονται όλες οι διαπιστώσεις και τα συμπεράσματα, που δημιουργήθηκαν από το κάθε στάδιο της εργασίας. Τέλος, προτείνονται κάποιες τεχνικές, με τις οποίες οι μελετητές μπορούν να προσεγγίσουν τόσο το

παρόν ζητούμενο όσο και άλλα παρεμφερή περί των παρακαμπτήριων λωρίδων, τα οποία χρήζουν βαθύτερης επιστημονικής διερεύνησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Το κεφάλαιο αυτό περιέχει αναλυτικό κατάλογο όλων των βιβλιογραφικών αναφορών, που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας έρευνας, δίνοντας τη δυνατότητα εύρεσης και αναζήτησης των σχετικών πηγών από τον εκάστοτε αναγνώστη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

- Παράρτημα Α: Στο συγκεκριμένο παράρτημα παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα από τα 47 υπολογιστικά φύλλα, που δημιουργήθηκαν στο Microsoft Excel. Λόγω του ότι σε κάθε υπολογιστικό φύλλο αναπτύχθηκαν 189 σενάρια, για πρακτικούς λόγους στο υπολογιστικό φύλλο του παραρτήματος φαίνονται μόνο τα δώδεκα πρώτα.
- Παράρτημα Β: Παρουσιάζεται η βάση δεδομένων της εργασίας, η οποία αποτελείται από 8.883 σειρές, όσα είναι δηλαδή και τα σενάρια. Για πρακτικούς λόγους η βάση δεδομένων στο παράρτημα φαίνεται μέχρι το 46^{ο} σενάριό της.
- Παράρτημα Γ: Παρατίθενται οι δύο πίνακες των συντελεστών συσχέτισης Pearson, που προέκυψαν από το πρόγραμμα R-Studio, μεταξύ και των 29 μεταβλητών της βάσης δεδομένων. Επιπλέον, υπάρχει και ένας τρίτος πίνακας, στον οποίο επεξηγούνται ορισμένες χρωματικές εμφανίσεις ορισμένων κελιών των συντελεστών συσχέτισης των δύο παραπάνω πινάκων.
- Παράρτημα Δ: Ο κώδικας, που αναπτύχθηκε στην πλατφόρμα του R-Studio.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

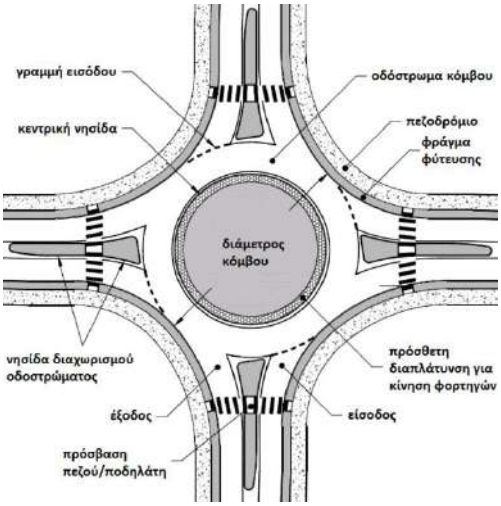
2.1. Εισαγωγή

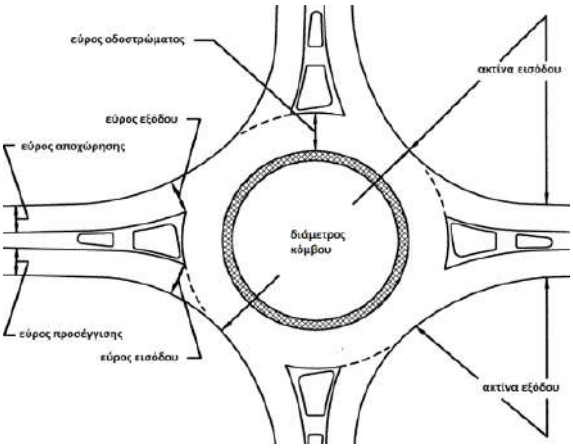
Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση, που έγινε για τις ανάγκες της παρούσας Διπλωματικής εργασίας. Για την πλήρη κατανόηση των παρακαμπτήριων λωρίδων ήταν αναγκαία μία πρωταρχική εμβάθυνση γενικά στους κυκλικούς κόμβους και στις ίδιες τις παρακαμπτήριες λωρίδες, έτσι όπως ορίζονται από τις επίσημες διεθνείς οδηγίες, καθώς και μία βιβλιογραφική ανάλυση των ερευνών, που έχουν μέχρι στιγμής διεξαχθεί και έχουν ως κεντρικό πυρήνα τους το αντικείμενο αυτό.

Διεθνώς για την ανάλυση των κυκλικών κόμβων υπάρχουν κατά βάση δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, οι Γερμανικές και οι Αμερικάνικες Οδηγίες. Οι Γερμανικές Οδηγίες ορίζονται μέσω του εγχειριδίου FGSV, 2006 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.) και οι Αμερικάνικες μέσω των Roundabouts: An Informational Guide, Report no 672 – NCHRP, 2010 (National Cooperative Highway Research Program) και FHWA, 2000 (Federal Highway Administration). Επιπλέον, ιδιαίτερη είναι η συνεισφορά του Γερμανού καθηγητή Brilon Werner στις Γερμανικές Οδηγίες για τους κυκλικούς κόμβους με τις εκτενείς του έρευνες.

2.2. Βασικά Μέρη ενός Κυκλικού Κόμβου

Τα βασικά γεωμετρικά στοιχεία διαμόρφωσης ενός κυκλικού κόμβου μίας λωρίδας κυκλοφορίας απεικονίζονται αναλυτικά στις παρακάτω εικόνες, από τις οποίες φαίνεται ότι οι κυκλικοί κόμβοι απαρτίζονται από δύο βασικές περιοχές: την περιοχή του δακτυλίου (περιοχή εντός του κυκλικού κόμβου) και την περιοχή των οδών προσέγγισης (περιοχή προσέγγισης/πρόσβασης). Η κυκλοφορία πέριξ του κυκλικού δακτυλίου ονομάζεται επερχόμενη κυκλοφορία.





Εικόνα 2-1 (Αριστερά) & Εικόνα 2-2 (Δεξιά): Τα Βασικά Στοιχεία Διαμόρφωσης ενός Κυκλικού Κόμβου (Αριστερά) και τα Βασικά Γεωμετρικά Στοιχεία ενός «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου (Δεξιά) [Πηγή: Μαυρομάτης 2020]

2.3. Αμερικάνικες & Γερμανικές Οδηγίες για τους Κυκλικούς Κόμβους

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρατίθενται οι τύποι των κυκλικών κόμβων, τα βασικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού τους, οι οριακές τιμές των χαρακτηριστικών αυτών, καθώς και η ιεράρχηση των κυκλικών κόμβων, όπως ορίζονται από τις Αμερικάνικες (NCHRP 2010) [10] και τις Γερμανικές Οδηγίες (FGSV 2006) [5]. Λόγω του ότι στην παρούσα Διπλωματική εργασία μελετήθηκαν αποκλειστικά **τετρασκελείς κυκλικοί κόμβοι**, στα παρακάτω υποκεφάλαια 2.3.1. έως 2.3.3. γίνεται μία τυπική εμβάθυνση μόνο σε αυτή τη διάταξη κυκλικών κόμβων.

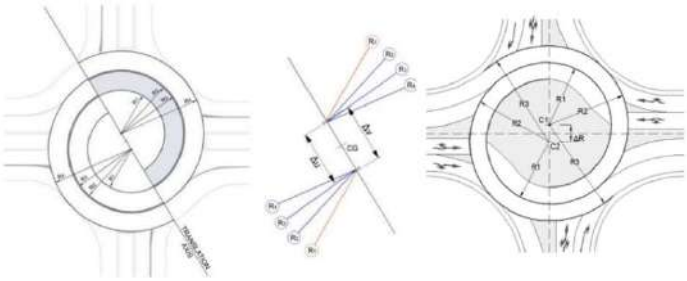
2.3.1. Τύποι Κυκλικών Κόμβων

Σύμφωνα με τις Αμερικάνικες [6] και τις Γερμανικές Οδηγίες [5], οι κυκλικοί κόμβοι διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

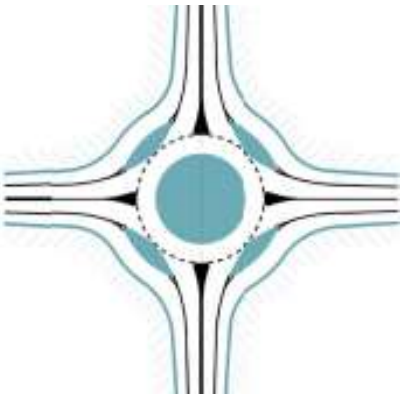
- «Μικροί» κυκλικοί κόμβοι (Mini-roundabouts)
  Αυτός ο τύπος κυκλικού κόμβου εφαρμόζεται σε αστικό περιβάλλον και έχει ως βασικό χαρακτηριστικό ότι η κεντρική του νησίδα είναι πλήρως υπερβατή, έτσι ώστε να εξυπηρετούνται τα Βαρέα Οχήματα (ΒΟ). Επιπλέον, θέτουν τα όρια σε περιοχές ή κατοικίες, στις οποίες οι ταχύτητες των οχημάτων είναι αρκετά περιορισμένες. [22]
- «Τυπικοί» κυκλικοί κόμβοι (Single-lane roundabouts)
  Αυτός ο τύπος κυκλικού κόμβου θεωρείται ο πιο ασφαλής και εφαρμόζεται κατά βάση σε αστικό περιβάλλον. Διαθέτει μία λωρίδα κίνησης τόσο στους κλάδους πρόσβασης όσο και επί του κυκλικού δακτυλίου, ενώ στη συγκεκριμένη διάταξη η κεντρική νησίδα είναι υπερυψωμένη όπως και οι νησίδες στις διαβάσεις των πεζών και ποδηλάτων στο αστικό περιβάλλον.
  Η διάμετρος της κεντρικής νησίδας και οι ταχύτητες των οχημάτων είναι μεγαλύτερες σε αυτόν τον τύπο κυκλικού κόμβου συγκριτικά με τους «μικρούς» κυκλικού κόμβους (mini roundabouts). Προκειμένου να μπορούν να εξυπηρετηθούν Βαρέα Οχήματα (ΒΟ) πιθανώς να απαιτείται ζώνη ομόκεντρα της κεντρικής νησίδας, που να είναι υπερβατή. [22]
- Κυκλικοί κόμβοι πολλαπλών λωρίδων (Multilane roundabouts)
  Οι κυκλικοί κόμβοι πολλαπλών λωρίδων εφαρμόζονται τόσο σε αστικό όσο και σε υπεραστικό περιβάλλον και εξυπηρετούν αυξημένους κυκλοφοριακούς φόρτους. Σε τουλάχιστον έναν κλάδο εισόδου τοποθετούνται δύο ή περισσότερες λωρίδες κυκλοφορίας και τόσο η διάμετρος της υπερυψωμένης κεντρικής νησίδας όσο και τα υπόλοιπα τόξα στις περιοχές εισόδου-εξόδου έχουν μικρότερη καμπυλότητα από τους άλλους τύπους και συνεπώς ευνοούνται οι υψηλότερες ταχύτητες κατά την κίνηση των οχημάτων εντός του.
  Βάσει των Γερμανικών Οδηγιών η μόνη αποδεκτή διάταξη κυκλικού κόμβου πολλαπλών λωρίδων είναι όταν υπάρχουν το πολύ δύο λωρίδες εισόδου αλλά όχι πάνω από μία λωρίδα εξόδου. Ο λόγος που απορρίπτονται οι περισσότερες λωρίδες οφείλεται στο γεγονός ότι οι μη σηματοδοτούμενοι κόμβοι της συγκεκριμένης διάταξης έχουν ως άνω όριο εξυπηρέτησης τα 40.000 οχ/ημέρα, γεγονός το οποίο δεν αντισταθμίζεται από την αυξημένη επικινδυνότητά τους (αυξημένες ταχύτητες, περιοχές με πλέξεις), που εμφανίζουν σε σχέση με τις άλλες διατάξεις κυκλικών κόμβων.
  Ένας άλλος λόγος είναι για να αποφευχθεί η πλέξη μεταξύ του εξερχόμενου οχήματος, που κινείται στην εσωτερική οριογραμμή του κυκλικού δακτυλίου και εκείνου, που κινείται επί του δακτυλίου, αναγκάζοντας με αυτόν τον τρόπο

οποιοδήποτε εξερχόμενο από τον κυκλικό κόμβο όχημα, να ακολουθήσει την εξωτερική οριογραμμή. Αυτός είναι εξάλλου και ο λόγος που οι Γερμανικές Οδηγίες απαγορεύουν την εφαρμογή διαγράμμισης αλλά συνιστούν τη χρήση μίας διευρυμένης λωρίδας επί του κυκλικού δακτυλίου για το διαχωρισμό των λωρίδων. [22]

Εκτός από τους παραπάνω τύπους κυκλικών κόμβων, όπου είναι και οι πιο συνηθισμένοι, υπάρχει ένας αυξανόμενος αριθμός εναλλακτικών τύπων, που όλοι τους έχουν ένα βασικό κοινό στόχο, τη μείωση του αριθμού των εμπλοκών κατά την κίνηση των οχημάτων εντός τους. Κάποιοι εναλλακτικοί τύποι κυκλικών κόμβων είναι ήδη σε συχνή χρήση παγκοσμίως (hamburger, dumb-dell roundabouts), κάποιοι άλλοι έχουν εφαρμοστεί σε συγκεκριμένες χώρες (turbo, turbo-square, dog-bone, compact semi-two lane roundabouts) ή βρίσκονται σε αναπτυσσόμενα στάδια (flower, target, four flyover roundabouts). Στην Εικόνα 2-3 και Εικόνα 2-4 φαίνονται ο σπειροειδής κυκλικός κόμβος (turbo roundabout) και κυκλικός κόμβος τύπου «λουλούδι» (flower roundabout) αντίστοιχα, που είναι δύο από τους πιο γνωστούς εναλλακτικούς τύπους κυκλικών κόμβων, που εφαρμόζονται περισσότερο.



Εικόνα 2-3: Γεωμετρική Διάταξη Σπειροειδών Κυκλικών Κόμβων (Turbo Roundabouts) [Πηγή: Silva 2013]



Εικόνα 2-4: Κυκλικός Κόμβος Τύπου «Λουλούδι» (Flower Roundabout) [Πηγή: Tollazi 2011]

2.3.2. Βασικά Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού Κυκλικών Κόμβων

Παρακάτω (Πίνακας 2-1) συνοψίζονται τα βασικά στοιχεία σχεδιασμού «μικρών», «τυπικών» κυκλικών κόμβων και κυκλικών κόμβων πολλαπλών λωρίδων βάσει των Αμερικάνικων [10] και των Γερμανικών Οδηγιών [5].

Πίνακας 2-1: Βασικά Στοιχεία Σχεδιασμού όλων των Τύπων Κυκλικών Κόμβων

Γεωμετρικά Στοιχεία Σχεδιασμού	«Μικροί» Κυκλικοί Κόμβοι		«Τυπικοί» 1 Λωρίδας Κυκλικοί Κόμβοι		2+ Λωρίδων Κυκλοφορίας	
	NCHRP (2010)	FGSV (2006)	NCHRP (2010)	FGSV (2006)	NCHRP (2010)	FGSV (2006)
Μέση Λειτουργική Ταχύτητα (km/h)	<50	<50	<50	<50	<50	<50
Κεντρική Νησίδα	πλήρως υπερβατή		υπερυψωμένη		υπερυψωμένη	
Υπερβατή Ζώνη Ομόκεντρα της Κεντρικής Νησίδας	όχι		ναι	ναι (Αστικοί) όχι (Υπεραστικοί)	ναι	ναι (Αστικοί) όχι (Υπεραστικοί)
Διάμετρος Κόμβου (m) *	13-27	13-24	27-55	26-50	46-90	40-60
Εύρος Οδοστρώματος Κόμβου (m) *	4,2-5,5	4,5-6,0	≤6,5	6,0-8,0	8,5-9,8 (2 λωρίδων) 12,8-14,6 (3 λωρίδων)	8,0-10,0
Μέση Ημερήσια Κυκλοφορίας (ΜΗΚ) (οχ/ημέρα) **	≤15.000	≤20.000	≤25.000	≤25.000	≤45.000	≤32.000
Λωρίδες Εισόδου	1	1	1	1	2+	1 ή 2
Λωρίδες Εξόδου	1	1	1	1	2+	1
Αστικός - Υπεραστικός	Αστικός		Αστικός - Υπεραστικός		Αστικός - Υπεραστικός	Υπεραστικός (κυρίως)
* Η Διάμετρος και το Εύρος δεν περιλαμβάνουν το πλάτος των λωρίδων καθοδήγησης						
** Η ΜΗΚ αναφέρεται σε μη σηματοδοτούμενο κόμβο						

Όπως γίνεται αντιληπτό οι Γερμανικές Οδηγίες σχεδιασμού είναι πιο «συντηρητικές» ως προς τη διάμετρο του κυκλικού κόμβου και τον αριθμό των λωρίδων εισόδου και εξόδου συγκριτικά με τις Αμερικάνικες, διότι λαμβάνουν περισσότερους περιορισμούς στον χώρο. Από την άλλη οι Αμερικάνικες Οδηγίες εστιάζουν περισσότερο στη λειτουργική ανάλυση των κυκλικών κόμβων. Στην Ελλάδα εφαρμόζονται κυρίως οι Γερμανικές, όσον αφορά τον σχεδιασμό των κυκλικών κόμβων, γιατί ταιριάζουν περισσότερο σε χωροταξικά θέματα, σε αντίθεση με τις Αμερικάνικες, οι οποίες κατά τα ελληνικά πρότυπα υπερδιαστασιολογούν. Ωστόσο, όσον αφορά τη λειτουργική τους ανάλυση, γενικά εφαρμόζονται οι αντίστοιχες Αμερικάνικες Οδηγίες.

Όσον αφορά τις επικλίσεις του κυκλικού οδοστρώματος λόγω των χαμηλών ταχυτήτων, που επικρατούν πάνω σε αυτόν και για να επιτυγχάνεται η απορροή των ομβρίων βάσει των Αμερικάνικων και Γερμανικών Οδηγιών εφαρμόζεται αρνητική επίκλιση ίση με -2,0% και -2,5% αντίστοιχα. Η περιοχή στην εσωτερική οριογραμμή του κυκλικού δακτυλίου ομόκεντρα της κεντρικής νησίδας συνηθίζεται να είναι υπερβατή για την εξυπηρέτηση των Βαρέων Οχημάτων (ΒΟ), επί της οποίας εφαρμόζονται όπως και στο κυκλικό οδόστρωμα αρνητικές επικλίσεις. Σύμφωνα με τις Γερμανικές Οδηγίες η υπερβατή ζώνη συνίσταται να τοποθετείται σε «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους (single-lane roundabouts) σε αστικό περιβάλλον. Επιπλέον, η υπερβατή αυτή ζώνη υπερυψώνεται κατά 3-7 cm ως προς το εύρος του οδοστρώματος και έχει πλάτος μικρότερο από το 1/3 αυτού.

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 2-2 & Πίνακας 2-3) φαίνονται τα απαραίτητα γεωμετρικά στοιχεία σχεδιασμού της περιοχής εισόδου και της περιοχής εξόδου αντίστοιχα για όλα τα είδη των κυκλικών κόμβων. Για κάθε περιοχή αυτά τα γεωμετρικά στοιχεία είναι το εύρος οδοστρώματος και οι ακτίνες του κυκλικού κόμβου.

Πίνακας 2-2: Εύρος Οδοστρώματος (m) & Ακτίνες Εισόδου (m) των Κυκλικών Κόμβων

Γεωμετρικά Στοιχεία Σχεδιασμού Εισόδου	Εύρος Οδοστρώματος Εισόδου (m)		Ακτίνες Εισόδου (m)	
	NCHRP (2010)	FGSV (2006)	NCHRP (2010)	FGSV (2006)
«Μικρός» - «Τυπικός» 1 Λωρίδας Κυκλικός Κόμβος	4,20-5,50	3,25-3,75 (αστικός)	15-30	8-10 (μικρός)
		3,50-4,00 (υπεραστικός)		10-14 (αστικός)
				14-16 (υπεραστικός)
2+ Λωρίδων Κυκλικοί Κόμβοι	3,70-4,60	3,25-3,75 (αστικός)	ακολουθία R=(20-45)	12-16 αστικός)
		3,50-4,00 (υπεραστικός)	μετά R=∞ ή R>45	14-16 (υπεραστικός)
* Στις Γερμανικές Οδηγίες ο αριθμός των λωρίδων εισόδου είναι μέχρι 2				
** Το εύρος οδοστρώματος δεν περιλαμβάνει το πλάτος των λωρίδων καθοδήγησης				

Πίνακας 2-3: Εύρος Οδοστρώματος (m) & Ακτίνες Εξόδου (m) των Κυκλικών Κόμβων

Γεωμετρικά Στοιχεία Σχεδιασμού Εξόδου	Εύρος Οδοστρώματος Εξόδου (m)		Ακτίνες Εξόδου (m)	
	NCHRP (2010)	FGSV (2006)	NCHRP (2010)	FGSV (2006)
«Μικρός» - «Τυπικός» 1 Λωρίδας Κυκλικός Κόμβος	4,20-5,50	3,50-4,00 (αστικός)	30-60 ή R≈250	8-10 (μικρός)
		3,75-4,50 (υπεραστικός)		12-16 (αστικός)
				16-18 (υπεραστικός)
2+ Λωρίδων Κυκλικοί Κόμβοι	3,70-4,60	3,50-4,00 (αστικός)	μεγαλύτερες από αντίστοιχες εισόδου	16-18
		3,75-4,50 (υπεραστικός)		
* Στις Γερμανικές Οδηγίες ο αριθμός των λωρίδων εισόδου είναι μέχρι 2				
** Το εύρος οδοστρώματος δεν περιλαμβάνει το πλάτος των λωρίδων καθοδήγησης				

Όπως γίνεται εμφανές κατά τον σχεδιασμό των εισόδων και εξόδων σε όλα τα είδη των κυκλικών κόμβων οι Γερμανικές Οδηγίες ορίζουν πιο «συντηρητικές» τιμές τόσο στα εύρη οδοστρώματος όσο και στις ακτίνες συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές, που ορίζουν οι Αμερικάνικες Οδηγίες. Γενικά, όμως, ισχύει βάσει και των δύο οδηγιών, ότι στην περιοχή εξόδου πρέπει να εφαρμόζονται τόξα μικρής καμπυλότητας, ώστε να ευνοείται η αυξημένη ταχύτητα των οχημάτων κατά την αποχώρησή τους από τον κυκλικό κόμβο. Η εφαρμογή αυτών των τόξων πρέπει να αντιμετωπίζεται με προσοχή όταν υπάρχουν διαβάσεις πεζών – ποδηλάτων, προκειμένου οι ταχύτητες εξόδου των οχημάτων να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα.

Όσον αφορά τις κατευθυντήριες – διαχωριστικές νησίδες, που πρέπει να τοποθετούνται στους κυκλικούς κόμβους, οι οδηγίες ορίζουν τις παρακάτω τιμές για κάθε τύπο κυκλικού κόμβου, που φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 2-4).

Πίνακας 2-4: Κατευθυντήριες – Διαχωριστικές Νησίδες των Κυκλικών Κόμβων

Κατευθυντήριες - Διαχωριστικές Νησίδες	Τύποι νησίδων		Εύρος νησίδων (m)		Μήκος σχεδιασμού νησίδων (m)
	NCHRP (2010)	FGSV (2006)	NCHRP (2010)	FGSV (2006)	NCHRP (2010)
«Μικρός» - «Τυπικός» 1 Λωρίδας Κυκλικός Κόμβος	υποχρεωτικά υπερυψωμένες ή με διαγράμμιση	προαιρετικά	ελάχιστη επιφάνεια 4,50 τ.μ.	≥ 2,50 (σε διαβάσεις πεζών & ποδηλάτων)	ελάχιστο μήκος 15 m
				≥ 1,60 (σε κάθε άλλη περίπτωση)	προτεινόμενο 30 m
2+ Λωρίδων Κυκλικοί Κόμβοι	υποχρεωτικά υπερυψωμένες	υποχρεωτικά υπερυψωμένες ή με διαγράμμιση	ελάχιστο εύρος 1,80 m	≥ 2,50 (σε διαβάσεις πεζών & ποδηλάτων)	ελάχιστο μήκος 15 m
				≥ 1,60 (σε κάθε άλλη περίπτωση)	προτεινόμενο 30 m

2.3.3. Ιεράρχηση των Κυκλικών Κόμβων

Σύμφωνα με μία έρευνα του Γερμανού καθηγητή Brilon Werner [3] η ιεράρχηση τοποθέτησης κυκλικών κόμβων, που θα πρέπει να ακολουθείται βάσει του μεγέθους τους, είναι η εξής:

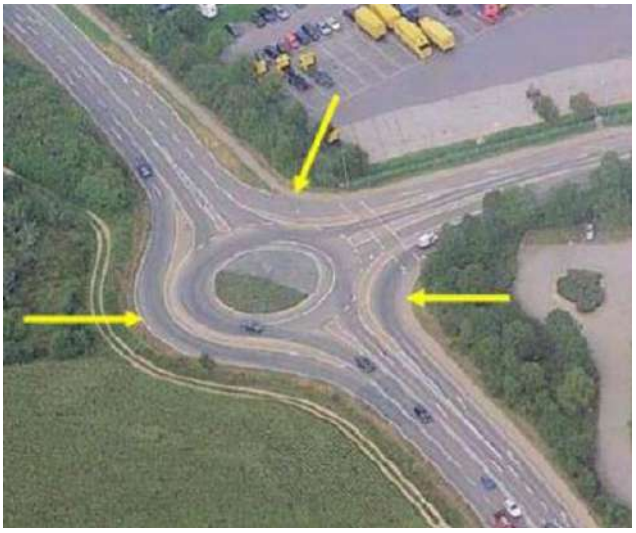
- Εάν η χωρητικότητα του κυκλικού κόμβου το επιτρέπει, μόνο οι «τυπικοί» κυκλικοί κόμβοι (single-lane roundabouts) πρέπει να εφαρμόζονται.
- Εάν οι «τυπικοί» κυκλικοί κόμβοι (single-lane roundabouts) δεν ικανοποιούν την απαιτούμενη χωρητικότητα, πρέπει να εφαρμόζονται διευρύνσεις με την παρακάτω σειρά. Οποιαδήποτε μη αναγκαία διεύρυνση πρέπει να αποφευχθεί για λόγους ασφαλείας:
  - δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες (right-turn bypass lanes)
  - συμπαγής κυκλικός δακτύλιος δύο λωρίδων με μονή λωρίδα εισόδου
  - δύο λωρίδες εισόδου, όπου είναι αναγκαίο

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται, ότι η εφαρμογή των δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων αποτελεί την πρώτη αποτελεσματική λύση, εάν οι «τυπικοί» κυκλικοί κόμβοι δεν ικανοποιούν την προσδοκώμενη χωρητικότητα, αποτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την αναβάθμισή τους σε κυκλικούς κόμβους δύο λωρίδων. Με αυτόν τον τρόπο παρατείνεται η ζωή ενός «τυπικού» κυκλικού κόμβου, προάγοντας έτσι τα θετικά χαρακτηριστικά του που τον καθιστούν πιο επιθυμητό από έναν αντίστοιχο κυκλικό κόμβο πολλαπλών λωρίδων. Κάποια από αυτά είναι η μεγαλύτερη απόδοσή του σε ασφάλεια λόγω του μικρότερου μεγέθους του και οι χαμηλότερες ταχύτητες, που επικρατούν σε αυτόν.

2.4. Οδηγίες για τις παρακαμπτήριες λωρίδες

Αφού πραγματοποιήθηκε παραπάνω μία γενική ανάλυση των βασικών στοιχείων των κυκλικών κόμβων, κρίθηκε ορθό να συμβεί κάτι αντίστοιχο και για τον κύριο πυρήνα αυτής της Διπλωματικής, δηλαδή τις παρακαμπτήριες λωρίδες. Στο υποκεφάλαιο αυτό γίνεται μία πρωταρχική ανάλυση των όσων ορίζονται από τις διεθνείς οδηγίες (Αμερικάνικες & Γερμανικές) για τις παρακαμπτήριες λωρίδες, σκοπός της οποίας είναι η βαθύτερη κατανόηση των βασικότερων εννοιών γύρω από αυτό το θέμα.

Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 1.1. οι παρακαμπτήριες λωρίδες (bypass/slip lanes) μπορεί να είναι είτε δεξιόστροφες (right-turn bypass lanes) είτε ευθείες (straight bypass lanes). **Οι δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες** τοποθετούνται σε όλους τους τύπους κυκλικών κόμβων, ενώ οι ευθείες μόνο στους αντίστοιχους τύπους των τρισκελών διατάξεων, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-5. Επειδή, σε όλη τη διάρκεια της εργασίας θα μελετηθούν **αποκλειστικά τετρασκελείς κυκλικοί κόμβοι**, η οποιαδήποτε αναφορά, που θα γίνεται παρακάτω σε παρακαμπτήρια λωρίδα, θα ληφθεί εφεξής δεδομένο ότι απευθύνεται **στις δεξιόστροφες**.



Εικόνα 2-5: Τρισκελής Υπεραστικός Κυκλικός Κόμβος με τρεις Παρακαμπτήριες Λωρίδες (δύο Δεξιόστροφες και μία Ευθεία) [Πηγή: Μαυρομάτης 2020]

Βασικός σκοπός των παρακαμπτήριων λωρίδων είναι να χρησιμοποιηθεί ο διαθέσιμος, υπολειπόμενος χώρος του κυκλικού κόμβου επαρκώς, προκειμένου να αυξηθεί το επίπεδο εξυπηρέτησής του (Level Of Service) (LOS) και η χωρητικότητα/κυκλοφοριακή του ικανότητα (capacity) και να μειωθεί η καθυστέρηση των οχημάτων και του μήκους ουράς (queue length), που αυτά δημιουργούν.

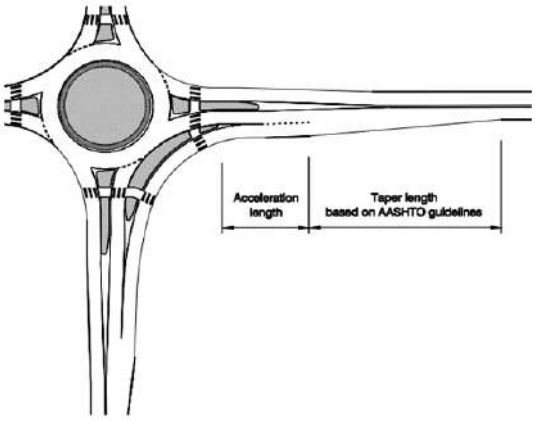
2.4.1. Αμερικάνικες Οδηγίες

Σύμφωνα με τις Αμερικάνικες Οδηγίες (NCHRP 2010) [10] μία δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα πρέπει να εφαρμόζεται μόνο όταν χρειάζεται, ιδίως σε αστικές περιοχές στις οποίες υπάρχει υψηλή δραστηριότητα ποδηλάτων και πεζών. Οι είσοδοι και οι έξοδοι των δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων μπορούν να αυξήσουν τις εμπλοκές μεταξύ των ποδηλάτων/πεζών και των οχημάτων, που εξέρχονται από τη λωρίδα και συγχωνεύονται με τη ροή εξόδου του επόμενου κλάδου.

Οι Αμερικάνικες Οδηγίες ορίζουν ότι οι δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες (right-turn bypass/slip lanes) είναι λωρίδες που εξυπηρετούν αποκλειστικά δεξιές στροφές και δεν μοιράζονται την ίδια γραμμή εισόδου με τις λωρίδες πρόσβασης, που προορίζονται για ευθείες και αριστερόστροφες κινήσεις μέσω του κυκλικού δακτυλίου. Οι λωρίδες αυτές είναι πιο επωφελείς όταν η ζήτηση σε κάποια πρόσβαση του κυκλικού κόμβου υπερβεί τη χωρητικότητά της και όταν ένα σημαντικό ποσοστό του φόρτου της στρίβει δεξιά. Επιπλέον, συνίσταται η εφαρμογή τους και σε περιπτώσεις όπου η γεωμετρία των κυκλικών κόμβων δεν ευνοεί την πραγματοποίηση δεξιών στροφών εντός του κυκλικού δακτυλίου από Βαρέα Οχήματα (ΒΟ).

Βάσει των οδηγιών αυτών διακρίνονται δύο τύποι δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων, που χρησιμοποιούνται σε όλους τους κυκλικούς κόμβους και είναι οι εξής:

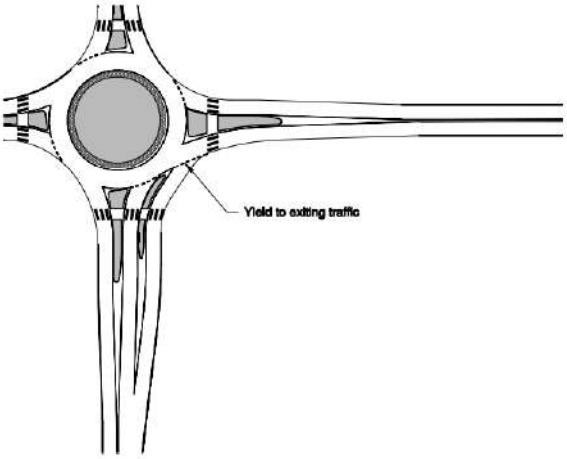
- <u>Δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής με λωρίδα επιτάχυνσης (Free-Flow/Full Bypass Lane)</u>
  Αυτός ο τύπος παρακαμπτήριας λωρίδας εφαρμόζεται όταν είναι επιθυμητό η δεξιά στρεφόμενη κυκλοφορία να συγχωνεύεται με μορφή λωρίδας επιτάχυνσης με την ροή εξόδου του επόμενου κλάδου. Με αυτόν τον τρόπο, ένα κομμάτι της παρακαμπτήριας λωρίδας δημιουργείται παράλληλα στον οδικό άξονα εξόδου του επόμενου κλάδου της και στη συνέχεια ενσωματώνεται στην κύρια ροή εξόδου του. Το μήκος, στο οποίο εκτείνεται παράλληλα, θα πρέπει να είναι αρκετό για να είναι εφικτό τα εξερχόμενα από τη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα οχήματα και τα εξερχόμενα οχήματα από τον γειτονικό κλάδο να επιταχύνουν ώστε να επιτύχουν συγκρίσιμες ταχύτητες. Μετά από αυτό το μήκος η αποκλειστική λωρίδα θα πρέπει να αρχίζει να ενσωματώνεται σταδιακά με τη κύρια ροή εξόδου του κλάδου αυτού βάσει των οδηγιών AASHTO, για να επιτευχθεί η κατάλληλη ταχύτητα σχεδιασμού. Όλα όσα αναφέρθηκαν, απεικονίζονται στην Εικόνα 2-6.



Εικόνα 2-6: Τυπική Διάταξη Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας Ελεύθερης Ροής (Free Flow Right-Turn Bypass Lane) [Πηγή: NCHRP 2010]

- <u>«Μερική» Δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP (Stop Slip Lane) ή παραχώρησης προτεραιότητας (Yield Slip Lane) – (Partial Bypass Lane)</u>
  Σε αυτόν τον τύπο παρακαμπτήριας λωρίδας η δεξιά στρεφόμενη κυκλοφορία της τερματίζει στην περιοχή εξόδου του επόμενού της κλάδου και τα εξερχόμενα από την παρακαμπτήρια λωρίδα οχήματα πρέπει είτε να πραγματοποιήσουν υποχρεωτική διακοπή πορείας STOP (stop slip lane) είτε βάσει κατάλληλης σήμανσης να παραχωρήσουν την προτεραιότητά τους (yield slip lane) στα εξερχόμενα από τον

γειτονικό κλάδο οχήματα. Όταν η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα συγχωνεύεται με αυτόν τον τρόπο με τον επόμενο κλάδο, τότε αποκαλείται «μερική» αποκλειστική λωρίδα δεξιάς στροφής (partial bypass lane). Στην Εικόνα 2-7 φαίνεται η διάταξη δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας με σήμανση παραχώρησης προτεραιότητας στην έξοδό της (yield slip lane).



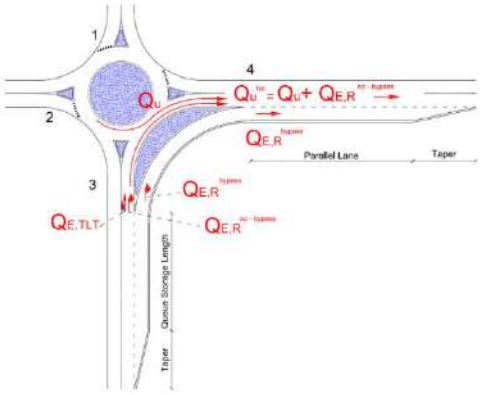
Εικόνα 2-7: Τυπική Διάταξη Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας με Σήμανση Παραχώρησης Προτεραιότητας (Yield Slip Lane) [Πηγή: NCHRP 2010]

Οι Αμερικάνικες Οδηγίες έχουν διεξάγει εκτενή συσχέτιση των δύο αυτών τύπων παρακαμπτήριων λωρίδων. Συνοπτικά ισχύει ότι η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής έχει καλύτερη λειτουργική απόδοση από τον άλλο τύπο. Ωστόσο, η «μερική» δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα απαιτεί μικρότερες κατασκευαστικές επεμβάσεις και πιο σαφή καθορισμό των προτεραιοτήτων (right-of-way). Αυτό αποδίδεται στο ότι στην παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής είναι απαραίτητη η εξ ολοκλήρου δημιουργία μίας αποκλειστικής λωρίδας στην περιοχή εξόδου της, κάτι το οποίο δεν απαιτείται στον άλλο τύπο. Επίσης, λόγω της σήμανσης διακοπής πορείας (STOP) και της παραχώρησης προτεραιότητας (yield signs), που διαθέτει, καθιστά ευνοϊκότερη τη μείωση της ταχύτητας των οχημάτων κατά την έξοδό τους από αυτήν, σε αντίθεση με την παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής, όπου τα οχήματα επιταχύνουν κατά τη συγχώνευσή τους με τη ροή εξόδου του επόμενου κλάδου.

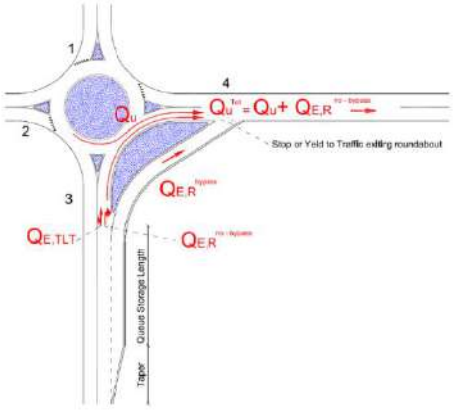
Με τη ύπαρξη σήμανσης παραχώρησης προτεραιότητας στην «μερική» παρακαμπτήρια λωρίδα προάγεται η ασφάλεια των πεζών και των ποδηλάτων, ιδίως σε αστικές περιοχές όπου η κυκλοφορία τους είναι εντονότερη. Αντιθέτως, η παρακαμπτήρια λωρίδας ελεύθερης ροής μπορεί να διαταράξει την ασφαλή πορεία των πεζών ή των ποδηλάτων, καθώς υπάρχει το ενδεχόμενο να έρθουν σε εμπλοκή στο σημείο, που συγχωνεύονται δύο ρεύματα κυκλοφορίας – αυτό που εξέρχεται από την παρακαμπτήρια λωρίδα και το άλλο που εξέρχεται από τον κυκλικό κόμβο από τον ακριβώς επόμενό της κλάδο.

Ωστόσο, οι Αμερικάνικες Οδηγίες συνιστούν όλες οι παρακαμπτήριες λωρίδες να σχεδιάζονται με μικρές τιμές ακτίνας, ώστε η καμπυλότητά τους να είναι μεγάλη και τα οχήματα να αναγκάζονται να κινούνται επί αυτών με χαμηλές ταχύτητες. Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορούν και οι δύο τύποι παρακαμπτήριων λωρίδων να αποπνέουν μία στοιχειώδη ασφάλεια στους ενδεχόμενους πεζούς και ποδηλάτες.

Στις δύο παρακάτω εικόνες απεικονίζονται ενδεικτικά οι κυκλοφοριακές ροές εισόδου, εξόδου και επερχόμενης κυκλοφορίας ενός κυκλικού κόμβου με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής και με σήμανση υποχρεωτικής διακοπής πορείας (STOP) ή παραχώρησης προτεραιότητας αντίστοιχα. Ο αριθμός 1 αντιστοιχεί στον Βόρειο κλάδο και οι υπόλοιποι αριθμοί έως το 4 αντιστοιχούν στους υπόλοιπους κλάδους με αντιωρολογιακή φορά.



(Εικόνα 2-8) Free-Flow Bypass Lane



(Εικόνα 2-9) Partial Bypass Lane

Εικόνα 2-8 & Εικόνα 2-9: Ροές Εισόδου, Εξόδου & Επερχόμενης Κυκλοφορίας ενός Κυκλικού Κόμβου με Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα Ελεύθερης Ροής (Free-Flow Bypass Lane) και με «Μερική» Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα (Partial Bypass Lane) στον Νότιο Κλάδο του [Πηγή: NCHRP 2010]

Όπως φαίνεται από τις εικόνες, οι συμβολισμοί των ροών εισόδου από τον Νότιο κλάδο, εξόδου από τον Ανατολικό και της επερχόμενης κυκλοφορίας ανάντη του Νοτίου είναι οι ίδιοι και στους δύο τύπους παρακαμπτήριας λωρίδας και αναλύονται παρακάτω:

- <u>Ροή εισόδου στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο (3):</u> Ισούται με το άθροισμα των φόρτων $Q_{E,TLT}$ και του $Q_{E,R}^{no\text{-}bypass}$. Το $Q_{E,TLT}$ είναι τα οχήματα, που εισέρχονται από τον Νότιο κλάδο (3) και κινούνται εντός του κυκλικού κόμβου είτε ευθύγραμμα είτε αριστερόστροφα και το $Q_{E,R}^{no\text{-}bypass}$ είναι η εισερχόμενη ροή στον κυκλικό κόμβο από τον ίδιο κλάδο (3), η οποία κινείται δεξιόστροφα προς τον Ανατολικό κλάδο (4) μέσω του κυκλικού δακτυλίου.
- <u>Επερχόμενη κυκλοφορία του κυκλικού κόμβου:</u> Ως επερχόμενη κυκλοφορία ορίζεται η κυκλοφορία του κυκλικού κόμβου πέριξ του κυκλικού του δακτυλίου. Συμβολίζεται με το Q_U και ισούται με το άθροισμα των ροών από το Βόρειο σκέλος (1) προς το Ανατολικό (4) ($Q_{1,4}$) και από το Δυτικό (2) προς το Ανατολικό (4) ($Q_{2,4}$) αντίστοιχα.
- <u>Ροή εξόδου του κυκλικού κόμβου από τον Ανατολικό κλάδο (4):</u> Είναι το άθροισμα των φόρτων Q_U^{Tot} και $Q_{E,R}^{bypass}$. Το Q_U^{Tot}, που είναι ο φόρτος εξόδου του ακριβώς επόμενου κλάδου της παρακαμπτήριας λωρίδας, αποτελεί **την ανταγωνιστική της ροή** και προκύπτει από το άθροισμα της επερχόμενης κυκλοφορίας Q_U και του $Q_{E,R}^{no\text{-}bypass}$. Το $Q_{E,R}^{bypass}$ είναι η εισερχόμενη ροή από τον Νότιο κλάδο (3), η οποία κατευθύνεται δεξιόστροφα προς τον Ανατολικό (4) μέσω της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2-5) παρατίθενται αναλυτικά τα στοιχεία σχεδιασμού των παρακαμπτήριων λωρίδων βάσει των Αμερικάνικων Οδηγιών.

Πίνακας 2-5: Στοιχεία Σχεδιασμού Παρακαμπτήριων Λωρίδων

Στοιχεία Σχεδιασμού Παρακαμπτήριων Λωρίδων	NCHRP (2010)
Προτεινόμενη Ταχύτητα Σχεδιασμού (km/h)	42-58
Τυπική Ακτίνα Καμπυλότητας Εισόδου (m)	60-90
Όχημα σχεδιασμού	WB-15 (WB-50)
Πλάτος λωρίδας (m)	3,6
Τύπος εξόδου	Παραχώρησης προτεραιότητας (yield sign) ή συνεχόμενης ροής (free-flow)
Τυπικό κατώφλι του κυκλοφοριακού φόρτου της παρακαμπτήριας λωρίδας (οχ/h)	400 - 600 (για τετρασκελείς κυκλικούς κόμβους)
Τοποθεσία Διάβασης Πεζών	Προτείνεται να αποφεύγεται

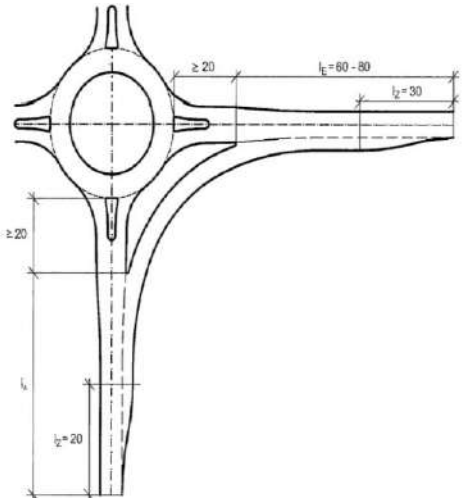
Η ακτίνα της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας δεν πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ακτίνα του «ταχύτερου μονοπατιού εισόδου», που παρέχεται από τον κυκλικό κόμβο. Ως «ταχύτερη διαδρομή» ορίζεται η ταχύτερη πορεία, που ακολουθεί ένα όχημα στον κυκλικό κόμβο κατά την είσοδό του έως και την έξοδό του από αυτόν διερχόμενο μέσω του κυκλικού δακτυλίου σε συνθήκες ελεύθερης ροής και αγνοώντας τις οριογραμμές των λωρίδων. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι οι ταχύτητες των οχημάτων της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας είναι παρόμοιες με τις ταχύτητες των οχημάτων της ανταγωνιστικής της ροής, δηλαδή της ροής εξόδου του ακριβώς επόμενού της κλάδου και ότι η συγχώνευση των δύο αυτών ρευμάτων γίνεται με ασφαλή τρόπο. Επίσης, μία μικρή ακτίνα είναι περισσότερο ασφαλής για τους πεζούς, που διασχίζουν τη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα.

Γενικά, βάσει των Αμερικάνικων Οδηγιών για να προσδιοριστεί εάν η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί σε έναν κυκλικό κόμβο, πρέπει να πραγματοποιηθούν ειδικοί υπολογισμοί χωρητικοτήτων και καθυστερήσεων. Ωστόσο δεν έχει οριστεί συγκεκριμένη σχέση, που να προσδιορίζει το πότε ακριβώς χρειάζεται να τοποθετηθεί. Συνεπώς, από τις οδηγίες και μόνο έχει αρχίσει να φαίνεται **το βιβλιογραφικό - ερευνητικό «κενό»**, που υπάρχει στο θέμα των παρακαμπτήριων λωρίδων.

2.4.2. Γερμανικές Οδηγίες

Η θεματολογία των δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων υπάρχει και στις Γερμανικές Οδηγίες, αλλά όχι σε τόσο διευρυμένη έκταση όσο στις Αμερικάνικες. Βάσει των Γερμανικών Οδηγιών (FGSV, 2006) [5] οι δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες δεν χωρίζονται σε τύπους ως προς τον έλεγχο των εξερχόμενων από αυτές οχημάτων κατά τη συγχώνευσή τους με τη ροή εξόδου του επόμενου κλάδου όπως στις Αμερικάνικες. Στις οδηγίες αυτές οι παρακαμπτήριες λωρίδες παρουσιάζονται μόνο ως παρακαμπτήριες λωρίδες ελεύθερης ροής (free-flow bypass lanes).

Οι Γερμανικές Οδηγίες αναφέρουν ελαφρώς το θεωρητικό υπόβαθρο, που υπάρχει και στις Αμερικάνικες Οδηγίες πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο, με τη μοναδική διαφορά να εντοπίζεται στις περισσότερες σχεδιαστικές παραμέτρους, που παραθέτουν. Πιο συγκεκριμένα, οι Γερμανικές Οδηγίες ορίζουν το πλάτος της παρακαμπτήριας λωρίδας να είναι ίσο με 5,50 m με εκατέρωθεν λωρίδες καθοδήγησης πλάτους 0,25 m, ενώ στην περιοχή επιτάχυνσης (l_E) – επιβράδυνσης (l_A) το πλάτος της να είναι 3,50 m με εξωτερική λωρίδα καθοδήγησης πλάτους 0,50 m. Το μήκος επιβράδυνσης (l_A) προκύπτει βάσει του αντίστοιχου τύπου δεξιάς στροφής εξόδου. Στην Εικόνα 2-10 φαίνονται συνοπτικά κάποιες άλλες απαραίτητες συναρμογές για τις παρακαμπτήριες λωρίδες σύμφωνα με τις Γερμανικές Οδηγίες. Ως l_Z έχει θεωρηθεί το μήκος διεύρυνσής της.



Εικόνα 2-10: Απαραίτητες Σχεδιαστικές Συναρμογές για τις Δεξιόστροφες Παρακαμπτήριες Λωρίδες [Πηγή: FGSV 2006]

2.5. Σχετικές έρευνες

Διεθνώς έχουν συγγραφεί πολλές έρευνες σχετικές με τις παρακαμπτήριες λωρίδες, οι οποίες στηρίζονται σε πειραματικές εκτιμήσεις και υπολογιστικές μεθόδους. Η βάση των υπολογιστικών μεθόδων πολλών από αυτών των ερευνών στηρίχτηκε σε μαθηματικές σχέσεις σχετικές με τη λειτουργική ανάλυση των παρακαμπτήριων λωρίδων, που υπάρχουν στις Αμερικάνικες Οδηγίες, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει ότι δεν έχουν προκύψει πολλές επίσημες μαθηματικές σχέσεις για το εξεταζόμενο αντικείμενο πέραν από αυτές των οδηγιών.

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες από τις βασικότερες έρευνες. Σε καθεμία γίνεται μία συνοπτική αναφορά στον κεντρικό της στόχο, στη μεθοδολογία, που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή της και στα βασικά συμπεράσματα, στα οποία κατέληξε. Με τη βοήθεια αυτών των ερευνών προσδιορίστηκε ο ακριβής στόχος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας.

2.5.1. Right-turn Bypass Lanes at Roundabouts: Geometric Schemes and Functional Analysis [9]

Η συγκεκριμένη έρευνα αποτελεί ένα επιστημονικό άρθρο, που δημοσιεύτηκε από τους Mauro Raffaele και Guerrieri Marco, οι οποίοι είναι καθηγητές του Πανεπιστημίου Trento της Ιταλίας και έχουν δημοσιεύσει κατά καιρούς αρκετές έρευνες σχετικές με τις παρακαμπτήριες λωρίδες.

Στόχος:

Η έρευνα παρουσιάζει ένα μοντέλο εκτίμησης της χωρητικότητας, των μηκών ουράς, των καθυστερήσεων και του επιπέδου εξυπηρέτησης (LOS) των κυκλικών κόμβων, που είναι εξοπλισμένοι με δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες, λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση της γεωμετρίας και του τύπου των παρακαμπτήριων λωρίδων (stop, yield & free-flow slip lane), καθώς και τους φόρτους σε οχήματα και πεζούς. Στη συγκεκριμένη έρευνα μελετήθηκαν αποκλειστικά τετρασκελείς κυκλικοί κόμβοι και μόνο στους «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους (single-lane roundabouts) θεωρήθηκε ότι θα τοποθετηθούν δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες.

Μεθοδολογία:

Οι γεωμετρικές διατάξεις των κυκλικών κόμβων, που αναλύθηκαν, ήταν οι εξής:

1) «Τυπικός» κυκλικός κόμβος (single-lane roundabout) με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα με σήμανση υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP (stop slip lane) σε κάθε κλάδο του
2) «Τυπικός» κυκλικός κόμβος (single-lane roundabout) με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα με σήμανση παραχώρησης προτεραιότητας (yield slip lane) σε κάθε κλάδο του
3) «Τυπικός» κυκλικός κόμβος (single-lane roundabout) με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής με λωρίδα επιτάχυνσης (free flow slip lane) σε κάθε κλάδο του
4) «Τυπικός» κυκλικός κόμβος με μία λωρίδα εισόδου και μία λωρίδα κυκλοφορίας επί του δακτυλίου (1+1)
5) Συμβατικός κυκλικός κόμβος με μία λωρίδα εισόδου και δύο λωρίδες κυκλοφορίας επί του δακτυλίου (1+2)
6) Συμβατικός κυκλικός κόμβος με δύο λωρίδες εισόδου και δύο λωρίδες κυκλοφορίας επί του δακτυλίου (2+2)

Επιπλέον, για να προσδιοριστούν οι χωρητικότητες των παραπάνω γεωμετρικών διατάξεων χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι τύποι:

- Η χωρητικότητα της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ($c_{E,R}$) με σήμανση υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP (stop slip lane) σε «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους υπολογίστηκε από τη θεωρία ουράς (queuing theory), καθώς δεν υπάρχει μαθηματική σχέση από τις επίσημες οδηγίες για τον προσδιορισμό της. Από τη σχέση αυτή, η οποία φαίνεται παρακάτω (Εξίσωση 2.5.1-1), προκύπτει ότι η χωρητικότητα αυτού του τύπου δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας εκφράζεται συναρτήσει της ανταγωνιστικής του ροής, που είναι ο φόρτος εξόδου του ακριβώς επόμενού του κλάδου (Q_U^{Tot}).

$$c_{E,R} = 1.231{,}4e^{[(-1{,}2\cdot 10^{-3})\cdot Q_U^{Tot}]} \quad (R^2=0{,}91)$$

Εξίσωση 2.5.1-1

- Η χωρητικότητα της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ($c_{E,R}$) με σήμανση παραχώρησης προτεραιότητας (yield slip lane) σε «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους προέκυψε από τον ακόλουθο τύπο (Εξίσωση 2.5.1-2), που έχει οριστεί από τις Αμερικάνικες Οδηγίες [10].

$$c_{E,R} = 1.130e^{[(-1,0\cdot 10^{-3})\cdot Q_U{}^{Tot}]}$$

Εξίσωση 2.5.1-2

- Η χωρητικότητα της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής με λωρίδα επιτάχυνσης (free-flow slip lane) σε «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους προέκυψε από τον ακόλουθη σχέση (Εξίσωση 2.5.1-3), η οποία έχει οριστεί από μία έρευνα πολλών καθηγητών, βασικότερος εκ των οποίων είναι ο Πολωνός καθηγητής Marian Tracz, ο οποίος την είχε επιβεβαιώσει και με ατομική του έρευνα (Tracz 2008, Tracz, Chodur & Ostrowsk 2011). Τόσο σε αυτήν την έρευνα όσο και σε πολλές άλλες, οι οποίες έχουν ως κεντρικό πυρήνα τις παρακαμπτήριες λωρίδες, έχει χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη σχέση για τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας των παρακαμπτήριων λωρίδων ελεύθερης ροής, καθώς δεν υπάρχει κάποια άλλη αντίστοιχη μαθηματική σχέση επίσημα ορισμένη από τις διεθνείς οδηγίες.

$$c_{E,R} = 1.250e^{[(-0,7\cdot 10^{-3})\cdot Q_U{}^{Tot}]}$$

Εξίσωση 2.5.1-3

- Όπως γίνεται αντιληπτό, η κυκλοφοριακή ικανότητα όλων των τύπων των δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων ($c_{E,R}$) εξαρτάται μόνο από την ανταγωνιστική τους ροή ($Q_U{}^{Tot}$). Επιπλέον, βάσει των ανωτέρω εξισώσεων (Εξίσωση 2.5.1-1, Εξίσωση 2.5.1-2 & Εξίσωση 2.5.1-3) συμπεραίνεται ότι η αύξηση της ανταγωνιστικής αυτής ροής προκαλεί μείωση της κυκλοφοριακής ικανότητας της παρακαμπτήριας λωρίδας.
- Η χωρητικότητα της λωρίδας πρόσβασης (c_E) σε «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους με μία λωρίδα εισόδου και μία λωρίδα κυκλοφορίας επί του δακτυλίου προέκυψε από την ακόλουθη σχέση (Εξίσωση 2.5.1-4), η οποία έχει οριστεί από τις Αμερικάνικες Οδηγίες [10]. Η συγκεκριμένη χωρητικότητα εκφράζεται συναρτήσει του φόρτου της επερχόμενης κυκλοφορίας του κυκλικού κόμβου (Q_C).

$$c_E = 1.130e^{[(-1,0\cdot 10^{-3})\cdot Q_C]}$$

Εξίσωση 2.5.1-4

- Η χωρητικότητα ανά λωρίδα πρόσβασης (c_E) σε συμβατικούς κυκλικούς κόμβους με μία λωρίδα εισόδου και δύο λωρίδες κυκλοφορίας επί του δακτυλίου προέκυψε από την ακόλουθη σχέση (Εξίσωση 2.5.1-5), όπου όπως και η προηγούμενη έτσι και αυτή έχει οριστεί από τις Αμερικάνικες Οδηγίες [10]:

$$c_E = 1.130e^{[(-0,7\cdot 10^{-3})\cdot Q_C]}$$

Εξίσωση 2.5.1-5

- Η χωρητικότητα ανά λωρίδα πρόσβασης σε συμβατικούς κυκλικούς κόμβους με δύο λωρίδες εισόδου και δύο λωρίδες επερχόμενης κυκλοφορίας επί του δακτυλίου εκφράζεται από τις ακόλουθες σχέσεις (Εξίσωση 2.5.1-6 & Εξίσωση 2.5.1-7), οι οποίες έχουν οριστεί από τις Αμερικάνικες Οδηγίες και η μία αφορά την κυκλοφοριακή

ικανότητα της δεξιάς ($c_{E,R}$) και η άλλη της αριστερής ($c_{E,TLT}$) λωρίδα πρόσβασης αντίστοιχα.

$$c_{E,R} = 1.130e^{[(-0,7\cdot 10^{-3})\cdot Q_C]}$$

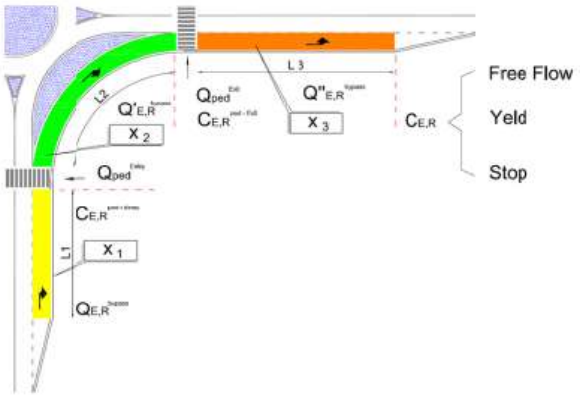
Εξίσωση 2.5.1-6

$$c_{E,TLT} = 1.130e^{[(-0,75\cdot 10^{-3})\cdot Q_C]}$$

Εξίσωση 2.5.1-7

- Όπως γίνεται αντιληπτό, η κυκλοφοριακή ικανότητα των λωρίδων πρόσβασης (c_E) σε όλους τους τύπους κυκλικού κόμβου εξαρτάται μόνο από την επερχόμενη κυκλοφορία (Q_c). Επιπλέον, βάσει των ανωτέρω εξισώσεων (Εξίσωση 2.5.1-4, Εξίσωση 2.5.1-5, Εξίσωση 2.5.1-6 & Εξίσωση 2.5.1-7) συμπεραίνεται ότι η αύξηση του φόρτου της επερχόμενης κυκλοφορίας προκαλεί μείωση της κυκλοφοριακής ικανότητας των λωρίδων πρόσβασης.

Η κυκλοφοριακή ικανότητα και η καθυστέρηση όλων των τύπων των κυκλικών κόμβων με και χωρίς παρακαμπτήρια λωρίδα, λαμβάνοντας υπόψιν όμως την επίδραση του φόρτου των πεζών, υπολογίστηκε από σχέσεις, που υπάρχουν αναλυτικά στις Αμερικάνικες Οδηγίες ή από μαθηματικές σχέσεις, που έχουν προκύψει από άλλες παρεμφερείς έρευνες. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται στην Εικόνα 2-11 οι διαβάσεις των πεζών, που θεωρήθηκαν ότι υπάρχουν, στο κομμάτι της παρακαμπτήριας λωρίδας στην έρευνα.



Εικόνα 2-11: Διαβάσεις των Πεζών στην Περιοχή της Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας [Πηγή: Mauro & Guerrieri 2012]

Κατά την εκπόνηση της έρευνας, για να βρεθούν οι κυκλοφοριακές συνθήκες, που ευνοούν την ύπαρξη δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων στους κυκλικούς κόμβους, διεξάχθηκε ένας μεγάλος αριθμός αναλύσεων θεωρώντας κάθε φορά ως κυκλοφοριακές συνθήκες διάφορους Πίνακες Προέλευσης-Προορισμού (Πίνακες Π-Π) από τον ένα κλάδο του κυκλικού κόμβου στον άλλον και διανύσματα φόρτων οχημάτων και πεζών τόσο σε συμβατικούς κυκλικούς κόμβους όσο και σε κυκλικούς κόμβους με δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες, για να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν οι Πίνακες Π-Π ως κυκλοφοριακά δεδομένα, είναι διότι περιγράφουν τις πιο σημαντικές καταστάσεις κυκλοφοριακής ζήτησης, που μπορούν να σχετίζονται άμεσα με τους υπό εξέταση κυκλικούς κόμβους.

Στην παρακάτω Εικόνα 2-12 φαίνονται οι έξι Πίνακες Π-Π (pi), τα τέσσερα διανύσματα φόρτων οχημάτων (Qi) και πεζών (Qpi). Πιο συγκεκριμένα, κάθε Πίνακας Π-Π pi απαρτίζεται από τέσσερις γραμμές και τέσσερις στήλες, όσοι είναι και οι κλάδοι των εξεταζόμενων

κυκλικών κόμβων. Ο αριθμός 1 αντιστοιχεί στον Βόρειο κλάδο και οι υπόλοιποι αριθμοί έως τον 4 αντιστοιχούν στους υπόλοιπους κλάδους με αντιωρολογιακή φορά. Αντίστοιχα τα διανύσματα οχημάτων (Qi) και πεζών (Qpi) φέρουν τέσσερις στήλες.

$$\rho 1 = \begin{vmatrix} 0 & 0{,}15 & 0{,}74 & 0{,}11 \\ 0{,}19 & 0 & 0{,}24 & 0{,}57 \\ 0{,}63 & 0{,}15 & 0 & 0{,}22 \\ 0{,}19 & 0{,}74 & 0{,}07 & 0 \end{vmatrix} \quad \rho 2 = \begin{vmatrix} 0 & 0{,}15 & 0{,}60 & 0{,}25 \\ 0{,}2 & 0 & 0{,}20 & ,55 \\ 0{,}60 & 0{,}25 & 0 & 0{,}15 \\ 0{,}30 & 0{,}50 & 0{,}20 & 0 \end{vmatrix}$$

$$[Q1] = [300 \quad 200 \quad 500 \quad 400]$$
$$[Q2] = [386 \quad 182 \quad 410 \quad 446]$$
$$[Q3] = [436 \quad 428 \quad 410 \quad 446]$$
$$[Q4] = [100 \quad 500 \quad 100 \quad 500]$$

$$\rho 3 = \begin{vmatrix} 0 & 0{,}15 & 0{,}70 & 0{,}15 \\ 0{,}02 & 0 & 0{,}18 & 0{,}80 \\ 0{,}70 & 0{,}15 & 0 & 0{,}15 \\ 0{,}18 & 0{,}80 & 0{,}02 & 0 \end{vmatrix} \quad \rho 4 = \begin{vmatrix} 0 & 0{,}125 & 0{,}75 & 0{,}125 \\ 0{,}375 & 0 & 0{,}375 & 0{,}25 \\ 0{,}75 & 0{,}125 & 0 & 0{,}125 \\ 0{,}375 & 0{,}25 & 0{,}375 & 0 \end{vmatrix}$$

$$[Qp\ 1] = [50 \quad 100 \quad 50 \quad 100]$$
$$[Qp\ 2] = [150 \quad 300 \quad 150 \quad 300]$$
$$[Qp\ 3] = [10 \quad 10 \quad 10 \quad 10]$$

$$\rho 5 = \begin{vmatrix} 0 & 0{,}25 & 0{,}75 & 0{,}125 \\ 0{,}125 & 0 & 0{,}625 & 0{,}25 \\ 0{,}5 & 0{,}25 & 0 & 0{,}25 \\ 0{,}125 & 0{,}25 & 0{,}625 & 0 \end{vmatrix} \quad \rho 6 = \begin{vmatrix} 0 & 0{,}7 & 0{,}2 & 0{,}1 \\ 0{,}2 & 0 & 0{,}7 & 0{,}1 \\ 0{,}1 & 0{,}3 & 0 & 0{,}6 \\ 0{,}7 & 0{,}2 & 0{,}1 & 0 \end{vmatrix}$$

Εικόνα 2-12: Διανύσματα Φόρτων Οχημάτων (Qi), Πίνακες Προέλευσης-Προορισμού (ρi) & Διανύσματα Πεζών (Qpi) της Έρευνας [Πηγή: Mauro & Guerrieri 2012]

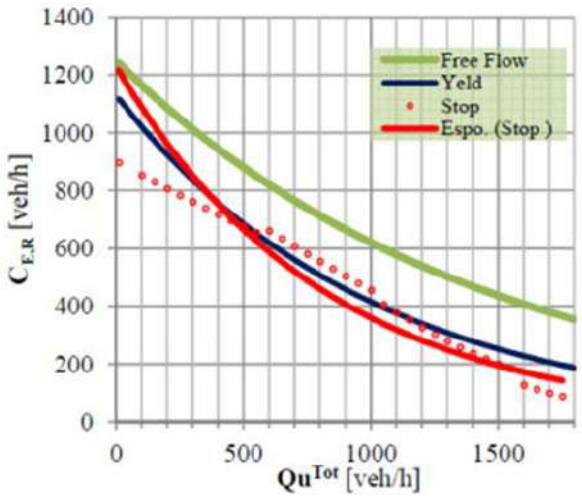
Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν έξι σενάρια, όπου στο καθένα εξεταζόταν διαφορετικός συνδυασμός Πίνακα Π-Π και διανύσματος φόρτου οχημάτων και πεζών. Για καθένα από αυτά τα σενάρια, τα οποία παρατίθενται παρακάτω, προέκυψαν διαγράμματα μέσης καθυστέρησης για τις έξι γεωμετρικές διατάξεις κυκλικών κόμβων συναρτήσει του συνολικού κυκλοφοριακού φόρτου.

- Σενάριο 1: ρ1, Q1, Qp1
- Σενάριο 2: ρ1, Q1, Qp2
- Σενάριο 3: ρ1, Q3, Qp2
- Σενάριο 4: ρ4, Q3, Qp2
- Σενάριο 5: ρ6, Q4, Qp3
- Σενάριο 6: ρ6, Q4, Qp2

Συμπεράσματα:

Στην έρευνα αυτή προέκυψαν κάποια αρχικά συμπεράσματα σχετικά με τις δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες από τις σχέσεις υπολογισμού της κυκλοφοριακής τους ικανότητας, οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, υπήρξαν οι ακόλουθες διαπιστώσεις, οι οποίες οπτικοποιήθηκαν στο παρακάτω Γράφημα 2-1:

- Η χωρητικότητα των δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων με σήμανση παραχώρησης προτεραιότητας (yield slip lane) είναι συνήθως υψηλότερη από την αντίστοιχη με σήμανση υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP (stop slip lane).
- Η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής με λωρίδα επιτάχυνσης φέρει τη μεγαλύτερη κυκλοφοριακή ικανότητα από τους άλλους τύπους δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας.



Γράφημα 2-1: Σύγκριση της Κυκλοφοριακής Ικανότητας όλων των Τύπων των Δεξιόστροφων Παρακαμπτήριων Λωρίδων ($c_{E,R}$ (veh/h) συναρτήσει της Ανταγωνιστικής τους Ροής (Q_U^{Tot} (veh/h)) [Πηγή: Mauro & Guerrieri 2012]

Επιπλέον, από τα έξι σενάρια και από τα διαγράμματα μέσης καθυστέρησής τους συναρτήσει του κυκλοφοριακού φόρτου προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής είναι εκείνη με τα περισσότερα πλεονεκτήματα από τους άλλους τύπους δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων (stop & yield slip lane). Αυτό προκύπτει και από άλλες έρευνες κυρίως του καθηγητή του πανεπιστημίου της Virginia Majed Nehad Al-Ghandour (Al-Ghandour 2012) [2].
- Στους «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους με κάθε τύπο δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας παρατηρήθηκε μία σημαντική μείωση στην υπολογιζόμενη καθυστέρησή τους υπό όλες τις κυκλοφοριακές συνθήκες σε σχέση με την αντίστοιχη καθυστέρηση των κυκλικών κόμβων με μία λωρίδα εισόδου και μία ή δύο λωρίδες επερχόμενης κυκλοφορίας δίχως παρακαμπτήρια λωρίδα.
- Όταν η συνολική πλήρως δεξιόστροφη ροή ενός κυκλικού κόμβου είναι μικρότερη από το 70% της συνολικής ροής του, τότε οι αποδόσεις των κυκλικών κόμβων με κάθε τύπο δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των κυκλικών κόμβων με δύο λωρίδες εισόδου και δύο λωρίδες επερχόμενης κυκλοφορίας αλλά χωρίς παρακαμπτήρια λωρίδα. Επίσης, οι καθυστερήσεις των κυκλικών κόμβων κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι ενδιάμεσες μεταξύ αυτών που καταγράφονται στους κυκλικούς κόμβους με μία λωρίδα εισόδου και μία ή δύο λωρίδες επερχόμενης κυκλοφορίας επί του δακτυλίου χωρίς παρακαμπτήρια λωρίδα.
- Όταν η συνολική πλήρως δεξιόστροφη ροή ενός κυκλικού κόμβου είναι ίση ή μεγαλύτερη από το 70% της συνολικής ροής του αναλόγως πάντα τον φόρτο των πεζών προτιμότεροι είναι οι κυκλικοί κόμβοι με κάθε τύπο δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας από τους υπόλοιπους τύπους κυκλικών κόμβων χωρίς παρακαμπτήρια λωρίδα λόγω των μικρότερων καθυστερήσεών τους. Ωστόσο, εάν επικρατεί μέτριος φόρτος πεζών, τότε μόνο στους κυκλικούς κόμβους με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής καταγράφονται μικρότερες καθυστερήσεις από ότι στους κυκλικούς κόμβους με δύο λωρίδες εισόδου και δύο λωρίδες επερχόμενης κυκλοφορίας χωρίς παρακαμπτήρια λωρίδα.

2.5.2. Roundabout Slip Lanes: Performance and Safety Analysis [1]

Η παρούσα έρευνα αποτελεί μία διατριβή του καθηγητή του πανεπιστημίου της Virginia Majed Nehad Al-Ghandour, η οποία εκπονήθηκε το 2011.

Στόχος:
Σκοπός της συγκεκριμένης διατριβής είναι να προσφέρει μία βαθύτερη κατανόηση στους «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους (single-lane roundabouts) με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα, παρατηρώντας την απόδοσή τους σε λειτουργία και ασφάλεια. Η λειτουργική απόδοση του κυκλικού κόμβου παρατηρήθηκε μέσω των κυκλοφοριακών του φόρτων, των μέσων καθυστερήσεων, των μηκών ουράς και του επιπέδου εξυπηρέτησής του (LOS), ενώ η ασφάλειά του μέσω των συχνοτήτων των εμπλοκών (conflict frequencies) και του φόρτου των πεζών (pedestrian traffic).
Σε όλη τη διάρκεια της διατριβής θεωρήθηκε ότι κάθε φορά στον κυκλικό κόμβο τοποθετούταν μία δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα και πάντα στον Νότιο κλάδο κατευθυνόμενη προς τον Ανατολικό. Τέλος, μελετήθηκαν όλοι οι τύποι δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας (free-flow, stop & yield slip lane).

Μεθοδολογία:
Για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά SIDRA και VISSIM. Το SIDRA είναι ένα αναλυτικό ντετερμινιστικό πακέτο λογισμικού, το οποίο χρησιμοποιείται για διασταυρώσεις και για δίκτυα και αξιολογεί τη λειτουργική απόδοση των κυκλικών κόμβων, υπολογίζοντας τη χωρητικότητα και το επίπεδο εξυπηρέτησής τους (LOS). Για τον υπολογισμό των χρόνων ενός δικτύου και για σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις όλα τα παραπάνω εκτελούνται από τον κυκλοφοριακό σχεδιασμό και από επαγγελματίες σχεδιασμού και λειτουργίας. Αντίστοιχα, το VISSIM είναι ένα γερμανικό λογισμικό, το οποίο εκτελεί μικροσκοπικές προσομοιώσεις και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας των κυκλικών κόμβων.

Αρχικά, υπολογίστηκε η απόδοση των «τυπικών» κυκλικών κόμβων με οποιονδήποτε τύπο δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας (free-flow, stop & yield slip lane) και η απόδοσή τους συγκρίθηκε με την αντίστοιχη απόδοσή τους δίχως δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα. Συνολικά λήφθηκαν δέκα διαφορετικά σενάρια διανομής πειραματικών κυκλοφοριακών ποσοστών (τέσσερα σενάρια με ισορροπημένη κυκλοφορία και έξι με μη-ισορροπημένη). Ως ισορροπημένη κυκλοφορία ορίστηκε όταν σε όλες τις προσβάσεις του κυκλικού κόμβου η εισερχόμενη και η εξερχόμενη κυκλοφοριακή ροή ήταν η ίδια, ενώ ως μη-ισορροπημένη ορίστηκε όταν δεν ήταν. Σε όλα τα σενάρια θεωρήθηκε ότι ο κυκλικός κόμβος δεν έχει συμφορηθεί (oversaturated conditions).

Η αξιολόγηση της απόδοσης όλων των διατάξεων των κυκλικών κόμβων, που μελετήθηκαν, βασίστηκε στην παράμετρο της αποδοχής κενού (gap acceptance) μέσω του λογισμικού **SIDRA** και στη προσομοίωση με τη βοήθεια του λογισμικού **VISSIM**. Η παράμετρος αποδοχής κενού (gap acceptance) σε έναν κυκλικό κόμβο ουσιαστικά προσδιορίζει την κυκλοφοριακή αλληλεπίδραση του εισερχόμενου οχήματος στον κυκλικό κόμβο με την επερχόμενη κυκλοφορία (Q_C), με την οποία συγχωνεύεται/διασταυρώνεται.

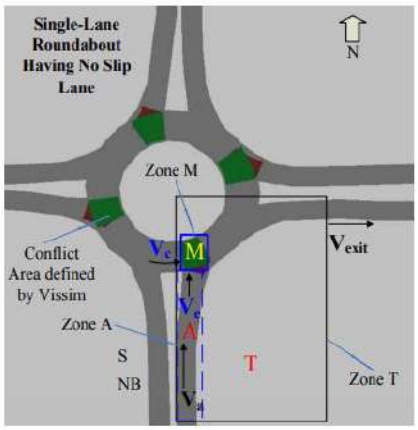
Στη συνέχεια, αξιολογήθηκαν οι εμπλοκές των κυκλικών κόμβων με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα και συγκρίθηκαν μεταξύ τους μέσω του λογισμικού **SSAM** (Surrogate Safety Assessment Model) και της παλινδρόμησης Poisson. Το λογισμικό SSAM είναι

κατάλληλο για να αναγνωρίζει αυτόματα, να ταξινομεί και να αξιολογεί τις κυκλοφοριακές εμπλοκές στην τροχιά κίνησης ενός οχήματος μέσω μοντέλων μικροσκοπικής κυκλοφοριακής προσομοίωσης.

Μέσω του SSAM και της παλινδρόμησης Poisson προέκυψαν μοντέλα πρόβλεψης εμπλοκών σε διάφορες ζώνες του κυκλικού κόμβου. Αυτά τα μοντέλα συγκρίθηκαν με εθνικά και διεθνή αντίστοιχα μοντέλα εμπλοκών για «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους και επιβεβαιώθηκαν περαιτέρω χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα από δέκα κυκλικούς κόμβους ίδιου τύπου, με αυτούς που εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα. Οι αριθμοί των εμπλοκών εκφράστηκαν συναρτήσει του φόρτου πρόσβασης εισόδου, της επερχόμενης κυκλοφορίας και του φόρτου της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας του κυκλικού κόμβου.

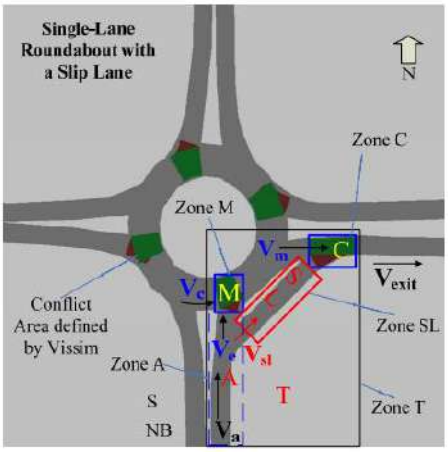
Στα πλαίσια της διατριβής αυτής εντοπίστηκαν επακριβώς όλες οι ζώνες εμπλοκών, που υπάρχουν σε «τυπικούς» κυκλικούς με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο. Αυτές οι ζώνες εμπλοκών απεικονίζονται στην Εικόνα 2-13 και Εικόνα 2-14 αντίστοιχα. Είναι αξιόλογο να σημειωθεί ότι οι ζώνες εμπλοκών “SL” και “C”, που φαίνονται στην Εικόνα 2-14, υπάρχουν μόνο σε κυκλικούς κόμβους, που έχουν δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα. Ωστόσο, η ζώνη εμπλοκών “C” υπάρχει μόνο στους κυκλικούς κόμβους με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα παραχώρησης προτεραιότητας (yield slip lane) και σε εκείνους με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής (free-flow slip lane).

Στα πλαίσια της έρευνας οι εμπλοκές μερισμού στη Ζώνη “A”, δηλαδή οι εμπλοκές που σημειώνονται όταν τα οχήματα στρίβουν είτε για να προσεγγίσουν τη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα είτε για να συνεχίσουν ευθεία έτσι ώστε να εισέλθουν στον κυκλικό κόμβο, παραλήφθηκαν λόγω του μικρού τους αριθμού. Έμφαση δόθηκε μόνο στα σημεία εμπλοκών λόγω συγχώνευσης, τα οποία παρατηρήθηκαν στις Ζώνες “M” και “C”, που είναι όταν τα εισερχόμενα στον κυκλικό κόμβο οχήματα συγχωνεύονται με την επερχόμενη κυκλοφορία (Ζώνη M) και όταν τα εξερχόμενα από τη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα οχήματα συγχωνεύονται με τη ροή εξόδου του επόμενου κλάδου (Ζώνη C).



Where,
A: Approach conflict zone. M: Merging conflict zone (vehicles entering the roundabout conflict with circulating vehicles). T: Conflicts in the selected region area (quadrant).
V_e: Roundabout entry flow, vehicles per hour. V_a: Total approach flow, vehicles per hour = (V_e) V_e = Roundabout entry volume (V_e), vehicles per hour. V_{exit}: Total exit flow, vehicles per hour. V_c: Circulating flow at merging zone M, vehicles per hour.

Εικόνα 2-13: Ζώνες Εμπλοκών σε «Τυπικό» Κυκλικό Κόμβο χωρίς Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα [Πηγή: Al-Ghandour 2011]



Where,
A: Approach conflict zone.
M: Merging conflict zone (vehicles entering the roundabout conflict with circulating vehicles).
SL*: Slip lane conflict zone.
C*: Merging conflict zone off slip lane (vehicles merging at a roundabout exit leg and slip lane).
T: Conflicts in the selected region area (quadrant).
V_{sl}: Slip lane entry flow vehicles per hour
V_e: Roundabout entry flow, vehicles per hour.
V_a: Total approach flow, vehicles per hour.
$V_a = V_e + V_{sl}$ = roundabout entry volume (V_e) + slip lane entry flow (V_{sl}).
(For no slip lane case: $V_{sl} = 0$, results $V_a = V_e$).
V_{exit}: Total exit flow, vehicles per hour.
V_c: Circulating flow at merging zone M, vehicles per hour.
V_m: Merging flow off slip lane at zone C, vehicles per hour.

*Zones SL and C don't apply in a roundabout without a slip-lane.

Εικόνα 2-14: Ζώνες Εμπλοκών σε «Τυπικούς» Κυκλικούς Κόμβους με Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα στον Νότιο Κλάδο [Πηγή: Al-Ghandour 2011]

Συμπεράσματα:

Μέσω της διατριβής αυτής αναδείχθηκε η χρησιμότητα του λογισμικού SSAM για την αξιολόγηση της ασφάλειας των κυκλικών κόμβων και για την ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων μεταξύ των προσομοιωμένων εμπλοκών και των συγκρούσεων που παρατηρήθηκαν στο πεδίο.

Μέσω των δέκα τοποθεσιών, που εξετάστηκαν στο πεδίο, προέκυψε μία σχέση (Εξίσωση 2.5.2-1) μεταξύ των συγκρούσεων ανά χρόνο και των συχνοτήτων των εμπλοκών σε έναν «τυπικό» κυκλικό κόμβο. Από αυτήν τη σχέση προκύπτει ένα καινούργιο μέσο αξιολόγησης της ασφάλειας των «τυπικών» κυκλικών κόμβων, με την προϋπόθεση ότι οι εμπλοκές προσδιορίζονται με τη χρήση του λογισμικού SSAM.

$$\frac{\text{Crashes}}{\text{Year}} = 0{,}796e^{0{,}0486\cdot(\frac{\text{Conflicts}}{\text{hour}})} \quad (R^2=0{,}707)$$

Εξίσωση 2.5.2-1

Από τη συγκεκριμένη έρευνα προέκυψαν κάποιοι επιπλέον τύποι, οι οποίοι εκφράζουν μεγέθη όπως τη μέση καθυστέρηση και τον αριθμό των εμπλοκών και απευθύνονται σε «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους, που περιέχουν οποιονδήποτε τύπο δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας (free-flow, stop & yield slip lane) στον Νότιο κλάδο τους:

- Η μέση καθυστέρηση οποιουδήποτε τύπου δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας εκφρασμένη συναρτήσει δύο ροών στην Εξίσωση 2.5.2-2 και Εξίσωση 2.5.2-3 αντίστοιχα:

$$SLDelay = 3{,}5881e^{0{,}0006 \cdot V_m} \quad (R^2=0{,}82)$$

Εξίσωση 2.5.2-2

όπου:

SLDelay: η μέση καθυστέρηση στη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα (sec/οχ)

V_m: ο φόρτος που έρχεται σε εμπλοκή στο σημείο συγχώνευσης της ροής της παρακαμπτήριας λωρίδας με τη ροή εξόδου του επόμενου κλάδου (οχ/h). Ο φόρτος αυτός υπάρχει μόνο στη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα με σήμανση υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP και με σήμανση παραχώρησης προτεραιότητας (stop & yield slip lane) και όχι στη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής

$$SLDelay = 3{,}5881e^{0{,}0005 \cdot V_e} \quad (R^2=0{,}82)$$

Εξίσωση 2.5.2-3

όπου:

SLDelay: η μέση καθυστέρηση στη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα (sec/οχ)

V_e: η ροή που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από το Νότιο άκρο (οχ/h)

Από τις δύο σχέσεις (Εξίσωση 2.5.2-2 & Εξίσωση 2.5.2-3) γίνεται αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται ο φόρτος, που έρχεται σε εμπλοκή στο σημείο συγχώνευσης της ροής της παρακαμπτήριας λωρίδας με τη ροή εξόδου του επόμενου κλάδου (V_m) και ο φόρτος, που εισέρχεται στον Νότιο κλάδο (V_e), τόσο αυξάνεται η μέση καθυστέρηση στη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα.

- Ο αριθμός των εμπλοκών σε ζώνες του κυκλικού κόμβου, που περιέχει δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο:

$$y_A = e^{\left(-2{,}17+2{,}30 \cdot \frac{V_a}{1.000}+4{,}50 \cdot \frac{V_c}{1.000}+1{,}10 \cdot V_{sl} \cdot \frac{app_{sl}}{1.000}\right)}$$

Εξίσωση 2.5.2-4

όπου:

y_A: ο αριθμός των εμπλοκών στη Ζώνη Α (Εικόνα 2-14), θεωρώντας ότι ο χρόνος για τη σύγκρουση ttc (ttc-time to collision) είναι μικρότερος από 1,5 sec

V_{sl}: ο εισερχόμενος φόρτος στη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα (οχ/h)

V_a: ο συνολικός φόρτος, που προσεγγίζει τον κυκλικό κόμβο (οχ/h) ($V_a=V_e+V_{sl}$, όπου V_e ο εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο ανά λωρίδα πρόσβασης, V_{sl} ο φόρτος της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας, ο οποίος είναι ίσος με 0 όταν δεν υπάρχει)

V_c: ο επερχόμενος φόρτος επί του κυκλικού δακτυλίου (οχ/h)

app_{sl}=1 εάν είναι για προσέγγιση με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα, διαφορετικά ισούται με 0

$$y_M = e^{\left(-0{,}54+1{,}50 \cdot \frac{V_e}{1.000}+3{,}70 \cdot \frac{V_c}{1.000}\right)}$$

Εξίσωση 2.5.2-5

όπου:

y_M: ο αριθμός των εμπλοκών στη Ζώνη Μ (Εικόνα 2-14), θεωρώντας ότι ο χρόνος για τη σύγκρουση ttc (ttc-time to collision) είναι μικρότερος από 1,5 sec

$$y_{SL} = e^{\left(-2{,}46-26\cdot\frac{V_C\cdot yield}{1.000}+5{,}80*\frac{V_{sl}\cdot stop}{1.000}+41{,}60\cdot\frac{V_{sl}\cdot yield}{1.000}\right)}$$

Εξίσωση 2.5.2-6

όπου:

y_{SL}:ο αριθμός των εμπλοκών στη Ζώνη SL (Εικόνα 2-14), θεωρώντας ότι ο χρόνος για τη σύγκρουση ttc (ttc-time to collision) είναι μικρότερος από 1,5 sec

yield=1 εάν η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα είναι με σήμανση παραχώρησης προτεραιότητας (yield slip lane), διαφορετικά ισούται με 0

stop=1 εάν η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα είναι με σήμανση υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP (stop slip lane), διαφορετικά ισούται με 0

$$y_C = e^{\left(-0{,}407+5{,}3*\frac{V_a\cdot stop}{1.000}+5{,}4*\frac{V_C\cdot yield}{1.000}+5{,}70*\frac{V_{sl}\cdot stop}{1.000}-1{,}2*\frac{V_m\cdot app_{sl}}{1.000}\right)}$$

Εξίσωση 2.5.2-7

όπου:

y_C:ο αριθμός των εμπλοκών στη Ζώνη C (Εικόνα 2-14), θεωρώντας ότι ο χρόνος για τη σύγκρουση ttc (ttc-time to collision) είναι μικρότερος από 1,5 sec

$$y_T = e^{\left(0{,}79+2{,}70\cdot\frac{V_a}{1.000}+3{,}0\cdot\frac{V_c}{1.000}-0{,}93\cdot free-1{,}23\cdot z_{nsl}+1{,}30\cdot\frac{V_{sl}\cdot stop}{1.000}+0{,}002\cdot\frac{V_a\cdot V_m}{1.000}\right)}$$

Εξίσωση 2.5.2-8

όπου:

y_T:ο αριθμός των εμπλοκών στη Ζώνη T (Εικόνα 2-14), θεωρώντας ότι ο χρόνος για τη σύγκρουση ttc (ttc-time to collision) είναι μικρότερος από 1,5 sec

free=1 εάν η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα είναι ελεύθερης ροής (free-flow slip lane), διαφορετικά ισούται με 0

z_{nsl}=1 εάν η λωρίδα προσέγγισης του κυκλικού κόμβου δεν έχει δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα, διαφορετικά ισούται με 0

Εκτός των τύπων προέκυψαν και κάποια επιπρόσθετα συμπεράσματα, τα σημαντικότερα από τα οποία παρατίθενται παρακάτω:

- Η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής συμβάλλει στη μείωση της συνολικής μέσης καθυστέρησης στον κυκλικό κόμβο αλλά και στην προσέγγιση της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας. Οι άλλοι δύο τύποι παρακαμπτήριας λωρίδας (stop & yield slip lane) μειώνουν τη συνολική καθυστέρηση στον κυκλικό κόμβο αλλά σε μικρότερο βαθμό. Πιο συγκεκριμένα, μέσω των αποτελεσμάτων του λογισμικού SIDRA προέκυψε ότι η συνολική μέση καθυστέρηση του κυκλικού κόμβου μειώθηκε κατά 14% με χρήση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής, κατά 11% με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα παραχώρησης προτεραιότητας και κατά 16% με χρήση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP στα σενάρια μη-ισορροπημένης κυκλοφορίας.
- Όσο αυξάνεται το ποσοστό του δεξιά στρεφόμενου φόρτου στην παρακαμπτήρια λωρίδα (V_{sl}), τόσο μειώνεται ο εισερχόμενος στον κυκλικό κόμβο φόρτος από τον Νότιο κλάδο (V_e) και ο φόρτος που έρχεται σε εμπλοκή στο σημείο συγχώνευσης της ροής της παρακαμπτήριας λωρίδας με τη ροή εξόδου του επόμενου κλάδου (V_m).
- Για τις τιμές φόρτου, που μπορεί να δεχτεί μία δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα, προέκυψε ως θεωρητικό κατώφλι (όριο) ένα εύρος από 150 έως 350 οχ/h σε

ισορροπημένες κυκλοφοριακές συνθήκες και 400 έως 500 οχ/h σε μη-ισορροπημένες.

- Όταν ο φόρτος της δεξιόστροφης κυκλοφορίας σε έναν «τυπικό» κυκλικό κόμβο είναι χαμηλός δεν συνίσταται η χρήση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας. Όταν όμως φθάσει κάποιο συγκεκριμένο ποσοστό, τότε προτείνεται η τοποθέτηση της αλλά με σήμανση παραχώρησης προτεραιότητας (yield slip lane). Μόνο όταν αυτός ο τύπος παρακαμπτήριας λωρίδας δεν μπορεί να ανταποκριθεί στον προβλεπόμενο δεξιόστροφο φόρτο προτείνεται η χρήση παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής.
- Από το λογισμικό VISSIM προέκυψε ότι με την παρουσία δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο σε υψηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους σημειώνεται η μεγαλύτερη αύξηση της συνολικής καθυστέρησης του κυκλικού κόμβου, όταν υπάρχει ταυτόχρονη κυκλοφορία πεζών. Αυτό συμβαίνει, διότι η κυκλοφορία των πεζών αναγκάζει τα οχήματα να διακόπτουν την πορεία τους σε έναν τύπο παρακαμπτήριας λωρίδας, που δεν προορίζεται για αυτό, όπως οι άλλοι δύο τύποι (stop & yield slip lane). Ακόμα, προέκυψε ότι όταν τη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής την διέσχιζαν 100 πεζοί/h, τότε η καθυστέρηση συνολικά στον κυκλικό κόμβο αυξανόταν από 6,6 σε 28,1 sec/οχ.
- Από τους τρεις τύπους δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων, η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συχνότητα σε εμπλοκές και η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής παρουσιάζει τη μικρότερη. Συνεπώς, η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP αποτελεί την λιγότερο βιώσιμη και ασφαλή διάταξη δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας.
- Η περιοχή προσέγγισης της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ή διαφορετικά η Ζώνη "SL" είναι η λιγότερο πιθανή τοποθεσία στον κυκλικό κόμβο για να πραγματοποιηθούν εμπλοκές. Εμπλοκές πραγματοποιούνται πιο συχνά στις περιοχές συγχώνευσης, δηλαδή στις Ζώνες "M" και "C", που αναλύθηκαν παραπάνω και φαίνονται στην Εικόνα 2-14.
- Οι εμπλοκές στη περιοχή συγχώνευσης των εξερχομένων από την παρακαμπτήρια λωρίδα οχημάτων με τη ροή εξόδου του επόμενου κλάδου (Ζώνη C) είναι πιο συχνές από ότι στην περιοχή συγχώνευσης των εισερχόμενων στον κυκλικό κόμβο οχημάτων με την επερχόμενή του κυκλοφορία (Ζώνη M). Η δημιουργία δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής μειώνει γενικά τα περιστατικά εμπλοκών στη Ζώνη "C".

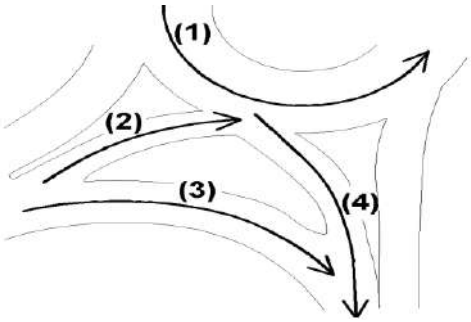
2.5.3. Capacity analysis of a bypass of roundabouts [14]

Στόχος:
Η παρούσα έρευνα, η οποία δημοσιεύθηκε το 2017, έχει ως βασικό στόχο να προσδιορίσει την χωρητικότητα των παρακαμπτήριων λωρίδων ως σύνολο και να αποτελέσει μελλοντικά κομμάτι των επίσημων οδηγιών, σχετιζόμενο με τη χωρητικότητα των κυκλικών κόμβων.

Μεθοδολογία:
Όλες οι εμπειρικές εκτιμήσεις και παρατηρήσεις πραγματοποιήθηκαν για «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους (single-lane roundabouts) με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο του. Επιπλέον, κατά την εκπόνηση της έρευνας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό VISSIM.

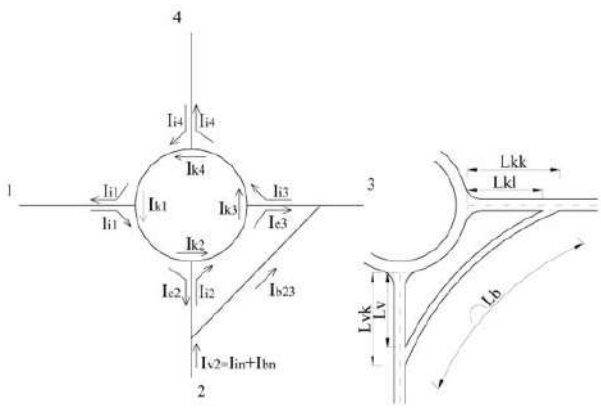
Για την πραγματοποίηση όλων των απαιτούμενων εκτιμήσεων μελετήθηκαν διεξοδικά οι βασικοί για την τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας φόρτοι, οι οποίοι παρατίθενται παρακάτω και φαίνονται στην Εικόνα 2-15:

1) Ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας, μπροστά από τον κλάδο, που διαθέτει δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα , δηλαδή τον Νότιο στην εν λόγω έρευνα
2) Ο εισερχόμενος στον κυκλικό κόμβο φόρτος από τον κλάδο με τη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα, δηλαδή τον Νότιο στην προκειμένη περίπτωση
3) Ο φόρτος της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας
4) Η ροής εξόδου του κλάδου, που εντοπίζεται ακριβώς μετά τον κλάδο, στον οποίο έχει τοποθετηθεί η παρακαμπτήρια λωρίδα. Ο ακριβώς επόμενος αυτός κλάδος στην παρούσα έρευνα είναι ο Ανατολικός.



Εικόνα 2-15: Βασικοί Φόρτοι για την Τοποθέτηση Παρακαμπτήριας Λωρίδας [Πηγή: Slabý 2017]

Στην Εικόνα 2-16 απεικονίζεται αναλυτικά η διάταξη του κυκλικού κόμβου, που μελετήθηκε. Πιο συγκεκριμένα, φαίνονται οι εντάσεις των φόρτων στις προσβάσεις του (I_v), στην είσοδο στον κυκλικό δακτύλιο (I_i), στην επερχόμενη κυκλοφορία (I_k), στην έξοδο από τον κυκλικό δακτύλιο (I_e) και στη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα (I_b). Επιπλέον, απεικονίζονται αναλυτικά οι αποστάσεις της εξωτερικής οριογραμμής του κυκλικού δακτυλίου από τα σημεία αποσύνδεσης της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας από τον Νότιο κλάδο (L_v, L_{vk}) και τα σημεία σύνδεσής της με τον Ανατολικό κλάδο (L_{kl}, L_{kk}), καθώς και το μήκος της ίδιας της παρακαμπτήριας λωρίδας (L_b).



Εικόνα 2-16: Εντάσεις των Φόρτων (I_i) ενός «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου με Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα στον Νότιο Κλάδο και η Γεωμετρική της Διάταξη [Πηγή: Slabý 2017]

Κατά την πραγματοποίηση της έρευνας εξετάστηκαν για τον συνολικό εισερχόμενο στον κυκλικό κόμβο φόρτο από τον Νότιο κλάδο, που σκόπευε να κινηθεί δεξιόστροφα προς τον Ανατολικό, διάφορες αναλογίες των ποσοστών κατανομής του μέσω του κυκλικού δακτυλίου (I_i) και μέσω της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας (I_b) (I_i/I_b). Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι αναλογίες 80/20, 70/30, 60/40 και 50/50, όπου σε κάθε αναλογία ο πρώτος αριθμός αντιστοιχούσε στο ποσοστό του εισερχόμενου στον κυκλικό κόμβο φόρτου από τον Νότιο κλάδο, που θα κινούταν δεξιόστροφα προς τον Ανατολικό μέσω του κυκλικού δακτυλίου και ο δεύτερος αριθμός στο ποσοστό του ίδιου φόρτου, που θα κινούταν όμως μέσω της παρακαμπτήριας λωρίδας. Το δεύτερο ποσοστό συμβολίστηκε με «α» σε όλη την έρευνα.

Για την αξιολόγηση της χωρητικότητας του κυκλικού κόμβου, ήταν απαραίτητο να επιβεβαιωθεί για την ένταση του φόρτου της κυκλοφορίας στην είσοδό του (I_i) η παρακάτω σχέση (Εξίσωση 2.5.3-1), η οποία υπάρχει στις Αμερικάνικες Οδηγίες [10]:

$$t_w^n \leq t_{w,lim}$$

Εξίσωση 2.5.3-1

όπου:

t_w^n: ο μέσος χρόνος καθυστέρησης των οχημάτων στο ρεύμα κυκλοφορίας (sec)

$t_{w,lim}$: ο μέγιστος επιτρεπτός μέσος χρόνος καθυστέρησης των οχημάτων βάσει του απαιτούμενου επίπεδου εξυπηρέτησης (LOS) (sec)

Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας στην είσοδο του κυκλικού κόμβου και στο σημείο σύνδεσης της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας με τον ακριβώς επόμενο κλάδο, δηλαδή τον Ανατολικό στην προκειμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε η σχέση, που υπάρχει στις Αμερικάνικες Οδηγίες για τον υπολογισμό της βασικής χωρητικότητας (Εξίσωση 2.5.3-2):

$$C_i = 3.600 \cdot \left(1 - \frac{\Delta * I_k}{n_k \cdot 3.600}\right)^{n_k} \cdot \frac{n_{i,koef}}{t_f} \cdot e^{-\frac{I_k}{3.600} * \left(t_g - \frac{t_f}{2} - \Delta\right)}$$

Εξίσωση 2.5.3-2

όπου:

C_i: η χωρητικότητα στην είσοδο του κυκλικού κόμβου/η χωρητικότητα στο σημείο σύνδεσης της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας με τον ακριβώς επόμενο κλάδο εξόδου του κυκλικού κόμβου, δηλαδή τον Ανατολικό (οχ/h)

I_k: η ένταση της κυκλοφορίας στον κυκλικό κόμβο/η ένταση στον κλάδο εξόδου του κυκλικού κόμβου (οχ/h)
n_k: ο αριθμός λωρίδων της επερχόμενης κυκλοφορίας στον κυκλικό κόμβο/ο αριθμός λωρίδων στον κλάδο εξόδου του κυκλικού κόμβου
$n_{i,koef}$: συντελεστής, που λαμβάνει υπόψιν τον αριθμό λωρίδων στην είσοδο του κυκλικού κόμβου και στη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα. Λαμβάνει την τιμή 1,00, όταν υπάρχει μία λωρίδα εισόδου και 1,50 όταν υπάρχουν δύο λωρίδες εισόδου
t_g: ο χρόνος κρίσιμου κενού (critical time gap) (sec)
t_f: ο χρόνος ακολουθίας (subsequent time gap) (sec)
$\Delta(t_0)$: ο χρόνος μικρότερου κενού μεταξύ των οχημάτων που κατευθύνονται προς τον κυκλικό δακτύλιο ή στην έξοδο του κυκλικού κόμβου (sec)

Για τον υπολογισμό των απαιτούμενων τριών χρόνων στην Εξίσωση 2.5.3-2 χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τύποι (Εξίσωση 2.5.3-3, Εξίσωση 2.5.3-4 & Εξίσωση 2.5.3-5), όπου και αυτοί υπάρχουν στις Αμερικάνικες Οδηγίες. Σε αυτούς τους τύπους το μήκος L_{kk} αναλύθηκε παραπάνω και φαίνεται στην Εικόνα 2-16.

$$t_g = 5\frac{L_{kk}}{30}$$

Εξίσωση 2.5.3-3

$$t_f = 2{,}7s$$

Εξίσωση 2.5.3-4

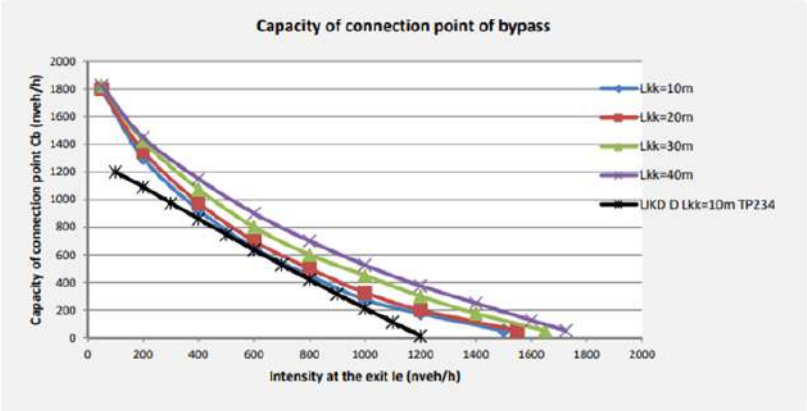
$$\Delta(t_0) = 3{,}2 - \frac{0{,}7}{30} \cdot L_{kk}$$

Εξίσωση 2.5.3-5

<u>Συμπεράσματα:</u>
Από την παρούσα έρευνα πολλά από τα συμπεράσματά της οπτικοποιήθηκαν σε γραφήματα, εκ των οποίων τα σημαντικότερα παρατίθενται παρακάτω.

Αρχικά, ένα βασικό εύρημα ήταν ότι η χωρητικότητα της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας εξαρτάται από την απόσταση της εξωτερικής οριογραμμής του κυκλικού δακτυλίου από το άκρο του σημείου σύνδεσης της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας με τον αμέσως επόμενο κλάδο εξόδου (L_{kk}) (Εικόνα 2-16). Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση L_{kk}, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος του κρίσιμου κενού t_g, δηλαδή ο οδηγός έχει καλύτερη οπτική από τα διερχόμενα οχήματα του ακριβώς επόμενου κλάδου και επομένως μπορεί να δεχτεί μικρότερο κενό, για να συγχωνευθεί με τη κύρια ροή εξόδου του. Συνεπώς, με τη μεγάλη τιμή L_{kk} αναμένεται και υψηλή χωρητικότητα στην παρακαμπτήρια λωρίδα C_b. Βάσει των μετρήσεων προέκυψε ότι η αύξηση του L_{kk} προκαλεί αύξηση της χωρητικότητας της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας C_b της τάξεως των 200 οχ/h.

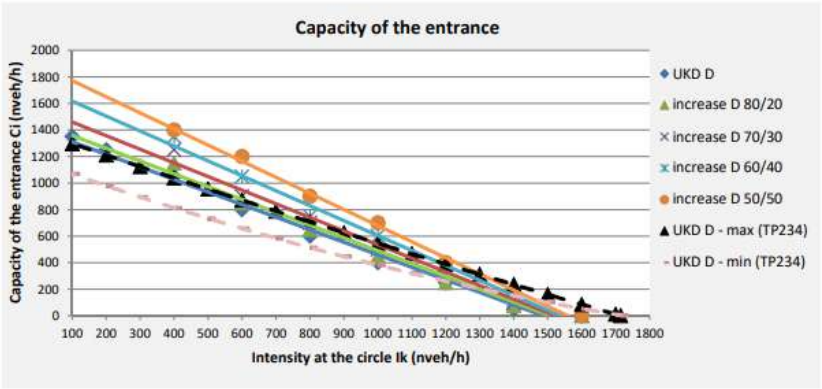
Στο Γράφημα 2-2 απεικονίζεται η χωρητικότητα της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας (C_b) συναρτήσει της έντασης του φόρτου εξόδου του ακριβώς επόμενου κλάδου (I_e), με τον οποίο συγχωνεύεται, καθώς και των τιμών του μήκους L_{kk}. Το μήκος L_{kk} λαμβάνει τιμές εντός του εύρους 10-40 m ανάλογα με το ζεύγος των τιμών (C_b, I_e). Από το γράφημα αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται η ένταση του φόρτου εξόδου του ακριβώς επόμενου κλάδου (I_e), τόσο μειώνεται η χωρητικότητά της παρακαμπτήριας λωρίδας (C_b), ενώ για υψηλές τιμές C_b και I_e απαιτείται η τιμή L_{kk} να ισούται με το μέγιστο δυνατό βάσει του εύρους της, δηλαδή με 40 m.



Γράφημα 2-2: Χωρητικότητα της Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας (C_b (veh/h)) συναρτήσει της Έντασης του Φόρτου Εξόδου του ακριβώς Επόμενού της Κλάδου (I_e (veh/h)) [Πηγή: Slabý 2017]

Στο Γράφημα 2-3 απεικονίζεται η χωρητικότητα στην αρχή του κλάδου με την παρακαμπτήρια λωρίδα (C_v) συναρτήσει της χωρητικότητας στην είσοδο στον κυκλικό δακτύλιο (C_i) και της έντασης του φόρτου της επερχόμενη κυκλοφορία μπροστά ακριβώς από τον ίδιο κλάδο (I_k). Από το γράφημα αυτό μπορεί να βρεθεί εάν η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα πρέπει να δημιουργηθεί. Πιο συγκεκριμένα, όταν οι συντεταγμένες του ζεύγους (C_i,I_k) είναι υψηλότερες από το όριο της χωρητικότητας C_v για επίπεδο εξυπηρέτησης D (μαύρη γραμμή), τότε υπάρχει η απαίτηση για δημιουργία παρακαμπτήριας λωρίδας. Στο ίδιο γράφημα υπάρχει και το αντίστοιχο όριο για επίπεδο εξυπηρέτησης B (ροζ γραμμή).

Επιπλέον από το ίδιο Γράφημα 2-3 προκύπτει ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του εισερχόμενου στον κυκλικό κόμβο φόρτου από τον Νότιο κλάδο, που επιλέγει να κατευθυνθεί δεξιόστροφα μέσω της παρακαμπτήριας λωρίδας και όχι μέσω του κυκλικού δακτυλίου, για να μεταβεί στον Ανατολικό (α%), τόσο αυξάνεται η χωρητικότητα C_v. Πιο συγκεκριμένα, από το Γράφημα 2-3 φαίνεται ότι, όταν το ποσοστό αυτό αυξάνεται από α=20% σε α=50% τότε, η χωρητικότητα στην αρχή του Νοτίου κλάδου (C_v) και η ένταση του φόρτου της επερχόμενης κυκλοφορίας (I_k) σημειώνουν μία αύξηση της τάξεως των 550-1.500 οχ/h και 200-1.200 οχ/h αντίστοιχα για επίπεδο εξυπηρέτησης D.



Γράφημα 2-3: Χωρητικότητα του Κλάδου με την Παρακαμπτήρια Λωρίδα (C_V (veh/h)) συναρτήσει της Χωρητικότητας στην Είσοδο στον Κυκλικό Δακτύλιο (C_i (veh/h)) και της Έντασης του Φόρτου της Επερχόμενης Κυκλοφορίας (I_k (veh/h)) [Πηγή: Slabý 2017]

Κάποια επιπλέον αποτελέσματα, στα οποία κατέληξε η έρευνα, ήταν τα εξής:

- Είναι σημαντικό για την μετέπειτα απόδοση μίας παρακαμπτήριας λωρίδας, να σχεδιάζεται σωστά η σύνδεσή της με τον αμέσως επόμενο κλάδο εξόδου, με τον οποίο συγχωνεύεται.
- Το μήκος της παρακαμπτήριας λωρίδας πρέπει να ταιριάζει με το μέγιστο μήκος της ουράς αναμονής, που δημιουργείται σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο εξυπηρέτησης (LOS). Εάν το μήκος της παρακαμπτήριας λωρίδας δεν πληροί το κριτήριο αυτό, τότε η ουρά αναμονής μπορεί να φθάσει πριν από το σημείο αποσύνδεσής της από το κλάδο στον οποίο αντιστοιχεί και αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση του χρόνου καθυστέρησης κατά την είσοδο των οχημάτων στον κυκλικό κόμβο και γενικότερα τη μείωση του συνολικού επιπέδου εξυπηρέτησής του (LOS). Παρόμοια καθυστέρηση μπορεί να υπάρξει και στην είσοδο της παρακαμπτήριας λωρίδας, εάν παρεμποδίζεται από ουρά οχημάτων, το μήκος της οποίας φθάνει πριν από το προαναφερθέν σημείο αποσύνδεσης.
- Το μήκος της ουράς στην είσοδο στον κυκλικό κόμβο πρέπει να είναι μικρότερο από την απόσταση L_v, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 2-16. Επιπλέον, το μήκος της ουράς στην παρακαμπτήρια λωρίδα πρέπει να είναι μικρότερο από το μήκος της L_b.
- Εάν στην παρακαμπτήρια λωρίδα έχει δημιουργηθεί ουρά αναμονής οχημάτων, που δεν μπορούν να συγχωνευθούν με την κύρια ροή εξόδου του επόμενου κλάδου λόγω του υψηλού της φόρτου (I_e), τότε είναι απαραίτητο να σχεδιάζεται μία ξεχωριστή λωρίδα στο σημείο σύνδεσης της παρακαμπτήριας λωρίδας με τον ακριβώς επόμενο κλάδο εξόδου, για να μην χρειάζεται τα οχήματα που εξέρχονται από την παρακαμπτήρια λωρίδα να περιμένουν για να συγχωνευθούν.

2.6. Σύνοψη Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

Όπως παρατηρήθηκε από τις παραπάνω έρευνες, έχει εξεταστεί σε θεωρητικό κατά βάση πλαίσιο η συνεισφορά των δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων σε έναν κυκλικό κόμβο. Παρόλο που έχει εκπονηθεί μεγάλος αριθμός ερευνών πάνω σε αυτό το αντικείμενο, δεν έχει καλυφθεί μέχρι στιγμής το ερευνητικό «κενό», που εντοπίζεται και στις επίσημες οδηγίες.

Πιο συγκεκριμένα, δεν έχει βρεθεί κάποια συγκεκριμένη σχέση, που να προσδιορίζει το πότε είναι απαραίτητο να τοποθετείται σε έναν κυκλικό κόμβο δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση μοντέλων - μαθηματικών σχέσεων, που να προτυποποιούν την αναγκαιότητα αυτή.

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία θα πραγματοποιηθεί μία προσπάθεια να καλυφθεί ένα μέρος αυτού του «κενού», καθώς θα εξεταστεί μία από τις πολλές περιπτώσεις, που μπορούν να υπάρξουν ως προς τον τύπο των παρακαμπτήριων λωρίδων, τον αριθμό και τη θέση τους σε έναν κυκλικό κόμβο, αλλά ακόμα και ως προς τον τύπο του ίδιου του κυκλικού κόμβου.

Βάσει των παραπάνω, βασικός στόχος της εν λόγω μελέτης έγινε η δημιουργία ενός μοντέλου, που να διερευνά την αναγκαιότητα χωροθέτησης **δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής** (free-flow right-turn bypass lane) **σε κλάδο τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου** (single-lane roundabout) και πιο συγκεκριμένα **στον Νότιο κλάδο** βάσει των υφιστάμενων φόρτων του ή των αντίστοιχων μελλοντικών, που θα είναι επιθυμητό να εξυπηρετεί. Ο λόγος, που αποφασίστηκε να εξεταστεί αυτή η περίπτωση, ήταν διότι και στις προαναφερθείσες και σε πολλές άλλες παρεμφερείς έρευνες εξετάζεται κατά κύριο λόγο η συγκεκριμένη διάταξη κυκλικού κόμβου και δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας και η συγκεκριμένη χωροταξική της θέση (Νότιος κλάδος) στον κυκλικό κόμβο. Συνεπώς, έχει γίνει μία καλή θεωρητική προεργασία για την εξεταζόμενη περίπτωση, η οποία θα φανεί πολύ χρήσιμη σε όλη τη διάρκεια της Διπλωματικής αυτής.

Κάποιοι άλλοι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε να μελετηθεί αυτή η διάταξη δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ήταν γιατί, όπως διαπιστώθηκε και από την παραπάνω βιβλιογραφική ανάλυση, οι δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες ελεύθερης ροής αποτελούν τον καλύτερο τύπο παρακαμπτήριας λωρίδας συγκριτικά με τους υπόλοιπους σε πολλές παραμέτρους. Οι δύο βασικές παράμετροι είναι η μεγαλύτερη χωρητικότητα (Γράφημα 2-1) και λειτουργική απόδοση, που εμφανίζουν.

Επιπλέον, αυτή η διάταξη υπάρχει και στις δύο επίσημες οδηγίες για τους κυκλικούς κόμβους (Αμερικάνικες & Γερμανικές), σε αντίθεση με τις άλλες διατάξεις (stop & yield slip lane), που εμφανίζονται μόνο στις Αμερικάνικες. Γενικά, αυτός ο τύπος συνηθίζεται να επιλέγεται, όταν κρίνεται αναγκαίο να εφαρμοστεί παρακαμπτήρια λωρίδα σε κυκλικό κόμβο κυρίως στις χώρες του εξωτερικού, όπου οι εφαρμογή τους είναι πιο διαδεδομένη.

Τέλος, επιλέχθηκε η παρακαμπτήρια λωρίδα να μελετηθεί σε «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους, καθώς όπως θα αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 3. μόνο για αυτόν τον τύπο κόμβου υπάρχει διαθέσιμη μαθηματική σχέση για τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής της ικανότητας σε αυτόν, η οποία ήταν αναγκαία για την εκπόνηση της εργασίας. Ωστόσο, επειδή η εφαρμογή των συγκεκριμένων παρακαμπτήριων λωρίδων συνίσταται κυρίως σε υπεραστικό οδικό περιβάλλον, ενώ των «τυπικών» κυκλικών κόμβων κυρίως σε αστικό, η παρούσα μελέτη απευθύνεται κατά βάση σε εισόδους οικισμών, χωρίς ωστόσο να περιορίζεται εκεί.

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΡΑΘΡΟ

3.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το Θεωρητικό Υπόβαθρο, στο οποίο βασίστηκε η εξ ολοκλήρου δημιουργία δεδομένων και η επεξεργασία τους για την ανάλυση του αντικειμένου της Διπλωματικής. Η δημιουργία των δεδομένων έγινε μέσω πολυάριθμων σεναρίων, από τα οποία προέκυψε η βάση δεδομένων της παρούσας εργασίας. Σε καθένα από τα σενάρια πραγματοποιήθηκε λειτουργική ανάλυση της εξεταζόμενης κάθε φορά περίπτωσης κυκλικού κόμβου με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα (right-turn bypass lane). Ύστερα, ακολούθησε η στατιστική ανάλυση, κατά την οποία υλοποιήθηκε η επεξεργασία της βάσης δεδομένων και η εξαγωγή μοντέλων με γραμμική παλινδρόμηση μέσω της γλώσσας προγραμματισμού R-Studio, ώστε να επιλεχθεί το καλύτερο γραμμικό μοντέλο.

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2., οι τετρασκελείς «τυπικοί» κυκλικοί κόμβοι (single-lane roundabouts) με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής (free-flow right-turn bypass lane) στον Νότιο κλάδο θα αποτελέσουν εφεξής τον βασικό πυρήνα της Διπλωματικής. Συνεπώς, τόσο το θεωρητικό υπόβαθρο όσο και μετέπειτα τα σενάρια και η λειτουργική τους ανάλυση θα βασιστούν σε αυτή τη διάταξη κυκλικού κόμβου και παρακαμπτήριας λωρίδας με τη συγκεκριμένη χωροταξική της θέση.

3.2. Λειτουργική Ανάλυση

Λόγω του ότι για την εκτέλεση των σεναρίων πραγματοποιήθηκε λειτουργική ανάλυση χωρίς να χρειαστεί να ληφθεί πουθενά υπόψιν κάποια σχεδιαστική παράμετρος των εξεταζόμενων κυκλικών κόμβων, ακολουθήθηκαν στην εργασία αυτή αποκλειστικά οι Αμερικάνικες Οδηγίες (NCHRP 2010) [10], διότι όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2. η Ελλάδα εφαρμόζει τις συγκεκριμένες οδηγίες, ως πιο ολοκληρωμένες που είναι στο αντικείμενο αυτό των κυκλικών κόμβων.

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα βασικά επιμέρους μεγέθη, που είναι απαραίτητα γενικά για τη λειτουργική ανάλυση όλων των τύπων των κυκλικών κόμβων με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα βάσει των Αμερικάνικων Οδηγιών (NCHRP 2010) και όσα χρειάστηκαν για την εκπόνηση της Διπλωματικής εργασίας. Τα μεγέθη αυτά αποτελούν και τα Μέτρα Αποτελεσματικότητας (Measure Of Effectiveness – MOEs) ενός κυκλικού κόμβου.

3.2.1. Εκτιμώμενοι Κυκλοφοριακοί Φόρτοι

Αρχικά, για την λειτουργική ανάλυση ενός κυκλικού κόμβου ένα από τα πρώτα πράγματα, που πρέπει να γίνουν, είναι ο προσδιορισμός των εκτιμώμενων κυκλοφοριακών φόρτων μέσω της συλλογής των κυκλοφοριακών του δεδομένων, η οποία πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως και στους Ισόπεδους κόμβους (ΙΚ). Πιο συγκεκριμένα, συλλέγονται οι φόρτοι των στρεφουσών κινήσεων ανά κλάδο πρόσβασης και μετατρέπονται σε Μονάδες Επιβατηγών Αυτοκινήτων (ΜΕΑ) ανάλογα με το ποσοστό κίνησης Βαρέων Οχημάτων (ΒΟ), όπου τότε λαμβάνεται υπόψη και ο Συντελεστής Ωριαίας Αιχμής (ΣΩΑ).

Για τον υπολογισμό των εκτιμώμενων κυκλοφοριακών φόρτων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι σύμφωνα με τις Αμερικάνικες Οδηγίες:

$$V_i = \frac{V_j}{\Sigma\Omega A}$$

Εξίσωση 3.2.1-1

$$V_{i,MEA} = \frac{V_i}{f_{HV}}$$

Εξίσωση 3.2.1-2

$$f_{HV} = \frac{1}{1+P_T(E_T-1)}$$

Εξίσωση 3.2.1-3

όπου:

V_j: ο μετρούμενος φόρτος (οχ/h)

V_i: ο ωριαίος φόρτος (οχ/h)

$V_{i,MEA}$: ο ωριαίος φόρτος εκφρασμένος σε MEA/h

ΣΩΑ: Συντελεστής Ωριαίας Αιχμής

f_{HV}: ο συντελεστής Βαρέων Οχημάτων (ΒΟ)

P_T: το ποσοστό Βαρέων Οχημάτων (ΒΟ) (%/100)

E_T: αντιστοιχία Βαρέων Οχημάτων με MEA (συνήθως E_T=2)

Ο Συντελεστής Ωριαίας Αιχμής (ΣΩΑ) (Peak Hour Factor – PHF) ορίζεται κατά κανόνα ως ο λόγος του αριθμού των οχημάτων, που περνούν από μία διατομή λωρίδας ή οδού σε μία ώρα προς τον τετραπλάσιο αριθμό των οχημάτων, που περνούν από την ίδια διατομή κατά τη διάρκεια των δεκαπέντε συνεχόμενων λεπτών της ώρας, που παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο φόρτο κυκλοφορίας.

$$\Sigma\Omega A = \frac{V}{4*V_{max15}}$$

Εξίσωση 3.2.1-4

όπου:

V: ο ωριαίος φόρτος (οχ/h)

V_{max15}: ο μέγιστος φόρτος των δεκαπέντε συνεχόμενων λεπτών εντός της ώρας (οχ/h)

Από τον ορισμό του ο ΣΩΑ μπορεί να πάρει τιμές από 0,25 έως 1,00. Η τιμή 1,00 αντιστοιχεί σε περιπτώσεις απόλυτα ομοιόμορφης κατανομής της κυκλοφορίας κατά την ώρα αιχμής, ώστε σε οποιαδήποτε δεκαπέντε συνεχόμενα λεπτά μέγιστης κυκλοφορίας να αντιστοιχεί το ένα τέταρτο της συνολικής κυκλοφοριακής ροής της ώρας. Η άλλη οριακή τιμή 0,25 παρατηρείται μόνο αν όλη η κυκλοφορία παρουσιάζεται μέσα σε μία μόνο περίοδο δεκαπέντε λεπτών και στην υπόλοιπη χρονική περίοδο δεν υπάρχει καθόλου κυκλοφορία. Οι ακραίες αυτές περιπτώσεις είναι φυσικά θεωρητικές. Στην πράξη ο ΣΩΑ κυμαίνεται συνήθως από 0,85 έως 0,95. (Φραντζεσκάκης και συν. 2009) [23]

Ωστόσο, επειδή στην παρούσα εργασία **δεν εξετάστηκε η παρουσία Βαρέων Οχημάτων (ΒΟ)** και οι φόρτοι, που χρησιμοποιήθηκαν, θεωρήθηκαν ότι είναι **φόρτοι σχεδιασμού**, δεν χρειάστηκε να υπολογιστεί το f_{HV} και ο ΣΩΑ. Συνεπώς, οι φόρτοι, που εξετάστηκαν, ισοδυναμούσαν ταυτόχρονα σε MEA και σε οχήματα (οχ), χωρίς να είναι απαραίτητη κάποια ενδιάμεση μετατροπή.

Για να βρεθούν οι φόρτοι στις περιοχές εισόδου, εξόδου και επερχόμενης κυκλοφορίας μέσα στον κυκλικό δακτύλιο πρέπει να πραγματοποιηθεί η κατάλληλη αντιστοίχιση των

στρεφουσών κινήσεων επί του κυκλικού κόμβου ως προς τον αντίστοιχο Ισόπεδο κόμβο (ΙΚ). Η αντιστοίχιση αυτή θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

3.2.2. Κυκλοφοριακή Ικανότητα

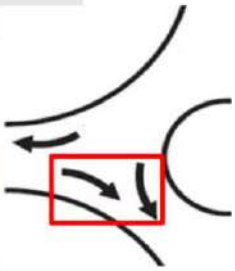
Η κυκλοφοριακή ικανότητα - χωρητικότητα ενός κυκλικού κόμβου συνδέεται άμεσα με το πλήθος των κινούμενων οχημάτων επί του δακτυλίου (επερχόμενη κυκλοφορία) στις περιοχές εισόδου, καθώς μία τέτοια αυξημένη κυκλοφορία μπορεί να μειώσει τη δυνατότητα των οχημάτων να εισέλθουν στον κυκλικό κόμβο.

Ο σωστός υπολογισμός της χωρητικότητας προϋποθέτει να γίνει ξεχωριστά σε κάθε πρόσβαση του κυκλικού κόμβου και πιο συγκεκριμένα ανά λωρίδα σε κάθε συνδυασμό αριθμού λωρίδων πρόσβασης και κίνησης στον δακτύλιο.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3-1) βάσει των Αμερικάνικων Οδηγιών φαίνεται σε επίπεδο εμπειρικών προσεγγίσεων ο καθορισμός του αριθμού λωρίδων εισόδου ανάλογα τον φόρτο των διασταυρωνόμενων κινήσεων, ο οποίος προκύπτει από το άθροισμα του φόρτου πρόσβασης και του φόρτου της επερχόμενης κυκλοφορίας ανάντη της αντίστοιχης πρόσβασης.

Πίνακας 3-1: Συσχέτιση Φόρτου Διασταυρωνόμενων Κινήσεων (οχ/h) και του Απαιτούμενου Αριθμού Λωρίδων Εισόδου σε κάθε Πρόσβαση σε έναν Κυκλικό Κόμβο [Πηγή: Μαυρομάτης 2020]

Φόρτος Διασταυρωνόμενων Κινήσεων (οχ/h)	Απαίτηση Λωρίδων Εισόδου
0 – 1000	μία λωρίδα
1000 - 1300	δύο λωρίδες μία λωρίδα
1300 - 1800	δύο λωρίδες
> 1800	> δύο λωρίδες περαιτέρω διερεύνηση



Ύστερα από μετρήσεις και κατάλληλη επεξεργασία έχουν προκύψει ορισμένες εξισώσεις, μέσω των οποίων υπολογίζεται η χωρητικότητα ανά λωρίδα πρόσβασης σε κυκλικούς κόμβους έως δύο λωρίδων κυκλοφορίας σύμφωνα με τις Αμερικάνικες Οδηγίες. Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της χωρητικότητας ανά λωρίδα πρόσβασης για την κάθε περίπτωση παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω, οι οποίες έχουν αναφερθεί επιγραμματικά και στην πρώτη έρευνα του Κεφαλαίου 2. (υποκεφάλαιο 2.5.1.).

- Μία ή οποιαδήποτε από δύο λωρίδες πρόσβασης και μία λωρίδα επερχόμενης κυκλοφορίας στον δακτύλιο:

$$c_{e,pce} = 1.130e^{[(-1,0\cdot 10^{-3})\cdot v_{c,pce}]} \text{ (Εξίσωση 2.5.1-4)}$$

όπου:

$c_{e,pce}$: η κυκλοφοριακή ικανότητα της λωρίδας πρόσβασης (ΜΕΑ/h)

$v_{c,pce}$: ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας (ΜΕΑ/h)

- Μία λωρίδας πρόσβασης και δύο λωρίδες επερχόμενης κυκλοφορίας στον δακτύλιο:

$$c_{e,pce} = 1.130e^{[(-0,7\cdot 10^{-3})\cdot v_{c,pce}]} \text{ (Εξίσωση 2.5.1-5)}$$

όπου:
$c_{e,pce}$: η κυκλοφοριακή ικανότητα της λωρίδας πρόσβασης (MEA/h)
$v_{c,pce}$: ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας (MEA/h)

- Δύο λωρίδες πρόσβασης και δύο λωρίδες επερχόμενης κυκλοφορίας στον δακτύλιο:

$$c_{e,R,pce} = 1.130e^{[(-0,7\cdot 10^{-3})\cdot v_{c,pce}]} \text{ (Εξίσωση 2.5.1-6)}$$

$$c_{e,TLT,pce} = 1.130e^{[(-0,75\cdot 10^{-3})\cdot v_{c,pce}]} \text{ (Εξίσωση 2.5.1-7)}$$

όπου:
$c_{e,R,pce}$: η κυκλοφοριακή ικανότητα της δεξιάς λωρίδας πρόσβασης (MEA/h)
$c_{e,TLT,pce}$: η κυκλοφοριακή ικανότητα της αριστερής λωρίδας πρόσβασης (MEA/h)
$v_{c,pce}$: ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας (MEA/h)

- Από τις παραπάνω εξισώσεις συμπεραίνεται ότι η κυκλοφοριακή ικανότητα των λωρίδων πρόσβασης σε όλους τους τύπους κυκλικού κόμβου ($c_{e,pce}$) εξαρτάται μόνο από την επερχόμενη κυκλοφορία ($v_{c,pce}$), η αύξηση της οποίας επιφέρει μείωση στη χωρητικότητα των λωρίδων αυτών.
- Ωστόσο, η κυκλοφοριακή ικανότητα των λωρίδων πρόσβασης ($c_{e,pce}$) εξαρτάται εμμέσως και από τον αριθμό των λωρίδων τόσο της πρόσβασης όσο και της επερχόμενης κυκλοφορίας στον δακτύλιο, οι διαφορές των οποίων φαίνονται στο Γράφημα 3-1.

Όπως έχει προαναφερθεί, οι κυκλικοί κόμβοι, που εξετάστηκαν σε όλα τα σενάρια, ήταν τετρασκελείς «τυπικοί» (single-lane roundabouts). Συνεπώς, για τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας κάθε λωρίδας πρόσβασής τους χρησιμοποιήθηκε μόνο η Εξίσωση 2.5.1-4.

Όπως και για τις λωρίδες πρόσβασης σε κάθε κλάδο ενός κυκλικού κόμβου, έτσι και για τις δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες υπάρχουν ειδικές εξισώσεις υπολογισμού της χωρητικότητάς τους σύμφωνα με τις Αμερικάνικες Οδηγίες. Οι εξισώσεις αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω. Η πρώτη από αυτές έχει αναφερθεί και στην πρώτη έρευνα του Κεφαλαίου 2. (υποκεφάλαιο 2.5.1.).

- «Μερική» δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα (partial bypass lane) με σήμανση υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP (stop slip lane) ή παραχώρησης προτεραιότητας (yield slip lane) έναντι μίας λωρίδας εξόδου στον ακριβώς επόμενό της κλάδο:

$$c_{bypass,pce} = 1.130e^{[(-1,0\cdot 10^{-3})\cdot v_{ex,pce}]} \text{ (Εξίσωση 2.5.1-2)}$$

όπου:
$c_{bypass,pce}$: η κυκλοφοριακή ικανότητα της «μερικής» δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας (MEA/h)
$v_{ex,pce}$: ο φόρτος εξόδου του ακριβώς επόμενου κλάδου της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας, ο οποίος αποτελεί την ανταγωνιστική της ροή (MEA/h)

- «Μερική» δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα (partial bypass lane) με σήμανση υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP (stop slip lane) ή παραχώρησης προτεραιότητας (yield slip lane) έναντι δύο λωρίδων εξόδου στον ακριβώς επόμενό της κλάδο:

$$c_{bypass,pce} = 1.130e^{[(-0,7\cdot 10^{-3})\cdot v_{ex,pce}]}$$

Εξίσωση 3.2.2-1

όπου:

$c_{bypass,pce}$: η κυκλοφοριακή ικανότητα της «μερικής» δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας (MEA/h)

$v_{ex,pce}$: ο φόρτος εξόδου του ακριβώς επόμενου κλάδου της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας, ο οποίος αποτελεί την ανταγωνιστική της ροή (MEA/h)

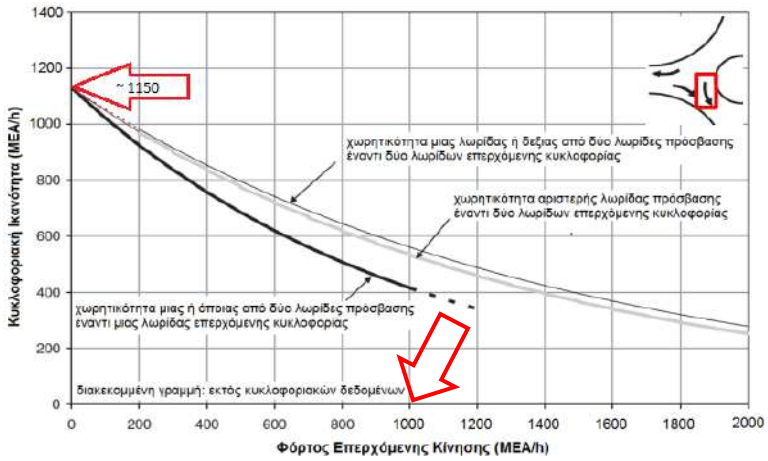
- Για τη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής με λωρίδα επιτάχυνσης (free-flow/full bypass lane) δεν έχει δοθεί κάποια συγκεκριμένη μαθηματική σχέση υπολογισμού της χωρητικότητάς της από τις Αμερικάνικες Οδηγίες, καθώς βάσει αυτών αφορά κλασική περίπτωση συγχώνευσης λωρίδων.

Επειδή, όμως, στην εργασία αυτή θα μελετηθούν αποκλειστικά οι δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες ελεύθερης ροής (free-flow bypass lane), ήταν απαραίτητη η χρήση κάποιου τύπου για τον υπολογισμό της χωρητικότητάς τους κατά την εκτέλεση των σεναρίων. Συνεπώς, χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη εξίσωση των καθηγητών Marian Tracz et al. [17], η οποία έχει αποτελέσει το μοναδικό μέσο υπολογισμού της κυκλοφοριακής ικανότητας των συγκεκριμένων τύπων στους «τυπικούς» μόνο κυκλικούς κόμβους σε όλες τις μέχρι τώρα έρευνες, που έχουν ως βασικό αντικείμενο μελέτης τις δεξιόστροφες παρακαμπτήριες λωρίδες. Αυτή η εξίσωση έχει αναφερθεί και στην πρώτη έρευνα του Κεφαλαίου 2. (υποκεφάλαιο 2.5.1.).

$$c_{bypass,pce} = 1.250e^{[(-0,7\cdot 10^{-3})\cdot v_{ex,pce}]} \text{ (Εξίσωση 2.5.1-3)}$$

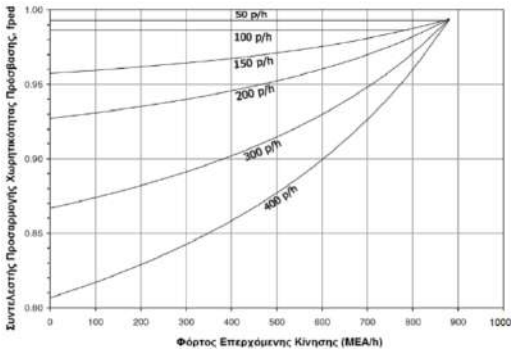
- Από τις παραπάνω εξισώσεις συμπεραίνεται ότι η κυκλοφοριακή ικανότητα όλων των τύπων των δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων ($c_{bypass,pce}$) εξαρτάται μόνο από την ανταγωνιστική τους ροή ($v_{exc,pce}$), δηλαδή τον φόρτο εξόδου του ακριβώς επόμενού τους κλάδου, η αύξηση του οποίου επιφέρει μείωση στη χωρητικότητά τους.
- Ωστόσο, όπως γίνεται αντιληπτό από την Εξίσωση 2.5.1-2 και Εξίσωση 3.2.2-1, η κυκλοφοριακή ικανότητα της «μερικής» δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας εξαρτάται εμμέσως και από τον αριθμό λωρίδων του ακριβώς επόμενού της κλάδου, διότι βάσει αυτού καθορίζεται ποιος τύπος υπολογισμού της θα επιλεχθεί. Επιπλέον, συγκρίνοντας τις δύο αυτές εξισώσεις προκύπτει ότι η χωρητικότητας της «μερικής» δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας είναι μεγαλύτερη όταν ο ακριβώς επόμενος της κλάδος διαθέτει δύο λωρίδες εξόδου.

Στο Γράφημα 3-1, το οποίο έχει προκύψει από τις Αμερικάνικες Οδηγίες, απεικονίζεται η κυκλοφοριακή ικανότητα ανά λωρίδα πρόσβασης σε κυκλικούς κόμβους, που έχουν έως δύο λωρίδες κυκλοφορίας. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί, μεγαλύτερη χωρητικότητα πρόσβασης εντοπίζεται όταν ο κυκλικός κόμβος διαθέτει μία λωρίδα πρόσβασης και δύο λωρίδες επερχόμενης κυκλοφορίας ή όταν διαθέτει δύο λωρίδες και στην περιοχή πρόσβασης και στην περιοχή επερχόμενης κυκλοφορίας, όπου τότε μεγαλύτερη χωρητικότητα παρουσιάζει η δεξιά λωρίδα πρόσβασής του.

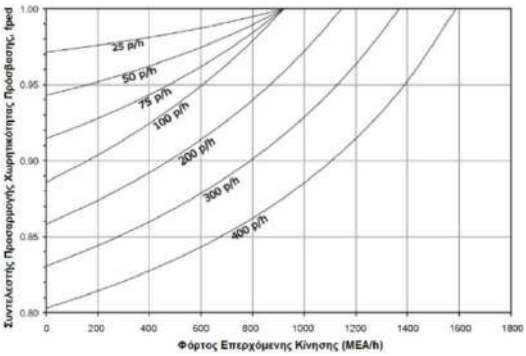


Γράφημα 3-1: Σύγκριση Κυκλοφοριακής Ικανότητας (ΜΕΑ/h) των Λωρίδων Πρόσβασης σε έναν Κυκλικό Κόμβο [Πηγή: Μαυρομάτης 2020]

Στο Γράφημα 3-2, όπου και αυτό έχει προκύψει από τις Αμερικάνικες Οδηγίες, φαίνεται η επιρροή των πεζών στην κυκλοφοριακή ικανότητα των λωρίδων πρόσβασης μέσω κατάλληλων συντελεστών, θεωρώντας σε κάθε περίπτωση ότι οι πεζοί έχουν προτεραιότητα. Οι συντελεστές αυτοί μειώνουν την αντίστοιχη χωρητικότητα των λωρίδων πρόσβασης χωρίς την παρουσία πεζών και η μείωση αυτή εξαρτάται από τον φόρτο των πεζών, τον φόρτο της επερχόμενης κυκλοφορίας και το πλήθος των λωρίδων πρόσβασης.



1 λωρίδα πρόσβασης



2 λωρίδες πρόσβασης

Σημείωση → p/h: πεζοί/ώρα

Γράφημα 3-2: Συντελεστής Προσαρμογής της Χωρητικότητας μίας και δύο Λωρίδων Πρόσβασης ως προς τους Φόρτους των Πεζών (πεζοί/h) και της Επερχόμενης Κυκλοφορίας (ΜΕΑ/h) [Πηγή: Μαυρομάτης 2020]

Αυτοί οι συντελεστές προσαρμογής της χωρητικότητας κάθε πρόσβασης λόγω του φόρτου των πεζών δεν χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, καθώς θεωρήθηκε ότι σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις κυκλικών κόμβων **δεν θα υπάρχει παρουσία πεζών**. Ο λόγος, που συνέβη αυτό, ήταν διότι, δεν συνίσταται βάσει των Αμερικάνικων Οδηγιών η ταυτόχρονη παρουσία πεζών και δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής.

3.2.3. Λόγος Εξυπηρετούμενου Φόρτου προς Χωρητικότητα

Ο υπολογισμός του εξυπηρετούμενου φόρτου προς τη χωρητικότητα ανά λωρίδα πρόσβασης αποτελεί ένα ικανοποιητικό μέσο λειτουργικής αξιολόγησης ενός κυκλικού κόμβου. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η Εξίσωση 3.2.3-1:

$$x = \frac{v}{c}$$

Εξίσωση 3.2.3-1

όπου:
x: ο λόγος φόρτου προς χωρητικότητα λωρίδας
v: ο φόρτος της λωρίδας πρόσβασης (ΜΕΑ/h)
c: η κυκλοφοριακή ικανότητα της λωρίδας πρόσβασης (ΜΕΑ/h)

Όταν οι τιμές του λόγου v/c είναι σε κάθε πρόσβαση έως και 0,85 δεν αναμένονται σημαντικά λειτουργικά προβλήματα. Για αυτό το λόγο, είναι επιθυμητό η Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία (ΜΗΚ) του κυκλικού κόμβου να μην υπερβαίνει τα 2.500 οχήματα/ημέρα, προκειμένου ο συγκεκριμένος λόγος σε κάθε πρόσβασή του να διατηρείται μικρότερος από 0,85. Όταν οι τιμές του λόγου υπερβούν το 0,85 απαιτείται ειδική ανάλυση, προκειμένου να βρεθεί εάν η μικρή επαύξηση του φόρτου επιφέρει τροποποιήσεις στις καθυστερήσεις και στον σχηματισμό ουρών. Σε ειδικές μόνο περιπτώσεις, όπως σε περιοχές όπου οι κόμβοι εντοπίζονται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, δεν απαιτείται η ανάλυση αυτή.

3.2.4. Εκτίμηση Καθυστερήσεων

Η εκτίμηση των καθυστερήσεων γενικά κατά τη διέλευση από έναν Ισόπεδο κόμβο (ΙΚ) και άρα και για έναν κυκλικό κόμβο αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους λειτουργικής αξιολόγησής τους. Από ορισμένες έρευνες έχει προκύψει ότι η διαδικασία εκτίμησης των καθυστερήσεων σε έναν κυκλικό κόμβο είναι παρόμοια με αυτή που ακολουθείται για μη σηματοδοτούμενους Ισόπεδους κόμβους. Στη συγκεκριμένη Διπλωματική έχει θεωρηθεί ότι ο εξεταζόμενος κυκλικός κόμβος **δεν διαθέτει φωτεινή σηματοδότηση**.

Σε έναν κυκλικό κόμβο όλο το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στη συνολική του καθυστέρηση λόγω της παρουσίας κανόνων προτεραιότητας και επιπλέον χρόνων, που δεν υπολογίζονται σε συνθήκες ελεύθερης ροής. Αυτοί οι επιπλέον χρόνοι περιλαμβάνουν τις απαιτήσεις του οχήματος σε χρόνο για να επιβραδύνει για την αναμονή στην ουρά, για να παραμείνει στην ουρά μέχρι να μπορέσει να εισέλθει στην επερχόμενη κυκλοφορία του κυκλικού κόμβου και στη συνέχεια να επιταχύνει.

Αρχικά, για τον υπολογισμό της συνολικής καθυστέρησης ενός κυκλικού κόμβου πρέπει πρώτα να βρεθεί η μέση ολική καθυστέρηση μέσα από την Εξίσωση 3.2.4-1 βάσει των Αμερικάνικων Οδηγιών:

$$d = \frac{3.600}{c} + 900T\left[\frac{v}{c} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v}{c} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3.600}{c}\right)\frac{v}{c}}{450T}}\right] + 5\min\left[\frac{v}{c}, 1\right]$$

Εξίσωση 3.2.4-1

όπου:
d: μέση ολική καθυστέρηση (sec/οχ)
c: κυκλοφοριακή ικανότητα λωρίδας πρόσβασης (οχ/h)
v: φόρτος λωρίδας πρόσβασης (οχ/h)
T: 0,25h [χρονική περίοδος ανάλυσης, η οποία συνίσταται να είναι ίση με 15 min]

Η μέση ολική καθυστέρηση υπολογίζεται σε sec/οχ και όχι σε sec/ΜΕΑ, δεδομένου ότι η ύπαρξη Βαρέων Οχημάτων (ΒΟ) αντιμετωπίζεται σαν ξεχωριστή περίπτωση. Όταν ο λόγος του φόρτου προς τη χωρητικότητα της λωρίδας πρόσβασης (x=v/c) είναι μεγαλύτερος από 0,90, ό,τι προκύπτει από την Εξίσωση 3.2.4-1 δεν είναι αρκετά αξιόπιστο και η ακρίβεια εξαρτάται άμεσα από την περίοδο ανάλυσης. Γενικά η περίοδος ανάλυσης συνίσταται να λαμβάνεται ίση με 15 min.

Για να μπορούν να συσχετισθούν οι υπολογιζόμενες καθυστερήσεις με άλλους τύπους ισόπεδων κόμβων, υπολογίζεται η καθυστέρηση σε κάθε πρόσβαση (Εξίσωση 3.2.4-2) σύμφωνα με τις Αμερικάνικες Οδηγίες ως ο σταθμισμένος μέσος των καθυστερήσεων των λωρίδων της με βάση τους φόρτους της κάθε λωρίδας, στις οποίες λαμβάνεται υπόψιν και η πιθανή ύπαρξη δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας.

$$d_{\text{πρόσβασης}} = \frac{d_{LL}v_{LL} + d_{RL}v_{RL} + d_{Bypass}v_{Bypass}}{v_{LL} + v_{RL} + v_{Bypass}}$$

Εξίσωση 3.2.4-2

όπου:

$d_{\text{πρόσβασης}}$: η συνολική καθυστέρηση της εξεταζόμενης πρόσβασης (sec/οχ)

d_i: η καθυστέρηση κάθε λωρίδας της εξεταζόμενης πρόσβασης (sec/οχ)

v_i: ο φόρτος κάθε λωρίδας της εξεταζόμενης πρόσβασης (οχ/h)

Bypass: η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα (εάν υπάρχει)

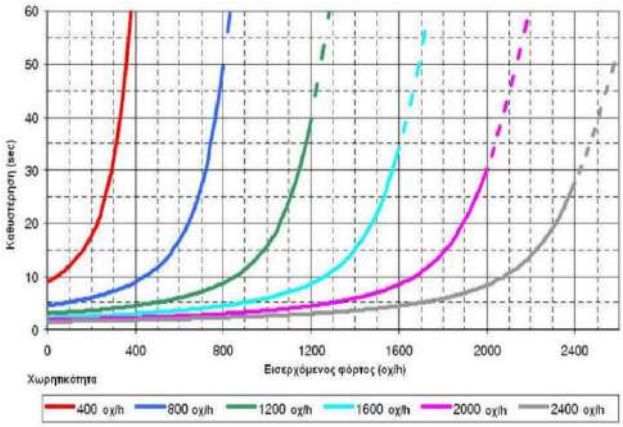
LL: η αριστερή λωρίδα της εξεταζόμενης πρόσβασης

RL: η δεξιά λωρίδα της εξεταζόμενης πρόσβασης

εάν η πρόσβαση διαθέτει δύο λωρίδες πρόσβασης, διαφορετικά λαμβάνεται υπόψιν μόνο η μία λωρίδα που υπάρχει

Στην εργασία αυτή, επειδή μελετήθηκαν αποκλειστικά τετρασκελείς «τυπικοί» κυκλικοί κόμβοι (single-lane roundabouts), στον σταθμισμένο μέσο στην Εξίσωση 3.2.4-2 τοποθετήθηκε μόνο η μία λωρίδα, που διέθετε η κάθε πρόσβαση και η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα, όποτε υπήρχε στον Νότιο κλάδο.

Στο Γράφημα 3-3, το οποίο έχει προκύψει από τις Αμερικάνικες Οδηγίες, αναπαρίστανται οι αναμενόμενες καθυστερήσεις ανά λωρίδα πρόσβασης συναρτήσει του εισερχόμενου φόρτου και της χωρητικότητάς της. Όπως φαίνεται, όσο μικρότερη είναι η χωρητικότητά της, τόσο μεγαλύτερες αναμένονται να είναι οι καθυστερήσεις της.



Γράφημα 3-3: Αναμενόμενες Καθυστερήσεις (sec/οχ) ανά Λωρίδα Πρόσβασης συναρτήσει της Χωρητικότητας (οχ/h) και του Εισερχόμενου Φόρτου της (οχ/h) [Πηγή: NCHRP 2010]

Έχοντας υπολογίσει τις καθυστερήσεις σε όλες τις προσβάσεις του κυκλικού κόμβου από την Εξίσωση 3.2.4-2, είναι εφικτό να μετρηθεί και η συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του κόμβου (Εξίσωση 3.2.4-3), σταθμίζοντας τις καθυστερήσεις αυτές με τους συνολικούς φόρτους της κάθε πρόσβασης.

$$d_{\text{κόμβου}} = \frac{\sum d_i v_i}{\sum v_i}$$

Εξίσωση 3.2.4-3

όπου:

$d_{\text{κόμβου}}$: η συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του κυκλικού κόμβου (sec/οχ)

d_i: η συνολική καθυστέρηση της κάθε πρόσβασης του κυκλικού κόμβου (sec/οχ)

v_i: ο συνολικός φόρτος της κάθε πρόσβασης του κυκλικού κόμβου (οχ/h)

3.2.5. Επίπεδο Εξυπηρέτησης

Όταν ο λόγος φόρτου προς χωρητικότητα (v/c) δεν υπερβαίνει τη μονάδα, τότε η συνολική καθυστέρηση ενός κυκλικού κόμβου χρησιμεύει για τον προσδιορισμό του επιπέδου εξυπηρέτησής του (LOS) μέσω του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3-2), ο οποίος έχει προκύψει από τις Αμερικάνικες Οδηγίες και χρησιμοποιείται και στους μη σηματοδοτούμενους Ισόπεδους κόμβους (ΙΚ). Στην παρούσα έρευνα, επειδή εξετάστηκαν σε όλες τις περιπτώσεις κυκλικοί κόμβοι με λόγους v/c έως και 0,85 σε κάθε πρόσβασή του, χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω πίνακας, για να υπολογίζεται το επίπεδο εξυπηρέτησής του.

Πίνακας 3-2: Αντιστοίχιση Καθυστερήσεων (sec/οχ) του Κυκλικού Κόμβου με τα Επίπεδα Εξυπηρέτησής του (LOS) [Πηγή: NCHRP 2010]

Συνολική Καθυστέρηση (sec/veh)	Επίπεδο Εξυπηρέτησης	
	v/c≤1.0	v/c>1.0
0 - 10	A	F
>10 - 15	B	F
>15 - 25	C	F
>25 - 35	D	F
>35 - 45	E	F
>50	F	F

3.2.6. Εκτίμηση Μήκους Ουρών

Ο υπολογισμός της αναμενομένης ουράς αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον σχεδιασμό των προσβάσεων σε έναν κυκλικό κόμβο, μέσω του οποίου αναδεικνύονται οι περιπτώσεις, που ίσως υπάρχουν προβλήματα με τις γειτονικές τους προσβάσεις και ταυτόχρονα την πιθανή αναγκαιότητα δημιουργίας δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας σύμφωνα με τις Αμερικάνικες Οδηγίες. Προκειμένου να υπολογιστούν οι αναμενόμενες ουρές χρησιμοποιείται η Εξίσωση 3.2.6-1 σύμφωνα με τις Αμερικάνικες Οδηγίες.

$$Q_{95} = 900T\left[\frac{v}{c} - 1 + \sqrt{\left(1 - \frac{v}{c}\right)^2 + \frac{\left(\frac{3.600}{c}\right)\frac{v}{c}}{150T}}\right] + \left(\frac{c}{3.600}\right)$$

Εξίσωση 3.2.6-1

όπου:

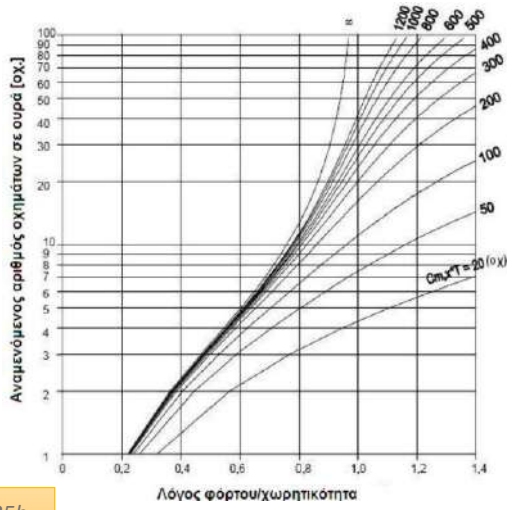
Q_{95}: η ουρά, που δεν υπερβαίνει το 95% των περιπτώσεων (οχ)

c: η κυκλοφοριακή ικανότητα λωρίδας πρόσβασης (οχ/h)

v: ο φόρτος της λωρίδας πρόσβασης (οχ/h)

T: 0,25h [χρονική περίοδος ανάλυσης, η οποία συνίσταται να είναι ίση με 15 min]

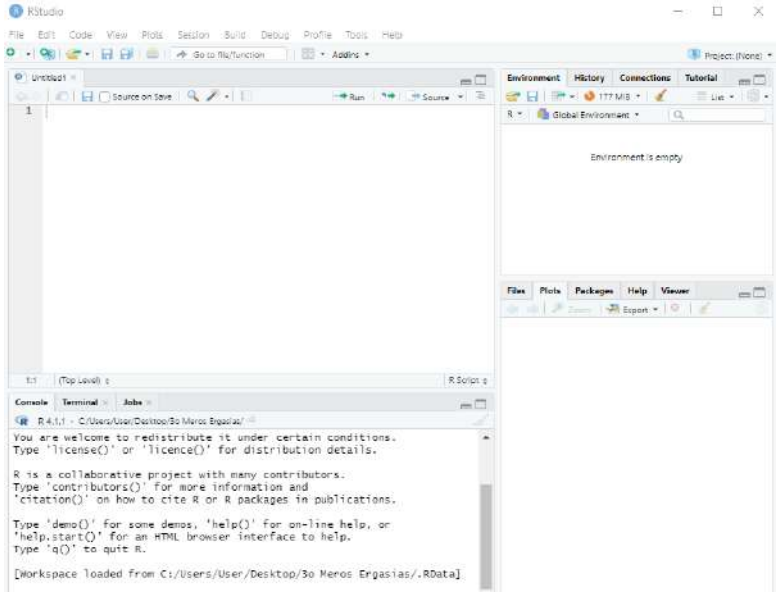
Από το Γράφημα 3-4, όπου όπως και τα υπόλοιπα έτσι και αυτό είναι βάσει των Αμερικάνικων Οδηγιών, προκύπτει ο αναμενόμενος αριθμός οχημάτων σε ουρά ως προς τη χωρητικότητα και το λόγο v/c. Οι καμπύλες του γραφήματος έχουν οριστεί ανά διαστήματα βάσει του γινομένου της χωρητικότητας επί της περιόδου ανάλυσης, η οποία λήφθηκε ίση με 15 min (T = 0,25h).



Γράφημα 3-4: Αναμενόμενο Μήκος Ουράς (οχ) συναρτήσει της Χωρητικότητας (οχ/h) και του Λόγου v/c ενός Κυκλικού Κόμβου [Πηγή: NCHRP 2010]

3.3. Εισαγωγή στη Στατιστική Ανάλυση

Μετά το πέρας της λειτουργικής ανάλυσης και της δημιουργίας των δεδομένων της Διπλωματικής εργασίας, ακολούθησε η στατιστική επεξεργασία. Η επεξεργασία αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω ενός προγράμματος ανοιχτού κώδικα του R-Studio, το οποίο παρέχει όλα τα αναγκαία εργαλεία για να εκτελεστεί αναλυτική υπολογιστική στατιστική και να σχεδιαστούν κατάλληλα γραφήματα. Στην Εικόνα 3-1 φαίνεται το περιβάλλον του R-Studio.



Εικόνα 3-1: Περιβάλλον του R-Studio

Το πάνω αριστερό μέρος του προγράμματος R-Studio ονομάζεται R-Script και αποτελεί την περιοχή, στην οποία γράφεται ο κώδικας και στο πάνω μέρος δεξιά, που είναι το Environment, γίνονται ορατά τα στοιχεία, που είτε εισέρχονται είτε δημιουργούνται μέσω του κώδικα. Κάτω αριστερά στο Console εμφανίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσής του και στο κάτω δεξιό μέρος εμφανίζονται δύο σημαντικές καρτέλες. Στη μία, που ονομάζεται Plots, φαίνονται τα διαγράμματα, που προκύπτουν και στην άλλη με το όνομα Packages τα διάφορα υποπρογράμματα, που εγκαθίστανται, για να μπορούν να εκτελούνται όλες οι επιθυμητές εντολές. Όλα αυτά απεικονίζονται στην Εικόνα 3-1.

Η στατιστική ανάλυση της Διπλωματικής εργασίας, η οποία έγινε μέσω του προγράμματος αυτού, πραγματοποιήθηκε για τη διερεύνηση της αναγκαιότητας χωροθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής (free-flow right-turn bypass lane) στον Νότιο κλάδο τετρασκελών «τυπικών» κυκλικών κόμβων (single-lane roundabouts) μέσω της δημιουργίας γραμμικών μοντέλων. Κεντρικός στόχος αποτέλεσε η εξαγωγή του καλύτερου μοντέλου, που να περιγράφει ορθώς την αναγκαιότητα αυτή.

Στο παρόν υποκεφάλαιο όπως και στα υποκεφάλαια 3.4. και 3.5. παρουσιάζεται γενικά το θεωρητικό υπόβαθρό, που χρειάστηκε, για να κατανοηθούν και ύστερα να χρησιμοποιηθούν όλες οι βασικές στατιστικές έννοιες κατά τη διάρκεια της παρούσας στατιστικής ανάλυσης.

3.3.1. Είδη Μεταβλητών

Με τον όρο μεταβλητές εκφράζονται τα μεγέθη, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες ενός συνόλου, που μετρούνται και καταγράφονται προκειμένου να αναλυθούν και να επεξεργαστούν. Βασικός στόχος αυτής της επεξεργασίας είναι η εξαγωγή βασικών συμπερασμάτων για το σύνολο, που χαρακτηρίζουν.

Οι μεταβλητές διακρίνονται σε εξαρτημένες ή διαφορετικά μεταβλητές απόκρισης (dependent/response variables) και ανεξάρτητες/επεξηγηματικές μεταβλητές (independent variables). Ως εξαρτημένη ορίζεται η μεταβλητή, της οποίας η τιμή αναμένεται να προβλεφθεί από το μοντέλο, ενώ ως ανεξάρτητη ορίζεται η μεταβλητή, η οποία επιδρά στην πρόβλεψη της εξαρτημένης και λαμβάνει συγκεκριμένες τιμές.

Οι μεταβλητές διακρίνονται και στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Ποιοτικές μεταβλητές: Σε αυτήν την κατηγόρια υπάγονται οι μεταβλητές εκείνες, που οι δυνατές τιμές τους είναι σαφώς διατεταγμένες. Παραδείγματα ποιοτικών μεταβλητών είναι το φύλο και η οικογενειακή κατάσταση.
- Ποσοτικές μεταβλητές: Ονομάζονται οι μεταβλητές εκείνες, που είναι άμεσα μετρήσιμες, καθώς οι διάφοροι παράγοντες, που χαρακτηρίζουν, μεταβάλλονται κατά αριθμητική ποσότητα. Παραδείγματα ποσοτικών μεταβλητών είναι το ύψος και ο αριθμός των πεζών, που διασχίζει μία διάβαση.

Με τη σειρά τους οι ποσοτικές μεταβλητές διακρίνονται στις ακόλουθες υποκατηγορίες:

- Συνεχείς: Ως συνεχείς ορίζονται οι ποσοτικές μεταβλητές, οι οποίες λαμβάνουν τιμές από το σύνολο των πραγματικών αριθμών. Παράδειγμα συνεχούς μεταβλητής αποτελεί η ταχύτητα.
- Διακριτές: Ονομάζονται οι ποσοτικές μεταβλητές, οι οποίες λαμβάνουν τιμές από το σύνολο των φυσικών αριθμών. Παράδειγμα αποτελεί το πλήθος των οχημάτων, που διέρχεται από μία οδό.

Στη συγκεκριμένη Διπλωματική τόσο η εξαρτημένη όσο και οι ανεξάρτητες μεταβλητές της βάσης δεδομένων, οι οποίες θα αναφερθούν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5., είναι ποσοτικές και κάποιες από αυτές συνεχείς.

3.3.2. Συσχέτιση Μεταβλητών

Στις ποσοτικές μεταβλητές σημαντική κρίνεται η διερεύνηση της μεταξύ τους συσχέτισης. Ως συσχέτιση ορίζεται η στατιστική μονάδα, η οποία δείχνει την ύπαρξη σχέσης και πιο συγκεκριμένα γραμμικής σχέσης ανάμεσα σε δύο ή περισσότερες μεταβλητές, τον βαθμό με τον οποίο μεταβάλλονται οι μεταβλητές αυτές συγχρόνως και προς ποια κατεύθυνση. Γενικά, η γραμμική σχέση δύο μεταβλητών είναι της μορφής Y=α+bX, όπου X και Y είναι η ανεξάρτητη και εξαρτημένη μεταβλητή αντίστοιχα, το α ο σταθερός όρος και το b ο συντελεστής της ανεξάρτητης μεταβλητής. Οι πιθανές κατηγορίες συσχετίσεων μεταξύ των μεταβλητών είναι οι εξής:

- Θετικά συσχετισμένες μεταβλητές
- Ασυσχέτιστες μεταβλητές
- Αρνητικά συσχετισμένες μεταβλητές

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι, μέσω των οποίων είναι εφικτό να βρεθεί η συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών. Παρακάτω παρατίθενται όλα τα μέτρα συσχέτισης:

- Γραμμικός Συντελεστής Συσχέτισης
- Συνδιακύμανση
- Συντελεστής Συσχέτισης Pearson
- Συντελεστή Συσχέτισης Spearman

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, λόγω του ότι οι μεταβλητές, που θα εξεταστούν στη Διπλωματική, είναι κάποιες από αυτές συνεχείς, χρησιμοποιήθηκε ο παραμετρικός συντελεστής συσχέτισης Pearson, σαν ο πιο κατάλληλος που είναι για τον υπολογισμό των συσχετίσεων μεταξύ ποσοτικών και ακριβέστερα συνεχών μεταβλητών. Ο συντελεστής αυτός, ο οποίος υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.3.2-1, δεν έχει μονάδα μέτρησης και συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα “ρ”.

$$\rho = \frac{\mathrm{cov}(x,y)}{s_x \cdot s_y}$$

Εξίσωση 3.3.2-1

όπου:

cov(x,y): η συνδιακύμανση του δείγματος

s_x: η τυπική απόκλιση της μεταβλητής x

s_y: η τυπική απόκλιση της μεταβλητής y

Το εύρος τιμών του συντελεστή συσχέτισης Pearson είναι [-1,1], με τις χαρακτηριστικές του τιμές να ερμηνεύονται όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

- ρ=1: υπάρχει τέλεια θετική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών x και y και η αύξηση της μίας μεταβλητής συνεπάγεται την αύξηση και της άλλης
- ρ=0: οι μεταβλητές x και y είναι ασυσχέτιστες, δηλαδή δεν υπάρχει καμία γραμμική σχέση μεταξύ των μεταβλητών x και y
- ρ=-1: υπάρχει τέλεια αρνητική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών x και y και η αύξηση της μίας μεταβλητής συνεπάγεται τη μείωση της άλλης (και αντίστροφα)

Γενικά, ένα μοντέλο, για να θεωρηθεί στατιστικά ορθό, είναι επιθυμητό οι ανεξάρτητες μεταβλητές του να εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση με την εξαρτημένη, δηλαδή ο συντελεστής συσχέτισής Pearson να λαμβάνει τιμή κοντά στο 1 κατά απόλυτη τιμή και οι ανεξάρτητες μεταβλητές μεταξύ τους να εμφανίζουν χαμηλή συσχέτιση, δηλαδή ο συντελεστής τους να λαμβάνει τιμές κοντά στο 0. Όταν, όμως, οι ανεξάρτητες μεταβλητές μεταξύ τους εμφανίζουν συντελεστή συσχέτισης Pearson κοντά στο 1 κατά απόλυτη τιμή, τότε το μοντέλο δεν είναι στατιστικά ορθό.

Στην Εξίσωση 3.3.2-1 αναφέρθηκαν οι έννοιες της τυπικής απόκλισης και της συνδιακύμανσης, οι οποίες δεν έχουν αναφερθεί ξανά. Παρακάτω γίνεται μία επιγραμματική παρουσίαση των καινούργιων αυτών εννοιών.

Η τυπική απόκλιση (standard deviation) αποτελεί ένα από τα μέτρα μεταβλητότητας (Measures of Variability) και χρησιμοποιείται, προκειμένου η σχετική μεταβλητότητα να εκφράζεται στις ίδιες μονάδες με τα αρχικά δεδομένα. Η τυπική απόκλιση, η οποία υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.3.2-2, προκύπτει από την τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης - διασποράς (variance). Η διακύμανση, όπου είναι και εκείνη μέτρο μεταβλητότητας, προκύπτει από το τετράγωνο της αριθμητικής μέτρησης του μέσου όρου της απόκλισης των δεδομένων γύρω από το μέσο.

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$$

Εξίσωση 3.3.2-2

όπου:
s: η τυπική απόκλιση
s^2: η διακύμανση - διασπορά του δείγματος
$x_1, x_2, \dots, x_n$: οι παρατηρήσεις της μεταβλητής x
$\bar{x}$: η μέση τιμή του δείγματος της μεταβλητής x
n: το πλήθος των παρατηρήσεων
(-s, +s): περιέχει περίπου του 68% των δεδομένων
(-2s, +2s): περιέχει περίπου το 95% των δεδομένων
(-3s, +3s): περιέχει περίπου το 99% των δεδομένων

ισχύουν εμπειρικά για συμμετρικά κατανεμημένο δείγμα δεδομένων

Η συνδιακύμανση (covariance) δύο μεταβλητών συμβολίζεται ως cov(x,y), υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.3.2-3 και αποτελεί την αναμενόμενη τιμή του γινομένου της απόκλισης του x από τον μέσο της και της απόκλισης του y από τον αντίστοιχό της μέσο. Πρακτικά είναι ένα μέγεθος, που εκφράζει το μέσο ποσό της «ταυτόχρονης» μεταβλητότητας των x και y από τις μέσες τιμές τους.

$$\mathrm{cov}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{n-1}$$

Εξίσωση 3.3.2-3

όπου:
$x_1, x_2, \dots, x_n$: οι παρατηρήσεις της μεταβλητής x
$y_1, y_2, \dots, y_n$: οι παρατηρήσεις της μεταβλητής y
$\bar{x}$: η μέση τιμή του δείγματος της μεταβλητής x
$\bar{y}$: η μέση τιμή του δείγματος της μεταβλητής y
n: το πλήθος των παρατηρήσεων
Θετική συνδιακύμανση: οι δύο μεταβλητές x και y κινούνται στην ίδια κατεύθυνση

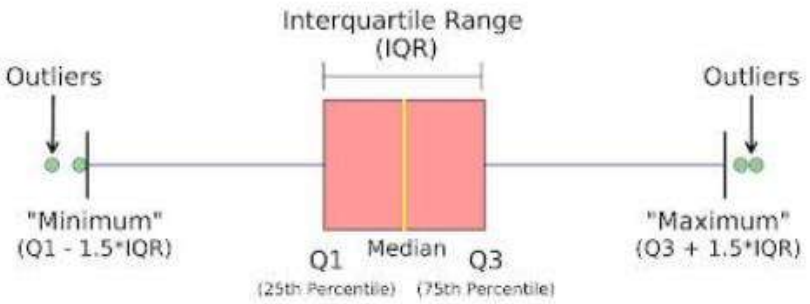
Μηδενική συνδιακύμανση: οι δύο μεταβλητές x και y δεν συσχετίζονται γραμμικά
Αρνητική συνδιακύμανση: οι δύο μεταβλητές x και y κινούνται σε διαφορετικές κατευθύνσεις

3.3.3. Γραφική Απεικόνιση Δεδομένων στο R-Studio – Boxplot

Το περιβάλλον R-Studio παρέχει πολλά εργαλεία περιγραφικής στατιστικής για την καλύτερη κατανόηση των δεδομένων. Παρακάτω θα γίνει αναφορά μόνο στο εργαλείο, που χρησιμοποιήθηκε από αυτή τη μελέτη, δηλαδή το εργαλείο του boxplot.

Πιο συγκεκριμένα, το boxplot είναι ένας εποπτικός τρόπος γραφικής απεικόνισης της κατανομής των τιμών - παρατηρήσεων μίας αριθμητικής μεταβλητής. Η κατανομή αυτή εκφράζεται μέσω πέντε τιμών, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 3-2 και είναι οι εξής:

- Διάμεσος (Median) (Q2/50th percentile): Αποτελεί την κεντρική τιμή, δηλαδή την τιμή της μεταβλητής, που χωρίζει ακριβώς στο μέσο το σύνολο των παρατηρήσεων. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο 50% των παρατηρήσεων και είναι η κίτρινη γραμμή του ορθογωνικού χωρίου (box) στην Εικόνα 3-2.
- 1^{ο} τεταρτημόριο (First Quartile) (Q1/25th percentile): Αποτελεί τη μεσαία τιμή ανάμεσα στη μικρότερη, όχι όμως την ελάχιστη και τη διάμεσο (median) της βάσης δεδομένων. Η τιμή Q1 είναι η αρχή του ορθογωνικού χωρίου (box) και αντιστοιχεί στο 25% των παρατηρήσεων.
- 3^{ο} τεταρτημόριο (Third Quartile) (Q3/75th percentile): Αποτελεί τη μεσαία τιμή ανάμεσα στη διάμεσο (median) και τη μεγαλύτερη, αλλά όχι τη μέγιστη τιμή της βάσης δεδομένων. Η τιμή Q3 είναι το τέλος του ορθογωνικού χωρίου (box) και αντιστοιχεί στο 75% των παρατηρήσεων. Το εύρος μεταξύ του 1^{ου} και του 3^{ου} τεταρτημορίου ισοδυναμεί με το εύρος IQR (Interquartile Range).
- Ελάχιστη τιμή (Minimum) (Q0/0th percentile): Αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή της βάσης δεδομένων. Προκύπτει από την διαφορά Q1 - 1,5·IQR.
- Μέγιστη τιμή (Maximum) (Q4/100th percentile): Αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της βάσης δεδομένων. Προκύπτει από την άθροισμα Q3 + 1,5·IQR.



Εικόνα 3-2: Βασικά Τμήματα ενός Boxplot [Πηγή: https://builtin.com/data-science/boxplot]

Μέσω των τιμών, που απεικονίζει το γράφημα του boxplot, μπορεί να ελεγχθεί εάν η μεταβλητή ακολουθεί κανονική κατανομή. Αυτό επιβεβαιώνεται όταν οι διαφορές (Median - Q1) και (Q3 – Median) είναι ίσες.

Επιπλέον, ένα άλλο τμήμα του boxplot είναι τα whiskers, που είναι οι δύο (μωβ) οριζόντιες γραμμές στην Εικόνα 3-2, οι οποίες εκτείνονται πέριξ και εξωτερικά του ορθογωνικού χωρίου μέχρι την ελάχιστη και μέγιστη τιμή αντίστοιχα. Πρακτικά, αυτές οι γραμμές αντιστοιχούν

στις παρατηρήσεις, που κυμαίνονται στο εύρος της ελάχιστης τιμής έως το Q1 και από το Q3 έως τη μέγιστη τιμή.

Τέλος, ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του συγκεκριμένου γραφήματος είναι τα outliers, που είναι οι πράσινες κουκίδες στην Εικόνα 3-2. Τα outliers αντιστοιχούν στις τιμές της βάσης δεδομένων, οι οποίες παρεκκλίνουν από τις συνήθεις τιμές των παρατηρήσεων. [4]

3.4. Ανάλυση Παλινδρόμησης

Στη στατιστική πολλές φορές προκύπτει η ανάγκη ταυτόχρονης μελέτης δύο ή περισσότερων μεταβλητών και ο προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο συσχετίζονται μεταξύ τους. Η ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) έρχεται να «υπηρετήσει» την ανάγκη αυτή, καθώς αποτελεί μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο υπολογισμού της συσχέτισης αυτής. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα κατανόησης του τρόπου, που μία αλλαγή της ανεξάρτητης μεταβλητής επηρεάζει μία τυπική τιμή της εξαρτημένης, όταν οι υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές διατηρούνται σταθερές.

Η ανάλυσης παλινδρόμησης διακρίνεται στην απλή και στην πολλαπλή παλινδρόμηση. Στην απλή παλινδρόμηση εξετάζεται μόνο μία ανεξάρτητη μεταβλητή X, η οποία μπορεί να εκφράσει ικανοποιητικά την εξαρτημένη μεταβλητή Y. Όταν υπάρχουν περισσότερες από μία ανεξάρτητες μεταβλητές, τότε η ανάλυση παλινδρόμησης καλείται πολλαπλή. Ωστόσο, και από τα δύο είδη ανάλυσης μπορούν να αναπτυχθούν μαθηματικά μοντέλα, τα οποία αποτελούν μία στατιστική διαδικασία ανάπτυξης μαθηματικών εξισώσεων, που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών με την εξαρτημένη και το ποιες από τις ανεξάρτητες επιδρούν στην πρόβλεψή της.

Γενικά, υπάρχουν πολλές μέθοδοι παλινδρόμησης, όπου η επιλογή της καταλληλότερης καθορίζεται από το είδος της εξαρτημένης μεταβλητής (συνεχής ή διακριτή). Οι συνηθέστερες μέθοδοι, που επιλέγονται σε συναφείς έρευνες με την υφιστάμενη, είναι αυτές της γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression) και της λογαριθμοκανονικής γραμμικής παλινδρόμησης (log-linear regression).

3.4.1. Μέθοδος Γραμμικής Παλινδρόμησης

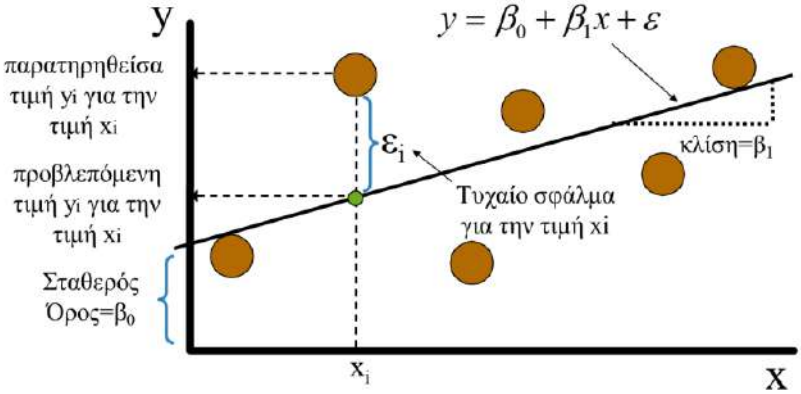
Η γραμμική παλινδρόμηση (linear regression) διερευνά τη σχέση μεταξύ μίας συνεχούς εξαρτημένης μεταβλητής, η οποία ακολουθεί κανονική κατανομή και μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Όταν στη σχέση αυτή υπάρχει μία μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή, τότε η γραμμική παλινδρόμηση ονομάζεται απλή, ενώ όταν υπάρχουν περισσότερες ονομάζεται πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση.

Στόχος της μεθόδου αυτής είναι η μοντελοποίηση της συνεχούς εξαρτημένης μεταβλητής Y ως μαθηματική συνάρτηση μίας η περισσότερων μεταβλητών X, έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η μεταβλητή Y όταν είναι γνωστό μόνο το X. Η σχηματική απεικόνιση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης φαίνεται στο Γράφημα 3-5 και η μαθηματική της εξίσωση μπορεί να γενικευτεί ως εξής (Εξίσωση 3.4.1-1):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

Εξίσωση 3.4.1-1

όπου:
β_0: ο σταθερός όρος
β_1: η κλίση της γραμμικής παλινδρόμησης
ε: ο όρος σφάλματος, δηλαδή το μέρος του y το οποίο δεν μπορεί να ερμηνευθεί από το γραμμικό μοντέλο
x: η ανεξάρτητη μεταβλητή
y: η εκτιμώμενη ή προβλεπόμενη τιμή της y



Γράφημα 3-5: Μορφή Γραμμικού Μοντέλου [Πηγή: Βλαχογιάννη 2021]

Ο συντελεστής β_1 της ανεξάρτητης μεταβλητής x καθορίζει το πόσο επηρεάζει η ανεξάρτητη μεταβλητή x την προβλεπόμενη τιμή της εξαρτημένης. Επιπλέον, η εκτίμηση του συντελεστή αυτού όπως και του σταθερού όρου β_0 πραγματοποιείται στη γραμμική παλινδρόμηση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία, επειδή η εξαρτημένη μεταβλητή ήταν συνεχής, πραγματοποιήθηκε αρχικά η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης. Ωστόσο, σε περίπτωση που δεν προέκυπτε κάποιο στατιστικά ορθό γραμμικό μοντέλο από τη μέθοδο αυτή, υπήρχε το πλάνο να εφαρμοστεί η λογαριθμοκανονική γραμμική παλινδρόμηση (log-linear regression), όπου και εκείνη χρησιμοποιείται όταν η εξαρτημένη μεταβλητή είναι συνεχής.

3.4.2. Λογαριθμοκανονική Γραμμική Παλινδρόμηση

Στη λογαριθμοκανονική παλινδρόμηση (log-linear regression) εξετάζεται η σχέση των φυσικών λογάριθμων μίας συνεχούς εξαρτημένης μεταβλητής και μίας η περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Η παλινδρόμηση αυτή βασίζεται στο ότι τα δεδομένα της βάσης δεδομένων είναι μη αρνητικά, ο φυσικός λογάριθμος της εξαρτημένης μεταβλητής ακολουθεί κανονική κατανομή και ότι ο αριθμητικός μέσος είναι σχετικά υψηλός.

Γενικά, ο λογαριθμικός μετασχηματισμός μεταβλητών είναι μία πολύ συνηθισμένη μέθοδος παλινδρόμησης, η οποία εφαρμόζεται όταν δεν υπάρχει γραμμική σχέση ανάμεσα στις ανεξάρτητες μεταβλητές και στην εξαρτημένη, καταφέρνοντας να δημιουργήσει ένα γραμμικό μοντέλο μεταξύ τους. Επιπλέον, οι λογαριθμικοί μετασχηματισμοί χρησιμοποιούνται και για τη μετατροπή των αρχικών τιμών μίας μεταβλητής, που έχουν μεγάλη κλίση σε διάγραμμα διασποράς σε τιμές, που έχουν ηπιότερη κλίση.

Υπάρχουν διάφορες σχέσεις, μέσω των οποίων μπορεί να εκφραστεί ένα λογαριθμικό μοντέλο και είναι οι εξής:

- $\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(x) + u$

Εξίσωση 3.4.2-1

όπου:
β_0: ο σταθερός όρος
β_1: ο συντελεστής του λογαρίθμου της ανεξάρτητης μεταβλητής x & η ελαστικότητα της εξαρτημένης μεταβλητής y σε σχέση με την ανεξάρτητη μεταβλητή x
u: το σφάλμα

- $\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 x + u$

Εξίσωση 3.4.2-2

όπου:
β_0: ο σταθερός όρος
β_1: ο συντελεστής του λογαρίθμου της ανεξάρτητης μεταβλητής x, ο οποίος δείχνει το ποσοστό μεταβολής της εξαρτημένης μεταβλητής y για κάθε μία μονάδα αλλαγής της ανεξάρτητης μεταβλητής x
u: το σφάλμα

- $y = \beta_0 + \beta_1 \ln(x) + u$

Εξίσωση 3.4.2-3

όπου:
β_0: ο σταθερός όρος
β_1: ο συντελεστής του λογαρίθμου της ανεξάρτητης μεταβλητής x, ο οποίος δείχνει τη μεταβολής της εξαρτημένης μεταβλητής y για κάθε 100% αλλαγή της ανεξάρτητης μεταβλητής
u: το σφάλμα

3.5. Κριτήρια Αποδοχής Μοντέλου

Αφού δημιουργηθεί ένα μαθηματικό πρότυπο, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί εάν πληροί ορισμένα κριτήρια, για να θεωρηθεί πλήρως αποδεκτό. Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν κατά σειρά τα κριτήρια αξιολόγησης και αποδοχής ενός μοντέλου, που εφαρμόστηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη.

3.5.1. Κριτήριο Καλής Προσαρμογής R^2 – Adjusted R^2

Το κριτήριο R^2 αποτελεί έναν στατιστικό τρόπο ελέγχου της συνολικής ποιότητας ενός μοντέλου μέσω του συντελεστή προσδιορισμού R^2, ο οποίος εκφράζεται μέσα από την Εξίσωση 3.5.1-1:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

Εξίσωση 3.5.1-1

όπου:
SSE: το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων
SST: το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων
n: ο αριθμός των παρατηρήσεων
y_i: η παρατηρηθείσα τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής y για δεδομένη τιμή x_i της ανεξάρτητης μεταβλητής x
$\hat{y}_i$: η προβλεπόμενη τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής y για δεδομένη τιμή x_i της ανεξάρτητης μεταβλητής x
$\bar{y}$: η μέση τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής y

Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 εκφράζει το πόσο κοντά βρίσκονται τα δεδομένα στη γραμμή παλινδρόμησης. Αποτελεί πρακτικά το ποσοστό της συνολικής κύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής, που μπορεί να εξηγηθεί βάσει της κύμανσης της ανεξάρτητης μεταβλητής.

Ο συντελεστής αυτό λαμβάνει τιμές εντός του εύρους $0 \leq R^2 \leq 1$. Όταν ισούται με 1, τότε υπάρχει η «τέλεια» γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των μεταβλητών x και y και ότι το 100% της κύμανσης της μεταβλητής y μπορεί να εξηγηθεί με βάση την κύμανση της μεταβλητής x. Όταν ο συντελεστής λαμβάνει τιμές μεταξύ του 0 και του 1, τότε αυτό υποδηλώνει ασθενέστερη γραμμική σχέση μεταξύ των μεταβλητών x και y, ενώ όταν λαμβάνει τιμή ίση με το 0 τότε η κύμανση της μεταβλητής y δεν μπορεί να εξηγηθεί με βάση την κύμανση της μεταβλητής x. Ωστόσο, μία χαμηλή τιμή R^2 δεν αποτελεί αιτία απόρριψης ενός μοντέλου.

Η κύμανση σε μία γραμμική παλινδρόμηση εκφράζεται από το ακόλουθο άθροισμα (Εξίσωση 3.5.1-2) και η σχηματική της απεικόνιση φαίνεται στο Γράφημα 3-6:

$$SST = SSE + SSR$$

Εξίσωση 3.5.1-2

όπου:

- SST: το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων, το οποίο μετρά την κύμανση των τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής y γύρω από τη μέση τιμή της (το «χειρότερο» πρότυπο) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SST = \sum n_i (y_i - \bar{y})^2$$

Εξίσωση 3.5.1-3

- SEE: το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων, μέσω του οποίου η κύμανση αποδίδεται σε διαφορετικούς παράγοντες της σχέσης των μεταβλητών x και y και υπολογίζεται από τη σχέση:

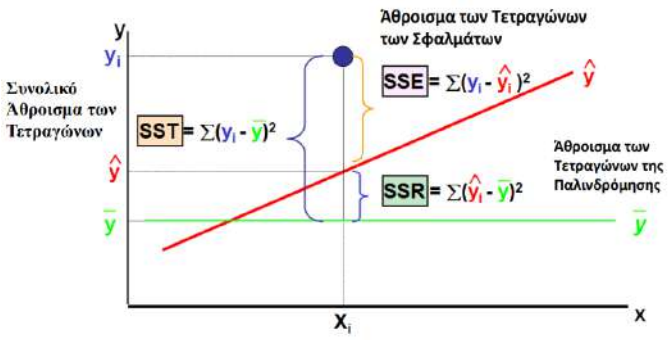
$$SSE = \sum n_i (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Εξίσωση 3.5.1-4

- SSR: το άθροισμα των τετραγώνων της παλινδρόμησης, το οποίο δείχνει τη διαφορά ανάμεσα στο «χειρότερο» και το «καλύτερο» πρότυπο, που είναι η ευθεία γραμμή και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SSR = \sum n_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

Εξίσωση 3.5.1-5



Γράφημα 3-6: Μορφή Κύμανσης Γραμμικής Παλινδρόμησης [Πηγή: Βλαχογιάννη 2021]

Στην ίδια κατηγορία κριτηρίων αποδοχής ενός μοντέλου με το συντελεστή προσδιορισμού R^2 ανήκει και το κριτήριο του Προσαρμοσμένου (Adjusted R^2), το οποίο, όμως, αποτελεί έναν καλύτερο στατιστικό έλεγχο της ποιότητας ενός μοντέλου από το κριτήριο του R^2. Ο λόγος για τον οποίον συμβαίνει αυτό, είναι διότι όταν προστίθενται μεταβλητές σε ένα μοντέλο τότε το R^2 αυξάνεται συγκριτικά με το προηγούμενο μοντέλο των λιγότερων μεταβλητών. Από την άλλη, το Adjusted R^2 «διορθώνει» το R^2, καθώς λαμβάνει υπόψιν τον επιπλέον αριθμό μεταβλητών και διαμορφώνεται αναλόγως, χωρίς απαραίτητα να σημαίνει ότι θα αυξηθεί με την προσθήκη μεταβλητών όπως το R^2. Το Adjusted R^2 υπολογίζεται μέσω της Εξίσωση 3.5.1-6:

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - \frac{MSE}{MST}$$

Εξίσωση 3.5.1-6

όπου:

- MSE: το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$MSE = \frac{SSE}{(n-q)}$$

Εξίσωση 3.5.1-7

- MST: η μέση τιμή του συνόλου των τετραγώνων, που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$MST = \frac{SST}{(n-1)}$$

Εξίσωση 3.5.1-8

- n: ο αριθμός των παρατηρήσεων
- q: ο αριθμός των συντελεστών στο μοντέλο

Το Adjusted R^2 λαμβάνει τιμές του ίδιου εύρους με αυτό του συντελεστή R^2, δηλαδή [0,1] και ό,τι ακριβώς ειπώθηκε παραπάνω για το R^2 ισχύει για το Adjusted R^2. Επίσης, όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι η τιμή του, τόσο πιο στατιστικά αξιόπιστο χαρακτηρίζεται το μοντέλο, θεωρώντας ότι εκφράζει καλύτερα την εξαρτημένη μεταβλητή.

Γενικά, όταν ένα μοντέλο περιέχει λίγες μεταβλητές, τότε οι τιμές των συντελεστών R^2 και Adjusted R^2 είναι παρόμοιες. Η διαφορά τους παρατηρείται σε μοντέλα με μεγάλο αριθμό μεταβλητών. Όσον αφορά τα δεδομένα, για τα οποία είναι επιθυμητό να υπολογιστούν οι παραπάνω συντελεστές, όταν προέρχονται από πραγματικές μετρήσεις, τότε το R^2 και το Adjusted R^2 λαμβάνουν χαμηλές τιμές, ενώ όταν είναι μαθηματικοποιημένα, τότε οι τιμές τους αναμένονται να είναι υψηλές.

3.5.2. Κριτήριο BIC

Το Bayesian Information Criterion (Schwarz 1978) ή διαφορετικά BIC αποτελεί ένα από τα μέτρα καλής προσαρμογής και χρησιμοποιείται για την επιλογή μοντέλου. Εξαρτάται από τη μέγιστη τιμή της συνάρτησης πιθανότητας L (Likelihood function) και προκύπτει από την Εξίσωση 3.5.2-1. Γενικά, όσο μικρότερες τιμές λαμβάνει το BIC, τόσο πιο αξιόπιστο θεωρείται το μοντέλο. [11]

$$BIC = -2 \cdot \ln(L) + k \cdot \ln(n)$$

Εξίσωση 3.5.2-1

όπου:

n: ο αριθμός των παρατηρήσεων

k: ο αριθμός των παραμέτρων στο μοντέλο

3.5.3. Student's t-test

Το κριτήριο αποδοχής Student's t-test ή διαφορετικά t-test καθορίζει την επιρροή μίας μεταβλητής στο τελικό αποτέλεσμα μέσω ενός συντελεστή t, ο οποίος υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.5.3-1. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής, τόσο σημαντικότερη κρίνεται ότι είναι η επιρροή της συγκεκριμένης μεταβλητής στο μοντέλο.

$$t = \frac{\beta_i}{s.e.}$$

Εξίσωση 3.5.3-1

όπου:

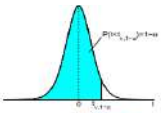
β_i: ο συντελεστής (παλινδρόμησης) της εξεταζόμενης ανεξάρτητης μεταβλητής x

s.e.: το τυπικό σφάλμα (standard error)

Από την Εξίσωση 3.5.3-1 γίνεται αντιληπτό ότι ο συντελεστής t είναι αντιστρόφως αναλόγως του τυπικού σφάλματος (s.e.). Για αυτό το λόγο, είναι επιθυμητές οι υψηλές τιμές t, διότι τότε συνεπάγεται ότι το τυπικό σφάλμα θα σημειώνει μείωση. Το t μπορεί να λάβει θετικές και αρνητικές τιμές, καθώς εξαρτάται από το πρόσημο του συντελεστή β_i της ανεξάρτητης μεταβλητής, που εξετάζεται κάθε φορά.

Επιπλέον, οι υψηλές τιμές του συντελεστή t κατά απόλυτη τιμή δείχνουν την αντίστοιχα μεγάλη στατιστική σημαντικότητα της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής. Η τιμές, που αντιστοιχούν στον συντελεστή t, οι οποίες φαίνονται αναλυτικά στον διπλανό πίνακα (Πίνακας 3-3), εξαρτώνται από το επίπεδο εμπιστοσύνης, που ορίζεται κάθε φορά. Στη συγκεκριμένη Διπλωματική λήφθηκε σαν παραδοχή ότι το **επίπεδο εμπιστοσύνης** είναι ίσο με **95%** και επειδή η βάση δεδομένων, που δημιουργήθηκε, περιέχει έναν πολύ μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων (ν=∞), ο οποίος θα αναφερθεί αναλυτικά στα Κεφάλαια 4. και 5., η τιμή του **t είναι ίση με 1,646**. Επομένως, για να κριθεί ότι μία ανεξάρτητη μεταβλητή είναι στατιστικά σημαντική και κατάλληλη για να συμπεριληφθεί σε κάποιο μοντέλο στην παρούσα μελέτη, πρέπει η απόλυτη τιμή του συντελεστή της t να είναι μεγαλύτερη του 1,646 (|t|>1,646).

Πίνακας 3-3: Πίνακας Κατανομής Student



ν: βαθμοί ελευθερίας

$1-\alpha$: τιμή της αθροιστικής συνάρτησης

Παράδειγμα:

$\nu = 10, \alpha = 0.05 \implies t_{10,0.05} = 1.812$

$\nu = 10, \alpha = 0.001 \implies t_{10,0.999} = 4.144$

$\nu = 20, \alpha = 0.025 \implies t_{20,0.975} = 2.086$

	$1-\alpha$						
ν	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995	0.999	0.9995
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.309	636.619
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
32	1.309	1.694	2.037	2.449	2.738	3.365	3.622
34	1.307	1.691	2.032	2.441	2.728	3.348	3.601
36	1.306	1.688	2.028	2.434	2.719	3.333	3.582
38	1.304	1.686	2.024	2.429	2.712	3.319	3.566
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
50	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.261	3.496
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
100	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
120	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.160	3.373
150	1.287	1.655	1.976	2.351	2.609	3.145	3.357
200	1.286	1.653	1.972	2.345	2.601	3.131	3.340
300	1.284	1.650	1.968	2.339	2.592	3.118	3.323
400	1.284	1.649	1.966	2.336	2.588	3.111	3.315
∞	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300

3.5.4. Τιμή Σημαντικότητας p-value

Η τιμή σημαντικότητας p-value (probability value) καθορίζει την πιθανότητα λήψης αποτελέσματος ίσο ή μεγαλύτερο από αυτό που παρατηρήθηκε μέσω των δεδομένων. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στη στατιστική συμπερασματολογία και αποτελεί ένα εργαλείο, που συνίσταται σε όλες τις στατιστικές αναλύσεις και στον έλεγχο των μοντέλων.

Η τιμή αυτή ορίζεται εύκολα στο περιβάλλον του R-Studio για κάθε μοντέλο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-3 και συγκρίνεται με μία προκαθορισμένη τιμή **στατιστικής σημαντικότητας**, η οποία λήφθηκε στην παρούσα μελέτη όσο λαμβάνεται συνήθως, δηλαδή ίση με **0,05**. Εάν η τιμή p-value είναι μικρότερη από το 0,05 (p-value<0,05), τότε το γραμμικό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί στατιστικά σημαντικό.

Η στατιστική σημαντικότητα επιβεβαιώνεται οπτικά και από τα αστέρια, που υπάρχουν δίπλα από την κάθε τιμή p-value στην Εικόνα 3-3 . Όσα περισσότερα είναι, όπου ο μέγιστος αριθμός τους είναι τα τρία αστέρια δίπλα από την τιμή p-value μίας ανεξάρτητης μεταβλητής σε ένα μοντέλο, τόσο στατιστικά σημαντική κρίνεται η μεταβλητή αυτή για το μοντέλο.

```
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -1.006e+01  1.974e-01  -50.95   <2e-16 ***
FortosSB    -5.200e-03  8.949e-05  -58.11   <2e-16 ***
FortosWB    -3.359e-03  5.500e-05  -61.07   <2e-16 ***
FortosNB     2.334e-02  3.922e-04   59.52   <2e-16 ***
FortosEB     8.505e-03  4.386e-05  193.93   <2e-16 ***
Sleft        1.568e-02  1.892e-04   82.88   <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

Εικόνα 3-3: Τιμή Σημαντικότητας p-value κάθε Μεταβλητής στο R-Studio

3.5.5. Συντελεστής Διογκωμένης Διακύμανσης της Παλινδρόμησης – VIF

Κατά την πραγματοποίηση των μοντέλων είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί ένας ειδικότερος έλεγχος πολυσυγγραμμικότητας (multicollinearity), καθώς δεν αρκεί μόνο η εύρεση των συντελεστών συσχέτισής Pearson. Επίσης, ενδέχεται οι συντελεστές παλινδρόμησης β_i, που αντιστοιχούν σε ανεξάρτητες μεταβλητές, οι οποίες συσχετίζονται μεταξύ τους, να μην αντανακλούν επακριβώς την εξάρτηση της Y με τις συσχετιζόμενες αυτές μεταβλητές, γεγονός που καθιστά τον ειδικότερο έλεγχο ακόμα περισσότερο αναγκαίο.

Ο ειδικός αυτός έλεγχος πολυσυγγραμμικότητας γίνεται μέσω του υπολογισμού του συντελεστή διογκωμένης διακύμανσης της παλινδρόμησης VIF (Variance Inflation Factor) για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή. Ο συντελεστής VIF υπολογίζεται μέσω της :

$$\text{VIF} = \frac{1}{1-R^2}$$

Εξίσωση 3.5.5-1

όπου:

R^2: ο συντελεστής προσδιορισμού του κριτηρίου καλής προσαρμογής R^2

Ο συντελεστής VIF λαμβάνει τιμές από 1 έως ∞. Ιδανικά είναι επιθυμητές οι τιμές εντός του εύρους 1≤VIF<2, όπου τότε θεωρείται ότι δεν υπάρχει καμία συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών στο μοντέλο. Οι τιμές του εύρους 2≤VIF≤5 δείχνουν ότι υπάρχει κάποια συσχέτιση, χωρίς να αποτελεί αιτία αφαίρεσης από το μοντέλο των ανεξάρτητων μεταβλητών, που φέρουν τις συγκεκριμένες τιμές. Όταν ισχύει VIF>5 θεωρείται ότι η συσχέτιση είναι προβληματική και ότι πρέπει να αφαιρεθούν από το μοντέλο οι ανεξάρτητες μεταβλητές με το μεγαλύτερο VIF.

Ακόμα, όταν υπολογίζεται ο συντελεστής VIF συνηθίζεται να ελέγχεται και η τετραγωνική του ρίζα sqrt(VIF). Πιο συγκεκριμένα, ισχύει ότι από 1≤sqrt(VIF)<$\sqrt{2}$=1,41 δεν υπάρχει καμία συσχέτιση, από $\sqrt{2}$=1,41≤sqrt(VIF)≤$\sqrt{5}$=2,24 υπάρχει μια κάποια συσχέτιση και από sqrt(VIF)>$\sqrt{5}$=2,24 η συσχέτιση είναι προβληματική.

3.5.6. Standard Error & F-Statistic

Τα Standard Error και F-Statistic αποτελούν μέτρα καλής προσαρμογής του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, το F-Statistic, το οποίο υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.5.6-1, χρησιμοποιείται για να κρίνει πολλαπλούς συντελεστές, που λαμβάνονται ταυτόχρονα, αντί να κριθούν μεμονωμένα μέσω του t-test. Όσο πιο υψηλή τιμή F-Statistic έχει ένα μοντέλο, τόσο πιο αξιόπιστο θεωρείται.

$$\text{F-Statistic} = \frac{\text{MSR}}{\text{MSE}}$$

Εξίσωση 3.5.6-1

όπου:

- MSR: η μέση τετραγωνική παλινδρόμηση, που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{MSR} = \frac{\sum_{i}^{n}(y_i - \bar{y})}{(q-1)} = \frac{\text{SST}-\text{SSE}}{(q-1)}$$

Εξίσωση 3.5.6-2

  Οι τιμές των SST και SSE έχουν αναλυθεί παραπάνω και προκύπτουν από την Εξίσωση 3.5.1-3 και Εξίσωση 3.5.1-4 αντίστοιχα. Το q είναι ο αριθμός των συντελεστών στο μοντέλο, το y_i είναι η παρατηρηθείσα τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής y για δεδομένη τιμή x_i της ανεξάρτητης μεταβλητής x και $\bar{y}$ είναι η μέση τιμή της μεταβλητής y.
- MSE: το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, το οποίο προκύπτει από την Εξίσωση 3.5.1-7

Από την άλλη, το τυπικό σφάλμα Std.Error (Standard Error) είναι η τυπική απόκλιση της κατανομής δειγματοληψίας και υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.5.6-3. Όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι η τιμή του τυπικού σφάλματος ενός μοντέλου, τόσο καλύτερη είναι η προσαρμογή του.

$$\text{Std.Error} = \sqrt{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\text{SSE}}{n-q}}$$

Εξίσωση 3.5.6-3

όπου:

MSE: το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, το οποίο προκύπτει από την Εξίσωση 3.5.1-7

SSE: το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων, το οποίο προκύπτει από την Εξίσωση 3.5.1-4

n: ο αριθμός των παρατηρήσεων

q: ο αριθμός των συντελεστών στο μοντέλο

3.5.7. Μέσο Απόλυτο Εκατοστιαίο Σφάλμα – MAPE

Για να γίνει ένα μοντέλο αποδεκτό, σημαντικό είναι να ελεγχθεί και το σφάλμα του. Ο έλεγχος αυτός γίνεται μέσω του μέσου απόλυτου εκατοστιαίου σφάλματος MAPE (Mean Absolute Percentage Error), το οποίο υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.5.7-1:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i-\hat{y}_i}{y_i}\right|$$

Εξίσωση 3.5.7-1

όπου:

n: ο αριθμός των παρατηρήσεων

y_i: η παρατηρηθείσα τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής y για δεδομένη τιμή x_i της ανεξάρτητης μεταβλητής x

$\hat{y}_i$: η προβλεπόμενη τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής y για δεδομένη τιμή x_i της ανεξάρτητης μεταβλητής x

Το MAPE λαμβάνει τιμές εντός του εύρους [0,1]. Όσο πιο μικρή είναι η τιμή του, τόσο πιο κατάλληλη θεωρείται η πρόβλεψη, που κάνει το μοντέλο. Ωστόσο, το σφάλμα αυτό δεν είναι εφικτό να υπολογισθεί, όταν η εξαρτημένη μεταβλητή y λαμβάνει την τιμή μηδέν λόγω της διαίρεσης στην Εξίσωση 3.5.7-1, κάτι το οποίο δεν συνέβη στην παρούσα έρευνα, οπότε για αυτό μπόρεσε να χρησιμοποιηθεί ως ένας επιπλέον έλεγχος αποδοχής μοντέλου.

Συνηθίζεται να λαμβάνεται ένα μέγιστο όριο - κατώφλι **στο MAPE**, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση λήφθηκε με παραδοχή ίσο με **30%**. Ένα μοντέλο όταν φέρει τιμή MAPE κάτω από το όριο αυτό, θεωρείται αξιόπιστο.

3.5.8. Συντελεστές βi

Οι συντελεστές παλινδρόμησης β_i των ανεξάρτητων μεταβλητών x ενός μοντέλου εκτιμώνται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Όταν το πρόσημο του συντελεστή είναι θετικό συνεπάγεται ότι η αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής προκαλεί αύξηση και στην εξαρτημένη, ενώ το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής προκαλεί μείωση στην εξαρτημένη και το αντίστροφο.

Επιπλέον, η τιμή του συντελεστή β_i κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής θα πρέπει να ερμηνεύεται και λογικά, καθώς η αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής κατά μία μονάδα οδηγεί σε αύξηση της εξαρτημένης κατά β_i μονάδες. Τέλος, οι τιμές των συντελεστών αυτών των ανεξάρτητων μεταβλητών δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερες της μονάδας.

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται εκτενώς η μεθοδολογία, που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία όλων των δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον στόχο της Διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναλυτική παρουσίαση του τρόπου δημιουργίας όλων των σεναρίων, από τα οποία προέκυψε η βάση δεδομένων και η όλη προεργασία, που απαιτήθηκε για τη δημιουργία τους. Τέλος, γίνεται μία σύντομη αναφορά στο λογισμικό TORUS με τη βοήθεια του οποίου σχεδιάστηκε υπό κλίμακα ένα από τα σενάρια, που εξετάστηκαν για λόγους οπτικοποίησης (visualization) και καλύτερης κατανόησης της διάταξης του τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου με μία δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδας ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο του, που μελετήθηκε.

4.1. Αντικείμενο Μελέτης

Όπως έχει αναφερθεί στα Κεφάλαια 1., 2. (υποκεφάλαιο 2.6.) και 3. (υποκεφάλαιο 3.1.), βασικό αντικείμενο της Διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της αναγκαιότητας χωροθέτησης **δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής** (free-flow right-turn bypass lane) **σε κλάδο τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου** (single-lane roundabout) και πιο συγκεκριμένα **στον Νότιο κλάδο** στην παρούσα μελέτη, βάσει των υφιστάμενων φόρτων του ή των αντίστοιχων μελλοντικών, που θα είναι επιθυμητό να εξυπηρετεί. Οι λόγοι, που αποφασίστηκε να εξεταστεί αυτή η συγκεκριμένη διάταξη κυκλικού κόμβου και δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας, καθώς και η συγκεκριμένη χωροταξική της θέση (Νότιος κλάδος), αναλύθηκαν στο υποκεφάλαιο 2.6.

Επιγραμματικά οι πιο σημαντικοί λόγοι ήταν αρχικά, το ότι για την επιλεχθείσα περίπτωση υπάρχει ένα θεωρητικό υπόβαθρο από άλλες έρευνες, το οποίο ήταν απαραίτητο για τον προσανατολισμό της παρούσας Διπλωματικής και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των άλλων ερευνών. Σύμφωνα με αυτό το υπόβαθρο υπάρχει μόνο για τον συγκεκριμένο συνδυασμό κυκλικού κόμβου και παρακαμπτήριας λωρίδας μαθηματική σχέση υπολογισμού της χωρητικότητας της, που ήταν αναγκαία για την εκπόνηση της εργασίας, γεγονός το οποίο έπαιξε σημαντικό ρόλο για την επιλογή του. Επιπλέον, η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής αποτελεί τον καλύτερο τύπο παρακαμπτήριας λωρίδας βάσει και των δύο οδηγιών (Αμερικάνικες & Γερμανικές) και αυτός που κατά κύριο λόγο συνηθίζεται να εφαρμόζεται διεθνώς, όταν κρίνεται αναγκαία η τοποθέτησή της σε έναν κυκλικό κόμβο.

Η μελέτη του αντικειμένου αυτού αποφασίστηκε στην παρούσα εργασία να προσεγγισθεί μέσω του υπολογισμού της διαφοράς της συνολικής αναμενόμενης καθυστέρησης του κυκλικού κόμβου ($d_{\text{κόμβου}}$) της κάθε εξεταζόμενης περίπτωσης με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια στον Νότιο κλάδο του. Μέσω της μεταβολής αυτής εντοπιζόταν κάθε φορά η επίδραση, που είχε η τοποθέτηση παρακαμπτήριας λωρίδας στον κυκλικό κόμβο.

Προκειμένου να βρεθούν οι συνολικές καθυστερήσεις του κυκλικού κόμβου, ήταν απαραίτητο πρώτα να οριστεί ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος κάθε λωρίδας πρόσβασης (v ή $v_{e,pce}$), για να υπολογιστεί ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας ανάντη του κάθε κλάδου ($v_{c,pce}$). Έτσι, θα μπορούσε να υπολογιστεί η κυκλοφοριακή ικανότητα ($c_{e,pce}$) και η μέση ολική καθυστέρηση (d) της κάθε λωρίδας πρόσβασης σε όλους τους κλάδους, καθώς και η συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του κόμβου ($d_{\text{κόμβου}}$). Στις περιπτώσεις με παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο έπρεπε να βρεθεί και ο φόρτος εξόδου ($v_{ex,pce}$) του

ακριβώς επόμενού της κλάδου, δηλαδή του Ανατολικού στην προκειμένη περίπτωση, έτσι ώστε να υπολογιστεί και η κυκλοφοριακή ικανότητα της παρακαμπτήριας λωρίδας ($c_{bypass,pce}$).

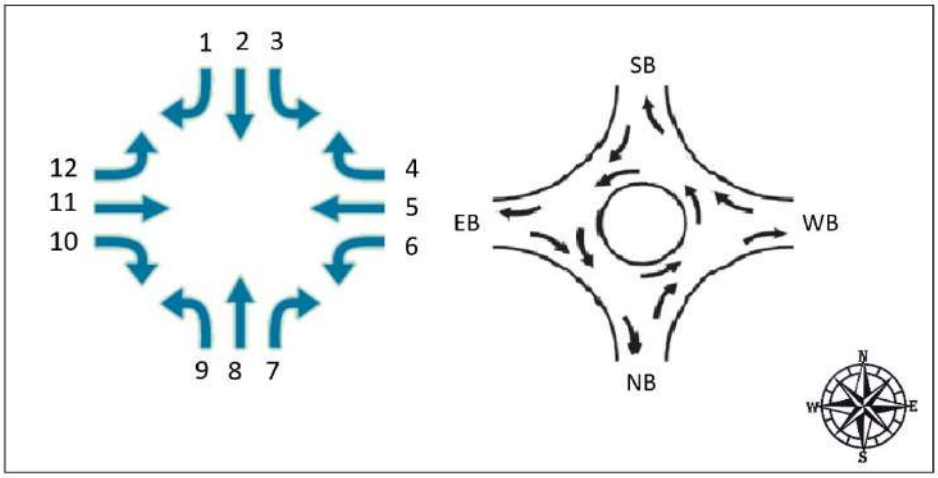
Επειδή, θα εξεταστούν μόνο «τυπικοί» κυκλικοί κόμβοι, ό,τι μεγέθη έχουν αναφερθεί και αφορούν **λωρίδα πρόσβασης**, θα εννοείται εφεξής ότι αφορούν **ολόκληρο τον κλάδο**. Για τον υπολογισμό όλων των παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν υπολογιστικά φύλλα του Microsoft Excel σε όλη τη διάρκεια της εργασίας.

4.2. Παρουσίαση της Εξεταζόμενης Διάταξης Κυκλικού Κόμβου

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί μία απεικονιστική κυρίως παρουσίαση, του τι μελετήθηκε στη συγκεκριμένη Διπλωματική.

Αρχικά, στην παρακάτω Εικόνα 4-1 φαίνεται στα δεξιά ο τετρασκελής «τυπικός» κυκλικός κόμβος, που μελετήθηκε, καθώς και το πώς ονομάστηκε ο κάθε κλάδος ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα, για τον κάθε κλάδο χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω ακρωνύμια σε όλη τη διάρκεια της μελέτης και είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά, που έχουν ληφθεί στη ξένη βιβλιογραφία και σε διεθνείς έρευνες σχετικές με τους κυκλικούς κόμβους:

- Βόρειος κλάδος: SB (South Bound), λόγω του ότι η εισερχόμενη ροή του κατευθύνεται προς τον Νότο (South)
- Ανατολικός κλάδος: WB (West Bound), λόγω του ότι η εισερχόμενη ροή του κατευθύνεται προς τη Δύση (West)
- Νότιο κλάδος: NB (North Bound), λόγω του ότι η εισερχόμενη ροή του κατευθύνεται προς τον Βορρά (North)
- Δυτικός κλάδος (East Bound), λόγω του ότι η εισερχόμενη ροή του κατευθύνεται προς την Ανατολή (East)

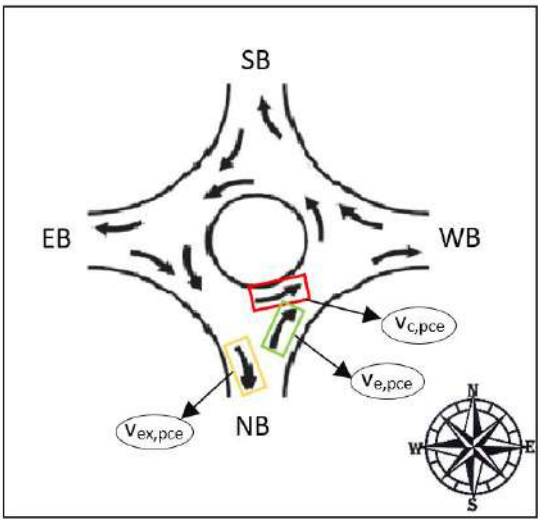


Εικόνα 4-1: Η Εξεταζόμενη Διάταξη Τετρασκελούς «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου (Single-Lane Roundabout) (Δεξιά) και οι Εισερχόμενες Κινήσεις σε έναν Αντίστοιχο Τετρασκελή Ισόπεδο Κόμβο (ΙΚ) (Αριστερά)

Στην ίδια Εικόνα 4-1 στα αριστερά φαίνονται οι τρεις εισερχόμενοι φόρτοι σε κάθε κλάδο ενός αντίστοιχου τετρασκελούς Ισόπεδου κόμβου (ΙΚ), οι οποίοι αποτελούν πρακτικά τον συνολικό εισερχόμενο φόρτο του αντίστοιχου κλάδου του τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου (δεξιά στην Εικόνα 4-1). Οι εισερχόμενες αυτές κινήσεις σε κάθε κλάδο του τετρασκελούς Ισόπεδου κόμβου (ΙΚ) αριθμήθηκαν για πρακτικούς λόγους από τον αριθμό 1 έως τον 12 με ωρολογιακή φορά, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα.

Ο λόγος, που εξετάστηκε η διάταξη του αντίστοιχου τετρασκελούς Ισόπεδου κόμβου (ΙΚ), ήταν διότι, απλά ορίζοντας τους επιθυμητούς εισερχόμενους φόρτους στον κάθε κλάδο του μπορούσαν εύκολα να υπολογιστούν όλες οι στρέφουσες κινήσεις του «τυπικού» κυκλικού κόμβου μέσω αντιστοιχίσεων στην κατάλληλη τριάδα των παραπάνω αριθμών. Όλες οι αντιστοιχίσεις, οι οποίες απεικονίζονται παρακάτω (Εικόνα 4-3 έως Εικόνα 4-5), είναι εκείνες, που χρησιμοποιούνται διεθνώς στις λειτουργικές αναλύσεις κυκλικών κόμβων. Μόνο κάποιες από αυτές ήταν αναγκαίες για την παρούσα Διπλωματική. Οι υπόλοιπες, που δεν χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάστηκαν για λόγους βαθύτερης κατανόησης.

Πριν τις αντιστοιχίσεις, στην Εικόνα 4-2 παρατίθενται σχηματικά οι τρεις βασικές στρέφουσες κινήσεις, που εκτελούνται σε κάθε κλάδο του κυκλικού κόμβου χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα. Οι στρέφουσες αυτές κινήσεις σε έναν κλάδο είναι η συνολική εισερχόμενη ροή στον κυκλικό κόμβο μέσω του συγκεκριμένου κλάδου ($v_{e,pce}$), ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας του κυκλικού κόμβου ακριβώς ανάντη του κλάδου ($v_{c,pce}$) και η συνολική εξερχόμενη ροή του κυκλικού κόμβου μέσω πάλι του ίδιου κλάδου ($v_{ex,pce}$). Συνεπώς, σε έναν κυκλικό κόμβο παρατηρούνται συνολικά δώδεκα βασικές στρέφουσες κινήσεις. Κατά τη διάρκεια της εργασίας έγινε αναφορά σε αυτούς τους φόρτους, έτσι ακριβώς όπως χαρακτηρίζονται στις παρενθέσεις και όπως φαίνονται μέσα στα κυκλικά χωρία της Εικόνα 4-2. Συγκεκριμένα στην εικόνα φαίνονται οι τρεις βασικές στρέφουσες κινήσεις του Νότιου κλάδου.

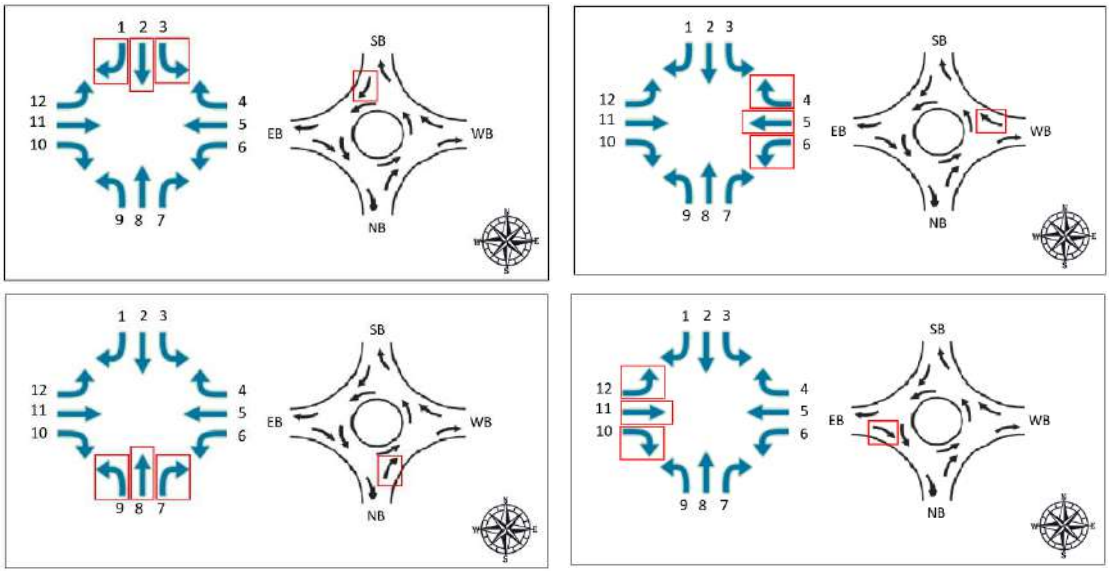


Εικόνα 4-2: Οι 3 Βασικές Στρέφουσες Κινήσεις του Νότιου Κλάδου

Ο συνδυασμός της εισερχόμενης ροής στον κυκλικό κόμβο από έναν κλάδο ($v_{e,pce}$) και της επερχόμενής κυκλοφορίας του ανάντη του κλάδου αυτού ($v_{c,pce}$) δημιουργεί τον φόρτο των διασταυρωνόμενων κινήσεων επί του κυκλικού δακτυλίου μπροστά από την κάθε πρόσβαση του κυκλικού κόμβου.

4.2.1. Αντιστοίχιση των Στρεφουσών Κινήσεων «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου με και χωρίς Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα στον Νότιο κλάδο ως προς τον αντίστοιχο Ισόπεδο Κόμβο (ΙΚ)

Στην Εικόνα 4-3 φαίνεται η αντιστοίχιση της συνολικής εισερχόμενης ροή στον «τυπικό» κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο ($v_{e,pce}$) με την κατάλληλη κάθε φορά τριάδα αριθμών των εισερχόμενων κινήσεων του αντίστοιχου τετρασκελούς Ισόπεδου κόμβου (ΙΚ).



Εικόνα 4-3: Αντιστοίχιση της Συνολικής Εισερχόμενης Ροής στον «Τυπικό» Κυκλικό Κόμβο από τον κάθε Κλάδο ($v_{e,pce}$) με τον κατάλληλο συνδυασμό αριθμών των Εισερχόμενων Κινήσεων του αντίστοιχου Τετρασκελούς Ισόπεδου Κόμβου (ΙΚ)

Όπως γίνεται αντιληπτό, ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος από τον κάθε κλάδο χωρίζεται σε τρεις επιμέρους κινήσεις: στον φόρτο, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο και κατευθύνεται δεξιόστροφα (right), σε εκείνον που κινείται ευθεία (straight) και σε εκείνον που κατευθύνεται αριστερόστροφα (left). Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά οι επιμέρους κινήσεις του κάθε κλάδου με τον αντίστοιχο αριθμό τους, έτσι ακριβώς όπως χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη:

Ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον Βόρειο κλάδο (SB):

$$v_{e,pce,SB} = FortosSB = 1 + 2 + 3$$

Εξίσωση 4.2.1-1

- ✓ Sright=1: μέρος του συνολικού εισερχόμενού φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον Βόρειο κλάδο, που κατευθύνεται δεξιόστροοφα προς τον Δυτικό
- ✓ Sstraight=2: μέρος του συνολικού εισερχόμενου φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον Βόρειο κλάδο, που κινείται ευθεία προς τον Νότιο
- ✓ Sleft=3: μέρος του συνολικού εισερχόμενου φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον Βόρειο κλάδο, που κατευθύνεται αριστερόστροφα προς τον Ανατολικό

Ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον Ανατολικό κλάδο (WB):

$$v_{e,pce,WB} = FortosWB = 4 + 5 + 6$$

Εξίσωση 4.2.1-2

- ✓ Wright=4: μέρος του συνολικού εισερχόμενού φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον Ανατολικό κλάδο, που κατευθύνεται δεξιόστροοφα προς τον Βόρειο

- ✓ Wstraight=5: μέρος του συνολικού εισερχόμενου φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον Ανατολικό κλάδο, που κινείται ευθεία προς τον Δυτικό
- ✓ Weft=6: μέρος του συνολικού εισερχόμενου φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον Ανατολικό κλάδο, που κατευθύνεται αριστερόστροφα προς τον Νότιο

Ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο (NB):

$$v_{e,pce,NB} = FortosNB = 7 + 8 + 9$$

Εξίσωση 4.2.1-3

- ✓ Nright=7: μέρος του συνολικού εισερχόμενού φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο, που κατευθύνεται δεξιόστροοφα προς τον Ανατολικό
- ✓ Nstraight=8: μέρος του συνολικού εισερχόμενου φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο, που κινείται ευθεία προς τον Βόρειο
- ✓ Nleft=9: μέρος του συνολικού εισερχόμενου φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο, που κατευθύνεται αριστερόστροφα προς τον Δυτικό

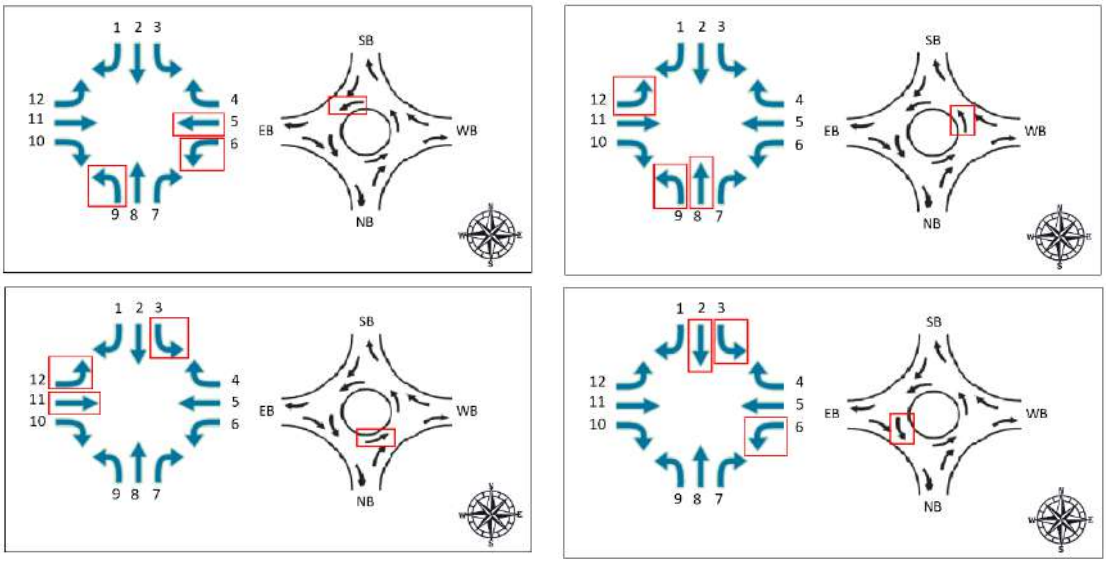
Ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον Δυτικό κλάδο (EB):

$$v_{e,pce,EB} = FortosEB = 10 + 11 + 12$$

Εξίσωση 4.2.1-4

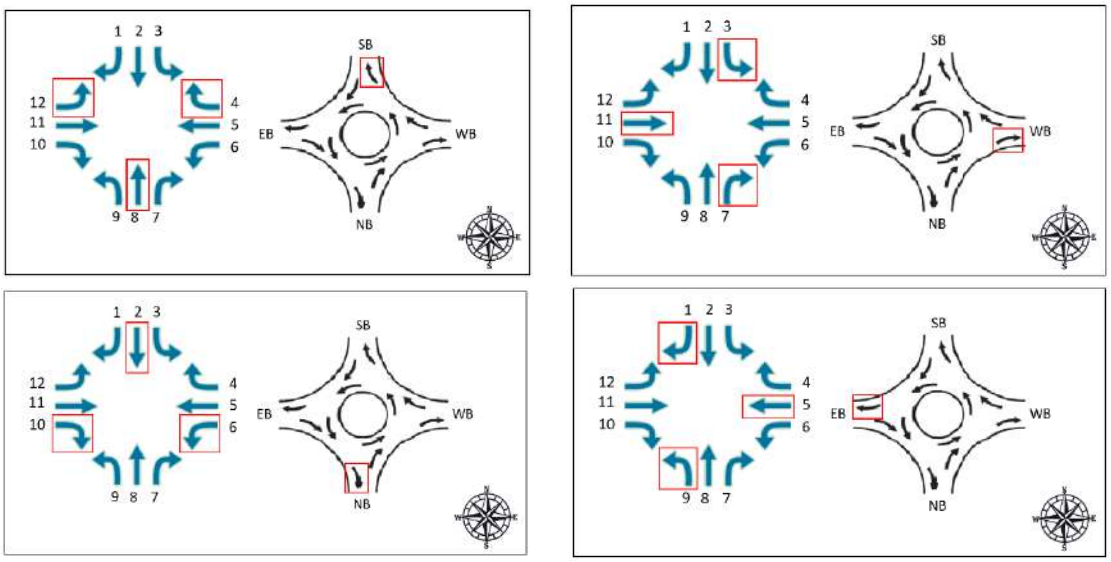
- ✓ Eright=10: μέρος του συνολικού εισερχόμενού φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον Δυτικό κλάδο, που κατευθύνεται δεξιόστροοφα προς τον Νότιο
- ✓ Estraight=11: μέρος του συνολικού εισερχόμενου φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον Δυτικό κλάδο, που κινείται ευθεία προς τον Ανατολικό
- ✓ Eleft=12: μέρος του συνολικού εισερχόμενου φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον Δυτικό κλάδο, που κατευθύνεται αριστερόστροφα προς τον Βόρειο

Στην Εικόνα 4-4 απεικονίζεται η αντιστοίχιση του φόρτου της επερχόμενης κυκλοφορίας του «τυπικού» κυκλικού κόμβου ανάντη του κάθε κλάδου ($v_{c,pce}$) με την κατάλληλη τριάδα αριθμών των εισερχόμενων κινήσεων του αντίστοιχου τετρασκελούς Ισόπεδου κόμβου (ΙΚ). Όπως γίνεται εμφανές, στον υπολογισμό της επερχόμενης κυκλοφορίας μπροστά από κάθε κλάδο δεν συμμετέχει καμία δεξιά κατευθυνόμενη εισερχόμενη ροή στον κυκλικό κόμβο οποιουδήποτε κλάδου (Sright (1), Wright (4), Nright (7), Eright (10)).



Εικόνα 4-4: Αντιστοίχιση της Επερχόμενης Κυκλοφορίας του «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου ανάντη του κάθε Κλάδου ($v_{c,pce}$) με τον κατάλληλο συνδυασμό αριθμών των Εισερχόμενων Κινήσεων του αντίστοιχου Τετρασκελούς Ισόπεδου Κόμβου (ΙΚ)

Τέλος, στην Εικόνα 4-5 αναπαρίσταται η αντιστοίχιση της συνολικής εξερχόμενης ροής του «τυπικού» κυκλικού κόμβου από τον κάθε κλάδο ($v_{ex,pce}$) με την κατάλληλη τριάδα αριθμών των εισερχόμενων κινήσεων του αντίστοιχου τετρασκελούς Ισόπεδου κόμβου (ΙΚ).



Εικόνα 4-5: Αντιστοίχιση της Συνολικής Εξερχόμενης Ροής του «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου από τον κάθε Κλάδο ($v_{ex,pce}$) με τον κατάλληλο συνδυασμό αριθμών των Εισερχόμενων Κινήσεων του αντίστοιχου Τετρασκελούς Ισόπεδου Κόμβου (ΙΚ)

Όταν τοποθετείται δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο της εξεταζόμενης διάταξης κυκλικού κόμβου, τότε σημειώνεται μεταβολή στους φόρτους του συγκεκριμένου κλάδου όπως και σε κάποιους του Ανατολικού και ισχύει η διάταξη, που φαίνεται στην Εικόνα 2-8 (υποκεφάλαιο 2.4.1.). Στη Διπλωματική εργασία λήφθηκε σαν παραδοχή ότι όταν εφαρμόζεται δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο, τότε η εισερχόμενη ροή του, που κατευθύνεται δεξιόστροφα προς τον Ανατολικό **(Nright (7))**, θα κινηθεί **αποκλειστικά μέσω της παρακαμπτήριας λωρίδας**. Συνεπώς, το $Q_{E,R}^{no\text{-}bypass}$, που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-8, θα είναι μηδενικό και θα παρατηρηθούν οι ακόλουθες μεταβολές φόρτων:

- θα μειωθεί ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο, ο οποίος θα είναι ίσος με:

$$v_{e,pce,NB} = Nstraight + Nleft = 8 + 9$$

Εξίσωση 4.2.1-5

- θα δημιουργηθεί ένας καινούργιος φόρτος, εκείνος της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ($v_{bypass,pce}$ ή διαφορετικά το $Q_{E,R}^{bypass}$ από την Εικόνα 2-8) του Νότιου κλάδου:

$$v_{bypass,pce,NB} = Nright = 7$$

Εξίσωση 4.2.1-6

- θα μειωθεί η ανταγωνιστική ροή της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας, δηλαδή ο συνολικός φόρτος εξόδου του ακριβώς επόμενού της κλάδου, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο Ανατολικός ($v_{ex,pce,WB}$ ή διαφορετικά το Q_u^{Tot} από την Εικόνα 2-8) και θα ισούται με:

$$v_{ex,pce,WB} = Sleft + Estraight = 3 + 11$$

Εξίσωση 4.2.1-7

4.2.2. «Κρίσιμες» Κινήσεις για την Τοποθέτηση Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας στον Νότιο κλάδο ενός «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου

Από τις παραπάνω κινήσεις, εκείνες που θεωρούνται «κρίσιμες» για την τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας στον Νότιο κλάδο ενός «τυπικού» κυκλικού κόμβου βάσει και άλλων παρεμφερών ερευνών, είναι οι εξής:

- Nright = 7: η εισερχόμενη ροή στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο, που κατευθύνεται δεξιόστροφα προς τον Ανατολικό κλάδο
- $v_{c,pce,NB}$ =Sleft + Estraight + Eleft = 3 + 11 + 12: ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας του κυκλικού κόμβου ανάντη του Νότιου κλάδου (κάτω αριστερά στην Εικόνα 4-4)

4.3. Παραδοχές

Κατά την πραγματοποίηση των σεναρίων και κατά τη λειτουργική τους ανάλυση λήφθηκε ένα σύνολο παραδοχών, οι οποίες έχουν αναφερθεί επιμέρους στα Κεφάλαια 2. και 3. Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρατεθούν συγκεντρωτικά ως εξής:

- Μελετήθηκε αποκλειστικά η διάταξη τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου (single-lane roundabout) χωρίς φωτεινή σηματοδότηση.
- Μελετήθηκε αποκλειστικά η διάταξη δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής (free-flow right-turn bypass lane).
- Η τοποθέτηση της συγκεκριμένης διάταξης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας έγινε αποκλειστικά στον Νότιο κλάδο του κυκλικού κόμβου.
- Όποτε τοποθετούταν δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο, θεωρούταν ότι η εισερχόμενή του ροή, που κατευθύνεται δεξιόστροφα προς τον Ανατολικό (Nright (7)), θα κινηθεί αποκλειστικά μέσω της παρακαμπτήριας λωρίδας.
- Ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο θεωρήθηκε σταθερός και ίσος με $v_{e,pce,NB}$ = FortosNB = 500 ΜΕΑ/h (οχ/h) στο ~96% των σεναρίων, τα οποία θα αναλυθούν στο υποκεφάλαιο 4.5.
- Δεν λήφθηκε υπόψιν η παρουσία Βαρέων Οχημάτων (ΒΟ) και οι φόρτοι του κυκλικού κόμβου θεωρήθηκαν ότι είναι φόρτοι σχεδιασμού. Έτσι, οι φόρτοι αυτοί ισοδυναμούσαν ταυτόχρονα σε Μονάδες Επιβατηγών Αυτοκινήτων (ΜΕΑ) και οχήματα (οχ), χωρίς να απαιτείται κάποια επιπρόσθετη μετατροπή.
- Δεν λήφθηκε υπόψιν η παρουσία πεζών.

4.4. Περιορισμοί

Πριν τη δημιουργία των σεναρίων και την εκτέλεση της λειτουργικής τους ανάλυσης ήταν απαραίτητο να συγκεντρωθούν όλοι οι απαιτούμενοι περιορισμοί, που έπρεπε να ικανοποιούνται, προκειμένου το κάθε εξεταζόμενο σενάριο να θεωρηθεί αποδεκτό. Οι περιορισμοί αυτοί έχουν αναφερθεί και στα Κεφάλαια 2. και 3., αλλά στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά, έτσι όπως ακολουθήθηκαν σε όλη τη διάρκεια της Διπλωματικής βάσει των αναγκών και των παραδοχών της.

Περιορισμός 1:
Σε κάθε πρόσβαση του «τυπικού» κυκλικού κόμβου πρέπει ο λόγος "x" του εξυπηρετούμενού της φόρτου ($v_{e,pce}$) προς τη χωρητικότητά της ($c_{e,pce}$) (υποκεφάλαιο 3.2.3., Εξίσωση 3.2.3-1) να είναι μικρότερος ή ίσος με 0,85 ($x \leq 0,85$).

Περιορισμός 2:
Από το Γράφημα 3-1 προκύπτει ότι σε «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους πρέπει ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας ανάντη του κάθε κλάδου ($v_{c,pce}$) να μην υπερβαίνει τα 1.000 ΜΕΑ/h. Η τιμή αυτή (κόκκινο βέλος πάνω από τον άξονα των Χ στο Γράφημα 3-1) είναι η μέγιστη, που μπορεί να λάβει η καμπύλη με σκούρο μαύρο χρώμα του συγκεκριμένου γραφήματος, η οποία αντιστοιχεί σε αυτόν τον τύπο κυκλικού κόμβου.

Περιορισμός 3:
Από το ίδιο πάλι Γράφημα 3-1 και βάσει της ίδιας καμπύλης προκύπτει ότι η κυκλοφοριακή ικανότητα της κάθε λωρίδας πρόσβασης ($c_{e,pce}$) δεν πρέπει να υπερβαίνει τα ~1.150 ΜΕΑ/h (κόκκινο βέλος δεξιά από τον άξονα των Υ στο Γράφημα 3-1). Ο περιορισμός αυτός δεν αφορά την κυκλοφοριακή ικανότητα της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής ($c_{bypass,pce}$).

Περιορισμός 4:
Ο Πίνακας 3-1 ορίζει ότι ο φόρτος των διασταυρωνόμενων κινήσεων επί του κυκλικού δακτυλίου μπροστά από την κάθε πρόσβασή πρέπει να είναι μικρότερος από 1.300 οχ/h (κόκκινο ορθογωνικό χωρίο πάνω στον συγκεκριμένο πίνακα), ώστε η διάταξη του «τυπικού» κυκλικού κόμβου να θεωρείται ικανοποιητική. Ως φόρτος διασταυρωνόμενων κινήσεων μπροστά από μία πρόσβαση έχει οριστεί και στο υποκεφάλαιο 4.2. το άθροισμα του συνολικού εισερχόμενου φόρτου στον κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο ($v_{e,pce}$) και του φόρτου της επερχόμενης κυκλοφορίας ανάντη του κλάδου αυτού ($v_{c,pce}$).

Περιορισμός 5:
Ο Πίνακας 2-5 ορίζει ότι ο μέγιστος φόρτος της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής ($v_{bypass,pce}$), όταν τοποθετείται σε τετρασκελείς κυκλικούς κόμβους, πρέπει να κυμαίνεται από 400-600 οχ/h.

Σε κάθε σενάριο ένας βασικός στόχος ήταν να ικανοποιούνται και οι πέντε περιορισμοί. Ωστόσο, μία μικρή υπέρβαση σε κάποιον περιορισμό δεν αποτέλεσε αιτία απόρριψής του, εκτός και εάν υπήρχε μεγάλη απόκλιση από την προβλεπόμενη τιμή του κάθε περιορισμού.

4.5. Μεθοδολογία Δημιουργίας των Σεναρίων

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η λογική, με την οποία επιλέχθηκαν τα σενάρια της παρούσας μελέτης. Ο λόγος, που δημιουργήθηκαν σενάρια, ήταν για να εξεταστούν διάφορες περιπτώσεις συνολικών εισερχόμενων φόρτων στον εξεταζόμενο κυκλικό κόμβο από τους διάφορους κλάδους του, μέσω των οποίων υπολογιζόταν κάθε φορά η διαφορά της συνολικής αναμενόμενης καθυστέρησής του ($d_{κόμβου}$) με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο. Από τις καθυστερήσεις αυτές, καθώς και από άλλα μεγέθη που βρέθηκαν και θα αναφερθούν αναλυτικά στη συνέχεια και στο Κεφάλαιο 5., προέκυψε η βάση δεδομένων της Διπλωματικής αυτής.

Λόγω του ότι υπάρχει πληθώρα επιλογών και ως προς τον συνολικό φόρτο, που μπορεί να εισέλθει στον «τυπικό» κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο του και ως προς τον τρόπο, που μπορεί να κατανεμηθεί ο φόρτος αυτός εντός του κυκλικού κόμβου σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση, αποφασίστηκε να οριστούν συγκεκριμένες περιπτώσεις συνολικών εισερχόμενων φόρτων από τον κάθε κλάδο και συγκεκριμένα ποσοστά κατανομής στις τρεις επιμέρους αυτές κινήσεις (right, straight, left). Ωστόσο, υπήρχε πάντα η απαίτηση να τηρούνται όλοι οι περιορισμοί, που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.4. για να γίνεται αποδεκτή η κάθε περίπτωση, που εξεταζόταν.

Αρχικά, θεωρήθηκε ορθό να μελετηθεί ο «τυπικός» κυκλικός κόμβος υπό συνθήκες ισορροπημένης και μη ισορροπημένης ροής, οι οποίες έχουν αναφερθεί ξανά και στο υποκεφάλαιο 2.5.2. Πιο συγκεκριμένα, η ροή στον κυκλικό κόμβο χαρακτηρίζεται ισορροπημένη (balanced flow), όταν σε κάθε κλάδο του η εισερχόμενη ($v_{e,pce}$) και η εξερχόμενη ροή του ($v_{ex,pce}$) είναι η ίδια, ενώ όταν δεν είναι τότε χαρακτηρίζεται μη-ισορροπημένη (unbalanced flow).

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε να μελετηθούν οι ακόλουθες 47 περιπτώσεις, οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4-1), όπου στην καθεμία ήταν διαφορετικός ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο.

Γενικά, χρειάστηκε να εξεταστούν πολλές παραπάνω περιπτώσεις και συνδυασμοί εισερχόμενων φόρτων από τον κάθε κλάδο, για να μπορέσουν να βρεθούν οι παρακάτω 47, οι οποίες να ικανοποιούν όλους τους απαιτούμενους περιορισμούς. Όπως φαίνεται από τον πίνακα (Πίνακας 4-1), μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις ισορροπημένης και 44 περιπτώσεις μη-ισορροπημένης ροής.

Υπό τις συνθήκες ισορροπημένης ροής ο μέγιστος συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο, που μπόρεσε να οριστεί, ήταν τα 500 ΜΕΑ/h, διότι όταν οι τιμές ήταν μεγαλύτερες από αυτόν τον αριθμό, δεν ικανοποιούνταν όλοι οι περιορισμοί. Επιπλέον, ο φόρτος αυτός από τον κάθε κλάδο δεν εξετάστηκε για τιμές μικρότερες των 400 ΜΕΑ/h, διότι όταν τότε τοποθετούταν στον Νότιο κλάδο δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής, δεν σημειωνόταν κάποια ιδιαίτερη μεταβολή στην συνολική αναμενόμενη καθυστέρησή του ($d_{κόμβου}$). Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή αυτή ήταν μία μείωση της καθυστέρησης του κόμβου της τάξεως περίπου του 1,0 sec/οχ, η οποία αν και μηδαμινή έδειχνε τη θετική επίδραση της παρακαμπτήριας λωρίδας.

Πίνακας 4-1: Οι 47 Εξεταζόμενες Περιπτώσεις των Συνολικών Εισερχόμενων Φόρτων στον «Τυπικό» Κυκλικό Κόμβο από τον κάθε Κλάδο

	A/A Περιπτώσεων	FortosSB (MEA/h)	FortosWB (MEA/h)	FortosNB (MEA/h)	FortosEB (MEA/h)	Συνολικός Εισερχόμενος Φόρτος στον Κυκλικό Κόμβο (MEA/h)
Ισορροπημένη Ροή (Balanced flow)	1	400	400	400	400	1.600
	2	450	450	450	450	1.800
	3	500	500	500	500	2.000
Μη-Ισορροπημένη Ροή (Unbalanced flow)	1	50	100	500	150	800
	2	150	100	500	50	800
	3	100	150	500	50	800
	4	50	150	500	100	800
	5	100	200	500	150	950
	6	150	200	500	100	950
	7	200	150	500	100	950
	8	100	150	500	200	950
	9	400	300	500	200	1.400
	10	200	300	500	400	1.400
	11	200	400	500	300	1.400
	12	300	400	500	200	1.400
	13	300	200	500	400	1.400
	14	400	200	500	300	1.400
	15	300	350	500	400	1.550
	16	400	350	500	300	1.550
	17	350	400	500	300	1.550
	18	300	400	500	350	1.550
	19	400	300	500	350	1.550
	20	350	300	500	400	1.550
	21	450	400	500	450	1.800
	22	450	450	500	400	1.800
	23	400	450	500	450	1.800
	24	550	400	500	450	1.900
	25	400	450	500	550	1.900
	26	550	450	500	400	1.900
	27	450	550	500	400	1.900
	28	400	550	500	450	1.900
	29	500	450	500	500	1.950
	30	500	500	500	450	1.950
	31	450	500	500	500	1.950
	32	510	500	500	500	2.010
	33	400	550	500	500	1.950
	34	500	550	500	400	1.950
	35	450	550	500	500	2.000
	36	500	550	500	450	2.000
	37	350	600	500	350	1.800
	38	350	350	500	600	1.800
	39	300	350	500	600	1.750
	40	350	300	500	600	1.750
	41	150	150	500	700	1.500
	42	700	150	500	150	1.500
	43	700	150	500	200	1.550
	44	150	200	500	700	1.550

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων υπό τις συνθήκες μη-ισορροπημένης ροής ο μέγιστος φόρτος, που εισερχόταν στον κυκλικό κόμβο, ήταν από τον Νότιο κλάδο, καθώς ήταν ο πιο «κρίσιμος» κλάδος στην παρούσα εργασία. Οι συνολικοί εισερχόμενοι φόρτοι από τους υπόλοιπους κλάδους προσαρμόστηκαν βάσει πάντα του Νοτίου και εμφάνισαν ως ελάχιστη τιμή τα 50 με 100 MEA/h. Ύστερα από πολλές δοκιμές, ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί ταυτόχρονα, πέραν των 500 MEA/h του Νοτίου κλάδου κατάφερε να τοποθετηθεί μέγιστος εισερχόμενος φόρτος ίσος με 700 MEA/h είτε από τον Βόρειο κλάδο (Περιπτώσεις 42 & 43, Πίνακας 4-1) είτε από τον Δυτικό (Περιπτώσεις 41 & 44, Πίνακας 4-1). Ο λόγος, που εξετάστηκαν οι περιπτώσεις αυτές, ήταν για να διερευνηθεί και η επίδραση της τοποθέτησης παρακαμπτήριας λωρίδας στον Νότιο κλάδο, από τον οποίο δεν θα εισερχόταν ο μέγιστος φόρτος, στη συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του κυκλικού κόμβου.

Επιπλέον, και στις 44 περιπτώσεις των συνθηκών μη-ισορροπημένης ροής ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με $v_{e,pce,NB}$ = FortosNB = 500 MEA/h. Το ίδιο συνέβη και στη μία από τις τρεις περιπτώσεις των συνθηκών ισορροπημένης ροής. Συνεπώς, για αυτό το λόγο στις παραδοχές του

υποκεφαλαίου 4.3. αναφέρθηκε ότι ο φόρτος αυτός του Νότιου κλάδου θεωρήθηκε σταθερός στο ~96% των περιπτώσεων (45 από τις 47 συνολικές περιπτώσεις). Η τιμή των 500 ΜΕΑ/h επιλέχθηκε διότι, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αποτελεί τη μέγιστη τιμή του συνολικού εισερχόμενου φόρτου, που μπορεί να δεχθεί ο κυκλικός κόμβος από τον κάθε κλάδο στις συνθήκες ισορροπημένης ροής, συνεπώς αποφασίστηκε να διατηρηθεί σταθερός και στις συνθήκες μη-ισορροπημένης ροής στον πιο «κρίσιμο» για την παρούσα εργασία κλάδο, δηλαδή στον Νότιο.

Στην συνέχεια, ορίστηκαν για τον κάθε εισερχόμενο στον κυκλικό κόμβο φόρτο ανά κλάδο της κάθε περίπτωσης διάφορα ποσοστά κατανομής του σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση, ώστε μέσω των ποσοστών αυτών να δημιουργηθούν οι αριθμοί από το 1 έως το 12 (Εικόνα 4-1). Με τη βοήθεια των αριθμών αυτών υπολογίστηκαν εύκολα στην κάθε περίπτωση οι βασικές στρέφουσες κινήσεις του κάθε κλάδου του κυκλικού κόμβου (Εικόνα 4-2), χρησιμοποιώντας τις αντιστοιχίσεις, που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2.1.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4-2) φαίνονται τα διάφορα ποσοστά κατανομής σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση του εισερχόμενου στον κυκλικό κόμβο φόρτου ανά κλάδο, που εφαρμόστηκαν στην παρούσα Διπλωματική. Το κίτρινο χρώμα αντιστοιχεί στα ποσοστά των δεξιόστροφων κινήσεων, το πράσινο στα ποσοστά των ευθειών και το μπλε στα ποσοστά των αριστερόστροφων. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα, εξετάστηκαν πολλά παραπάνω ποσοστά κατανομής για τον εισερχόμενο φόρτο του Νότιου κλάδο, λόγω της κρισιμότητάς του.

Πίνακας 4-2: Ποσοστά Κατανομής σε Δεξιόστροφη, Ευθεία & Αριστερόστροφη Κίνηση του Εισερχόμενου στον «Τυπικό» Κυκλικό Κόμβο Φόρτου ανά Κλάδο

Βόρειος Κλάδος (SB)				Ανατολικός Κλάδος (WB)		
S1	S2	S3		W1	W2	W3
20%	30%	30%		20%	30%	30%
40%	50%	50%		40%	50%	50%
40%	20%	20%		40%	20%	20%
		Δυτικός Κλάδος (EB)				
		E1	E2	E3		
		20%	30%	30%		
		40%	50%	50%		
		40%	20%	20%		
Νότιος Κλάδος (NB)						
N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7
40%	40%	50%	50%	60%	60%	60%
20%	40%	30%	20%	20%	30%	10%
40%	20%	20%	30%	20%	10%	30%
right		straight		left		

Πιο συγκεκριμένα, στον Νότιο κλάδο εφαρμόστηκαν επτά διαφορετικά ποσοστά κατανομής στις τρεις επιμέρους κινήσεις (right, straight, left) του εισερχόμενού του φόρτου (N1-N7). Σε καθένα από αυτά τα ποσοστά, το μεγαλύτερο ορίστηκε κατά κύριο λόγο στη δεξιόστροφη κίνησή (Nright), καθώς αποτελεί μία από τις «κρίσιμες» κινήσεις για την τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας στον κλάδο αυτόν.

Στους υπόλοιπους κλάδους εφαρμόστηκαν τρία διαφορετικά ποσοστά κατανομής (S1-S3, W1-W3, E1-E3), όπου σε καθένα από αυτά στη δεξιόστροφη κίνηση δόθηκε το χαμηλότερο, ίσο με 20%. Ο λόγος, που συνέβη αυτό, ήταν διότι η ροή που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από αυτούς τους κλάδους (Βόρειος, Ανατολικός και Δυτικός) και κατευθύνεται δεξιόστροφα, δεν επιδρά στις «κρίσιμες» κινήσεις για την τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας

λωρίδας στον Νότιο κλάδο. Υπενθυμίζεται ότι οι «κρίσιμες» κινήσεις είναι ο εισερχόμενος στον κυκλικό κόμβο φόρτος από τον Νότιο κλάδο, που κατευθύνεται δεξιόστροφα προς τον Ανατολικό (Nright) και ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας ανάντη του Νότιου κλάδου ($v_{c,pce,NB}$ = Sleft + Estraight + Eleft).

Τα παραπάνω ποσοστά κατανομής των φόρτων του Βόρειου, του Ανατολικού και του Δυτικού κλάδου συνδυάστηκαν με όλους τους πιθανούς τρόπους μεταξύ τους και προέκυψαν οι ακόλουθοι 27 συνδυασμοί (Πίνακας 4-3). Στη συνέχεια, οι 27 αυτοί συνδυασμοί συνδυάστηκαν με τα επτά ποσοστά κατανομής του φόρτου του Νότιου κλάδου (N1-N7) (Πίνακας 4-2) και έτσι δημιουργήθηκαν συνολικά και για τους τέσσερις κλάδους 189 συνδυασμοί (27x7) ποσοστών κατανομής σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση των εισερχόμενων φόρτων από τους κλάδους αυτούς ξεχωριστά.

Τέλος, σε καθεμία από τις 47 περιπτώσεις (Πίνακας 4-1) εφαρμόστηκαν οι 189 αυτοί συνδυασμοί. Με αυτόν τον τρόπο φτιάχτηκαν **8.883 σενάρια** (189x47), όπου ανά 189 εξετάζονταν οι ίδιοι ανά κλάδο συνολικά εισερχόμενοι φόρτοι στον κυκλικό κόμβο, αλλά διαφορετικά ποσοστά κατανομής τους σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση.

Πίνακας 4-3: Οι 27 Συνδυασμοί των Ποσοστών Κατανομής σε Δεξιόστροφη, Ευθεία & Αριστερόστροφη Κίνηση των Εισερχόμενων στον «Τυπικό» Κυκλικό Κόμβο Φόρτων από τον Βόρειο, τον Ανατολικό και τον Δυτικό Κλάδο

	right				straight				left		
1)	E1	W1	S1	2)	E1	W2	S1	3)	E1	W3	S1
	20%	20%	20%		20%	30%	20%		20%	30%	20%
	40%	40%	40%		40%	50%	40%		40%	50%	40%
	40%	40%	40%		40%	20%	40%		40%	20%	40%
4)	E2	W1	S1	5)	E2	W2	S1	6)	E2	W3	S1
	30%	20%	20%		30%	30%	20%		30%	30%	20%
	50%	40%	40%		50%	50%	40%		50%	50%	40%
	20%	40%	40%		20%	20%	40%		20%	20%	40%
7)	E3	W1	S1	8)	E3	W2	S1	9)	E3	W3	S1
	30%	20%	20%		30%	30%	20%		30%	30%	20%
	50%	40%	40%		50%	50%	40%		50%	50%	40%
	20%	40%	40%		20%	20%	40%		20%	20%	40%
10)	E1	W1	S2	11)	E1	W2	S2	12)	E1	W3	S2
	20%	20%	30%		20%	30%	30%		20%	30%	30%
	40%	40%	50%		40%	50%	50%		40%	50%	50%
	40%	40%	20%		40%	20%	20%		40%	20%	20%
13)	E2	W1	S2	14)	E2	W2	S2	15)	E2	W3	S2
	30%	20%	30%		30%	30%	30%		30%	30%	30%
	50%	40%	50%		50%	50%	50%		50%	50%	50%
	20%	40%	20%		20%	20%	20%		20%	20%	20%
16)	E3	W1	S2	17)	E3	W2	S2	18)	E3	W3	S2
	30%	20%	30%		30%	30%	30%		30%	30%	30%
	50%	40%	50%		50%	50%	50%		50%	50%	50%
	20%	40%	20%		20%	20%	20%		20%	20%	20%
19)	E1	W1	S3	20)	E1	W2	S3	21)	E1	W3	S3
	20%	20%	30%		20%	30%	30%		20%	30%	30%
	40%	40%	50%		40%	50%	50%		40%	50%	50%
	40%	40%	20%		40%	20%	20%		40%	20%	20%
22)	E2	W1	S3	23)	E2	W2	S3	24)	E2	W3	S3
	30%	20%	30%		30%	30%	30%		30%	30%	30%
	50%	40%	50%		50%	50%	50%		50%	50%	50%
	20%	40%	20%		20%	20%	20%		20%	20%	20%
25)	E3	W1	S3	26)	E3	W2	S3	27)	E3	W3	S3
	30%	20%	30%		30%	30%	30%		30%	30%	30%
	50%	40%	50%		50%	50%	50%		50%	50%	50%
	20%	40%	20%		20%	20%	20%		20%	20%	20%

Βασικός στόχος κάθε σεναρίου ήταν με τα δεδομένα των συνολικών εισερχόμενων στον «τυπικό» κυκλικό κόμβο φόρτων ανά κλάδο και των ποσοστών κατανομής τους στις τρεις επιμέρους κινήσεις, να υπολογιστούν όλα τα απαιτούμενα μεγέθη για την εύρεση της συνολικής αναμενόμενης καθυστέρησης του κόμβου ($d_{\text{κόμβου}}$) με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο. Ζητούμενο, λοιπόν, σε κάθε σενάριο αποτέλεσε η διαφορά αυτή στη συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του κυκλικού κόμβου, η οποία ονομάστηκε $\Delta d_{\text{κόμβου}}$ και προέκυψε από τον παρακάτω τύπο:

$$\Delta d_{\text{κόμβου}} = d_{\text{κόμβου,no-bypass}} - d_{\text{κόμβου,bypass}}$$

όπου:

$d_{\text{κόμβου,no-bypass}}$ = η συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του «τυπικού» κυκλικού κόμβου χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο (sec/οχ)

$d_{\text{κόμβου,bypass}}$ = η συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του «τυπικού» κυκλικού κόμβου με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο (sec/οχ)

4.6. Λειτουργική Ανάλυση Σεναρίων

Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφεται η λειτουργική ανάλυση του «τυπικού» κυκλικού κόμβου με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο, που πραγματοποιήθηκε για να βρεθεί σε κάθε σενάριο το $\Delta d_{\text{κόμβου}}$. Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 4.5. τα δεδομένα, που υπήρχαν κάθε φορά για το κάθε σενάριο, ήταν ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο (μία περίπτωση από Πίνακας 4-1) και τα ποσοστά κατανομής του φόρτου αυτού σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση ανά κλάδο (Πίνακας 4-2 & Πίνακας 4-3).

Η λειτουργική ανάλυση και των 8.883 σεναρίων πραγματοποιήθηκε σε υπολογιστικά φύλλα του Microsoft Excel και όλες οι μαθηματικές σχέσεις, που χρησιμοποιήθηκαν, έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.2.

4.6.1. Λειτουργική Ανάλυση κάθε Σεναρίου χωρίς Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα στον Νότιο κλάδο του «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου

Σε κάθε σενάριο η λειτουργική ανάλυση του «τυπικού» κυκλικού κόμβου ξεκινούσε με τη θεώρηση ότι δεν υπάρχει δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο.

Αρχικά, υπολογιζόταν για τον κάθε κλάδο ξεχωριστά ο εισερχόμενος φόρτος του στον κυκλικό κόμβο ($v_{e,pce}$) και ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας ακριβώς ανάντη του ($v_{c,pce}$) με τη βοήθεια των κατάλληλων αντιστοιχίσεων, που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2.1. (Εικόνα 4-3 & Εικόνα 4-4 αντίστοιχα). Επιπλέον, υπολογιζόταν και ο φόρτος των διασταυρωνόμενων κινήσεων μπροστά από τον κάθε κλάδο, έτσι ώστε να ελέγχεται ο Περιορισμός 4 (υποκεφάλαιο 4.4.).

Στη συνέχεια, από την Εξίσωση 2.5.1-4, της οποίας ο τύπος φαίνεται παρακάτω, υπολογίστηκε η κυκλοφοριακή ικανότητα του κάθε κλάδου ($c_{e,pce}$) σε ΜΕΑ/h βάσει των Αμερικάνικων Οδηγιών. Ο τύπος αυτός επιλέχθηκε, καθώς υπολογίζει τη χωρητικότητα της λωρίδα πρόσβασης σε «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους.

$$c_{e,pce} = 1.130e^{[(-1,0\cdot 10^{-3})\cdot v_{c,pce}]} \quad \text{(Εξίσωση 2.5.1-4)}$$

Ύστερα, υπολογίστηκε ο λόγος "x" του εξυπηρετούμενού φόρτου του κάθε κλάδου ($v_{e,pce}$) προς τη χωρητικότητά του ($c_{e,pce}$), για να βρεθεί η μέση ολική καθυστέρηση του κάθε κλάδου του κυκλικού κόμβου (d) σε sec/οχ. Η χρονική περίοδος ανάλυσης λήφθηκε ίση με τη συνιστώμενη τιμή βάσει των Αμερικάνικων Οδηγιών, δηλαδή 15 min (T = 0,25h).

$$d = \frac{3.600}{c} + 900T[\frac{v}{c}-1+\sqrt{(\frac{v}{c}-1)^2+\frac{(\frac{3.600}{c})\frac{v}{c}}{450T}}] + 5min[\frac{v}{c},1] \text{ (Εξίσωση 3.2.4-1)}$$

Τέλος, υπολογίστηκε η συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του κυκλικού κόμβου ($d_{κόμβου,no\text{-}bypass}$) σε sec/οχ από τον παρακάτω τύπο, στον οποίο το v_i είναι ο εξυπηρετούμενος φόρτος του κάθε κλάδου ($v_{e,pce}$).

$$d_{κόμβου} = \frac{\sum d_i v_i}{\sum v_i} \text{ (Εξίσωση 3.2.4-3)}$$

Μέσω της συνολικής αυτής αναμενόμενης καθυστέρησης του κόμβου βρέθηκε το επίπεδο εξυπηρέτησής του (LOS) με τη βοήθεια του πίνακα, που έχει παρουσιαστεί στο υποκεφάλαιο 3.2.5. (Πίνακας 3-2) και για λόγους ευκολίας παρατίθεται ξανά παρακάτω:

Συνολική Καθυστέρηση (sec/veh)	Επίπεδο Εξυπηρέτησης	
	v/c≤1.0	v/c>1.0
0 - 10	A	F
>10 - 15	B	F
>15 - 25	C	F
>25 - 35	D	F
>35 - 45	E	F
>50	F	F

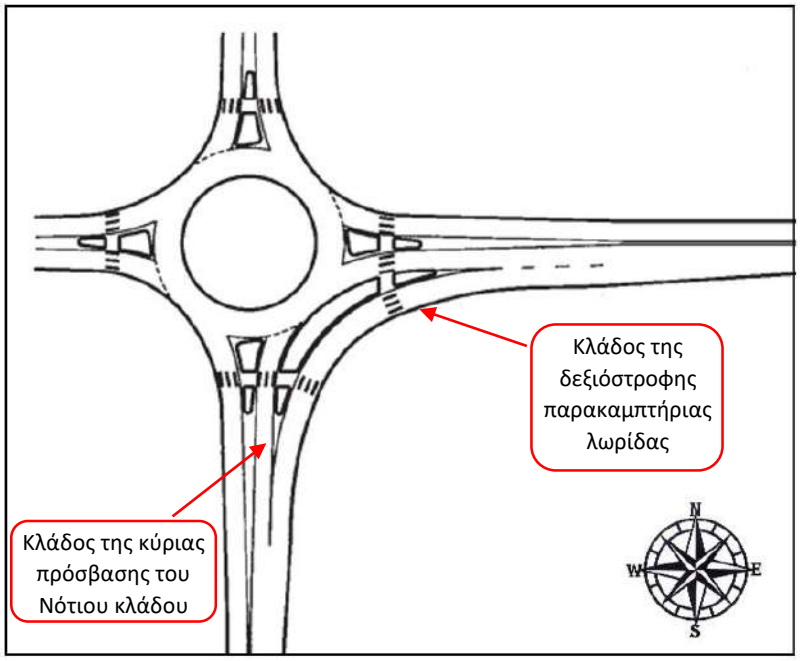
4.6.2. Λειτουργική Ανάλυση κάθε Σεναρίου με Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα στον Νότιο κλάδο του «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου

Έπειτα, στο κάθε σενάριο πραγματοποιήθηκε η ίδια λειτουργική ανάλυση του «τυπικού» κυκλικού, αλλά με τη θεώρηση ότι υπήρχε η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο.

Για αυτή τη λειτουργική ανάλυση πραγματοποιήθηκε ό,τι αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 4.6.1. Ωστόσο, υπήρξαν κάποιες διαφοροποιήσεις στον Νότιο κλάδο λόγω της ύπαρξης της παρακαμπτήριας λωρίδας. Όσα είχαν υπολογιστεί στους υπόλοιπους κλάδους, παρέμειναν σταθερά.

Η μεγάλη διαφοροποίηση εντοπίστηκε στην αντιμετώπιση της Νότιας πρόσβασης σαν δύο ξεχωριστούς κλάδους. Ο ένας κλάδος ήταν εκείνος της παρακαμπτήριας λωρίδας επί της οποίας κινούνταν τα εισερχόμενα οχήματά της πρόσβασης, που κατευθύνονταν δεξιόστροφα προς τον Ανατολικό κλάδο (Nright (7)). Η ροή αυτή, όπως έχει αναφερθεί ξανά και στο υποκεφάλαιο 4.2.1., αποτέλεσε τον καινούργιο φόρτο της παρακαμπτήριας λωρίδας ($v_{bypass,pce}$ = Nright), όποτε τοποθετούταν παρακαμπτήρια λωρίδα στον κλάδο αυτόν. Ο άλλος κλάδος ήταν η κύρια λωρίδα πρόσβασης, η οποία εξυπηρετούσε τον υπόλοιπο εισερχόμενο

φόρτο της ($v_{e,pce}$ = Nstraight + Nleft = 8 + 9). Για καθένα από τους δύο αυτούς κλάδους βρέθηκε η μέση ολική τους καθυστέρησή (d).



Εικόνα 4-6: Οι 2 Επιμέρους Κλάδοι της Νότιας Πρόσβασης κατά της Ύπαρξη Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας Ελεύθερης Ροής σε αυτήν

Για τον υπολογισμό της μέσης ολικής καθυστέρησης της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας (d_{bypass}) χρειάστηκε να υπολογιστεί πρώτα ο φόρτος εξόδου του επόμενού της κλάδου δηλαδή του Ανατολικού, που είναι η ανταγωνιστική ροή της παρακαμπτήριας λωρίδας ($v_{ex,pce,WB}$). Ο φόρτος αυτός διαφοροποιούταν, όταν υπήρχε δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο και υπολογιζόταν από τον παρακάτω τύπο:

$$v_{ex,pce,WB} = \text{Sleft} + \text{Estraight} = 3 + 11 \quad \text{(Εξίσωση 4.2.1-7)}$$

Με τη βοήθεια του παραπάνω φόρτου, ήταν εφικτό να υπολογιστεί η κυκλοφοριακή ικανότητα της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας μέσα από την ακόλουθη εξίσωση:

$$c_{bypass,pce} = 1.250e^{[(-0,7\cdot 10^{-3})\cdot v_{ex,pce}]} \quad \text{(Εξίσωση 2.5.1-3)}$$

Για την εύρεση της μέσης ολικής καθυστέρησης της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας (d_{bypass}) σε sec/οχ χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος τύπος, που αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 4.6.1. (Εξίσωση 3.2.4-1). Για τον τύπο αυτόν, ο οποίος φαίνεται ξανά παρακάτω, χρειάστηκε να υπολογιστεί ο λόγος "x" του εξυπηρετούμενού φόρτου της παρακαμπτήριας λωρίδας ($v_{bypass,pce}$) προς τη χωρητικότητά της ($c_{bypass,pce}$).

$$d = \frac{3.600}{c} + 900T[\frac{v}{c}-1+\sqrt{(\frac{v}{c}-1)^2+\frac{(\frac{3.600}{c})\frac{v}{c}}{450T}}] + 5\min[\frac{v}{c},1] \quad \text{(Εξίσωση 3.2.4-1)}$$

Ο ίδιος τύπος χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό της μέσης ολικής καθυστέρησης της κύριας λωρίδας πρόσβασης (d) του Νότιου κλάδου. Διαφορά υπήρξε απλά στον τύπο υπολογισμού της κυκλοφοριακής της ικανότητας, όπου φαίνεται παρακάτω και στο ότι στον τύπο αυτόν χρειάστηκε ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας ανάντη του κλάδου αυτού

($v_{c,pce}$). Ο συγκεκριμένος φόρτος παρέμενε ο ίδιος είτε ο κλάδος διέθετε παρακαμπτήρια λωρίδα είτε όχι και προέκυπτε μέσω της κατάλληλης αντιστοίχισης ($v_{c,pce}$ = Sleft + Estraight + Eleft = 3 + 11 + 12) (Εικόνα 4-4). Μία ακόμα διαφορά ήταν ότι ο εξυπηρετούμενός της φόρτος, ο οποίος χρειάστηκε στον λόγο "x", ισούταν με τον εναπομείναντα εισερχόμενο φόρτο της πρόσβασης ($v_{e,pce}$ = Nstraight + Nleft = 8 + 9, Εξίσωση 4.2.1-5), όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

$$c_{e,pce} = 1.130e^{[(-1,0\cdot 10^{-3})\cdot v_{c,pce}]} \text{ (Εξίσωση 2.5.1-4)}$$

Στον τύπο της μέσης ολικής καθυστέρησης (d) και στους δύο κλάδους η χρονική περίοδος ανάλυσης λήφθηκε ίση με T = 0,25h.

Για να υπολογιστεί η συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του κυκλικού κόμβου ($d_{κόμβου,bypass}$) χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος τύπος με αυτόν στο υποκεφάλαιο 4.6.1. Στον τύπο αυτόν όπου v_i τοποθετήθηκαν ακριβώς τα ίδια με της προηγούμενης λειτουργικής ανάλυσης, στην οποία είχε ληφθεί η θεώρηση ότι δεν υπάρχει παρακαμπτήρια λωρίδα, με τη διαφορά ότι στον Νότιο κλάδο συμπεριλήφθηκαν δύο φόρτοι πρόσβασης ($v_{bypass,pce}$, $v_{e,pce}$) αντί για έναν και δύο καθυστερήσεις (d_{bypass}, d) αντί για μία.

$$d_{κόμβου} = \frac{\sum d_i v_i}{\sum v_i} \text{ (Εξίσωση 3.2.4-3)}$$

Αφού βρέθηκε η συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του κόμβου ($d_{κόμβου,bypass}$) υπολογίστηκε το επίπεδο εξυπηρέτησής του (LOS) από τον ίδιο πίνακα (Πίνακας 3-2) με αυτόν του υποκεφαλαίου 4.6.1.

Σε κάθε σενάριο μετά την εύρεση των δύο συνολικών αναμενόμενων καθυστερήσεων του κυκλικού κόμβου με ($d_{κόμβου,bypass}$) και χωρίς ($d_{κόμβου,no\text{-}bypass}$) παρακαμπτήρια λωρίδα, υπολογιζόταν η διαφορά των καθυστερήσεων αυτών ($\Delta d_{κόμβου}$).

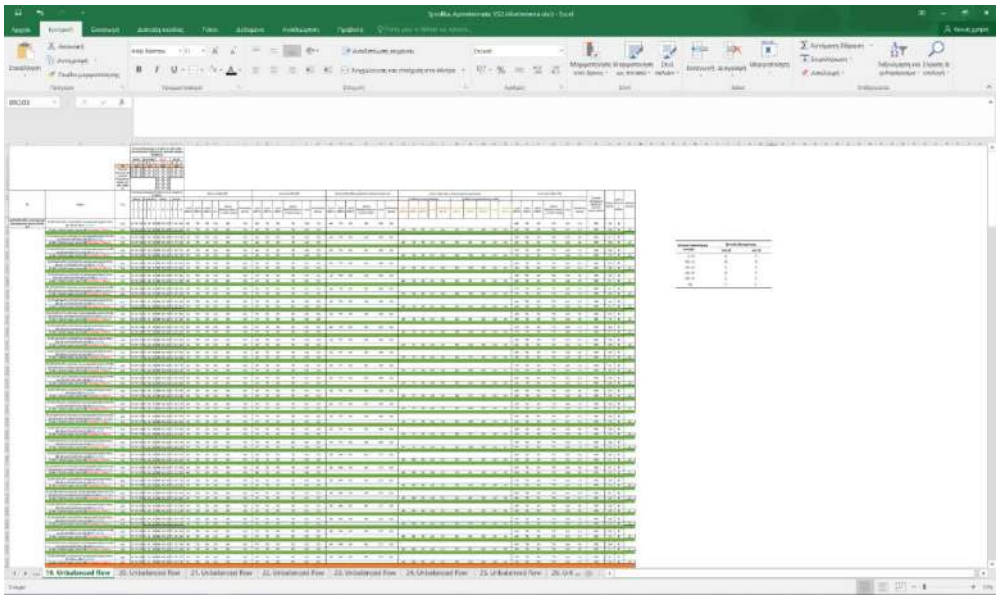
$$\Delta d_{κόμβου} = d_{κόμβου,no\text{-}bypass} - d_{κόμβου,bypass}$$

<u>Συμπέρασμα:</u> Κανένα από τα $\Delta d_{κόμβου}$ των 8.883 σεναρίων δεν είχε αρνητική ή μηδενική τιμή, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι όταν ο τετρασκελής «τυπικός» κυκλικός κόμβος διέθετε δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο, η συνολική αναμενόμενη καθυστέρησή του ($d_{κόμβου,bypass}$) ήταν πάντα μικρότερη από την αντίστοιχη, που είχε, όταν δεν διέθετε ($d_{κόμβου,no\text{-}bypass}$). Αυτό και μόνο αρκεί, για να επιβεβαιωθεί η θετική επίδραση, που είχε η τοποθέτηση του συγκεκριμένου τύπου παρακαμπτήριας λωρίδας στον Νότιο κλάδο του κυκλικού κόμβου στα εξεταζόμενα σενάρια. Επιπλέον, η μεγαλύτερη τιμή $\Delta d_{κόμβου}$, που προέκυψε και από τα 8.883 σενάρια, ήταν τα 8,4 sec/οχ.

4.6.3. Δομή των Υπολογιστικών Φύλλων στο Microsoft Excel

Ο υπολογισμός όλων όσων αναφέρθηκαν στα υποκεφάλαια 4.6.1. και 4.6.2. αυτοματοποιήθηκε σε υπολογιστικά φύλλα του Microsoft Excel και για τα 8.883 σενάρια. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν 47 υπολογιστικά φύλλα, όσες ήταν και οι εξεταζόμενες περιπτώσεις (Πίνακας 4-1), όπου στο καθένα εισάγοντας απλά τον συνολικό εισερχόμενο φόρτο ανά κλάδο της κάθε περίπτωσης, υπολογίζονταν 189 σενάρια, όσοι ήταν και οι συνδυασμοί των ποσοστών κατανομής των φόρτων αυτών ανά κλάδο στις τρεις επιμέρους κινήσεις (Πίνακας 4-2) και άρα προέκυπταν 189 $Δd_{κόμβου}$.

Στην παρακάτω Εικόνα 4-7 φαίνεται ένα από τα υπολογιστικά φύλλα και πιο συγκεκριμένα της 19ης περίπτωσης. Για πρακτικούς λόγους φαίνονται μόνο τα 27 πρώτα σενάρια της περίπτωσης αυτής, που είναι οι 27 συνδυασμοί των ποσοστών κατανομής των εισερχόμενων φόρτων από τον Βόρειο, τον Ανατολικό και τον Δυτικό κλάδο (Πίνακας 4-3) με τα ποσοστά κατανομής N1 του Νότιου κλάδου (Πίνακας 4-2). Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τα υπόλοιπα ποσοστά κατανομής του Νότιου κλάδου έως τα ποσοστά N7. Η καθεμία ομάδα των 27 σεναρίων χωριζόταν με μία πορτοκαλή γραμμή, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-7.



Εικόνα 4-7: Υπολογιστικό Φύλλο της κάθε Εξεταζόμενης Περίπτωσης στο Microsoft Excel

Στην Εικόνα 4-8 παρουσιάζεται αναλυτικά το περιεχόμενο του υπολογιστικού φύλλου της κάθε περίπτωσης στο Microsoft Excel. Τα σενάρια μεταξύ τους χωρίζονταν με μία πράσινη γραμμή, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

Εικόνα 4-8: Περιεχόμενο του κάθε Υπολογιστικού Φύλλου στο Microsoft Excel

Στο παράρτημα Α φαίνεται σε μία πιο μεγεθυμένη μορφή το υπολογιστικό φύλλο της 19ης περίπτωσης, στο οποίο μπόρεσαν να αναπαρασταθούν έως τα 12 σενάριά της για πρακτικούς λόγους. [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α]

4.7. Παρουσίαση του Λογισμικού Σχεδίασης Κυκλικών Κόμβων TORUS

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί μία συνοπτική παρουσίαση του Λογισμικού σχεδίασης TORUS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα Διπλωματική, για τον σχεδιασμό ενός από τα 8.883 σενάρια, που εξετάστηκαν. Επιπλέον, θα γίνει αναφορά και στις σχεδιαστικές παραμέτρους, οι οποίες επιλέχθηκαν να εισαχθούν στο λογισμικό, για να σχεδιαστεί ο «τυπικός» κυκλικός κόμβος, που μελετήθηκε σε όλη τη διάρκεια της μελέτης.

4.7.1. Εισαγωγή στο Λογισμικό TORUS

Το λογισμικό TORUS είναι ένα λογισμικό σχεδίασης κυκλικών κόμβων της Transoft Solutions, μία από τις μεγαλύτερες εταιρείες ανάπτυξης ειδικών λογισμικών σχεδίασης για τη Συγκοινωνιακή Μηχανική. Η σχεδίαση κυκλικών κόμβων μέσω αυτού του λογισμικού γίνεται έξυπνα και αποτελεσματικά με όσο το δυνατόν λιγότερα λάθη. Βοηθάει στην ανάπτυξη των σχεδίων σε όλα τα προκαταρκτικά στάδια έως τα στάδια του αναλυτικού σχεδιασμού και συμβάλει στην απομείωση τόσο του απαιτούμενου χρόνου σχεδίασης έως και κατά 68% όσο και των υπολογισμών, που απαιτούνται κατά τη σχεδίαση ενός κυκλικού κόμβου. ([8],[12])

Ο κάθε χρήστης του λογισμικού αυτού έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει ανάλυση της «ταχύτερης διαδρομής» στον κυκλικό κόμβο, που σχεδιάζει, για να ελέγξει την ασφάλειά του και ταυτόχρονα να εντοπίσει εάν η φυσική τροχιά των οχημάτων επικαλύπτει γειτονικές λωρίδες. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται το κατάλληλο υπόβαθρο επισήμανσης αυτού του είδους της εμπλοκής των οχημάτων, το οποίο είναι πολύ χρήσιμο κατά τη σχεδίαση κυκλικών κόμβων πολλαπλών λωρίδων (multilane roundabouts).

Εικόνα 4-9: Ανάλυση «ταχύτερης διαδρομής» (Αριστερά) και επικάλυψης μονοπατιού για τους κυκλικούς κόμβους πολλαπλών λωρίδων (Δεξιά) στο TORUS [Πηγή: https://www.issd.com.tr/en/44841/TORUS]

Το λογισμικό προάγει και την ασφάλεια των οδηγών, καθώς δίνει την επιλογή στους σχεδιαστές να ελέγξουν όλα τα πεδία ορατότητάς μέσω της σχεδίασής τους στις προσεγγίσεις των διαβάσεων, στα σημεία, που πρέπει να παραχωρήσουν προτεραιότητα και κατά την πρόσβασή τους στην επερχόμενη κυκλοφορία. Επιπλέον, υπάρχει το εργαλείο, να προστεθεί ένα καινούργιο πεδίο ορατότητας, το οποίο να ελέγχει τη γωνία, υπό την οποία ο οδηγός αντιλαμβάνεται τα οχήματα, που εισέρχονται από τον γειτονικό κλάδο πρόσβασης.

Εικόνα 4-10: Έλεγχος όλων των πεδίων ορατότητας στο TORUS [Πηγή: https://www.issd.com.tr/en/44841/TORUS]

Ένα ακόμα αξιοσημείωτο εργαλείο ασφαλείας, που διαθέτει, είναι ότι υπάρχουν «αυτοματοποιημένα» γεωμετρικά χαρακτηριστικά, που ο χρήστης του λογισμικού μπορεί να επιλέξει, ώστε να υπάρχει ασφαλής μείωση στην ταχύτητα εισόδου των οχημάτων στον κυκλικό κόμβο. Ένα από αυτά είναι η εφαρμογή διαδοχικών τόξων αυξανόμενης καμπυλότητας πριν την περιοχή εισόδου.

Εικόνα 4-11: Εφαρμογή Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών Μείωσης της Ταχύτητας στην Είσοδο του Κυκλικού Κόμβου στο TORUS [Πηγή: https://www.issd.com.tr/en/44841/TORUS]

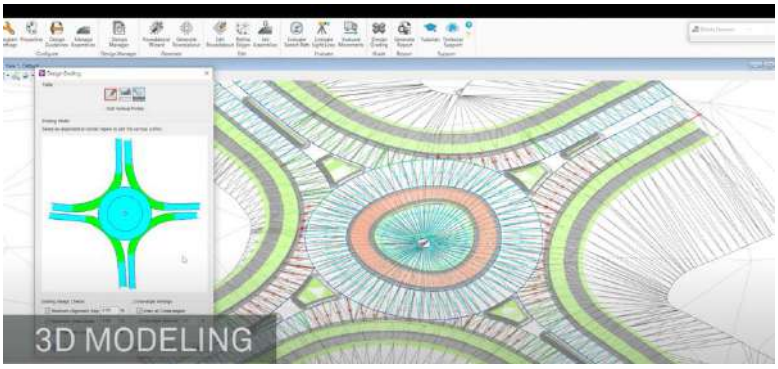
Όταν οι σχεδιαστικοί παράμετροι, που ορίζει ο σχεδιαστής, υπερβαίνουν το εύρος των επιτρεπτών τιμών βάσει των οδηγιών, τότε εμφανίζεται μία προειδοποίηση από το λογισμικό και το μόνο, που χρειάζεται να συμβεί, είναι να εφαρμοστούν καινούργιες αποδεκτές τιμές, οι οποίες θα εμφανιστούν αυτόματα στη γεωμετρική απεικόνιση του κυκλικού κόμβου. Στο TORUS υπάρχει και η δυνατότητα να εισαχθούν, να επεξεργαστούν μέχρι και να διαγραφούν οι κινήσεις των οχημάτων από έναν κυκλικό κόμβο του λογισμικού AutoTURN, προκειμένου να ελεγχθούν εάν αυτές οι κινήσεις υπακούν στις επίσημες σχεδιαστικές οδηγίες.

Εικόνα 4-12: Έλεγχος των Κινήσεων των Οχημάτων στο TORUS [Πηγή: https://www.issd.com.tr/en/44841/TORUS]

Κάποια επιπρόσθετα εργαλεία, που διαθέτει το λογισμικό, είναι ότι μέσω αυτού μπορούν να σχεδιαστούν κυκλικοί κόμβοι, όπου η κεντρική τους νησίδα να χρειάζεται να λάβει και άλλα σχήματα πέραν του τέλειου κύκλου (non-circular roundabouts). Επιπλέον, με το πάτημα ενός κουμπιού ελέγχεται το αν μπορούν να εξυπηρετηθούν Βαρέα Οχήματα (ΒΟ) βάσει της υπό σχεδίαση διάταξης του κυκλικού κόμβου και ταυτόχρονα μπορούν εύκολα να σχεδιαστούν παρακαμπτήριες λωρίδες σε οποίον κλάδο, είναι επιθυμητό.

Εικόνα 4-13: Σχεδίαση Κυκλικών Κόμβων με μη Κυκλική Κεντρική Νησίδα (Non-Circular Roundabouts) στο TORUS [Πηγή: https://www.transoftsolutions.com/road-design/torus-roundabouts/]

Τέλος, ένα ακόμα χρήσιμο εργαλείο του λογισμικού αυτού είναι ότι μπορεί να μοντελοποιήσει σε προχωρημένο επίπεδο τον κυκλικό κόμβο και την επιφάνειά του στον Τρισδιάστατο Χώρο (3D), αφαιρώντας με ευκολία την υφιστάμενη επιφάνεια εδάφους του περιβάλλοντα χώρου.



Εικόνα 4-14: Τρισδιάστατη (3D) Αναπαράσταση Κυκλικού Κόμβου στο TORUS [Πηγή: https://www.transoftsolutions.com/road-design/torus-roundabouts/]

Ωστόσο, επειδή το λογισμικό είναι καθαρά σχεδιαστικό, κατά τη χρήση του δεν λαμβάνονται καθόλου κυκλοφοριακά δεδομένα και φόρτοι υπόψιν παρά μόνο σχεδιαστικές παράμετροι, οι οποίες είναι αναγκαίες για τη δημιουργία του επιθυμητού κυκλικού κόμβου.

4.7.2. Σχεδιαστικές Παράμετροι

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η σχεδίαση υπό κλίμακα ενός από των 8.883 σεναρίων του εξεταζόμενου τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου με τη μία δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο και όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυκλικού κόμβου, που ορίστηκαν στο λογισμικό. Η σχεδίαση αυτή, η οποία στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε μέσω της έκδοσης TORUS 6.0, έγινε καθαρά για λόγους οπτικοποίησης (visualization) και καλύτερης κατανόησης των σεναρίων. Επειδή, το λογισμικό έχει ως κύρια μονάδα μέτρησης μήκους τα πόδια (ft), όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά θα οριστούν και σε αυτήν τη μονάδα.

Λόγω του ότι το βασικό αντικείμενο της Διπλωματικής ήταν η λειτουργική ανάλυση τετρασκελών «τυπικών» κυκλικών κόμβων, για την εκπόνησή της ακολουθήθηκαν αποκλειστικά οι Αμερικάνικες Οδηγίες, όπως έχει αναφερθεί ξανά και στα προηγούμενα κεφάλαια. Συνεπώς, μόνο κατά τη χρήση του λογισμικού TORUS χρησιμοποιήθηκαν σχεδιαστικές παράμετροι για τον εξεταζόμενο κυκλικό κόμβο.

Για όσα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά απαιτήθηκαν, αποφασίστηκε να ληφθούν, όπου ήταν δυνατόν, οι μέσες τιμές των όσων ορίζονται από τις δύο επίσημες οδηγίες (Γερμανικές &

Αμερικάνικες). Αυτό συνέβη διότι, όπως έχει αναφερθεί και στο υποκεφάλαιο 2.3.2., η Ελλάδα ακολουθεί κυρίως τις Γερμανικές Οδηγίες στον σχεδιασμό κυκλικών κόμβων, αλλά επειδή όλη η εργασία βασίστηκε στις Αμερικάνικες, θεωρήθηκε ορθό να ικανοποιούνται και εκείνες στο κομμάτι αυτό. Όλες οι σχεδιαστικές παράμετροι, που χρειάστηκαν, έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.

Αρχικά, ο κυκλικός κόμβος, που σχεδιάστηκε, θεωρήθηκε ότι είναι **υπεραστικός**. Ο λόγος, που έγινε η θεώρηση αυτή, ήταν διότι χρειαζόταν να καθοριστεί ο περιβάλλοντας οδικός χώρος του, για να επιλεχθούν ορισμένα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά. Ακόμα, όπως έχει αναφερθεί ξανά, το πεδίο μελέτης της παρούσας Διπλωματικής απευθύνεται κυρίως σε εισόδους οικισμών, συνεπώς η επιλογή του υπεραστικού περιβάλλοντος κρίθηκε πιο ορθή για την εν λόγω μελέτη. Βάσει όλων αυτών, τόσο στην περιοχή του κυκλικού κόμβου όσο και στην παρακαμπτήρια λωρίδα δεν τοποθετήθηκαν **πουθενά διαβάσεις πεζών**.

Κάποια από τα γεωμετρικά στοιχεία σχεδιασμού του τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου λήφθηκαν από τον πίνακα των βασικών στοιχείων σχεδιασμού όλων των τύπων των κυκλικών κόμβων του υποκεφαλαίου 2.3.2. (Πίνακας 2-1). Πιο συγκεκριμένα, βάσει και των δύο οδηγιών ορίστηκαν τα εξής:

- Κεντρική νησίδα: υπερυψωμένη
- Διάμετρος του κόμβου = ~40 m = 130 ft, όπου είναι η μέση τιμή του εύρους, που προτείνουν οι Αμερικάνικες Οδηγίες [27 - 55 m] και οι Γερμανικές [26 - 50 m].
- Εύρος οδοστρώματος κόμβου = 6,75 m = 22 ft, όπου η τιμή αυτή υπερβαίνει κατά λίγο τις Αμερικάνικες Οδηγίες, οι οποίες συνιστούν έως και 6,5 m, αλλά υπακούει τις Γερμανικές Οδηγίες, οι οποίες συνιστούν ένα εύρος [6,0 – 8,0 m].
- Ύπαρξη υπερβατής ζώνης ομόκεντρα της κεντρικής νησίδας, της οποίας το πλάτος επιλέχθηκε να είναι ίσο με 2 m, έτσι ώστε να είναι μικρότερο από το 1/3 του εύρους του οδοστρώματος ($\frac{1}{3} \cdot 6{,}75 = 2{,}25$ m).
- Πλάτος των λωρίδων καθοδήγησης = 0,25 m, το οποίο λήφθηκε **με παραδοχή**. Τόσο η διάμετρος όσο και το εύρος του οδοστρώματος, που αναφέρθηκαν παραπάνω, δεν περιλαμβάνουν το πλάτος των λωρίδων καθοδήγησης.
- Λωρίδες Εισόδου: 1
- Λωρίδες Εξόδου: 1

Τα στοιχεία σχεδιασμού εισόδου και εξόδου σε κάθε κλάδο του κυκλικού κόμβου λήφθηκαν από τους αντίστοιχους πίνακες του υποκεφαλαίου 2.3.2. (Πίνακας 2-2 & Πίνακας 2-3) πάλι σύμφωνα με τις δύο επίσημες οδηγίες. Τα στοιχεία αυτά παρατίθενται αναλυτικά παρακάτω:

- Εύρος οδοστρώματος εισόδου = 4,00 m = 13 ft, λήφθηκε η μέγιστη τιμή του εύρους των Γερμανικών Οδηγιών για υπεραστικούς «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους [3,50 – 4,00 m]. Δεν ήταν εφικτό να ικανοποιηθεί ταυτόχρονα και το αντίστοιχο εύρος των Αμερικάνικων Οδηγιών [4,20 – 5,50 m], οπότε αποφασίστηκε να ικανοποιηθούν μόνο οι Γερμανικές Οδηγίες.
- Ακτίνα εισόδου = 16 m = 52 ft, αντίστοιχα όπως στο εύρος οδοστρώματος εισόδου λήφθηκε η μέγιστη τιμή του εύρους των Γερμανικών Οδηγιών [14 – 16 m], η οποία ικανοποιεί και το εύρος των Αμερικάνικων Οδηγιών [15 – 30 m].
- Εύρος οδοστρώματος εξόδου = ~4,50 m = 15 ft, λήφθηκε η μέγιστη τιμή του εύρους των Γερμανικών Οδηγιών [3,75 – 4,50 m], η οποία ικανοποιεί και τις Αμερικάνικες Οδηγίες, που ορίζουν εύρος ίσο με [4,20 – 5,50 m].

- Ακτίνα εξόδου = 18 m = 59 ft, λήφθηκε η μέγιστη τιμή του εύρους των Γερμανικών Οδηγιών για υπεραστικούς «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους [16 – 18 m]. Δεν ήταν εφικτό να ικανοποιηθεί και το εύρος των Αμερικάνικων [30 – 60 m], καθώς εμφανίζει μεγάλη απόκλιση με το αντίστοιχο εύρος των Γερμανικών Οδηγιών.
- Πλάτος των λωρίδων καθοδήγησης = 0,25 m, τόσο στην περιοχή εισόδου όσο και στην περιοχή εξόδου το εύρος οδοστρώματος δεν περιλαμβάνει το πλάτος των λωρίδων καθοδήγησης, οπότε η τιμή αυτή λήφθηκε πάλι με παραδοχή.

Στο παρακάτω σχέδιο στην Εικόνα 4-15 δεν φαίνεται ξεχωριστά το πλάτος των λωρίδων καθοδήγησης, καθώς έχει συμπεριληφθεί στο συνολικό επιμέρους κάθε φορά πλάτος τόσο στην περιοχή του κυκλικού δακτυλίου όσο και στις περιοχές εισόδου και εξόδου του κυκλικού κόμβου.

Για τη σχεδίαση της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας στον Νότιο κλάδο όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 2.4. Πιο συγκεκριμένα, λήφθηκαν τα εξής:

- Τυπική ακτίνα καμπυλότητας εισόδου = 57 m = 188 ft, η οποία προέκυψε από το λογισμικό και βάσει των αντίστοιχων ακτινών εισόδου και εξόδου του Νότιου και του Ανατολικού κλάδου, από τους οποίους ξεκινάει και καταλήγει η παρακαμπτήρια λωρίδα αντιστοίχως. Οι Αμερικάνικες Οδηγίες ορίζουν εύρος τιμών για τις ακτίνες καμπυλότητας εισόδου των παρακαμπτήριων λωρίδων ίσο με [60 - 90 m] (Πίνακας 2-5), σε αντίθεση με τις Γερμανικές Οδηγίες που δεν ορίζουν. Όπως γίνεται εμφανές, η ακτίνα που προέκυψε, δεν υπακούει το εύρος των Αμερικάνικων Οδηγιών γεγονός αναμενόμενο, καθώς όσες ακτίνες έχουν οριστεί μέχρι στιγμής στους κλάδους των κυκλικών κόμβων ακολουθούν κυρίως τις Γερμανικές Οδηγίες, οι οποίες συνιστούν πάντα πιο «συντηρητικές» τιμές από τις αντίστοιχες Αμερικάνικες.
- Δεν τοποθετήθηκε διάβαση πεζών επί της παρακαμπτήριας λωρίδας, βάσει των συστάσεων των Αμερικάνικων Οδηγιών επί αυτού του θέματος.

Επιπλέον, ακολουθήθηκαν και οι σχεδιαστικές παράμετροι, που ορίζουν οι Γερμανικές Οδηγίες, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 2.4.2. και φαίνονται αναλυτικά στην Εικόνα 2-10:

- Πλάτος της παρακαμπτήριας λωρίδας = 5,50 m με εκατέρωθεν λωρίδες καθοδήγησης πλάτους 0,25 m
- Πλάτος της παρακαμπτήριας λωρίδας στην περιοχή επιτάχυνσης (l_E) – επιβράδυνσης (l_A) = 3,50 m με εξωτερική λωρίδα καθοδήγησης πλάτους 0,50 m.
- Μήκος επιτάχυνσης (l_E) από το σημείο συμβολής της παρακαμπτήριας λωρίδας με την ανταγωνιστική της ροή, δηλαδή τον φόρτο εξόδου του Ανατολικού κλάδου έως το τέλος της = 70 m, λήφθηκε η μέση τιμή του εύρους [60 – 80 m], που ορίζουν οι Γερμανικές Οδηγίες.
- Μήκος διεύρυνσης (l_Z) στο αρχή της παρακαμπτήριας λωρίδας = 20 m
- Μήκος διεύρυνσης (l_Z) στο τέλος της παρακαμπτήριας λωρίδας = 30 m
- Απόσταση της εξωτερικής οριογραμμής του κυκλικού δακτυλίου από το σημείο αποσύνδεσης της παρακαμπτήριας με τον κύριο κλάδο πρόσβασης του Νότιου κλάδου = 21 m, το οποίο ορίζεται ≥20 m βάσει των Γερμανικών Οδηγιών.
- Απόσταση της εξωτερικής οριογραμμής του κυκλικού δακτυλίου από το σημείο συμβολής της παρακαμπτήριας με την ανταγωνιστική της ροή, δηλαδή τον φόρτο

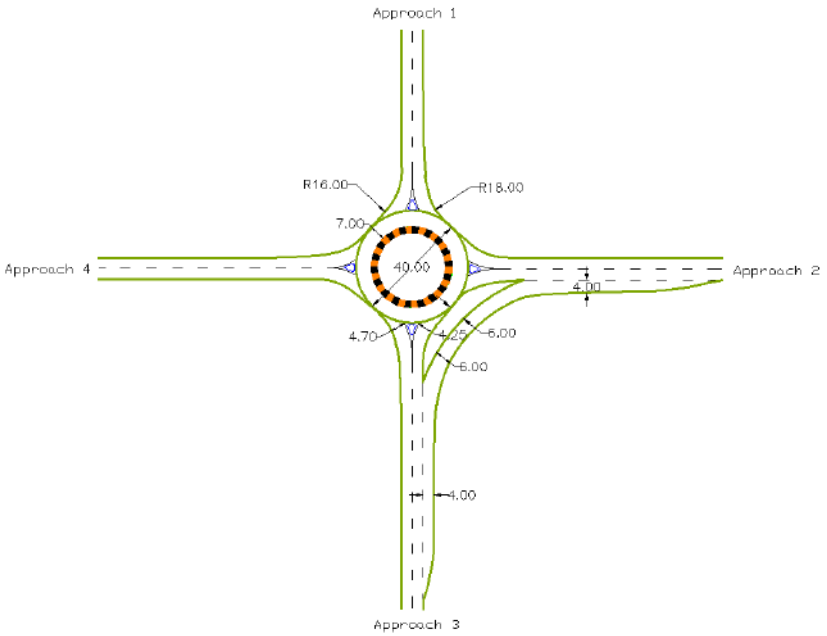
εξόδου του Ανατολικού κλάδου = 20 m, το οποίο ορίζεται ≥20 m βάσει των Γερμανικών Οδηγιών.

Στο σχέδιο στην Εικόνα 4-16 το πλάτος της παρακαμπτήριας λωρίδας σε όλες τις περιοχές της απεικονίζεται αθροιστικά και με το πλάτος των λωρίδων καθοδήγησής της.

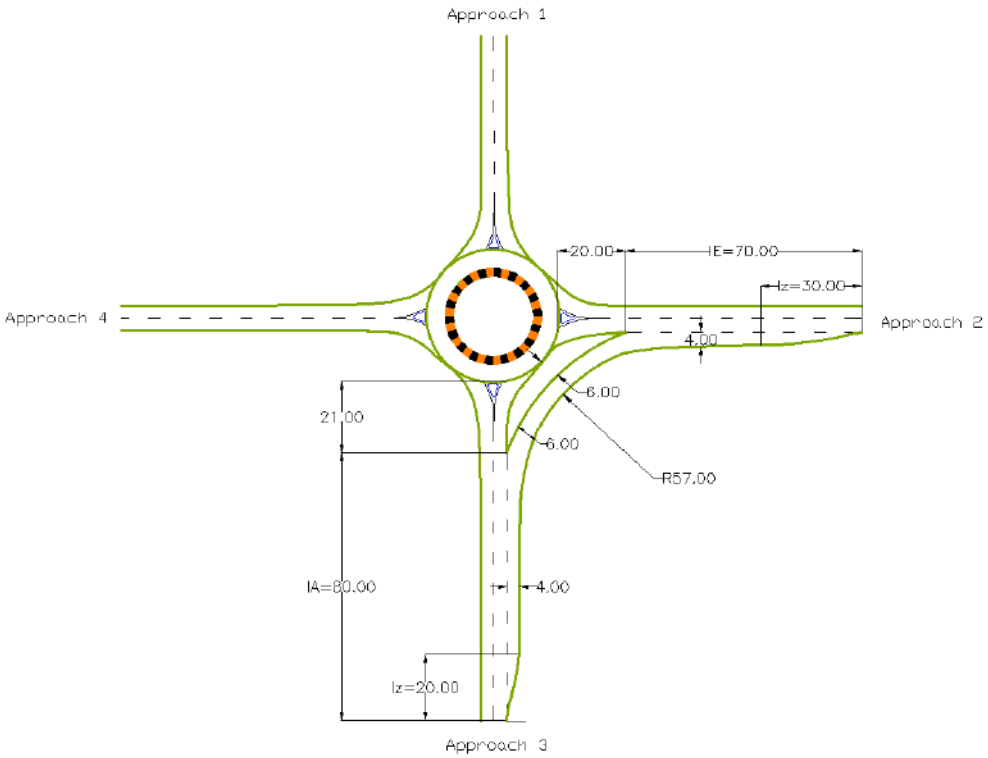
Τέλος, επιλέχθηκε να αναπαρασταθεί ένα από τα σενάρια, που εμφάνισαν το μεγαλύτερο $\Delta d_{\text{κόμβου}}$, δηλαδή ίσο με 8,4 sec/οχ. Πιο συγκεκριμένα, τυχαία αποφασίστηκε να σχεδιαστεί το σενάριο με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Περίπτωση 41, δηλαδή ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο ήταν ο εξής:
  - ※ FortosSB = 150 MEA/h (Βόρειος κλάδος)
  - ※ FortosWB = 150 MEA/h (Ανατολικός κλάδος)
  - ※ FortosNB = 500 MEA/h (Νότιος κλάδος)
  - ※ FortosEB = 700 MEA/h (Δυτικός κλάδος)
- Ποσοστά κατανομής σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση του συνολικού εισερχόμενου στον κυκλικό κόμβο φόρτου ανά κλάδο:
  - ※ S3 → right:20%, straight:30%, left:50% (Βόρειος κλάδος)
  - ※ W3 → right:20%, straight:30%, left:50% (Ανατολικός κλάδος)
  - ※ N6 → right:60%, straight:30%, left:10% (Νότιος κλάδος)
  - ※ E3 → right:20%, straight:30%, left:50% (Δυτικός κλάδος)

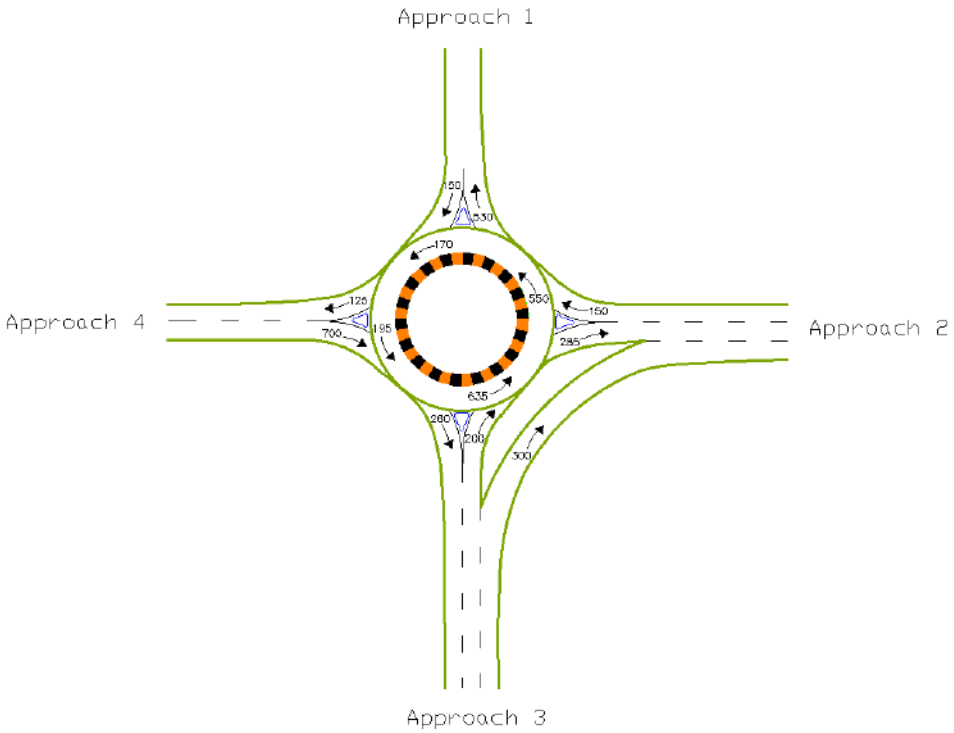
Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται υπό κλίμακα ο κυκλικός κόμβος, που σχεδιάστηκε στο λογισμικό TORUS 6.0 με όλα τα προαναφερθέντα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και με όλους τους φόρτους εισόδου, εξόδου και επερχόμενης κυκλοφορίας σε κάθε κλάδο του βάσει του παραπάνω σεναρίου. Όλα τα γεωμετρικά αυτά χαρακτηριστικά απεικονίζονται στη μονάδα των μέτρων (m).



Εικόνα 4-15: Το Σχέδιο του Τετρασκελούς «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου του Σεναρίου με τη Δεξιόστροφη Παρακαμπτήρια Λωρίδα Ελεύθερης Ροής στον Νότιο Κλάδο από το Λογισμικό TORUS 6.0



Εικόνα 4-16: Διαστασιολόγηση της Δεξιόστροφης Παρακαμπτήριας Λωρίδας Ελεύθερης Ροής του Τετρασκελούς «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου του Σεναρίου (m)



Εικόνα 4-17: Οι Συνολικοί Φόρτοι Εισόδου, Εξόδου & Επερχόμενης Κυκλοφορίας του κάθε Κλάδου Πρόσβασης του Τετρασκελούς «Τυπικού» Κυκλικού Κόμβου του Σεναρίου (ΜΕΑ/h)

5. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Έχοντας αναλύσει τη μεθοδολογία, που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία των 8.883 σεναρίων, στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η στατιστική επεξεργασία της βάσης δεδομένων, η οποία όπως έχει αναφερθεί ξανά, προέκυψε από αυτά τα σενάρια. Κύριος σκοπός της στατιστικής επεξεργασίας ήταν η εύρεση του στατιστικά καλύτερου γραμμικού μοντέλου, το οποίο να ικανοποιεί τον στόχο της εν λόγω Διπλωματικής, δηλαδή τη διερεύνηση της αναγκαιότητας χωροθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής (free-flow right-turn bypass lane) στον Νότιο κλάδο σε έναν τετρασκελή «τυπικό» κυκλικό κόμβο (single-lane roundabout).

Όλη η στατιστική επεξεργασία της βάσης δεδομένων έγινε στο περιβάλλον του R-Studio. Συνεπώς, στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί ο κώδικας, που αναπτύχθηκε και οι επιμέρους εντολές, που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση της στατιστικής αυτής ανάλυσης, καθώς και των όσων αναφέρθηκαν στα υποκεφάλαια 3.3. έως 3.5.

5.1. Περιγραφή των Μεταβλητών της Βάσης Δεδομένων

Για να βρεθεί το ζητούμενο στατιστικά ορθότερο μοντέλο, χρειάστηκε να ορισθούν οι μεταβλητές, γύρω από τις οποίες θα πραγματοποιούταν η στατιστική ανάλυση. Οι μεταβλητές αυτές επιλέχθηκαν από τα αποτελέσματα των σεναρίων του Κεφαλαίου 4., όπου ο αριθμός των παρατηρήσεων της καθεμίας **(8.883 συνολικά!)** ήταν αρκετά ικανοποιητικός, για να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικά η ανάλυση αυτή.

Ως εξαρτημένη μεταβλητή επιλέχθηκε το $\Delta d_{\text{κόμβου}}$, δηλαδή η διαφορά της συνολικής αναμενόμενης καθυστέρησης του τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου ($d_{\text{κόμβου}}$) με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο. Ο λόγος, που έγινε αυτή η επιλογή, ήταν διότι, το $\Delta d_{\text{κόμβου}}$ αποτέλεσε το βασικό ζητούμενο όλων των σεναρίων και το μέγεθος, μέσω του οποίου προσεγγίσθηκε η επίδραση της τοποθέτησης παρακαμπτήριας λωρίδας στον κυκλικό κόμβο στην παρούσα Διπλωματική.

Ως ανεξάρτητες μεταβλητές επιλέχθηκαν τα 28 παρακάτω μεγέθη, τα οποία θεωρήθηκαν ότι ήταν τα πιο βασικά για την εκτέλεση του κάθε σεναρίου. Τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται παρακάτω με την ονομασία, που τους δόθηκε στο κομμάτι της στατιστικής ανάλυσης, προκειμένου να αναγνωρίζονται από τη γλώσσα προγραμματισμού R-Studio. Για να μπορεί να αναγνωρίζεται και η εξαρτημένη μεταβλητή $\Delta d_{\text{κόμβου}}$, μετονομάστηκε σε Ddkombou.

<u>Οι τέσσερις συνολικοί εισερχόμενοι φόρτοι στον «τυπικό» κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο:</u>

- FortosSB: ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος από τον Βόρειο κλάδο
- FortosWB: ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος από τον Ανατολικό κλάδο
- FortosNB: ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος από τον Νότιο κλάδο
- FortosEB: ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος από τον Δυτικό κλάδο

<u>Τα ποσοστά κατανομής σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον κάθε κλάδο, τα οποία ήταν δώδεκα για όλον τον «τυπικό» κυκλικό κόμβο:</u>

- Srightper-Sstraightper-Sleftper: τα ποσοστά κατανομής σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη αντίστοιχα κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Βόρειο κλάδο

- Wrightper-Wstraightper-Wleftper: τα ποσοστά κατανομής σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη αντίστοιχα κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Ανατολικό κλάδο
- Nrightper-Nstraightper-Nleftper: τα ποσοστά κατανομής σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη αντίστοιχα κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Νότιο κλάδο
- Erightper-Estraightper-Eleftper: τα ποσοστά κατανομής σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη αντίστοιχα κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Δυτικό κλάδο

Οι φόρτοι της δεξιόστροφης, ευθείας και αριστερόστροφης κίνησης στους οποίους επιμερίζεται ο συνολικός εισερχόμενος στον κυκλικό κόμβο φόρτος από τον κάθε κλάδο. Ο καθένας από αυτούς τους φόρτους, οι οποίοι είναι δώδεκα για όλον τον «τυπικό» κυκλικό κόμβο, προέκυψε από το γινόμενο του συνολικού εισερχόμενου φόρτου του αντίστοιχου κλάδου με το ποσοστό κατανομής στην αντίστοιχη επιμέρους κίνηση:

- Sright-Sstraight-Sleft: οι επιμέρους ροές του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Βόρειο κλάδο, που κινούνται δεξιόστροφα (προς τον Δυτικό), ευθεία (προς τον Νότιο) και αριστερόστροφα (προς τον Ανατολικό) αντίστοιχα
- Wright-Wstraight-Wleft: οι επιμέρους ροές του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Ανατολικό κλάδο, που κινούνται δεξιόστροφα (προς τον Βόρειο), ευθεία (προς τον Δυτικό) και αριστερόστροφα (προς τον Νότιο) αντίστοιχα
- Nright-Nstraight-Nleft: οι επιμέρους ροές του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Νότιο κλάδο, που κινούνται δεξιόστροφα (προς τον Ανατολικό), ευθεία (προς τον Βόρειο) και αριστερόστροφα (προς τον Δυτικό) αντίστοιχα
- Eright-Estraight-Eleft: οι επιμέρους ροές του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Δυτικό κλάδο, που κινούνται δεξιόστροφα (προς τον Νότιο), ευθεία (προς τον Ανατολικό) και αριστερόστροφα (προς τον Βόρειο) αντίστοιχα

Οι παραπάνω 29 μεταβλητές (28 ανεξάρτητες & 1 εξαρτημένη) μαζί με τις τιμές, που έλαβαν και στα 8.883 σενάρια, αποτέλεσαν τη βάση δεδομένων της παρούσας στατιστικής επεξεργασίας. Επιπλέον, βάσει αυτών η συγκεκριμένη στατιστική ανάλυση απέκτησε πιο σαφή στόχο, που ήταν η εύρεση μίας αξιόπιστης σχέσης μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής $\Delta d_{\text{κόμβου}}$ και κάποιων - όσο το δυνατόν λιγότερων – ανεξάρτητων μεταβλητών από τις 28 προαναφερθείσες.

Η εξαρτημένη μεταβλητή είναι συνεχής, λόγω του ότι οι τιμές, που έλαβε και στα 8.883 σενάρια, ήταν ένα συνεχές υποσύνολο του συνόλου των πραγματικών αριθμών. Συνεπώς, βάσει των όσων ειπώθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.4. ορίστηκε σαν αρχικό πλάνο να πραγματοποιηθεί γραμμική παλινδρόμηση για την εύρεση του ζητούμενου γραμμικού μοντέλου. Σε περίπτωση που δεν μπορούσε να προκύψει κάποιο στατιστικά ορθό μοντέλο από αυτή τη μέθοδο παλινδρόμησης, για μία καλύτερη προσαρμογή των μεταβλητών στα μοντέλα υπήρχε σαν δεύτερο πλάνο να εφαρμοστεί λογαριθμοκανονική ή κάποιου άλλου είδους γραμμική παλινδρόμηση.

5.2. Ο Κώδικας στο R-Studio

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί ο κώδικας, που αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού R-Studio, ο οποίος παρατίθεται ολόκληρος στο παράρτημα Δ [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ]. Στην Εικόνα 3-1 του υποκεφαλαίου 3.3. παρουσιάστηκε το περιβάλλον του R-Studio.

Όλος ο κώδικας γράφτηκε στο R-Script, που είναι το πάνω αριστερό μέρος στην Εικόνα 3-1. Αρχικά, στις πρώτες γραμμές εκτελέστηκαν οι εντολές install.packages και library, οι οποίες πρακτικά εγκαθιστούν και ανακαλούν ήδη εγκατεστημένα υποπρογράμματα - πακέτα (packages) του R-Studio, που είναι απαραίτητα για τον τελικό κώδικα. Ενδεικτικά, κάποια από τα βασικότερα πακέτα, που εγκαταστάθηκαν για τις ανάγκες της εργασίας, ήταν τα εξής:

- ggplot2: δίνει τη δυνατότητα να δημιουργηθούν διαγράμματα, στα οποία γίνεται να προστεθεί τίτλος και διάφορα χαρακτηριστικά. Μέσω των διαγραμμάτων αυτών κατανοούνται οπτικά τα δεδομένα και εξάγονται κατάλληλα συμπεράσματα.
- visreg: δίνει τη δυνατότητα να οπτικοποιηθούν τα μοντέλα παλινδρόμησης (regression models)
- plyr: παρέχει εργαλεία για να διαχωρίζονται, να εφαρμόζονται και να συνδυάζονται τα δεδομένα

Στις επόμενες ακριβώς γραμμές στον κώδικα ορίστηκε το directory, στο οποίο ήταν επιθυμητό να εκτελεστεί το αρχείο του R-Studio. Αυτό πραγματοποιήθηκε μέσω της εντολής setwd, εντός της οποίας ορίστηκε το path του φακέλου, από τον οποίο λαμβάνονταν τα απαραίτητα αρχεία.

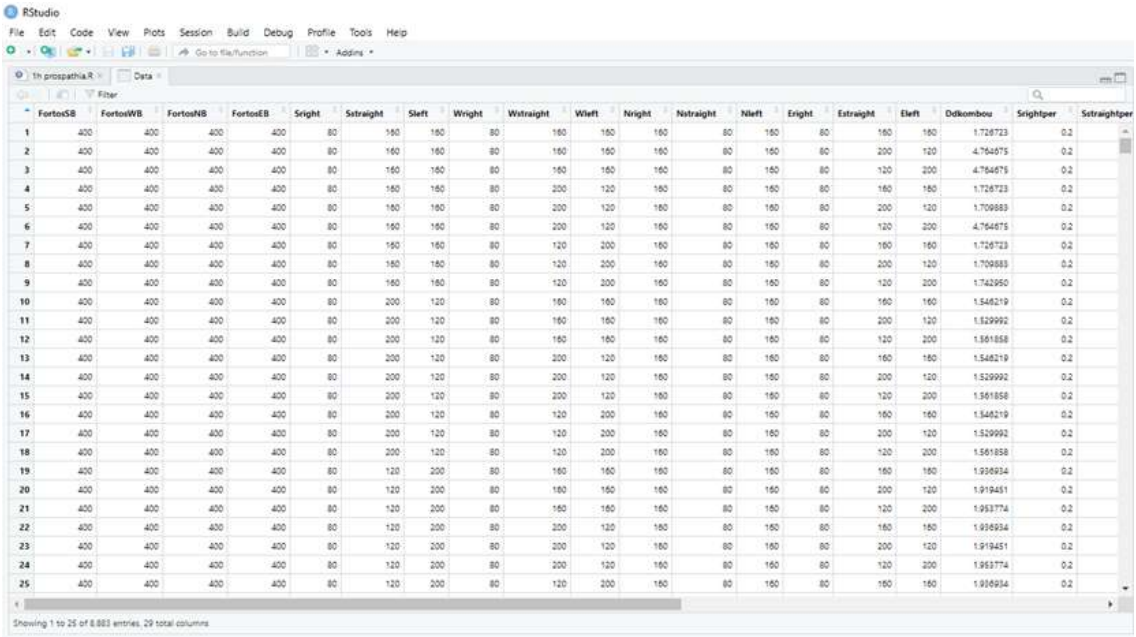
Στα υποκεφάλαια 5.2.1. έως 5.2.5. παρατίθενται κατά σειρά όσα εκτελέστηκαν στον κώδικα.

5.2.1. Εισαγωγή των Δεδομένων

Σε μία πρώτη φάση συγκεντρώθηκε σε έναν πίνακα σε αρχείο Microsoft Excel η βάση δεδομένων, δηλαδή οι 29 μεταβλητές, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 5.1. με τις τιμές, που έλαβε η καθεμία στα 8.883 σενάρια. Συνεπώς, ο πίνακας αυτός, ο οποίος ονομάστηκε “Synopsh_Apotelesmatwn” αποτελούταν από 29 στήλες και 8.883 σειρές.

Για λόγους καλύτερης εμφάνισης ο πίνακας αυτός του Microsoft Excel παρατίθεται στο παράρτημα Β [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β] μέχρι το 46^{ο} σενάριό του. Η στήλη της εξαρτημένης μεταβλητής Ddkombou εμφανίζεται με ανοιχτό ροζ χρώμα, για να διαφοροποιείται από τις 28 υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές.

Σε δεύτερη φάση ο πίνακας αυτός εισήχθη στο R-Studio μέσω της εντολής readWorksheetFromFile. Η εντολή αυτή για να χρησιμοποιηθεί, χρειάστηκε πρώτα να εγκατασταθούν και να ανακαλεστούν από τη βιβλιοθήκη του R-Studio τα πακέτα XLConnect και XLConnectJars. Ορίζοντάς το κατάλληλο path εντός αυτής της εντολής, στο οποίο είναι αποθηκευμένο το αρχείο του πίνακα, εισήχθη στο πρόγραμμα με την ονομασία Data, ένα μέρος του οποίου φαίνεται στην Εικόνα 5-1. Στο R-Studio οι στήλες του πίνακα αναγνωρίζονται σαν “variables” και οι σειρές σαν “observations” και αυτό φαίνεται στην καρτέλα Environment (πάνω μέρος δεξιά στην Εικόνα 3-1).



	FortosSB	FortosWB	FortosNB	FortosEB	Sright	Sstraight	Sleft	Wright	Wstraight	Wleft	Nright	Nstraight	Nleft	Eright	Estraight	Eleft	Ddkombou	Srightper	Sstraightper
1	400	400	400	400	80	160	160	80	160	160	160	80	160	80	160	160	1.726723	0.2	
2	400	400	400	400	80	160	160	80	160	160	160	80	160	80	200	120	4.764675	0.2	
3	400	400	400	400	80	160	160	80	160	160	160	80	160	80	120	200	4.764675	0.2	
4	400	400	400	400	80	160	160	80	200	120	160	80	160	80	160	160	1.726723	0.2	
5	400	400	400	400	80	160	160	80	200	120	160	80	160	80	200	120	1.709883	0.2	
6	400	400	400	400	80	160	160	80	200	120	160	80	160	80	120	200	4.764675	0.2	
7	400	400	400	400	80	160	160	80	120	200	160	80	160	80	160	160	1.726723	0.2	
8	400	400	400	400	80	160	160	80	120	200	160	80	160	80	200	120	1.709883	0.2	
9	400	400	400	400	80	160	160	80	120	200	160	80	160	80	120	200	1.742950	0.2	
10	400	400	400	400	80	200	120	80	160	160	160	80	160	80	160	160	1.546219	0.2	
11	400	400	400	400	80	200	120	80	160	160	160	80	160	80	200	120	1.529992	0.2	
12	400	400	400	400	80	200	120	80	160	160	160	80	160	80	120	200	1.561858	0.2	
13	400	400	400	400	80	200	120	80	200	120	160	80	160	80	160	160	1.546219	0.2	
14	400	400	400	400	80	200	120	80	200	120	160	80	160	80	200	120	1.529992	0.2	
15	400	400	400	400	80	200	120	80	200	120	160	80	160	80	120	200	1.561858	0.2	
16	400	400	400	400	80	200	120	80	120	200	160	80	160	80	160	160	1.546219	0.2	
17	400	400	400	400	80	200	120	80	120	200	160	80	160	80	200	120	1.529992	0.2	
18	400	400	400	400	80	200	120	80	120	200	160	80	160	80	120	200	1.561858	0.2	
19	400	400	400	400	80	120	200	80	160	160	160	80	160	80	160	160	1.936934	0.2	
20	400	400	400	400	80	120	200	80	160	160	160	80	160	80	200	120	1.919451	0.2	
21	400	400	400	400	80	120	200	80	160	160	160	80	160	80	120	200	1.953774	0.2	
22	400	400	400	400	80	120	200	80	200	120	160	80	160	80	160	160	1.936934	0.2	
23	400	400	400	400	80	120	200	80	200	120	160	80	160	80	200	120	1.919451	0.2	
24	400	400	400	400	80	120	200	80	200	120	160	80	160	80	120	200	1.953774	0.2	
25	400	400	400	400	80	120	200	80	120	200	160	80	160	80	160	160	1.936934	0.2	

Εικόνα 5-1: Απόσπασμα του Πίνακα της Βάσης Δεδομένων στο Περιβάλλον του R-Studio

5.2.2. Γραμμική Συσχέτιση των Μεταβλητών

Πριν την ανάπτυξη των γραμμικών μοντέλων βρέθηκαν οι γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών, για να υπάρξει μία πρώτη εικόνα του πόσο συσχετίζονται μεταξύ τους. Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 3.3.2., στην παρούσα Διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ο παραμετρικός συντελεστής συσχέτισης Pearson (ρ), για να βρεθούν οι συσχετίσεις των μεταβλητών.

Βασικό ζητούμενο ήταν μεταξύ οποιασδήποτε ανεξάρτητης μεταβλητής με την εξαρτημένη Ddkombou να υπάρχει υψηλή συσχέτιση, ενώ οι ανεξάρτητες μεταβλητές, που θα χρησιμοποιηθούν στο γραμμικό μοντέλο, να έχουν χαμηλή έως μηδενική συσχέτιση μεταξύ τους.

Για να υπολογιστεί ο συντελεστής συσχέτισης Pearson στην γλώσσα προγραμματισμού R-Studio, χρησιμοποιήθηκε η εντολή cor(x,y,method), όπου x και y είναι οι μεταβλητές μεταξύ των οποίων υπολογίζεται η συσχέτιση και το method εκφράζει τη μέθοδο, βάσει της οποίας θα υπολογιστεί η συγκεκριμένη συσχέτιση. Στην προκειμένη περίπτωση, όπου x και y ορίστηκε η βάση δεδομένων Data και όπου method η μέθοδος Pearson.

Στη συνέχεια, οι συσχετίσεις, που υπολογίστηκαν μεταξύ και των 29 μεταβλητών, συγκεντρώθηκαν σε έναν πίνακα με το όνομα “Pearson_cor” και μέσω της εντολής write.csv υπήρξε η δυνατότητα να εξαχθεί σε αρχείο .csv. Για να συμβεί αυτό, χρειάστηκε απλά να δηλωθεί εντός της συγκεκριμένης εντολής το όνομα του πίνακα και το path του φακέλου του υπολογιστή, που ήταν επιθυμητό να αποθηκευτεί. Ο κώδικας, που συντάχθηκε στο περιβάλλον του R-Studio, για να υπολογιστούν οι συντελεστές συσχέτισης Pearson, παρουσιάζεται αναλυτικά στην Εικόνα 5-2.

```
##CORRELATION TEST BETWEEN ALL VARIABLES (28 anexarthtes metavlhtes & 1 exarthmenh)
cor(Data,method=c("pearson"))
Pearson_cor=cor(Data,method=c("pearson"))
#Write Pearson_cor into .csv
write.csv(Pearson_cor,"C:/Users/User/Desktop/3o Meros Ergasias/Pearson_Data_1.csv" )
```

Εικόνα 5-2: Κώδικας για τον Υπολογισμό των Συντελεστών Συσχέτισης Pearson στο R-Studio

Προκειμένου να είναι πιο ευανάγνωστοι οι συντελεστές συσχέτισης, που προέκυψαν από τον κώδικα, παρουσιάζονται σε δύο πίνακες στο παράρτημα Γ [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ].

Λήφθηκε σαν παραδοχή να θεωρείται ότι υπάρχει **υψηλή συσχέτιση** όταν οι απόλυτες τιμές του συντελεστή συσχέτισης Pearson ήταν άνω του 0,6 **(|ρ|>0,6)**, **μέτρια συσχέτιση** όταν ήταν μεταξύ του 0,5 και του 0,6 **(0,5≤|ρ|≤ 0,6)** και **χαμηλή** όταν ήταν μικρότερες του 0,5 **(|ρ|<0,5)**. Η υψηλή συσχέτιση εκφράζει αδυναμία ταυτόχρονης χρήσης των μεταβλητών, που παρουσιάζουν τον συγκεκριμένο συντελεστή συσχέτισης, στο ίδιο στατιστικό μοντέλο, ενώ η μέτρια συσχέτιση υποδηλώνει ότι οι μεταβλητές μπορούν να συμπεριληφθούν στο ίδιο μοντέλο, εάν κρίνεται απαραίτητο. Ωστόσο, όλα αυτά τα όρια ανήκουν στα θεωρητικά πλαίσια της μεθόδου Pearson. Πρακτικά εάν προέκυπτε μοντέλο, που να περιλάμβανε μεταβλητές με συντελεστή συσχέτισης |ρ|>0,6, δε θα αποτελούσε αιτία απόρριψής του, καθώς μετέπειτα κατά την πραγματοποίηση των μοντέλων εξετάστηκε και ο συντελεστής VIF, που παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 3.5.5.

Οι δώδεκα ανεξάρτητες μεταβλητές των ποσοστών κατανομής σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον κάθε κλάδο εμφάνισαν τόσο μεταξύ τους όσο με τις υπόλοιπες 16 ανεξάρτητες μεταβλητές συντελεστή συσχέτισης πολύ κοντά στο μηδέν. Για αυτό το λόγο σε αυτές τις μεταβλητές ο συντελεστή συσχέτισής δεν εκφράστηκε μόνο με δύο δεκαδικά ψηφία.

Ακόμα, όπως γίνεται αντιληπτό από τον δεύτερο πίνακα στο παράρτημα Γ [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ], οι ανεξάρτητες μεταβλητές των ποσοστών κατανομής σε δεξιόστροφη κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Βόρειο κλάδο (Srightper), από τον Ανατολικό κλάδο (Wrightper) και από τον Δυτικό κλάδο (Erightper) εμφάνισαν το σύμβολο NA. Αυτό συνέβη, διότι δεν παρουσίασαν κανέναν συντελεστή συσχέτισης με καμία μεταβλητή, καθώς και οι τρεις τους έλαβαν την τιμή 0,2 (20%) και στα 8.883 σενάρια.

Τέλος, όπως ισχύει και σε άλλα είδη συντελεστών συσχέτισης, έτσι και στον συντελεστή συσχέτισης Pearson ενός ζεύγους μεταβλητών το πρόσημό του υποδεικνύει την 1:1 επίδραση, που έχει η μία μεταβλητή στην άλλη. Πιο συγκεκριμένα, το θετικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η αύξηση της μίας μεταβλητής συνεπάγεται την αύξηση της άλλης, ενώ το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η αύξηση της μίας συνεπάγεται τη μείωση της άλλης (και αντίστροφα).

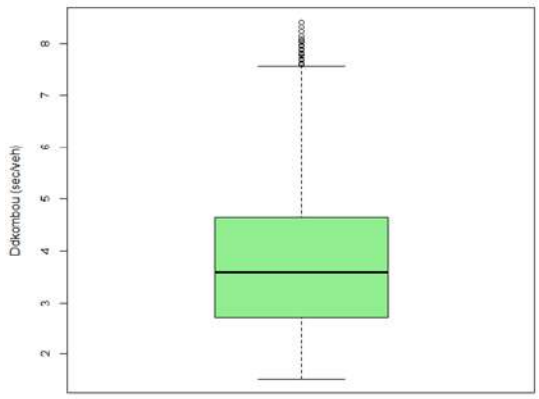
5.2.3. Γραφική Απεικόνιση των Μεταβλητών – Boxplot

Για μία καλύτερη κατανόηση των μεταβλητών δημιουργήθηκαν boxplots, στα οποία έγινε αναφορά στο υποκεφάλαιο 3.3.3.

Στη γλώσσα προγραμματισμού R-Studio το boxplot υλοποιήθηκε με τη βοήθεια της εντολής boxplot(name,y="name"), όπου στο name τοποθετήθηκε το όνομα της μεταβλητής, για την οποία ήταν επιθυμητό να δημιουργηθεί το γράφημα αυτό.

Στην Εικόνα 5-3 παρουσιάζεται το boxplot της εξαρτημένης μεταβλητής Ddkombou και ο κώδικας, που συντάχθηκε, για να δημιουργηθεί.

```
#BOXPLOT
boxplot_Ddkombou <- boxplot(Data$Ddkombou, ylab="Ddkombou (sec/veh)", col="lightgreen")
boxplot_Ddkombou
```



Εικόνα 5-3: Boxplot της Εξαρτημένης Μεταβλητής Ddkombou και ο Κώδικας για τη Δημιουργία του στο R-Studio

Από τον παραπάνω κώδικα (Εικόνα 5-3) πέραν του boxplot προέκυψε στην καρτέλα Console (κάτω αριστερό μέρος στην Εικόνα 3-1) οι πέντε τιμές, που χαρακτηρίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή και φαίνονται παρακάτω:

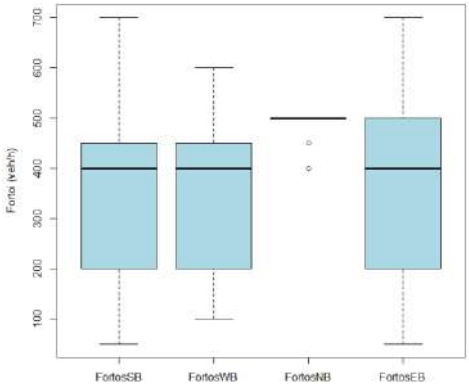
- Minimum = 1,53 sec/οχ (η ελάχιστη τιμή της)
- Q1 = 2,70 sec/οχ
- Median = 3,57 sec/οχ (η διάμεσός της)
- Q3 = 4,66 sec/οχ
- Maximum = 7,57 sec/οχ (η μέγιστη τιμή της)

Από το boxplot στην Εικόνα 5-3 γίνεται οπτικά εμφανές ότι η εξαρτημένη μεταβλητή δεν ακολουθεί ακριβώς την κανονική κατανομή. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από τις διαφορές (Median - Q1) και (Q3 – Median), οι οποίες δεν έβγαλαν ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα, προέκυψε ότι Median - Q1 = 0,87 sec/οχ ≠ Q3 – Median = 1,09 sec/οχ. Ωστόσο, η απόκλισή τους πέραν του ότι ήταν μικρή, θεωρήθηκε και αναμενόμενη, καθώς οι διαφορές αυτές αφορούν μία μεταβλητή (Ddkombou), η οποία προέκυψε από τυχαίες μετρήσεις.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν τα boxplots των συνολικών εισερχόμενων φόρτων στον «τυπικό» κυκλικό κόμβο και από τους τέσσερις κλάδους, τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 5-4. Για να ενοποιηθούν στο ίδιο γράφημα, χρειάστηκε πρώτα οι τέσσερις ανεξάρτητες μεταβλητές των φόρτων αυτών να τοποθετηθούν σε έναν ενιαίο πίνακα μέσω της εντολής cbind. Στην Εικόνα 5-4 φαίνεται αναλυτικά και ο κώδικας για τη δημιουργία των τεσσάρων αυτών boxplots.

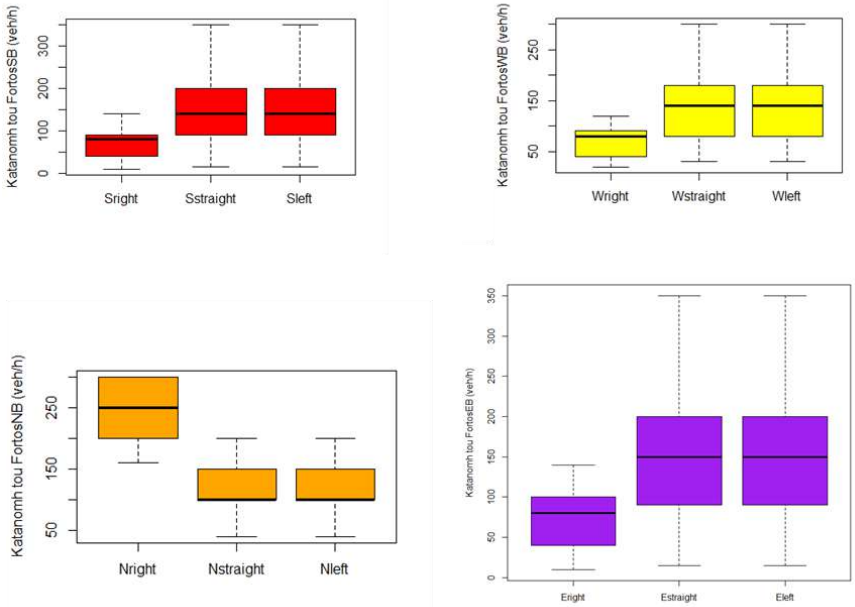
Στην ίδια εικόνα στο boxplot του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Νότιο κλάδο (FortosNB) υπάρχει απλώς μία γραμμή στην τιμή 500 ΜΕΑ/h και δύο κουκίδες στις τιμές 400 και 450 ΜΕΑ/h αντίστοιχα. Αυτό συνέβη, διότι όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4., στο ~96% των σεναρίων λήφθηκε ο φόρτος αυτός ίσος με 500 ΜΕΑ/h πέρα από τα σενάρια των δύο περιπτώσεων στις συνθήκες ισορροπημένης ροής, που λήφθηκε ίσος με 400 και 450 ΜΕΑ/h αντίστοιχα (Πίνακας 4-1).

```
#####################
FortosSB <- Data$FortosSB
FortosWB <- Data$FortosWB
FortosNB <- Data$FortosNB
FortosEB <- Data$FortosEB
Fortoi <- cbind(FortosSB, FortosWB, FortosNB, FortosEB)
boxplot_Fortoi <- boxplot(Fortoi, ylab="Fortoi (veh/h)", col="lightblue")
boxplot_Fortoi
```



Εικόνα 5-4: Boxplots των Συνολικών Εισερχόμενων Φόρτων στον «Τυπικό» Κυκλικό Κόμβο από τον κάθε Κλάδο και ο Κώδικας για τη Δημιουργία τους στο R-Studio

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα boxplots των φόρτων της δεξιόστροφης, ευθείας και αριστερόστροφης κίνησης στους οποίους επιμερίστηκε ο συνολικός εισερχόμενος στον κυκλικό κόμβο φόρτος από τον κάθε κλάδο. Τα boxplots αυτά φαίνονται στην Εικόνα 5-5. Ωστόσο, αποφασίστηκε να μην πραγματοποιηθούν boxplots και για τα αντίστοιχα ποσοστά κατανομής, καθώς θα ήταν τα ίδια με τα παρακάτω απλά σε μορφή ποσοστών.



Εικόνα 5-5: Boxplots της Επιμέρους Δεξιόστροφης, Ευθείας και Αριστερόστροφης Ροής του Συνολικού Εισερχόμενου Φόρτου από τον κάθε Κλάδο

Όπως φαίνεται από το κάτω αριστερά γράφημα στην Εικόνα 5-5 το Q3 του boxplot της επιμέρους δεξιόστροφης ροής του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Νότιο κλάδο (Nright) συμπίπτει με τη μέγιστη τιμή της (Maximum). Επίσης, είναι εύκολα αντιληπτό, ότι τα boxplots όλων των επιμέρους ευθείων και αριστερόστροφων ροών του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον κάθε κλάδο είναι ακριβώς τα ίδια.

5.2.4. Γραμμική Παλινδρόμηση

Όπως έχει αναφερθεί στα υποκεφάλαια 3.4. και 5.1., λόγω του ότι η εξαρτημένη μεταβλητή Ddkombou είναι συνεχής, εφαρμόστηκε αρχικά γραμμική παλινδρόμηση. Βάσει της λειτουργικής ανάλυσης των σεναρίων (υποκεφάλαιο 4.6.) γίνεται αντιληπτό ότι η εξαρτημένη μεταβλητή Ddkombou προέκυψε από έναν συνδυασμό πολλών ανεξάρτητων μεταβλητών, οι οποίες περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων Data. Συνεπώς, κρίθηκε σκόπιμο να υλοποιηθεί πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση.

Γενικά, η γραμμική παλινδρόμηση στο περιβάλλον R-Studio γίνεται μέσω της εντολής regsubsets, η οποία για να χρησιμοποιηθεί, χρειάστηκε πρώτα να εγκατασταθεί και να ανακαλεστεί από τη βιβλιοθήκη του R-Studio το πακέτο leaps. Πρακτικά, η εντολή αυτή δίνει τη γραμμικότητα της εξαρτημένης με οποιοδήποτε συνδυασμό ανεξάρτητων μεταβλητών.

Επιπλέον, μέσω της εντολής regsubsets μπορεί να υπολογιστεί και η τιμή του συντελεστή Adjusted R^2 της γραμμική παλινδρόμησης αλλά με δύο μόνο δεκαδικά ψηφία. Η τιμή αυτή απεικονίζεται γραφικά μέσω της εντολής plot. Ωστόσο, το Adjusted R^2 για έναν συνδυασμό μεταβλητών, που προκύπτει στη γραμμική παλινδρόμηση, δεν είναι απαραίτητο ότι θα είναι ακριβώς το ίδιο, όταν θα εκτελεστεί και σαν γραμμικό μοντέλο, γεγονός το οποίο οφείλεται στον αλγόριθμο του R-Studio. Για αυτό είναι απαραίτητο οι συνδυασμοί, που θα προκύψουν από το regsubsets, να ελεγχθούν στατιστικά και ως γραμμικά μοντέλα, διότι η συγκεκριμένη εντολή απλά προσφέρει μία πρώτη εικόνα εκτίμησης των πιθανών καλύτερων συνδυασμών με τις υψηλότερες τιμές Adjusted R^2.

Επειδή, στην προκειμένη περίπτωση η βάση δεδομένων Data περιέχει μεγάλο όγκο μεταβλητών και οι πρώτες δοκιμές αναγκαστικά θα ξεκινούσαν με πολλές από αυτές, ορίστηκε το “nvmax=30” εντός της εντολής, έτσι ώστε να αυξηθεί ο αριθμός των μεταβλητών, που μπορεί να εκτελέσει. Ακόμα, αποφασίστηκε να μην χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό οι δώδεκα ανεξάρτητες μεταβλητές των ποσοστών κατανομής στις τρεις επιμέρους κινήσεις των συνολικών εισερχόμενων φόρτων από τον κάθε κλάδο, καθώς θεωρήθηκε ότι αρκούν οι αντίστοιχοι επιμέρους φόρτοι, που προκύπτουν από αυτά τα ποσοστά. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή οι 16 από τις 28 ανεξάρτητες μεταβλητές.

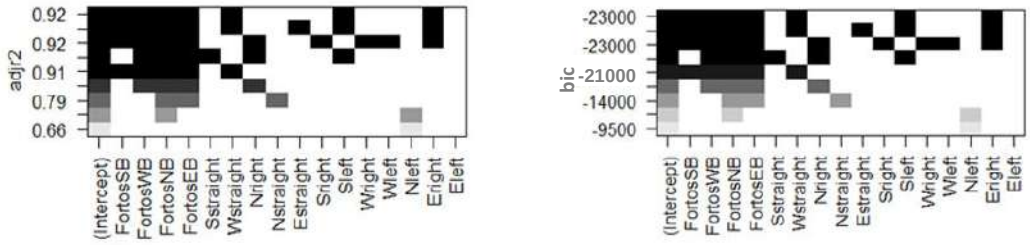
Ένας άλλος λόγος, που δεν λήφθηκαν αρκετά υπόψιν τα ποσοστά αυτά, ήταν λόγω του ότι οι συντελεστές συσχέτισης Pearson αυτών των μεταβλητών με τις υπόλοιπες 16 ανεξάρτητες είτε ήταν πολύ κοντά στο μηδέν είτε δεν εμφάνιζαν κάποιον συντελεστή συσχέτισης (NA).

Οι γραμμικές παλινδρομήσεις, που εκτελέστηκαν από την εντολή regsubsets, ονομάστηκαν reg. Αρχικά, στο πρώτο reg, στο οποίο δόθηκε το όνομα reg0, τοποθετήθηκαν και οι 16 ανεξάρτητες μεταβλητές της βάσης δεδομένων Data. Στην Εικόνα 5-6 φαίνεται ο κώδικας για τη δημιουργία του στο R-Studio.

```
##MULTIPLE LINEAR REGRESSION
#reg0 with 16 out of 28 independent variables (without the 12 percentages)
reg0 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sstraight + Sleft +
                   Wright + Wstraight + Wleft + Nright + Nstraight + Nleft + Eright + Estraight +
                   Eleft, data= Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg0,scale = "adjr2")
plot(reg0,scale="bic")
```

Εικόνα 5-6: Κώδικας για την Εκτέλεση της πρώτης Γραμμικής Παλινδρόμησης (reg0) στο R-Studio

Με την εντολή plot δημιουργήθηκαν τα γραφήματα του συντελεστή Adjusted R^2 και του BIC του reg0, που φαίνονται στο Γράφημα 5-1 και τα οποία εμφανίστηκαν στην καρτέλα Plots στο περιβάλλον του R-Studio (κάτω μέρος δεξιά στην Εικόνα 3-1).



Adjusted R^2 *BIC*

Γράφημα 5-1: Τιμές του Adjusted R^2 και του BIC της πρώτης Γραμμικής Παλινδρόμησης (reg0)

Στο Γράφημα 5-1 αριστερά απεικονίζονται οι τιμές του Adjusted R^2 με δύο δεκαδικά ψηφία διαφόρων συνδυασμών των 16 ανεξάρτητων μεταβλητών του reg0 και στα δεξιά απεικονίζονται οι τιμές BIC των ίδιων συνδυασμών. Γενικά, είναι επιθυμητοί οι συνδυασμοί με όσο το δυνατόν λιγότερες ανεξάρτητες μεταβλητές, με υψηλή τιμή Adjusted R^2 και χαμηλή τιμή BIC, βάσει των όσων αναφέρθηκαν στα υποκεφάλαια 3.5.1. και 3.5.2. Από την πρώτη κιόλας γραμμική παλινδρόμηση προέκυψαν ικανοποιητικά υψηλές τιμές Adjusted R^2, με τη μέγιστη να είναι ίση με 0,92 και εξίσου ικανοποιητικά χαμηλές τιμές BIC, εκ των οποίων όλες ήταν αρνητικές.

Στο γράφημα του Adjusted R^2 του reg0 όπως και σε οποιουδήποτε reg απεικονίζονται συνδυασμοί με μαύρο χρώμα στο πάνω τμήμα του, με σκούρο γκρι στο μεσαίο και με ανοιχτό γκρι έως άσπρο προς τα κάτω. Προσοχή κυρίως δόθηκε στους μαύρους έως σκούρο γκρι συνδυασμούς, καθώς φέρουν τις πιο υψηλές τιμές Adjusted R^2 και ταυτόχρονα περιλαμβάνουν τις πιο στατιστικά σημαντικές ανεξάρτητες μεταβλητές.

Πιο συγκεκριμένα, στο γράφημα του reg0 (αριστερά στο Γράφημα 5-1) φαίνονται συνολικά πέντε μαύροι συνδυασμοί, όπου οι τέσσερις πρώτοι έχουν το ίδιο Adjusted R^2 ίσο με 0,92, πέραν του πέμπτου ο οποίος φέρει τιμή ίση με 0,91. Ο πρώτος μαύρος συνδυασμός ξεκινά με εννιά ανεξάρτητες μεταβλητές και προς τα κάτω κάθε φορά ο ακριβώς επόμενος περιέχει κατά μία λιγότερη. Κάτω από τον πέμπτο μαύρο συνδυασμό ακολουθεί ένας με σκούρο γκρι χρώμα και με Adjusted R^2 ίσο με 0,85, ο οποίος περιλαμβάνει τέσσερις ανεξάρτητες μεταβλητές.

Αφού εντοπίστηκαν και καταγράφηκαν οι συνδυασμοί με μαύρο έως σκούρο γκρι χρώμα, δοκιμάστηκε στο επόμενό reg, το οποίο ήταν το reg1, καθώς και σε καθένα από τα επόμενα να μην συμπεριλαμβάνονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές, οι οποίες είτε δεν υπήρχαν σε κανέναν συνδυασμό με μαύρο χρώμα ή εμφανίζονταν μόνο σε συνδυασμό με σκούρο γκρι χρώμα. Εάν δεν υπήρχε καμία τέτοια ανεξάρτητη μεταβλητή, τότε αφαιρούνταν εκείνες, που

υπήρχαν σε έναν μόνο μαύρο συνδυασμό. Έτσι, με αυτού του είδους τις δοκιμές αφαιρέθηκαν οι ανεξάρτητες μεταβλητές, οι οποίες επηρέαζαν λιγότερο το μοντέλο.

Ωστόσο, οι μεταβλητές, που δεν συμπεριλήφθηκαν στο reg1, οι οποίες ήταν οι Sstraight, Wright, Wleft, Nleft και Eleft, δεν είναι οι ίδιες, με αυτές που θα έπρεπε να μην συμπεριληφθούν βάσει του παραπάνω γραφήματος (αριστερά στο Γράφημα 5-1). Αυτό οφείλεται, καθώς κάθε φορά που εκτελείται εκ νέου ο κώδικας στο R-Studio, παράγει στα ίδια reg διαφορετικά γραφήματα Adjusted R^2 και BIC.

Με βάση τη παραπάνω λογική υλοποιήθηκαν συνολικά 109 reg. Αυτά φαίνονται αναλυτικά στο παράρτημα Δ [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ], όπου παρατίθεται ο κώδικας της παρούσας Διπλωματικής και στον οποίο περιγράφεται ποιες ακριβώς ανεξάρτητες μεταβλητές αφαιρέθηκαν για να προκύψει το κάθε reg. Ο λόγος, για τον οποίον πραγματοποιήθηκαν τόσες παλινδρομήσεις, ήταν για να μειωθούν τα σφάλματα της τυχαιότητας των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου του R-Studio κατά την εκτέλεση της εντολής regsubests και για να προκύψουν όσο το δυνατόν περισσότεροι συνδυασμοί με υψηλές τιμές Adjusted R^2 για ένα στατιστικά ορθότερο τελικό αποτέλεσμα.

Από αυτά τα 109 reg παρατηρήθηκε ότι υπήρξαν πολλοί κοινοί συνδυασμοί, που είχαν τις ίδιες ανεξάρτητες μεταβλητές και την ίδια τιμή Adjusted R^2, η οποία ήταν η υψηλότερη για την κάθε κατηγορία συνδυασμού βάσει του αριθμού των ανεξάρτητων μεταβλητών, που περιείχε. Βασικός στόχος ήταν από τα 109 reg να επιλεχθούν οι συνδυασμοί, που να φέρουν την υψηλότερη τιμή Adjusted R^2 και ταυτόχρονα όσο το δυνατόν λιγότερες μεταβλητές.

Από τους συνδυασμούς αυτούς προτιμήθηκε να συγκρατηθούν οι συνδυασμοί με πέντε ανεξάρτητες μεταβλητές, διότι περιείχαν τις λιγότερες από εκείνους, που εμφανίζονταν πάντα με μαύρο χρώμα. Συνεπώς, οι συνδυασμοί αυτοί έφεραν πάντα στατιστικά σημαντικές ανεξάρτητες μεταβλητές και ταυτόχρονα από τις υψηλές τιμές Adjusted R^2 του κάθε γραφήματος, οι οποίες ήταν ίσες με 0,91.

5.2.5. Ανάπτυξη Γραμμικών Μοντέλων

Για την ανάπτυξη γραμμικών μοντέλων στο περιβάλλον R-Studio χρησιμοποιήθηκε η εντολή lm. Η εντολή αυτή πρακτικά είναι η συνάρτηση, που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των συντελεστών ενός γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Για να λειτουργήσει η εν λόγω εντολή έπρεπε πρώτα να εγκατασταθεί και να ανακαλεστεί από τη βιβλιοθήκη του R-Studio το πακέτο lmtest.

Αρχικά, εκτελέστηκε η εντολή lm για τους έντεκα συνδυασμούς με τις πέντε ανεξάρτητες μεταβλητές και με Adjusted R^2 ίσο με 0,91, που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 5.2.4. Τα γραμμικά μοντέλα των έντεκα αυτών συνδυασμών ονομάστηκαν Reg.

Προκειμένου να προκύψει ένα στατιστικά ορθότερο γραμμικό μοντέλο, αποφασίστηκε η βάση δεδομένων Data να χωριστεί σε δύο σύνολα, το σύνολο εκπαίδευσης (training set) και το σύνολο ελέγχου (test set). Αυτό πραγματοποιείται, όταν το R-Studio καλείται να διαχειριστεί μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούν μεγάλο όγκο δεδομένων, οπότε μέσω των παρατηρήσεων του training set εκπαιδεύεται το μοντέλο και μέσω του test set αξιολογείται το τελικό πρότυπο ως προς την προβλεπτική του ικανότητα. Γενικά, αν και στη συγκεκριμένη εργασία η βάση δεδομένων περιέχει 8.883 σενάρια, δεν κρίνεται τυπικά απαραίτητο να πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός αυτός, ωστόσο υλοποιήθηκε, για να προκύψει πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα κατά την εκτέλεση των γραμμικών μοντέλων.

Η παρούσα βάση δεδομένων Data χωρίστηκε βάσει παραδοχής **σε 60% training** και **σε 40% test set** ως προς τις σειρές της. Στο περιβάλλον R-Studio ο χωρισμός αυτός έγινε μέσω της εντολής floor. Έτσι προέκυψαν οι καινούργιες Data.train και Data.test βάσεις δεδομένων, όπου η καθεμία περιείχε ίδιο αριθμό στηλών με αυτόν της αρχικής βάσης δεδομένων Data, δηλαδή 29 στήλες. Η διαφορά ήταν στις σειρές τους, καθώς το Data.train περιείχε 5.329 σειρές και το Data.test 3.554, το άθροισμα των οποίων έδινε τον αριθμό σειρών του Data, δηλαδή τις 8.883 σειρές του.

Στη συνέχεια, τα δύο καινούργια αυτά σύνολα χρειάστηκε να υποβληθούν σε δύο ελέγχους, προκειμένου να εξεταστεί εάν έχουν ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά πρώτης και δεύτερης τάξης. Ο πρώτος έλεγχος έγινε μέσω της εντολής t.test και είχε σαν βασικό σκοπό να εξετάσει αν έχουν ίσους μέσους όρους. Προέκυψε ότι ο μέσος όρος του Data.train ήταν ίσος με 3,870 και του Data.test ίσος με 3,912, συνεπώς ήταν με πολύ μικρή απόκλιση ίδιοι. Ο δεύτερος έλεγχος, ο οποίος εξέταζε εάν η αναλογία των διακυμάνσεών τους (ratio of variances) είναι κοντά στη μονάδα, πραγματοποιήθηκε μέσω της εντολής var.test και προέκυψε μία ικανοποιητική αναλογία της τάξεως του 0,976. Ο κώδικας, που συντάχθηκε στο R-Studio, για να προκύψουν και να ελεγχθούν τα δύο καινούργια datasets, φαίνεται αναλυτικά στην Εικόνα 5-7.

```
#Creates Training Sets and Test Sets
bound <- floor((nrow(Data)/10)*6) #defines % of training and test set
Data <- Data[sample(nrow(Data)), ]
Data.train <- Data[1:bound, ] #defines training set
Data.test <- Data[(bound+1):nrow(Data), ] #defines test set
t.test(Data.train$Ddkombou,Data.test$Ddkombou) #determines if the means of the two sets are equal
var.test(Data.train$Ddkombou,Data.test$Ddkombou) #determines if the ratio of variances of the populations is equal to 1
```

Εικόνα 5-7: Κώδικας για τη Δημιουργία των Training και Test sets στο R-Studio

Συνεπώς, στη φάση των γραμμικών μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν ως βάσεις δεδομένων τα Data.train και Data.test. Στην Εικόνα 5-8 φαίνεται ενδεικτικά ο κώδικας, που συντάχθηκε για το γραμμικό μοντέλο του πρώτου συνδυασμού, δηλαδή του Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft, το οποίο ονομάστηκε Reg1.

```
##LINEAR MODELS
#Reg1
Reg1 <-lm(Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft, data=Data.train)
summary(Reg1)
##############################################################
Reg1_pre <- predict(Reg1, Data.test)
absresiduals1 <- abs(Reg1_pre - Data.test$Ddkombou)
Pe1 <- absresiduals1/Data.test$Ddkombou
MAPE1 <- mean(Pe1)
MAPE1
#create vector of VIF values
vif(Reg1)
vif_values1 <- vif(Reg1)
sqrt(vif(Reg1))
```

Εικόνα 5-8: Κώδικας για την Ανάπτυξη του πρώτου Γραμμικού Μοντέλου (Reg1) στο R-Studio

Στην πρώτη γραμμή του κώδικα στην Εικόνα 5-8 εκτελέστηκε το γραμμικό μοντέλο με την εντολή lm, στην οποία χρησιμοποιήθηκε ως βάση δεδομένων το Data.train. Στη δεύτερη γραμμή χρησιμοποιήθηκε η εντολή summary, από όπου προέκυψαν διάφορα στατιστικά χαρακτηριστικά του γραμμικού μοντέλου Reg1, τα οποία εμφανίστηκαν στην καρτέλα Console του R-Studio (κάτω μέρος αριστερά στην Εικόνα 3-1) και φαίνονται στην Εικόνα 5-9.

```
> Reg1 <-lm(Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft, data=Data.train)
> summary(Reg1)

Call:
lm(formula = Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright +
    Sleft, data = Data.train)

Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.18729 -0.31389  0.00677  0.29183  1.22078

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -1.011e+01  1.901e-01  -53.19   <2e-16 ***
FortosWB    -3.470e-03  5.466e-05  -63.48   <2e-16 ***
FortosNB     2.340e-02  3.776e-04   61.97   <2e-16 ***
FortosEB     8.619e-03  4.297e-05  200.57   <2e-16 ***
Sright      -2.553e-02  4.358e-04  -58.58   <2e-16 ***
Sleft        1.562e-02  1.893e-04   82.50   <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.4385 on 5323 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9104,    Adjusted R-squared:  0.9103
F-statistic: 1.081e+04 on 5 and 5323 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Εικόνα 5-9: Στατιστικά Χαρακτηριστικά του πρώτου Γραμμικού Μοντέλου (Reg1)

Πιο συγκεκριμένα, τα στατιστικά χαρακτηριστικά του Reg1 ήταν τα υπόλοιπα (Residuals) (Min, 1Q, Median, 3Q, Max), οι συντελεστές (Coefficients), οι οποίοι εμφανίστηκαν σε μορφή πίνακα και τα Residual standard error, Adjusted R-squared (Adjusted R^2) και F-statistic. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 5-9, ο συντελεστής R^2 (Multiple R-squared) του Reg1 εμφανίζει παρόμοια τιμή με το Adjusted R^2 και όπως έχει εξηγηθεί στο υποκεφάλαιο 3.5.1., αυτό οφείλεται στο ότι το μοντέλο δεν περιέχει μεγάλο αριθμό μεταβλητών. Αυτό συνέβη και στα υπόλοιπα μοντέλα.

Στον πίνακα των Coefficients στην πρώτη στήλη εμφανίζεται ο σταθερός όρος (Intercept) και οι ανεξάρτητες μεταβλητές του μοντέλου, στη δεύτερη στήλη οι συντελεστές τους (Estimate), στην τρίτη τα Std. Error τους, στην τέταρτη τα t-values τους, στην πέμπτη οι τιμές p-value και στην έκτη τα αστέρια. Ακριβώς κάτω από αυτό τον πίνακα υπάρχει μία επεξηγηματική γραμμή (Signif. codes), στην οποία ορίζεται με τι ισούται ο κάθε αριθμός των αστεριών αυτών.

Στα p-values στην Εικόνα 5-9 το <2e-16 είναι ένας τρόπος ένδειξης στη γλώσσα προγραμματισμού R-Studio ότι η τιμή αυτή είναι πολύ κοντά στο μηδέν και στην πραγματικότητα είναι ακόμα μικρότερη από το $2e^{-16}$.

Στις επόμενες πέντε γραμμές του κώδικα για το Reg1 (Εικόνα 5-8) ελέγχθηκε η προβλεπτική ικανότητα του μοντέλου με την εντολή predict και με τη βοήθεια της βάσης δεδομένων Data.test. Ταυτόχρονα, υπολογίστηκε το σφάλμα του μοντέλου (MAPE), όπου το συγκεκριμένο ονομάστηκε MAPE1.

Το σφάλμα προέκυψε αρχικά μέσω της εντολής abs, η οποία υπολόγισε τις απόλυτες τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής Ddkombou της βάσης δεδομένων Data.test (absresiduals1). Ύστερα αυτές οι τιμές διαιρέθηκαν με τις αρχικές τιμές Ddkombou της ίδιας βάσης δεδομένων (Data.test) και το πηλίκο αυτό ονομάστηκε Pe1. Οι μέσοι όροι των τιμών του Pe1 αποτέλεσαν το σφάλμα, το οποίο υπολογίστηκε με τη βοήθεια της εντολής mean.

Στις τελευταίες τρεις σειρές του κώδικα (Εικόνα 5-8) βρέθηκαν οι τιμές VIF των ανεξάρτητων μεταβλητών του Reg1 με την εντολή vif, καθώς και οι τετραγωνικές τους ρίζες με την εντολή sqrt(vif).

Όλη αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε και για τους υπόλοιπους δέκα συνδυασμούς, που βρέθηκαν από τις γραμμικές παλινδρομήσεις (υποκεφάλαιο 5.2.4.). Έτσι, προέκυψαν συνολικά έντεκα γραμμικά μοντέλα Reg.

5.3. Στατιστικός Έλεγχος Μοντέλων

Όλες οι πληροφορίες, που προέκυψαν για καθένα από τα έντεκα γραμμικά μοντέλα Reg του υποκεφαλαίου 5.2.5., έπρεπε να ελεγχθούν ως προς τα κριτήρια του υποκεφαλαίων 3.5.1. έως 3.5.7., για να κριθεί εάν τα μοντέλα αυτά είναι αποδεκτά και στατιστικά επαρκή.

Το πρώτο κριτήριο αποδοχής ήταν η τιμή Adjusted R^2, που προέκυψε σε καθένα από τα μοντέλα στο υποκεφάλαιο 5.2.5. Ο συντελεστής αυτός, όπως έχει αναφερθεί, λαμβάνει τιμές από το εύρος [0,1] και όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι, τόσο πιο στατιστικά αξιόπιστο θεωρείται το μοντέλο. Γενικά, δεν εμφάνισαν και τα έντεκα γραμμικά μοντέλα το ίδιο Adjusted R^2 με εκείνο στη φάση της γραμμικής παλινδρόμησης, δηλαδή 0,91. Συνεπώς, ο συντελεστής αυτός υπήρξε σημαντικό κριτήριο σύγκρισης μεταξύ των μοντέλων.

Στη συνέχεια, τα μοντέλα, που γίνονταν αποδεκτά λόγω του Adjusted R^2, έπρεπε να ελεγχθούν στις τιμές t-value και p-value τους, οι οποίες αποτελούν βασικές προϋποθέσεις αποδοχής των ανεξάρτητων μεταβλητών τους.

Οι βαθμοί ελευθερίας σε κάθε μοντέλο ήταν ίσοι με DF=5.329-5-1 → DF=5.323, όπου 5.329 οι σειρές/παρατηρήσεις (observations) της βάσης δεδομένων Data.train και 5 οι ανεξάρτητες μεταβλητές σε κάθε Reg. Για αυτόν τον λόγο στο υποκεφάλαιο 3.5.3. λήφθηκε στον στατιστικό πίνακα κατανομής Student (Πίνακας 3-3) το ν ίσο με ∞. Συνεπώς, σε κάθε μοντέλο έπρεπε η απόλυτη τιμή t-value όλων των ανεξάρτητων μεταβλητών της και του σταθερού της όρου να είναι μεγαλύτερη από 1,646 (|t|>1,646).

Η τιμή p-value κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής και του σταθερού όρου στο μοντέλο έπρεπε να είναι μικρότερη του 0,05 (p-value<0,05). Αυτό ερμηνευόταν και οπτικά με τη βοήθεια των αστεριών (Εικόνα 3-3 & Εικόνα 5-9), όπου όσο περισσότερα ήταν δίπλα από την κάθε τιμή p-value, τόσο πιο στατιστικά σημαντική θεωρούταν η ανεξάρτητη μεταβλητή για το μοντέλο.

Ύστερα, οι τιμές του συντελεστή VIF κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής έπρεπε να είναι μικρότερες ή ίσες του πέντε (VIF≤5) και ιδανικά εντός του εύρους 1≤VIF<2, για να θεωρηθεί μη προβληματική η συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών σε ένα μοντέλο. Αντίστοιχα, οι τιμές sqrt(VIF) έπρεπε να είναι μικρότερες ή ίσες του $\sqrt{5}$ [sqrt(VIF)≤$\sqrt{5}$=2,24] και ιδανικά εντός του εύρους 1≤sqrt(VIF)<$\sqrt{2}$=1,41. Όλα αυτά έχουν αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 3.5.5.

Επιπλέον, για να συγκριθούν τα μοντέλα μεταξύ τους, ελέγχονταν τα F-Statistic και τα Std.Error τους. Πιο συγκεκριμένα, όσο το F-statistic και το Std. Error του μοντέλου ήταν υψηλό και πιο κοντά στο μηδέν αντίστοιχα, τόσο πιο αξιόπιστο θεωρούταν και τόσο καλύτερη ότι ήταν η προσαρμογή του (υποκεφάλαιο 3.5.6.).

Ένας τελευταίος έλεγχος για το κάθε μοντέλο ήταν εκείνος του σφάλματός του (MAPE), κατά τον οποίον έπρεπε να είναι μικρότερο από 30% (MAPE<30%) (υποκεφάλαιο 3.5.7.).

5.4. Τελικό Μοντέλο

Αφού ελέγχθηκαν στατιστικά και τα έντεκα γραμμικά μοντέλα βάσει των κριτηρίων του υποκεφαλαίου 5.3., βρέθηκε ότι το στατιστικά καλύτερο μοντέλο ήταν το Reg7, δηλαδή ο συνδυασμός Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Nright, του οποίου όλα τα στατιστικά χαρακτηριστικά φαίνονται συγκεντρωτικά στην Εικόνα 5-10.

Reg7

Call:
lm(formula = Ddkombou ~ FortosSB + ForotsWB + FortosNB + FortosEB + Nright, data = Data.train)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1,2235	-0,5584	-0,0388	0,3637	1,8476

Coefficients:

	Estimate	Std.Error	t value	Pr(>|t|)		VIF	sqrt(VIF)
(Intercept)	-9,994E+00	2,766E-01	-36,13	<2e-16	***		
FortosSB	9,929E-04	6,682E-05	14,86	<2e-16	***	1,426	1,194
FortosWB	-3,368E-03	7,954E-05	-42,34	<2e-16	***	1,760	1,327
FortosNB	2,098E-02	5,599E-04	37,47	<2e-16	***	1,047	1,023
FortosEB	8,638E-03	6,254E-05	138,12	<2e-16	***	1,367	1,169
Nright	4,265E-03	2,122E-04	20,1	<2e-16	***	1,039	1,019

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 ',' 0.1 ' ' 1

Συντελεστές Συσχέτισης Pearson

	FortosSB	FortosWB	FortosNB	FortosEB	Nright
FortosSB	1	0,55	-0,08	0,32	-0,02
FortosWB	0,55	1	-0,09	0,52	-0,02
FortosNB	-0,08	-0,09	1	-0,06	0,19
FortosEB	0,32	0,52	-0,06	1	-0,01
Nright	-0,02	-0,02	0,19	-0,01	1

Residual standard error:	0,6381 on 5323 degreed of freedom
Multiple R-squared:	0,8102
Adjusted R-quared:	0,81
F-statistic:	4544 on 5 and 5323 DF
p-value:	<2,2e-16
MAPE:	0,1365

Εικόνα 5-10: Στατιστικά Χαρακτηριστικά του καλύτερου Γραμμικού Μοντέλου (Reg7)

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα Coefficients στην Εικόνα 5-10 του μοντέλου, πληρούνται όλα τα στατιστικά κριτήρια ως προς τις τιμές t-value και p-value όλων τω ανεξάρτητων μεταβλητών και του σταθερού όρου, ενώ ταυτόχρονα σε όλες τις ανεξάρτητες μεταβλητές εμφανίστηκε ο μέγιστος αριθμός αστεριών (***). Από αυτό γίνεται αντιληπτό ότι όλες τους είναι στατιστικά σημαντικές. Η τελική μορφή του μοντέλου φαίνεται παρακάτω:

$$Ddkombou\ (sec/o\chi) = -9{,}994 + 0{,}001 \cdot FortosSB - 0{,}003 \cdot FortosWB + 0{,}021 \cdot FortosNB + 0{,}009 \cdot FortosEB + 0{,}004 \cdot Nright$$

Παρατηρώντας τις τιμές VIF και sqrt(VIF) των ανεξάρτητων μεταβλητών του μοντέλου Reg7, συμπεραίνεται ότι ανήκουν εντός των ιδανικών ορίων $1 \leq VIF < 2$ και $1 \leq sqrt(VIF) < \sqrt{2} = 1{,}41$ αντίστοιχα, γεγονός το οποίο δεν ήταν πολύ συχνό στα υπόλοιπα μοντέλα πέραν του Reg3 [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ], το οποίο όμως απορρίφθηκε λόγω του ότι το Reg7 είχε καλύτερα στατιστικά χαρακτηριστικά.

Ένας λόγος, για τον οποίο τα VIF και sqrt(VIF) εμφάνισαν τιμές εντός των ιδανικών τους ορίων, οφείλεται στο ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του μοντέλου παρουσιάζουν ικανοποιητικούς συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ τους, οι οποίοι παρατέθηκαν σε πίνακα στην Εικόνα 5-10. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τη χρωματική τους εμφάνιση, όπου η επεξήγηση των συγκεκριμένων χρωμάτων πραγματοποιήθηκε στον παράρτημα Γ [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ].

Επιπλέον, το μοντέλο ικανοποιεί και τον έλεγχο σφάλματος MAPE, καθώς εμφάνισε σφάλμα ίσο με 0,1365, δηλαδή μικρότερο του 30%.

Συγκριτικά με τα υπόλοιπα μοντέλα, το Reg7 ήταν το μοναδικό με τη μεγαλύτερη τιμή Adjusted R^2 από τα μοντέλα, που ικανοποιούσαν όλους τους στατιστικούς ελέγχους. Όπως

φαίνεται και από την Εικόνα 5-10 η τιμή του συντελεστή αυτού ήταν ίση με 0,81, που από μόνη της είναι πολύ ικανοποιητική. Επιπλέον, η τιμή 0,81 επιβεβαιώνει για μία ακόμα φορά ότι το Adjusted R^2, που προκύπτει από τη γραμμική παλινδρόμηση, δεν είναι απαραίτητα το ίδιο με αυτό των γραμμικών μοντέλων.

Γενική παρατήρηση: Σε περίπτωση, που είτε δεν εμφανιζόταν υψηλό Adjusted R^2 είτε δεν ικανοποιούνταν οι στατιστικοί έλεγχοι στα γραμμικά μοντέλα, υπήρχε το πλάνο να δημιουργηθούν επιπλέον συνδυασμοί καινούργιων μεταβλητών και να προστεθούν στη βάση δεδομένων Data. Ως καινούργιες μεταβλητές θα μπορούσε να ήταν οι λογάριθμοι, τα τετράγωνα και οι κύβοι των υφιστάμενων ανεξάρτητων μεταβλητών. Με τις καινούργιες αυτές μεταβλητές επαγωγικά θα εκτελούταν λογαριθμοκανονική ή κάποια άλλου είδους γραμμική παλινδρόμηση και θα δημιουργούνταν λογαριθμικά ή άλλα είδη μοντέλων. Ωστόσο, δεν χρειάστηκε να συμβεί τίποτα από όλα αυτά, διότι προέκυψαν υψηλές τιμές Adjusted R^2 σε όλες τις φάσεις της στατιστικής ανάλυσης, γεγονός αναμενόμενο καθώς η βάση δεδομένων Data ήταν μαθηματικοποιημένη και δεν είχε προέλθει από πραγματικές μετρήσεις.

5.5. Λειτουργική Αξιολόγηση του Τελικού Μοντέλου

Λόγω του ότι στην παρούσα περίπτωση το R-Studio στηρίζει τους στατιστικούς του ελέγχους σε μία πλήρως μαθηματικοποιημένη βάση δεδομένων Data, είναι εύκολο να προκύψει στατιστικά ορθό ένα γραμμικό μοντέλο, το οποίο όμως να αντιπροσωπεύει μία σχέση της εξαρτημένης μεταβλητής Ddkombou με έναν συνδυασμό ανεξάρτητων μεταβλητών, που να μην υπακούει σε κάποια λειτουργική λογική.

Συνεπώς, το τελικό γραμμικό μοντέλο Reg7 πέραν από τους στατιστικούς ελέγχους έπρεπε να ελεγχθεί και ως προς τις ανεξάρτητες μεταβλητές του, οι οποίες να φέρουν κάποια λειτουργική εξήγηση, δηλαδή να εμφανίζουν κάποια στοιχειώδη σχέση με την εξαρτημένη μεταβλητή Ddkombou, να μην εκφράζουν την ίδια πληροφορία στο ίδιο μοντέλο και ταυτόχρονα τόσο τα πρόσημα των συντελεστών τους όσο και οι ίδιοι συντελεστές τους να μπορούν να εξηγηθούν λογικά βάσει του υποκεφαλαίου 3.5.8.

Παρατηρώντας το μοντέλο Reg7, κρίθηκε ότι είναι λειτουργικά το βέλτιστο συγκριτικά με τα υπόλοιπα μοντέλα, καθώς περιέχει τις πιο ουσιαστικές για το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής ανεξάρτητες μεταβλητές. Αρχικά, περιλαμβάνει μία από τις «κρίσιμες» κινήσεις για την τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας στον Νότιο κλάδο ενός «τυπικού» κυκλικού κόμβου, δηλαδή τον φόρτο της εισερχόμενης ροής από τον Νότιο κλάδο, που κινείται δεξιόστροφα προς τον Ανατολικό (Nright) (υποκεφάλαιο 4.2.2.). Επιπλέον, περιλαμβάνει όλους τους συνολικούς εισερχόμενους φόρτους από τον κάθε κλάδο, από τους οποίους πρακτικά μπορούν να προκύψουν όλα τα επιμέρους μεγέθη, που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του Ddkombou, ο οποίος έχει αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 4.6.

Ακόμα, οι ανεξάρτητες μεταβλητές στο μοντέλο εκφράζουν από μία διαφορετική πληροφορία η καθεμία, γεγονός το οποίο πληροί το δεύτερο κριτήριο της λειτουργικής τους αξιολόγησης.

Η εξήγηση τόσο των προσήμων των συντελεστών όσο και των ίδιων των συντελεστών των ανεξάρτητων μεταβλητών θα πραγματοποιηθεί αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 6.2.

Σύνοψη αποτελεσμάτων για το τελικό μοντέλο: Το γραμμικό μοντέλο Reg7 είναι τυπικά το καλύτερο μοντέλο τόσο από στατιστικής όσο και από λειτουργικής σκοπιάς. Μέσα από το μοντέλο αυτό μπορεί ο οποιοσδήποτε να διερευνήσει, εάν η τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο σε έναν τετρασκελή «τυπικό» κυκλικό κόμβο είναι χρήσιμη για τη συνολική του απόδοση βάσει των τωρινών ή των μελλοντικών φόρτων, που θα είναι επιθυμητό να εξυπηρετεί.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

6.1. Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Κύριος πυρήνας της παρούσας Διπλωματικής αποτέλεσε η διερεύνηση της αναγκαιότητας χωροθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής (free-flow right-turn bypass lane) σε κλάδο τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου (single lane roundabout) βάσει των υφιστάμενων φόρτων ή των αντίστοιχων μελλοντικών, που θα είναι επιθυμητό να εξυπηρετεί. Ο κλάδος αυτός στη διάρκεια της εν λόγω μελέτης αποφασίστηκε να είναι ο Νότιος. Επειδή, οι συγκεκριμένες παρακαμπτήριες λωρίδες εφαρμόζονται κυρίως σε υπεραστικό οδικό περιβάλλον, ενώ οι «τυπικοί» κυκλικοί κόμβοι σε αστικό, η παρούσα μελέτη απευθύνεται κατά κύριο λόγο σε εισόδους οικισμών, χωρίς ωστόσο να περιορίζεται εκεί.

Αφού παρουσιάστηκε ο Στόχος της εργασίας, ακολούθησε η Βιβλιογραφική Ανασκόπηση, στην οποία πραγματοποιήθηκε μία πρώτη εμβάθυνση γενικά στους κυκλικούς κόμβους και ύστερα στο βασικό θέμα της Διπλωματικής, δηλαδή τις παρακαμπτήριες λωρίδες. Η ανάλυση αυτή στηρίχτηκε στις δύο βασικές επίσημες διεθνείς οδηγίες για τους κυκλικούς κόμβους, δηλαδή στις Γερμανικές και τις Αμερικάνικες. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν συναφείς έρευνες με την εν λόγω Διπλωματική, όπου στην καθεμία έγινε αναφορά στον κεντρικό της στόχο, στη μεθοδολογία, που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή της και στα βασικά συμπεράσματα, στα οποία κατέληξε.

Στη συνέχεια, αναλύθηκε διεξοδικά το Θεωρητικό Υπόβαθρο, στο οποίο στηρίχτηκε η εξ ολοκλήρου δημιουργία της βάσης δεδομένων της παρούσας εργασίας, καθώς και η επεξεργασία της. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν θεμελιώδεις θεωρητικές έννοιες γενικά για τη λειτουργική ανάλυση όλων των τύπων των κυκλικών κόμβων με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα βάσει των Αμερικάνικων Οδηγιών (NCHRP 2010), οι οποίες χρειάστηκαν στα σενάρια, από όπου προέκυψε η βάση δεδομένων. Επιπλέον, επεξηγήθηκαν βασικές στατιστικές έννοιες για τη στατιστική ανάλυση της βάσης δεδομένων, που πραγματοποιήθηκε μέσω της γλώσσας προγραμματισμού R-Studio.

Έπειτα, ακολούθησε η μεθοδολογία της δημιουργίας των σεναρίων και η όλη προεργασία, που απαιτήθηκε για τη δημιουργία τους. Στη μελέτη εξετάστηκαν 47 περιπτώσεις διαφορετικών συνολικών εισερχόμενων φόρτων στον «τυπικό» κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο και στην κάθε περίπτωση 189 διαφορετικά ποσοστά κατανομής των φόρτων αυτών σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση. Συνεπώς, δημιουργήθηκαν **8.883 σενάρια** (189x47), όπου στο καθένα πραγματοποιήθηκε λειτουργική ανάλυση του «τυπικού» κυκλικού με και χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο. Με αυτόν τον τρόπο, προέκυψε από το κάθε σενάριο η διαφορά της συνολικής αναμενόμενης καθυστέρησης του κυκλικού κόμβου ($\Delta d_{\text{κόμβου}}$), από την οποία εντοπίστηκε η επίδραση, που είχε κάθε φορά η τοποθέτηση της συγκεκριμένης παρακαμπτήριας λωρίδας στον Νότιο κλάδο του υπό τις διάφορες συνθήκες των 8.883 σεναρίων. Όλα αυτά υλοποιήθηκαν σε 47 υπολογιστικά φύλλα του Microsoft Excel, όσες ήταν και οι εξεταζόμενες περιπτώσεις και ένα μέρος τους φαίνεται στο παράρτημα Α [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α].

$$\Delta d_{\text{κόμβου}} = d_{\text{κόμβου,no-bypass}} - d_{\text{κόμβου,bypass}}$$

Εξίσωση 6.1-1

όπου:

$d_{\text{κόμβου,no-bypass}}$ = η συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του «τυπικού» κυκλικού κόμβου χωρίς δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο (sec/οχ)

$d_{\text{κόμβου,bypass}}$ = η συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του «τυπικού» κυκλικού κόμβου με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα στον Νότιο κλάδο (sec/οχ)

Στο ίδιο κομμάτι με τη μεθοδολογία, έγινε μία σύντομη παρουσίαση του λογισμικού TORUS, μέσω του οποίου οπτικοποιήθηκε ένα από τα σενάρια, που έφερε το μεγαλύτερο $\Delta d_{\text{κόμβου}}$, ίσο με 8,4 sec/οχ. Το σχέδιο του σεναρίου αυτού, που σχεδιάστηκε στην έκδοση TORUS 6.0, είχε σαν στόχο τη βαθύτερη κατανόηση της εξεταζόμενης διάταξης του τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου με το συγκεκριμένο τύπο παρακαμπτηρίας λωρίδας στη συγκεκριμένη χωροταξική της θέση στον κόμβο.

Μετά τη δημιουργία των σεναρίων έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης του στόχου της Διπλωματικής, δηλαδή της αναγκαιότητας χωροθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας στον Νότιο κλάδο «τυπικών» κυκλικών κόμβων. Πριν τη μοντελοποίηση ήταν απαραίτητο να οριστεί η βάση δεδομένων της εργασίας, η οποία προέκυψε από τα βασικότερα μεγέθη του κάθε σεναρίου, δηλαδή την τιμή $\Delta d_{\text{κόμβου}}$ του, τους τέσσερις συνολικούς εισερχόμενους φόρτους από τον κάθε κλάδο, τα δώδεκα ποσοστά κατανομής των φόρτων αυτών σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση και τους δώδεκα επιμέρους φόρτους, που προήλθαν από τα ποσοστά. Ένα μέρος της βάσης δεδομένων φαίνεται στο παράρτημα Β [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β].

Ύστερα, ακολούθησε η στατιστική επεξεργασία της βάσης δεδομένων στο περιβάλλον του R-Studio [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ], κύριος σκοπός της οποίας ήταν η εύρεση του στατιστικά καλύτερου γραμμικού μοντέλου με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης. Η τελική μορφή του στατιστικά και λειτουργικά βέλτιστου μοντέλου, που προέκυψε, παρατίθεται παρακάτω (Εξίσωση 6.1-2) και στον πίνακα φαίνονται κάποια από τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά του (Πίνακας 6-1).

$$\text{Ddkombou (sec/οχ)} = -9{,}994 + 0{,}001\cdot\text{FortosSB} - 0{,}003\cdot\text{FortosWB} + 0{,}021\cdot\text{FortosNB} + 0{,}009\cdot\text{FortosEB} + 0{,}004\cdot\text{Nright} \quad (R^2=0{,}81)$$

Εξίσωση 6.1-2

όπου:

Ddkombou: η διαφορά στη συνολική αναμενόμενη καθυστέρηση του κυκλικού κόμβου λόγω της τοποθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο του (sec/οχ)

FortsoSB: ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος από τον Βόρειο κλάδο (οχ/h)

FortosWB: ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος από τον Ανατολικό κλάδο (οχ/h)

FortosNB: ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος από τον Νότιο κλάδο (οχ/h)

FortosEB: ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος από τον Δυτικό κλάδο (οχ/h)

Nright: η επιμέρους δεξιόστροφη ροή του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Νότιο κλάδο (οχ/h)

Πίνακας 6-1: Βασικά Στατιστικά Χαρακτηριστικά του τελικού Στατιστικά και Λειτουργικά Βέλτιστου Γραμμικού Μοντέλου

Reg7				
Μεταβλητές	βi	Std.Error	t-value	p-value
Σταθερός όρος	-9,994	0,2766	-36,13	<2e-16
FortosSB	0,001	6,682E-05	14,86	<2e-16
FortosWB	-0,003	7,954E-05	-42,34	<2e-16
FortosNB	0,021	5,599E-04	37,47	<2e-16
FortosEB	0,009	6,254E-05	138,12	<2e-16
Nright	0,004	2,122E-04	20,1	<2e-16

από τον μεγαλύτερο (πράσινο χρώμα) προς τον μικρότερο (κόκκινο χρώμα) συντελεστή ανεξάρτητης μεταβλητής βi

Μέσω της παραπάνω εξίσωσης (Εξίσωση 6.1-2) γίνεται εφικτό να διερευνηθεί εάν η τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο σε έναν τετρασκελή «τυπικό» κυκλικό κόμβο είναι χρήσιμη για τη συνολική του απόδοση. Αυτό μπορεί να συμβεί, τοποθετώντας σε αυτήν την εξίσωση τους υφιστάμενους ή τους μελλοντικούς φόρτους, που θα είναι επιθυμητό να εξυπηρετεί και έτσι να προκύψει το Ddkombou. Με το μέγεθος αυτό, καθώς και με την υφιστάμενη καθυστέρηση του κόμβου ($d_{\text{κόμβου,no-bypass}}$) μπορεί να υπολογιστεί η αντίστοιχη συνολική αναμενόμενη μετά την τοποθέτηση της παρακαμπτήριας λωρίδας ($d_{\text{κόμβου,bypass}}$) μέσα από την Εξίσωση 6.1-1 και με αυτόν τον τρόπο να διαπιστωθεί, εάν υπάρχει κάποια βελτίωση στον κόμβο και στο επίπεδο εξυπηρέτησής του (LOS) (Πίνακας 3-2).

Τέλος, στον πίνακα του τελικού γραμμικού μοντέλου (Πίνακας 6-1) φαίνεται σε χρωματική κλίμακα η αριθμητική κατάταξη των συντελεστών των ανεξάρτητων μεταβλητών, στόχος της οποίας είναι να οπτικοποιήσει τη διαφοροποίηση της επιρροής της καθεμίας στην εξαρτημένη μεταβλητή Ddkombou.

6.2. Συμπεράσματα

Από τα διάφορα στάδια μελέτης, καθώς και από τον μεγάλο όγκο των σεναρίων, που στο σύνολό τους ήταν **8.883**, έγινε εφικτή η διατύπωση των συμπερασμάτων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Τα συμπεράσματα, που θα ακολουθήσουν, αφορούν αποκλειστικά **τετρασκελείς «τυπικούς» κυκλικούς κόμβους** (single-lane roundabouts):

- Στο στάδιο της μεθοδολογίας για τη δημιουργία των σεναρίων έγιναν οι εξής διαπιστώσεις:
  - Όταν αυξάνεται ο φόρτος εξόδου του ακριβώς επόμενου κλάδου οποιασδήποτε τύπου δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας, δηλαδή η ανταγωνιστική της ροή ($v_{ex,pce}$), τότε μειώνεται η κυκλοφοριακή της ικανότητα ($c_{bypass,pce}$). Αυτό διαπιστώθηκε από τις μαθηματικές σχέσεις υπολογισμού της κυκλοφοριακής τους ικανότητας (Εξίσωση 2.5.1-2, Εξίσωση 2.5.1-3 & Εξίσωση 3.2.2-1).
  - Καμία από τις επιμέρους δεξιόστροφες ροές του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον κάθε κλάδο δεν λαμβάνεται υπόψιν στον υπολογισμό της επερχόμενης κυκλοφορίας του κυκλικού δακτυλίου ($v_{c,pce}$) και άρα δεν επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ικανότητα των λωρίδων πρόσβασης του κάθε κλάδου ($c_{e,pce}$). Επιπλέον, οι επιμέρους δεξιόστροφες αυτές ροές, πέραν από εκείνη του Νότιου κλάδου (Nright), δεν επιδρούν σε καμία από τις «κρίσιμες» κινήσεις για την τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας στον

εν λόγω κλάδο. **Υπενθυμίζεται** ότι **οι «κρίσιμες» κινήσεις** είναι η επιμέρους δεξιόστροφη εισερχόμενη ροή από τον Νότιο κλάδο **(Nright)** και ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας ανάντη του κλάδου αυτού **($v_{c,pce,NB}$ = Sleft + Estraight + Eleft)**, ο οποίος φαίνεται και κάτω αριστερά στην Εικόνα 4-4.

- Όταν εισάγεται οποιοσδήποτε τύπος δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας σε κάποιον κλάδο του κυκλικού κόμβου, του οποίου η επιμέρους δεξιόστροφη ροή του συνολικού εισερχόμενού του φόρτου έχει θεωρηθεί ότι θα εξυπηρετηθεί αποκλειστικά μέσω αυτής, τότε λόγω της ακριβώς προηγούμενης διαπίστωσης δεν θα επηρεαστεί καθόλου η κυκλοφοριακή ικανότητα του συγκεκριμένου κλάδου πρόσβασης ($c_{e,pce}$).
- Οι αλλαγές που παρατηρούνται, όταν τοποθετείται οποιοσδήποτε τύπος δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας σε έναν κλάδο του κυκλικού κόμβου με τη θεώρηση ότι η επιμέρους δεξιόστροφη ροή του συνολικού εισερχόμενού του φόρτου θα εξυπηρετηθεί αποκλειστικά μέσω αυτής, είναι η μείωση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου του κλάδου αυτού ($v_{e,pce}$) και του φόρτου εξόδου του ακριβώς επόμενού κλάδου, δηλαδή της ανταγωνιστικής ροής της παρακαμπτήριας λωρίδας ($v_{ex,pce}$). Οι φόρτοι αυτοί φαίνονται αναλυτικά στην Εικόνα 4-3 και Εικόνα 4-5 αντίστοιχα.

Τα συμπεράσματα, που θα ακολουθήσουν, είχαν σαν βασική συνθήκη την τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής (free-flow right-turn bypass lane) στον Νότιο κλάδο «τυπικού» κυκλικού κόμβου. Επιπλέον, λόγω του ότι στη Διπλωματική αυτή προσεγγίσθηκε το κομμάτι της επίδρασης της παρακαμπτήριας λωρίδας στον κυκλικό κόμβο μέσω του $\Delta d_{κόμβου}$, έτσι και στα συμπεράσματα συνέβη το ίδιο. Πρακτικά η αύξηση αυτού του μεγέθους υποδηλώνει τη μείωση της συνολικής αναμενόμενης καθυστέρησης του κόμβου, όταν υπάρχει ο συγκεκριμένος τύπος παρακαμπτήριας λωρίδας με τη συγκεκριμένη χωροταξική της θέση σε αυτόν ($d_{κόμβου,bypass}$) συγκριτικά με όταν δεν υπάρχει ($d_{κόμβου,no-bypass}$) και άρα τη θετική της επίδραση, ενώ η μείωσή του ακριβώς τα αντίθετα.

Σε κανένα από τα 8.883 σενάρια δεν παρουσιάστηκε $\Delta d_{κόμβου}$ αρνητικό ή μηδενικό, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι η τοποθέτηση της δεξιόστροφης αυτής παρακαμπτήριας λωρίδας ήταν **πάντα επωφελής** για τον τετρασκελή «τυπικό» κυκλικό κόμβο κάτω από όλες τις συνθήκες, που εξετάστηκαν. Στα συμπεράσματα, όπου αναφέρεται ο όρος **«υψηλή» τιμή $\Delta d_{κόμβου}$**, θα εννοούνται οι τιμές **κοντά στα 10 sec/οχ**. Αυτή η οριοθέτηση έγινε με παραδοχή, προκειμένου να υπάρχει ένα ενδεικτικό θεωρητικό εύρος αναφοράς. Ο λόγος, όμως, που αυτό το εύρος τιμών $\Delta d_{κόμβου}$ χαρακτηρίστηκε «υψηλό» ήταν διότι, τα επίπεδα εξυπηρέτησης (LOS) ενός κυκλικού κόμβου διαφοροποιούνται μεταξύ τους, όταν η συνολική αναμενόμενη καθυστέρησή του ($d_{κόμβου}$) αλλάζει περίπου κατά 10 sec/οχ (Πίνακας 3-2). Ωστόσο, 10 sec/οχ δεν παρατηρήθηκε σε κανένα από τα 8.883 $\Delta d_{κόμβου}$, καθώς η μέγιστη τιμή, που παρουσιάστηκε, ήταν τα 8,4 sec/οχ.

Όπως σε όλη τη Διπλωματική έτσι και για τα ακόλουθα συμπεράσματα ισχύουν οι παραδοχές, που λήφθηκαν σε όλη τη διάρκεια εκπόνησής της και οι οποίες συνοψίζονται στο υποκεφάλαιο 4.3. Επιπλέον, όπου γίνεται αναφορά σε «κρίσιμες» κινήσεις, θα εννοούνται οι «κρίσιμες» κινήσεις για την τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας στον Νότιο κλάδο, οι οποίες έχουν αναφερθεί παραπάνω και στο υποκεφάλαιο 4.2.2.

- Από τα μεγέθη και τα αποτελέσματα καθενός από **τα 8.883 σενάρια**, που δημιουργήθηκαν στο στάδιο της μεθοδολογίας, προέκυψαν τα ακόλουθα, τα οποία προσέφεραν μία πρώτη εικόνα σχετικά με το αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας εργασίας. Όλα τα παρακάτω συμπεράσματα παρατηρήθηκαν, όταν διατηρούνταν σταθεροί οι συνολικοί εισερχόμενοι φόρτοι από τον κάθε κλάδο, καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά κατανομής τους στις τρεις επιμέρους κινήσεις, πέραν από εκείνου του κλάδου στον οποίο αναφερόταν το κάθε συμπέρασμα. Οι ονομασίες όλων των παρακάτω μεγεθών έχουν επεξηγηθεί στα υποκεφάλαια 4.2. και 4.5.

<u>Για τα σενάρια, στα οποία είτε επικρατούσαν συνθήκες ισορροπημένης είτε μη-ισορροπημένης ροής (balanced & unbalanced flow), υπήρξαν τα εξής κοινά συμπεράσματα:</u>

- Όσο αυξάνεται το ποσοστό κατανομής σε δεξιόστροφη κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Νότιο κλάδο (Nright%, δηλαδή από το N1 προς το N7, Πίνακας 4-2), τόσο αυξάνεται το $\Delta d_{\text{κόμβου}}$. Αυτό αποδίδεται στο ότι το Nright αποτελεί μία από τις κύριες «κρίσιμες» κινήσεις.
- Η οποιαδήποτε μεταβολή των ποσοστών κατανομής σε ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Νότιο κλάδο (Nstraight% και Nleft% αντίστοιχα) δεν επηρεάζουν πουθενά το $\Delta d_{\text{κόμβου}}$.
- Όμοια με το ακριβώς προηγούμενο συμπέρασμα, τα ποσοστά κατανομής και στις τρεις επιμέρους κινήσεις του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Ανατολικό κλάδο (Wright%, Wstraight%, Wleft%, δηλαδή τα W1 έως W3, Πίνακας 4-2) δεν επηρεάζουν πουθενά το $\Delta d_{\text{κόμβου}}$. Αυτό οφείλεται στο ότι οι επιμέρους φόρτοι των ποσοστών αυτών του εν λόγω κλάδου δεν λαμβάνονται υπόψιν σε καμία από τις «κρίσιμες» κινήσεις.
- Όταν αυξάνεται το ποσοστό κατανομής σε αριστερόστροφη κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Βόρειο κλάδο (Sleft%, δηλαδή από το S2 → S1 → S3, Πίνακας 4-2), τότε αυξάνεται το $\Delta d_{\text{κόμβου}}$. Αυτό οφείλεται στο ότι η κίνηση αυτή αποτελεί μία από τις «κρίσιμες» κινήσεις.
- Όταν αυξάνεται το ποσοστό κατανομής σε αριστερόστροφη κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Δυτικό κλάδο (Eleft%, δηλδή από το E2 → E1 → E3, Πίνακας 4-2), τότε σημειώνεται μία μικρής κλίμακας αύξηση στο $\Delta d_{\text{κόμβου}}$. Η αύξηση αυτή είναι ακόμα περισσότερο αισθητή, όταν ταυτόχρονα τα ποσοστά κατανομής σε δεξιόστροφη κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Νότιο κλάδο (Nright%) και σε αριστερόστροφη κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Βόρειο κλάδο (Sleft%) είναι υψηλά. Αυτό συμβαίνει, διότι και οι τρεις φόρτοι (Eleft, Nright και Sleft) αποτελούν «κρίσιμες» κινήσεις.

<u>Στα σενάρια, στα οποία επικρατούσαν συνθήκες ισορροπημένης ροής (balanced flow), προέκυψαν τα εξής:</u>

- Όσο αυξάνεται ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο, τότε γίνεται πιο αισθητή η αύξηση του $\Delta d_{\text{κόμβου}}$. Ωστόσο, η μέγιστη τιμή, που μπορεί να λάβει καθένας από αυτούς τους φόρτους, ήταν τα 500 MEA/h, διότι διαφορετικά δεν ικανοποιούνταν οι περιορισμοί, που έχουν αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 4.4.

- Όσο μικρότερος είναι ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος από τον κάθε κλάδο, τόσο μικρότερη είναι η αύξηση του $\Delta d_{\text{κόμβου}}$. Μία λογική εξήγηση αυτού είναι ότι, όταν οι υφιστάμενοι φόρτοι, που ικανοποιεί ο κυκλικός κόμβος, είναι ήδη χαμηλοί, τότε η συνολική αναμενόμενη καθυστέρησή του είναι από μόνη της σε χαμηλά επίπεδα και έτσι δεν κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη κάποιας παρακαμπτήριας λωρίδας.

Στα σενάρια, στα οποία επικρατούσαν συνθήκες μη-ισορροπημένης ροής (unbalanced flow), έγινε η εξής διαπίστωση:

- Κάτω από τις συνθήκες αυτές, παρατηρήθηκαν «υψηλές» τιμές στο $\Delta d_{\text{κόμβου}}$, όταν ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον Δυτικό κλάδο (FortosEB) έφτανε τα 700 MEA/h. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί λογικά από το ότι οι δύο από τις τρεις επιμέρους ροές του συνολικού εισερχόμενού του φόρτου (Estraight, Eleft) περιλαμβάνονται στις «κρίσιμες» κινήσεις. Συνεπώς, είναι χρήσιμη η τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας στον Νότιο κλάδο, όταν ο Δυτικός κλάδος φέρει πολύ υψηλό φόρτο.

- Από τη στατιστική επεξεργασία **των 8.883 σεναρίων** και τη δημιουργία του τελικού γραμμικού μοντέλου (Εξίσωση 6.1-2) επιβεβαιώθηκαν κάποια από τα παραπάνω συμπεράσματα και έγινε μία βαθύτερη κατανόηση της επιρροής της κάθε μεταβλητής στο $\Delta d_{\text{κόμβου}}$ ή διαφορετικά στο Ddkombou, όπως ονομάστηκε στο κομμάτι αυτό. Ωστόσο, το μοντέλο δεν μπόρεσε να συγκριθεί αυτό καθαυτό με άλλο αντίστοιχο, καθώς μέχρι στιγμής δεν έχει προκύψει κάτι παρόμοιο από παρεμφερείς έρευνες, που έχουν εκπονηθεί γύρω από το αντικείμενο μελέτης της παρούσας Διπλωματικής.

  Αυτά, που επιβεβαιώθηκαν, ήταν τα εξής:

  - Το θετικό πρόσημο της ανεξάρτητης μεταβλητής της επιμέρους δεξιόστροφης κίνησης του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Νότιο κλάδο (Nright) στο τελικό γραμμικό μοντέλο επιβεβαιώνει το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό κατανομής της (Nright%) και άρα και ο αντίστοιχος φόρτος της (Nright), τόσο αυξάνεται το Ddkombou.
  - Αντίστοιχα, τα θετικά πρόσημα των ανεξάρτητων μεταβλητών των συνολικών εισερχόμενων φόρτων από τον Βόρειο (FortosSB), τον Νότιο (FortosNB) και τον Δυτικό κλάδο (FortosEB) υποδηλώνουν ότι η αύξησή τους, προκαλεί αύξηση στο Ddkombou. Αυτό εν μέρει επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα, τα οποία αφορούν τα ποσοστά κατανομής των αντίστοιχων κλάδων Sleft%, Nright% και Eleft%. Επιπλέον, τα θετικά πρόσημα αποδίδονται στο ότι από τους συγκεκριμένους φόρτους μπορούν να προκύψουν όλες οι «κρίσιμες» κινήσεις.
  - Το αρνητικό πρόσημο της ανεξάρτητης μεταβλητής του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Ανατολικό κλάδο (FortosWB) πιθανώς οφείλεται στην τυχαιότητα των αποτελεσμάτων του κώδικα στο R-Studio και στο ότι οι επιμέρους κινήσεις του συνολικού αυτού φόρτου δεν εμπλέκονται πουθενά στον υπολογισμό των «κρίσιμων» κινήσεων. Εξάλλου, ο συντελεστής της μεταβλητής αυτής είναι σχετικά μικρός, συνεπώς δεν προκαλεί σημαντική μείωση στο Ddkombou.

Κάποιες επιπλέον πληροφορίες, που προέκυψαν, για την επιρροή της κάθε μεταβλητής στο Ddkombou βάσει των συντελεστών τους στο τελικό γραμμικό μοντέλο ήταν οι εξής:

- Ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο (FortosNB) είναι εκείνος με τη μεγαλύτερη θετική επιρροή στο Ddkombou. Δηλαδή, όσο αυξάνεται ο συγκεκριμένος φόρτος, τόσο πιο σημαντική γίνεται η τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας στον Νότιο κλάδο. Αυτό αποδίδεται στο ότι ο κλάδος αυτός αποτελεί τον πιο «κρίσιμο» για την παρούσα εργασία, καθώς αποκλειστικά σε αυτόν τοποθετείται η δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής.
- Η αμέσως επόμενη ιεραρχικά ανεξάρτητη μεταβλητή, που επηρεάζει θετικά το Ddkombou, είναι ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος στον κυκλικό κόμβο από τον Δυτικό κλάδο (FortosEB). Μία βασική αιτία είναι ότι ο κλάδος αυτός περιέχει δύο από τις «κρίσιμες» κινήσεις, δηλαδή την επιμέρους αριστερόστροφη και ευθεία κίνηση του συνολικού εισερχόμενού του φόρτου (Eleft & Estraight).
- Λίγο μικρότερη θετική επιρροή στο Ddkombou μετά την ανεξάρτητη μεταβλητή FortosEB έχει η επιμέρους δεξιόστροφη κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον Νότιο κλάδο (Nright), η οποία όπως και οι παραπάνω αποτελεί «κρίσιμη κίνηση».
- Την τελευταία θέση στην κατάταξη των ανεξάρτητων μεταβλητών με θετική επιρροή στο Ddkombou βάσει του μοντέλου κατέχει ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος από τον Βόρειο κλάδο (FortosSB), καθώς η επιμέρους αριστερόστροφη κίνηση του φόρτου αυτού (Sleft) αποτελεί την τέταρτη και τελευταία «κρίσιμη» κίνηση.
- Βάσει την επιρροή της κάθε μεταβλητής, γίνεται φανερό ότι όσο πιο υψηλές είναι οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών FortosNB, FortosEB και Nright, τόσο πιο πιθανό είναι το Ddkombou να μην είναι αρνητικό. Ως υψηλές τιμές ορίζεται θεωρητικά ένα εύρος άνω των 300 οχ/h, διότι κάτω από αυτό το όριο τιμών δεν χρειάζεται η τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας.

Ένα γενικότερο συμπέρασμα όλων όσων αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι ότι το τελικό γραμμικό μοντέλο (Εξίσωση 6.1-2) αποτελεί ένα αξιόλογο μέσο, για να εντοπίζεται πότε είναι απαραίτητη η τοποθέτηση δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής στον Νότιο κλάδο ενός τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου. Δηλαδή, η συγκεκριμένη εξίσωση καλύπτει μία από τις πολλές περιπτώσεις του αντικειμένου αυτού. Ωστόσο, μπορεί να αποτελέσει τόσο η ίδια όσο και η μεθοδολογία, που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία της, πολύτιμα εργαλεία για τους μελετητές, προκειμένου να παραχθεί ένα μοντέλο, που να καλύπτει ένα ευρύτερο φάσμα στο κομμάτι αυτό της διερεύνησης της αναγκαιότητας χωροθέτησης γενικά των δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων στους κυκλικούς κόμβους.

Λόγω του ότι το μοντέλο αυτό στηρίχτηκε σε μία βάση δεδομένων πλήρως μαθηματικόποιημένη, είναι αναμενόμενο να υπάρχουν αποκλίσεις με τυχόν αντίστοιχα μελλοντικά μοντέλα, που θα προέλθουν από πραγματικές μετρήσεις.

6.3. Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Η παρούσα Διπλωματική εργασία είχε σαν κεντρικό πυρήνα ανάλυσής τη διερεύνηση της αναγκαιότητας χωροθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας ελεύθερης ροής σε κλάδο τετρασκελούς «τυπικού» κυκλικού κόμβου και πιο συγκεκριμένα στον Νότιο, ακολουθώντας τις επίσημες Αμερικάνικες Οδηγίες (NCHRP 2010). Με τα αποτελέσματα της εργασίας έγινε ένα πρώτο και σημαντικό βήμα πάνω στο αντικείμενο αυτό, το οποίο έχει πολλά περιθώρια για περαιτέρω μελέτη.

Για την περαιτέρω μελέτη ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η διερεύνηση με τις παρακάτω τεχνικές:

- ✓ Να πραγματοποιηθεί παρόμοια επίλυση αλλά με περισσότερα ποσοστά κατανομής των συνολικών εισερχόμενων φόρτων από τον κάθε κλάδο, κυρίως από τον Βόρειο, τον Ανατολικό και τον Δυτικό κλάδο, καθώς σε αυτούς τους τρεις δεν εφαρμόστηκαν μεγάλη ποικιλία ποσοστών κατανομής όσο στον Νότιο κλάδο.
- ✓ Η επιμέρους δεξιόστροφη εισερχόμενη ροή στον Νότιο κλάδο, που κατευθύνεται προς τον Ανατολικό (Nright), να μην εξυπηρετείται αποκλειστικά μέσω της δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας, αλλά να διαμοιράζεται και στην κύρια λωρίδα πρόσβασης του κλάδου αυτού.
- ✓ Να μελετηθούν περισσότεροι συνολικοί εισερχόμενοι φόρτοι στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο (FortosNB), διότι στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν σε αυτόν κατά κύριο λόγο τα 500 ΜΕΑ/h.
- ✓ Να ληφθούν υπόψιν Βαρέα Οχήματα (ΒΟ).
- ✓ Να εξεταστεί η εναλλακτική λύση της τοποθέτησης φωτεινής σηματοδότησης, όποτε κρίνεται αναγκαία η δημιουργία δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας στον Νότιο κλάδο βάσει του τωρινού μοντέλου, καθώς η φωτεινή σηματοδότηση αποτελεί μία λιγότερο κοστοβόρα και παρεμβατική λύση από εκείνη της παρακαμπτήριας λωρίδας.
- ✓ Να εφαρμοστούν και οι άλλοι δύο τύποι δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων, δηλαδή η παρακαμπτήρια λωρίδα με σήμανση υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP (stop slip lane) και παραχώρησης προτεραιότητας (yield slip lane).
- ✓ Να ληφθεί υπόψιν η παρουσία πεζών κυρίως στους τύπους δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας με σήμανση υποχρεωτικής διακοπής πορείας STOP ή παραχώρησης προτεραιότητας, καθώς δεν συνίσταται η συνύπαρξή τους με τη δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ελεύθερης ροής σύμφωνα με τις Αμερικάνικες Οδηγίες.
- ✓ Να μελετηθεί η τοποθέτηση παρακαμπτήριας λωρίδας και σε άλλους τύπους κυκλικών κόμβων πέραν του «τυπικού» κυκλικού κόμβου, όπως στους «μικρούς» κυκλικούς κόμβους (mini-roundabouts) και στους κυκλικούς κόμβους πολλαπλών λωρίδων (multilane roundabouts).
- ✓ Να διερευνηθεί το συγκεκριμένο αντικείμενο και στις τρισκελείς διατάξεις κυκλικών κόμβων, στις οποίες πέραν από όλους τους τύπους δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων, μπορούν να τοποθετηθούν και ευθείες παρακαμπτήριες λωρίδες (straight bypass lanes), αναφορά στις οποίες έχει γίνει στο υποκεφάλαιο 2.4.
- ✓ Να εκτελεστεί η παρούσα μελέτη με ταυτόχρονη τοποθέτηση περισσότερων δεξιόστροφων παρακαμπτήριων λωρίδων σε διάφορους κλάδους του κυκλικού κόμβου και όχι αποκλειστικά στον Νότιο κλάδο.

- ✓ Να προσεγγισθεί η αναγκαιότητα της χωροθέτησης δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας μέσω άλλων μεγεθών πέραν του $\Delta d_{\text{κόμβου}}$.
- ✓ Η βάση δεδομένων της μελέτης να δημιουργηθεί από πραγματικές κυκλοφοριακές μετρήσεις στο πεδίο σε πραγματικούς κυκλικούς κόμβους, που είτε διαθέτουν είτε όχι παρακαμπτήρια λωρίδα.

Όπως γίνεται αντιληπτό, λόγω του ότι το αντικείμενο αυτό δεν έχει διερευνηθεί σε βάθος, υπάρχουν πολλές καινούργιες τεχνικές, που μένουν να μελετηθούν, με ποικίλους συνδυασμούς μέσω των οποίων μπορεί να προσεγγισθεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1]. **Al-Ghandour, M. N.** Roundabouts Slip Lanes: Performance and Safety Analysis (2011).

[2]. **Al-Ghandour, M., Schroeder, B., Rasdof, W., & Williams, B.** Delay Analysis of Single-Lane Roundabout with a Slip Lane under Varying Exit Types. Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting. (2012).

[3]. **Brilon, W.** Studies on Roundabouts in Germany: Lessons Learned. Carmel Indiana. (May 2011).

[4]. **Build in.** Ανάκτηση από: https://builtin.com/data-science/boxplot.

[5]. **FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V).** (2006).

[6]. **FHWA (Federal Highway Administation).** Roundabouts: An Informational Guide. (2000).

[7]. **HCM (Highway Capacity Manual).** Transportation Research Board of the National Academies. (2010).

[8]. **ISSTD - Integrated Systems & Systems Design.** TORUS™. Ανάκτηση από: https://www.issd.com.tr/en/44841/TORUS.

[9]. **Mauro R., & Guerrieri, M.** Right-turn Bypass Lanes at Roundabouts: Geometric Schemes and Functional Analysis. (2012).

[10]. **NCHRP (National Cooperative Highway Research Program).** Report no 672. (2010).

[11]. **R Domumentation.** Bayesian Information Criterion (BIC). Ανάκτηση από: https://astrostatistics.psu.edu/su07/R/html/stats4/html/BIC.html.

[12]. **Road & Bridges.** Ανάκτηση από: https://www.roadsbridges.com/roadway-design/article/10653756/torus-helps-reduce-roundabout-design-time-by-68. (2021).

[13]. **Silva A. B., Santos, S., Gaspar, M.** Turbo-Roundabout Use and Design. 6th Annual Conference on Planning Research. (2013).

[14]. **Slabý, Ivan Sedlačik and Petr.** Capacity analysis of a bypass of roundabouts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. (2017).

[15]. **Tommaz Tollazzi, Marko Rencelj, Saso Turnsek.** New Type of Roundabout: Roundabouts with "Depressed" Lanes for Right Turning - "Flower Roundabout". (2011).

[16]. **Tracz M.** Analysis of Small Roundabouts' Capacity. Kansas City, Missouri. (2008).

[17]. **Tracz M., Chodur, J., & Ostrowsk, K.** Roundabouts Country report. Poland. (2011).

[18]. **Transoft Solutions.** Ανάκτηση από: https://www.transoftsolutions.com/road-design/torus-roundabouts/features/. (2021).

[19]. **Αλβέρτης Αλέξανδρος.** ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ "Διερεύνηση της τροχιάς οχημάτων κατά τη διαδικασία προσπέρασης με χρήση προσομοιωτή οδήγησης". ΕΜΠ. (2020).

[20]. **Βλαχογιάννη Ε.** "Σημείωσεις: Ποσοτικές Μέθοδοι στις Μεταφορές", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. (2021).

[21]. **Λουκάς Ι. Στργγύλης.** ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ "Κρίσιμοι παράγοντες επιρροής της κίνησης πεζών στο κέντρο της Αθήνας". ΕΜΠ. (2021).

[22]. **Μαυρομάτης Σ.** "ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ: Ειδικά Κεφάλαια Γεωμετρικού Σχεδιασμού Οδών", Τεύχος Α: ΟΔΙΚΟΙ ΚΟΜΒΟΙ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. (2020).

[23]. **Φραντζεσκάκης, Ι. Μ., Γκόλιας, Ι. Κ., & Πιτσιάβα-Λατινοπούλου, Μ. Χ.** Βιβλίο: Κυκλοφοριακή Τεχνική. Αθήνα. (2009).

[24]. **Φώτος Φώτιος Α.** ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ "Χρήση Μοντέλου Αξιοπιστίας για τη Διερεύνηση Ορατότητας για Στάση στον Τρισδιάστατο Χώρο (3D)". ΕΜΠ. (2021).

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

Παρακάτω αναλύονται όλα τα ακρωνύμια και οι συντομογραφίες, που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας:

- *FortosSB:* ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Βόρειο κλάδο (South Bound)
- *FortosWB:* ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Ανατολικό κλάδο (West Bound)
- *FortosNB:* ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο (North Bound)
- *FortosEB:* ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Δυτικό κλάδο (East Bound)
- *Sright:* ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Βόρειο κλάδο και κινείται δεξιόστροφα προς τον Δυτικό
- *Sstraight:* ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Βόρειο κλάδο και κινείται ευθεία προς τον Νότιο
- *Sleft*: ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Βόρειο κλάδο και κινείται αριστερόστροφα προς τον Ανατολικό
- *Wright*: ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Ανατολικό κλάδο και κινείται δεξιόστροφα προς τον Βόρειο
- *Wstraight*: ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Ανατολικό κλάδο και κινείται ευθεία προς τον Δυτικό
- *Wleft*: ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Ανατολικό κλάδο και κινείται αριστερόστροφα προς τον Νότιο
- *Nright*: ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο και κινείται δεξιόστροφα προς τον Ανατολικό
- *Nstraight*: ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο και κινείται ευθεία προς τον Βόρειο
- *Nleft*: ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Νότιο κλάδο και κινείται αριστερόστροφα προς τον Δυτικό
- *Eright:* ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Δυτικό κλάδο και κινείται δεξιόστροφα προς τον Νότιο
- *Estraight*: ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Δυτικό κλάδο και κινείται ευθεία προς τον Ανατολικό
- *Eleft*: ο φόρτος, που εισέρχεται στον κυκλικό κόμβο από τον Δυτικό κλάδο και κινείται αριστερόστροφα προς τον Βόρειο
- *c*: χωρητικότητα (capacity) ή κυκλοφοριακή ικανότητα
- *v ή Q:* κυκλοφοριακός φόρτος (volume)
- $v_{e,pce}$*:* ο συνολικός εισερχόμενος φόρτος της λωρίδας πρόσβασης ενός κυκλικού κόμβου (MEA/h)
- $Q_{E,TLT}$*:* ο εισερχόμενος φόρτος της αριστερής λωρίδας ενός κλάδου, που αποτελείται από δύο λωρίδες πρόσβασης (MEA/h)
- $Q_{E,R}^{bypass}$ *ή* $v_{bypass,pce}$*:* η εισερχόμενη στον κλάδο με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ροή, η οποία κατευθύνεται δεξιόστροφα μέσω της παρακαμπτήριας λωρίδας (MEA/h)
- $Q_{E,R}^{no\text{-}bypass}$*:* η εισερχόμενη στον κλάδο με δεξιόστροφη παρακαμπτήρια λωρίδα ροή, η οποία κατευθύνεται δεξιόστροφα μέσω της λωρίδας πρόσβασης του ίδιου κλάδου αντί μέσω της παρακαμπτήριας λωρίδας (MEA/h)

- Q_U *ή* Q_C *ή* $v_{c,pce}$*:* ο φόρτος της επερχόμενης κυκλοφορίας, δηλαδή ο φόρτος πέριξ του κυκλικού δακτυλίου (ΜΕΑ/h)
- Q_U^{Tot} *ή* $v_{ex,pce}$*:* η ανταγωνιστική ροή μίας δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας, που είναι ο φόρτος εξόδου του ακριβώς επόμενού της κλάδου (ΜΕΑ/h)
- c_E *ή* $c_{e,pce}$*:* η κυκλοφοριακή ικανότητα/χωρητικότητα της λωρίδας πρόσβασης ενός κυκλικού κόμβου (ΜΕΑ/h)
- $c_{E,R}$ *ή* $c_{e,R,pce}$*:* η κυκλοφοριακή ικανότητα/χωρητικότητα της δεξιάς λωρίδας ενός κλάδου, που αποτελείται από δύο λωρίδες πρόσβασης (ΜΕΑ/h)
- $c_{E,TLT}$ *ή* $c_{e,TLT,pce}$*:* η κυκλοφοριακή ικανότητα/χωρητικότητα της αριστερής λωρίδας ενός κλάδου, που αποτελείται από δύο λωρίδες πρόσβασης (ΜΕΑ/h)
- $c_{E,R}$ *ή* $c_{bypass,pce}$*:* η κυκλοφοριακή ικανότητα/χωρητικότητα μιας δεξιόστροφης παρακαμπτήριας λωρίδας (ΜΕΑ/h)
- *s.e.:* Τυπικό σφάλμα (standard error)
- *ΒΟ:* Βαρέα Οχήματα
- *ΜΗΚ:* Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία (οχ/24^h)
- *LOS:* Επίπεδο Εξυπηρέτησης (Level Of Service)
- l_Z*:* Μήκος διεύρυνσης (m)
- l_A*:* Μήκος/Λωρίδα επιβράδυνσης (m)
- l_E*:* Μήκος/Λωρίδα επιτάχυνσης (m)
- *ΜΟΕs:* Μέτρα Αποτελεσματικότητας (Measures Of Effectiveness)
- *Πίνακες Π-Π:* Πίνακες Προέλευσης-Προορισμού
- *ΣΩΑ:* Συντελεστής Ωριαίας Αιχμής (Peak Hour Factor – PHF)
- *ΙΚ:* Ισόπεδος Κόμβος
- *ΜΕΑ:* Μονάδες Επιβατηγών Αυτοκινήτων
- *οχ (veh):* Μονάδα μέτρησης του αριθμού των οχημάτων
- *ΜΗΚ:* Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία
- *VIF:* Συντελεστής Διογκωμένης Διακύμανσης της Παλινδρόμησης (Variance Inflation Factor)
- *τ.μ.:* Μονάδα μέτρησης Επιφάνειας – τετραγωνικά μέτρα (m^2)
- *ft:* Μονάδα μέτρησης Μήκους (πόδι/foot)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

			Συνολικοί Εισερχόμενοι Φόρτοι σε κάθε κλάδο του αντίστοιχου τετρασκελούς Ισόπεδου κόμβου (ΙΚ) (MEA/h)											
			Βόρειος			Ανατολικός			Νότιος			Δυτικός		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		19)	400			300			500			350		
		Ποσοστά Κατανομής του Συνολικού Εισερχόμενου Φόρτου του κάθε κλάδου (%)	20	40	40	20	40	40	40	20	40	20	40	40
			20	50	30	20	50	30	40	40	20	20	50	30
			20	30	50	20	30	50	50	30	20	20	30	50
									50	20	30			
									60	20	20			
									60	30	10			
									60	10	30			

Ni	Σενάρια	T (h)	Αντίστοιχοι Εισερχόμενοι Φόρτοι σε ένα τετρασκελή ΙΚ (MEA/h)												Βόρειος Κλάδος (SB)						Δυτικός Κλάδος (EB)						Νότιος Κλάδος (NB) χωρίς free-flow right-turn bypass lane					
			Βόρειος			Ανατολικός			Νότιος			Δυτικός																				
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	vc,pce (MEA/h)	ce,pce (MEA/h)	ve,pce (MEA/h)	x (v/c)	Φόρτος διασταυρωνόμενων κινήσεων (οχ/h)	dπρόσβασης (sec/οχ)	vc,pce (MEA/h)	ce,pce (MEA/h)	ve,pce (MEA/h)	Φόρτος διασταυρούμενων κινήσεων (οχ/h)	x (v/c)	dπρόσβασης (sec/οχ)	vc,pce (MEA/h)	ce,pce (MEA/h)	ve,pce (MEA/h)	Φόρτος διασταυρωνόμενων κινήσεων (οχ/h)	x (v/c)	dπρόσβασης (sec/οχ)
a) 40%-20%-40% η κατανομη του κυκλοφοριακού φόρτου στο ΝΒ (Ν1)	S0 (20%-40%-40% η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στους ΕΒ, WB και SB) (E1, W1, S1)	0,25	80	160	160	60	120	120	**200**	100	200	70	140	140	440	728	400	0,55	840	13,6	440	728	350	790	0,48	11,8	440	728	500	940	0,69	18,5
	S1-NB (1 right-turn bypass lane στο NB) *(Παραδοχές S1-NB-α=1)	0,25	80	160	160	60	120	120	**200**	100	200	70	140	140	440	728	400	0,55	840	13,6	440	728	350	790	0,48	11,8						
	S0 (20%-50%-30% η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στο ΕΒ και 20%-40%-40% στους WB, SB) (E2,W1,S1)	0,25	80	160	160	60	120	120	**200**	100	200	70	175	105	440	728	400	0,55	840	13,6	440	728	350	790	0,48	11,8	440	728	500	940	0,69	18,5
	S1-NB (1 right-turn bypass lane στο NB) *(Παραδοχές S1-NB-α=1)	0,25	80	160	160	60	120	120	**200**	100	200	70	175	105	440	728	400	0,55	840	13,6	440	728	350	790	0,48	11,8						
	S0 (20%-30%-50% η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στο ΕΒ και 20%-40%-40% στους WB, SB) (E3, W1, S1)	0,25	80	160	160	60	120	120	**200**	100	200	70	105	175	440	728	400	0,55	840	13,6	440	728	350	790	0,48	11,8	440	728	500	940	0,69	18,5
	S1-NB (1 right-turn bypass lane στο NB) *(Παραδοχές S1-NB-α=1)	0,25	80	160	160	60	120	120	**200**	100	200	70	105	175	440	728	400	0,55	840	13,6	440	728	350	790	0,48	11,8						
	S0 (20%-40%-40% η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στους ΕΒ, SB και 20%-50%-30% στο WB) (E1, W2, S1)	0,25	80	160	160	60	150	90	**200**	100	200	70	140	140	440	728	400	0,55	840	13,6	410	750	350	760	0,47	11,3	440	728	500	940	0,69	18,5
	S1-NB (1 right-turn bypass lane στο NB) *(Παραδοχές S1-NB-α=1)	0,25	80	160	160	60	150	90	**200**	100	200	70	140	140	440	728	400	0,55	840	13,6	410	750	350	760	0,47	11,3						
	S0 (20%-50%-30% η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στους στους ΕΒ, WB και 20%-40%-40% στο SB) (E2, W2, S1)	0,25	80	160	160	60	150	90	**200**	100	200	70	175	105	440	728	400	0,55	840	13,6	410	750	350	760	0,47	11,3	440	728	500	940	0,69	18,5
	S1-NB (1 right-turn bypass lane στο NB) *(Παραδοχές S1-NB-α=1)	0,25	80	160	160	60	150	90	**200**	100	200	70	175	105	440	728	400	0,55	840	13,6	410	750	350	760	0,47	11,3						
	S0 (20%-30%-50% η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στο ΕΒ, 20%-50%-30% στο WB και 20%-40%-40% στο SB) (E3, W2, S1)	0,25	80	160	160	60	150	90	**200**	100	200	70	105	175	440	728	400	0,55	840	13,6	410	750	350	760	0,47	11,3	440	728	500	940	0,69	18,5
	S1-NB (1 right-turn bypass lane στο NB) *(Παραδοχές S1-NB-α=1)	0,25	80	160	160	60	150	90	**200**	100	200	70	105	175	440	728	400	0,55	840	13,6	410	750	350	760	0,47	11,3						
	S0 (20%-40%-40% η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στους ΕΒ, SB και 20%-30%-50% στο WB) (E1, W3, S1)	0,25	80	160	160	60	90	150	**200**	100	200	70	140	140	440	728	400	0,55	840	13,6	470	706	350	820	0,50	12,5	440	728	500	940	0,69	18,5
	S1-NB (1 right-turn bypass lane στο NB) *(Παραδοχές S1-NB-α=1)	0,25	80	160	160	60	90	150	**200**	100	200	70	140	140	440	728	400	0,55	840	13,6	470	706	350	820	0,50	12,5						
	S0 (20%-50%-30% η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στο ΕΒ, 20%-30%-50% στο WB και 20%-40%-40% στο SB) (E2, W3, S1)	0,25	80	160	160	60	90	150	**200**	100	200	70	175	105	440	728	400	0,55	840	13,6	470	706	350	820	0,50	12,5	440	728	500	940	0,69	18,5
	S1-NB (1 right-turn bypass lane στο NB) *(Παραδοχές S1-NB-α=1)	0,25	80	160	160	60	90	150	**200**	100	200	70	175	105	440	728	400	0,55	840	13,6	470	706	350	820	0,50	12,5						
	S0 (20%-30%-50% η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στους ΕΒ, WB και 20%-40%-40% στο SB) (E3, W3, S1)	0,25	80	160	160	60	90	150	**200**	100	200	70	105	175	440	728	400	0,55	840	13,6	470	706	350	820	0,50	12,5	440	728	500	940	0,69	18,5
	S1-NB (1 right-turn bypass lane στο NB) *(Παραδοχές S1-NB-α=1)	0,25	80	160	160	60	90	150	**200**	100	200	70	105	175	440	728	400	0,55	840	13,6	470	706	350	820	0,50	12,5						
	S0 (20%-40%-40% η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στους ΕΒ, WB και 20%-50%-30% στο SB) (E1, W1, S2)	0,25	80	200	120	60	120	120	**200**	100	200	70	140	140	440	728	400	0,55	840	13,6	440	728	350	790	0,48	11,8	400	757	500	900	0,66	16,8
	S1-NB (1 right-turn bypass lane στο NB) *(Παραδοχές S1-NB-α=1)	0,25	80	200	120	60	120	120	**200**	100	200	70	140	140	440	728	400	0,55	840	13,6	440	728	350	790	0,48	11,8						
	S0 (20%-50%-30% η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στους ΕΒ, SB και 20%-40%-40% στο WB) (E2, W1, S2)	0,25	80	200	120	60	120	120	**200**	100	200	70	175	105	440	728	400	0,55	840	13,6	440	728	350	790	0,48	11,8	400	757	500	900	0,66	16,8
	S1-NB (1 right-turn bypass lane στο NB) *(Παραδοχές S1-NB-α=1)	0,25	80	200	120	60	120	120	**200**	100	200	70	175	105	440	728	400	0,55	840	13,6	440	728	350	790	0,48	11,8						
	S0 (20%-30%-50% η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου στο ΕΒ, 20%-40%-40% στο WB και 20%-50%-30% στο SB) (E3, W1, S2)	0,25	80	200	120	60	120	120	**200**	100	200	70	105	175	440	728	400	0,55	840	13,6	440	728	350	790	0,48	11,8	400	757	500	900	0,66	16,8
	S1-NB (1 right-turn bypass lane στο NB) *(Παραδοχές S1-NB-α=1)	0,25	80	200	120	60	120	120	**200**	100	200	70	105	175	440	728	400	0,55	840	13,6	440	728	350	790	0,48	11,8						

Νότιος Κλάδος (NB) με free-flow right-turn bypass lane										Ανατολικός Κλάδος (WB)						Συνολικός Εισερχόμενος Φόρτος του Κυκλικού Κόμβου (MEA/h)	dκόμβου (sec/οχ)	LOS του Κυκλικού Κόμβου	Δdκόμβου (sec/οχ)
Κλάδος της κύριας πρόσβασης					Κλάδος της παρακαμπτήριας λωρίδας														
vc,pce (MEA/h)	ce,pce (MEA/h)	ve,pce (MEA/h)	x (v/c)	dπρόσβασης (sec/οχ)	vex,pce,WB (MEA/h)	cbypass,pce (MEA/h)	vbypass,pce (MEA/h)	x (v/c)	dbypass (sec/οχ)	vc,pce (MEA/h)	ce,pce (MEA/h)	ve,pce (MEA/h)	Φόρτος διασταυρωνόμενων κινήσεων (οχ/h)	x (v/c)	dπρόσβασης (sec/οχ)				
										440	728	300	740	0,41	10,4	1550	14,2	**B**	
440	728	300	0,41	10,4	300	1013	200	0,20	**5,4**	440	728	300	740	0,41	10,4	1550	10,9	**B**	3,3
										405	754	300	705	0,40	9,9	1550	14,1	**B**	
440	728	300	0,41	10,4	335	989	200	0,20	**5,6**	405	754	300	705	0,40	9,9	1550	10,8	**B**	3,2
										475	703	300	775	0,43	11,0	1550	14,3	**B**	
440	728	300	0,41	10,4	265	1038	200	0,19	**5,3**	475	703	300	775	0,43	11,0	1550	11,0	**B**	3,3
										440	728	300	740	0,41	10,4	1550	14,0	**B**	
440	728	300	0,41	10,4	300	1013	200	0,20	**5,4**	440	728	300	740	0,41	10,4	1550	10,8	**B**	3,3
										405	754	300	705	0,40	9,9	1550	13,9	**B**	
440	728	300	0,41	10,4	335	989	200	0,20	**5,6**	405	754	300	705	0,40	9,9	1550	10,7	**B**	3,2
										475	703	300	775	0,43	11,0	1550	14,1	**B**	
440	728	300	0,41	10,4	265	1038	200	0,19	**5,3**	475	703	300	775	0,43	11,0	1550	10,9	**B**	3,3
										440	728	300	740	0,41	10,4	1550	14,3	**B**	
440	728	300	0,41	10,4	300	1013	200	0,20	**5,4**	440	728	300	740	0,41	10,4	1550	11,1	**B**	3,3
										405	754	300	705	0,40	9,9	1550	14,2	**B**	
440	728	300	0,41	10,4	335	989	200	0,20	**5,6**	405	754	300	705	0,40	9,9	1550	11,0	**B**	3,2
										475	703	300	775	0,43	11,0	1550	14,4	**B**	
440	728	300	0,41	10,4	265	1038	200	0,19	**5,3**	475	703	300	775	0,43	11,0	1550	11,1	**B**	3,3
										440	728	300	740	0,41	10,4	1550	13,6	**B**	
400	757	300	0,40	9,8	260	1042	200	0,19	**5,2**	440	728	300	740	0,41	10,4	1550	10,8	**B**	2,8
										405	754	300	705	0,40	9,9	1550	13,5	**B**	
400	757	300	0,40	9,8	295	1017	200	0,20	**5,4**	405	754	300	705	0,40	9,9	1550	10,7	**B**	2,8
										475	703	300	775	0,43	11,0	1550	13,7	**B**	
400	757	300	0,40	9,8	225	1068	200	0,19	**5,1**	475	703	300	775	0,43	11,0	1550	10,9	**B**	2,9

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ																													
FortosSB	FortosWB	FortosNB	FortosEB	Sright	Sstraight	Sleft	Wright	Wstraight	Wleft	Nright	Nstraight	Nleft	Eright	Estraight	Eleft	Ddkombou	Srightper	Sstraightper	Sleftper	Wrightper	Wstraightper	Wleftper	Nrightper	Nstraightper	Nleftper	Erightper	Estraightper	Eleftper
400	400	400	400	80	160	160	80	160	160	160	80	160	80	160	160	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	160	160	80	160	160	160	80	160	80	200	120	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	160	160	80	160	160	160	80	160	80	120	200	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	160	160	80	200	120	160	80	160	80	160	160	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,5	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	160	160	80	200	120	160	80	160	80	200	120	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,5	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	160	160	80	200	120	160	80	160	80	120	200	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,5	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	160	160	80	120	200	160	80	160	80	160	160	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	160	160	80	120	200	160	80	160	80	200	120	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	160	160	80	120	200	160	80	160	80	120	200	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	200	120	80	160	160	160	80	160	80	160	160	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	200	120	80	160	160	160	80	160	80	200	120	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	200	120	80	160	160	160	80	160	80	120	200	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	200	120	80	200	120	160	80	160	80	160	160	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	200	120	80	200	120	160	80	160	80	200	120	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	200	120	80	200	120	160	80	160	80	120	200	1,6	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	200	120	80	120	200	160	80	160	80	160	160	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	200	120	80	120	200	160	80	160	80	200	120	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	200	120	80	120	200	160	80	160	80	120	200	1,6	0,2	0,5	0,3	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	120	200	80	160	160	160	80	160	80	160	160	1,9	0,2	0,3	0,5	0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	120	200	80	160	160	160	80	160	80	200	120	1,9	0,2	0,3	0,5	0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	120	200	80	160	160	160	80	160	80	120	200	2,0	0,2	0,3	0,5	0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	120	200	80	200	120	160	80	160	80	160	160	1,9	0,2	0,3	0,5	0,2	0,5	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	120	200	80	200	120	160	80	160	80	200	120	1,9	0,2	0,3	0,5	0,2	0,5	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	120	200	80	200	120	160	80	160	80	120	200	2,0	0,2	0,3	0,5	0,2	0,5	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	120	200	80	120	200	160	80	160	80	160	160	1,9	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	120	200	80	120	200	160	80	160	80	200	120	1,9	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	120	200	80	120	200	160	80	160	80	120	200	2,0	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	160	160	80	160	160	160	160	80	80	160	160	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	160	160	80	160	160	160	160	80	80	200	120	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	160	160	80	160	160	160	160	80	80	120	200	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	160	160	80	200	120	160	160	80	80	160	160	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,5	0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	160	160	80	200	120	160	160	80	80	200	120	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,5	0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	160	160	80	200	120	160	160	80	80	120	200	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,5	0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	160	160	80	120	200	160	160	80	80	160	160	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,5	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	160	160	80	120	200	160	160	80	80	200	120	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,5	0,4	0,4	0,2	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	160	160	80	120	200	160	160	80	80	120	200	1,7	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,5	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	200	120	80	160	160	160	160	80	80	160	160	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	200	120	80	160	160	160	160	80	80	200	120	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	200	120	80	160	160	160	160	80	80	120	200	1,6	0,2	0,5	0,3	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	200	120	80	200	120	160	160	80	80	160	160	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	200	120	80	200	120	160	160	80	80	200	120	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	200	120	80	200	120	160	160	80	80	120	200	1,6	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	200	120	80	120	200	160	160	80	80	160	160	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,3	0,5	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4
400	400	400	400	80	200	120	80	120	200	160	160	80	80	200	120	1,5	0,2	0,5	0,3	0,2	0,3	0,5	0,4	0,4	0,2	0,2	0,5	0,3
400	400	400	400	80	200	120	80	120	200	160	160	80	80	120	200	1,6	0,2	0,5	0,3	0,2	0,3	0,5	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3	0,5
400	400	400	400	80	120	200	80	160	160	160	160	80	80	160	160	1,9	0,2	0,3	0,5	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ των 29 μεταβλητών της 1ης στήλης με τις μεταβλητές της 1ης γραμμής, δηλαδή με την εξαρτημένη μεταβλητή Ddkombou και με τις 16 από τις 28 ανεξάρτητες μεταβλητές (του τέσσερις συνολικούς εισερχόμενους φόρτους στον κυκλικό κόμβο από τον κάθε κλάδο και του δώδεκα φόρτους της επιμέρους δεξιόστροφης, ευθείας και αριστερόστροφης ροής του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον κάθε κλάδο).

	FortosSB	FortosWB	FortosNB	FortosEB	Sright	Sstraight	Sleft	Wright	Wstraight	Wleft	Nright	Nstraight	Nleft	Eright	Estraight	Eleft	Ddkombou
FortosSB	1	0,55	-0,08	0,32	1	0,89	0,89	0,55	0,48	0,48	-0,02	-0,01	-0,01	0,32	0,28	0,28	0,21
FortosWB	0,55	1	-0,09	0,52	0,55	0,49	0,49	1	0,88	0,88	-0,02	-0,01	-0,01	0,52	0,46	0,46	0,20
FortosNB	-0,08	-0,09	1	-0,06	-0,08	-0,07	-0,07	-0,09	-0,08	-0,08	0,19	0,09	0,09	-0,06	-0,05	-0,05	0,22
FortosEB	0,32	0,52	-0,06	1	0,32	0,28	0,28	0,52	0,46	0,46	-0,01	-0,005	-0,005	1	0,89	0,89	0,81
Sright	1	0,55	-0,08	0,32	1	0,89	0,89	0,55	0,48	0,48	-0,02	-0,01	-0,01	0,32	0,28	0,28	0,21
Sstraight	0,89	0,49	-0,07	0,28	0,89	1	0,59	0,49	0,43	0,43	-0,01	-0,01	-0,01	0,28	0,25	0,25	0,04
Sleft	0,89	0,49	-0,07	0,28	0,89	0,59	1	0,49	0,43	0,43	-0,01	-0,01	-0,01	0,28	0,25	0,25	0,34
Wright	0,55	1	-0,09	0,52	0,55	0,49	0,49	1	0,88	0,88	-0,02	-0,01	-0,01	0,52	0,46	0,46	0,20
Wstraight	0,48	0,88	-0,08	0,46	0,48	0,43	0,43	0,88	1	0,56	-0,02	-0,01	-0,01	0,46	0,41	0,41	0,18
Wleft	0,48	0,88	-0,08	0,46	0,48	0,43	0,43	0,88	0,56	1	-0,02	-0,01	-0,01	0,46	0,41	0,41	0,18
Nright	-0,02	-0,02	0,19	-0,01	-0,02	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	1	-0,43	-0,43	-0,01	-0,01	-0,01	0,16
Nstraight	-0,01	-0,01	0,09	-0,005	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,43	1	-0,56	-0,005	-0,004	-0,004	-0,03
Nleft	-0,01	-0,01	0,09	-0,005	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,43	-0,56	1	-0,005	-0,004	-0,004	-0,03
Eright	0,32	0,52	-0,06	1	0,32	0,28	0,28	0,52	0,46	0,46	-0,01	-0,005	-0,005	1	0,89	0,89	0,81
Estraight	0,28	0,46	-0,05	0,89	0,28	0,25	0,25	0,46	0,41	0,41	-0,01	-0,004	-0,004	0,89	1	0,60	0,72
Eleft	0,28	0,46	-0,05	0,89	0,28	0,25	0,25	0,46	0,41	0,41	-0,01	-0,004	-0,004	0,89	0,60	1	0,73
Ddkombou	0,21	0,20	0,22	0,81	0,21	0,04	0,34	0,20	0,18	0,18	0,16	-0,03	-0,03	0,81	0,72	0,73	1,00
Srightper	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Sstraightper	-0,0000000092	0,0000003170	-0,0000000477	-0,0000022306	0,0000003819	0,4124791580	-0,4124791580	0,0000021831	0,0000007849	0,0000000830	-0,0000008159	-0,0000013132	-0,0000012986	0,0000001128	0,0000007763	-0,0000001593	-0,31
Sleftper	0,0000010388	0,0000036979	0,0000001444	-0,0000016540	0,0000003017	-0,4124791580	0,4124791580	0,0000003616	0,0000019786	0,0000011503	-0,0000008159	-0,0000003157	-0,0000002905	0,0000000218	0,0000000488	0,0000002536	0,31
Wrightper	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Wstraightper	-0,0000008341	0,0000000377	0,0000000313	-0,0000022771	0,0000006187	0,0000000060	0,0000000060	0,0000007810	0,43	-0,43	-0,0000005609	-0,0000003422	-0,0000003382	0,0000003749	0,0000010819	0,0000000829	0,03
Wleftper	-0,0000008524	0,0000000213	0,0000000622	-0,0000002196	0,0000006149	0,0000006102	0,0000007448	0,0000007912	-0,43	0,43	-0,0000005609	-0,0000000337	-0,0000003436	0,0000003422	0,0000008584	0,0000009559	-0,03
Nrightper	0,0000057528	0,0000104465	-0,0000044265	-0,0000208734	-0,0000292562	-0,0000267662	-0,0000267511	-0,0000280170	-0,0000002394	-0,0000229622	0,98	-0,46	-0,46	-0,0000025546	-0,0000024851	-0,0000024859	0,12
Nstraightper	0,0000092244	-0,0000006814	-0,0000121672	-0,0000059999	0,0000268538	0,0000246710	0,0000222190	-0,0000050942	-0,0000039194	-0,0000037609	-0,45	1	-0,57	-0,0000218087	-0,0000197510	-0,0000193867	-0,05
Nleftper	0,0000096137	0,0000151159	-0,0000072480	0,0000003868	0,0000224346	0,0000194882	0,0000200727	-0,0000062325	-0,0000060899	-0,0000063261	-0,45	-0,57	1	-0,0000208532	-0,0000182510	-0,0000181335	-0,05
Erightper	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Estraightper	-0,0000001115	-0,0000000689	0,0000001178	-0,0000001214	0,0000000783	0,0000009306	0,0000008564	0,0000007062	0,0000008410	0,0000000710	-0,0000005609	0,0000000252	0,0000000272	0,0000000881	0,41	-0,41	-0,02
Eleftper	-0,0000001115	-0,0000000689	0,0000001178	-0,0000001214	0,0000007810	0,0000009868	0,0000009297	0,0000007123	0,0000008392	0,0000007081	-0,0000005609	0,0000000252	0,0000000272	0,0000000881	-0,41	0,41	0,02

Στον πρώτο πίνακα παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ των υπόλοιπων δώδεκα μεταβλητών, δηλαδή των ποσοστών κατανομής σε δεξιόστροφη, ευθεία και αριστερόστροφη κίνηση του συνολικού εισερχόμενου φόρτου από τον κάθε κλάδο. Στον δεύτερο πίνακα παρατίθεται μία σύντομη επεξήγηση των χρωμάτων, που εμφανίζονται σε ορισμένα κελιά των δύο πινάκων των συντελεστών συσχέτισης.

	Srightper	Sstraightper	Sleftper	Wrightper	Wstraightper	Wleftper	Nrightper	Nstraightper	Nleftper	Erightper	Estraightper	Eleftper
Srightper	1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Sstraightper	NA	1	-1	NA	0,0000018794	0,0000018794	-0,0000031517	-0,0000000103	-0,0000009785	NA	0	0
Sleftper	NA	-1	1	NA	0,0000018794	0,0000018794	-0,0000031629	-0,0000009798	-0,0000019492	NA	0	0
Wrightper	NA	NA	NA	1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Wstraightper	NA	0,0000018794	0,0000018794	NA	1	-1	-0,0000000006	-0,0000000052	-0,0000000065	NA	0	0
Wleftper	NA	0,0000018794	0,0000018794	NA	-1	1	-0,0000000008	-0,0000004834	-0,0000000026	NA	0	0
Nrightper	NA	-0,0000031517	-0,0000031629	NA	-0,0000000006	-0,0000000008	1	-0,46	-0,46	NA	-0,0000009225	-0,0000009225
Nstraightper	NA	-0,0000000103	-0,0000009798	NA	-0,0000000052	-0,0000004834	-0,46	1	-0,58	NA	-0,0000000851	-0,0000000851
Nleftper	NA	-0,0000009785	-0,0000019492	NA	-0,0000000065	-0,0000000026	-0,46	-0,58	1	NA	-0,0000007329	-0,0000000851
Erightper	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1	NA	NA
Estraightper	NA	0	0	NA	0	0	-0,0000009225	-0,0000000851	-0,0000007329	NA	1	-1
Eleftper	NA	0	0	NA	0	0	-0,0000009225	-0,0000000851	-0,0000000851	NA	-1	1

	οι ανεξάρτητες μεταβλητές με υψηλή συσχέτιση (|ρ|>0,6) --> αδυναμία ταυτόχρονης χρήσης των συγκεκριμένων ανεξάρτητων μεταβλητών στο ίδιο στατιστικό μοντέλο
	οι ανεξάρτητες μεταβλητές με μέτρια συσχέτιση (0,5=<|ρ|=<0,6) --> οι υπόψη ανεξάρτητες μεταβλητές μπορούν να περιληφθούν συγχρόνως στο ίδιο στατιστικό μοντέλο, εάν κρίνεται απαραίτητο
	οι ανεξάρτητες μεταβλητές με χαμηλη συσχέτιση (|ρ|<0,5)
	οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής Ddkombou με όλες τις ανεξάρτητες
	μηδενικός συντελεστής συσχέτισης, ο οποίος εμφανίστηκε μεταξύ των μεταβλητών Sstraightper, Sleftper, Wstraightper, Wleftper, Estraightper & Eleftper, λόγω του ότι λαμβάνουυν επαναλαμβανόμενες και πανομοιότυπες τιμές και στα 8.883 σενάρια
NA	όταν δεν υπάρχει κανένας συντελεστής συσχέτισης με κάποια μεταβλητή

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Παρακάτω παρατίθεται αναλυτικά ο κώδικας, που αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα του R-Studio για τη στατιστική ανάλυση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

```
options(java.parameters = "-Xmx16g")
##INSTALL PACKAGES
install.packages("XLConnect")
install.packages("XLConnectJars")
install.packages("ggpl")
install.packages("ggthemes")
install.packages("plyr")
install.packages("dplyr")
install.packages("lattice")
install.packages("leaps")
install.packages("GGally")
install.packages("car")
install.packages("lmtest")
install.packages("e1071")
install.packages("plotly")
install.packages("rlang")
install.packages("pscl")
install.packages("pROC")
install.packages("caret")
install.packages("reshape2")
install.packages("leaps")
install.packages("foreign")
install.packages("nnet")
install.packages("visreg")
install.packages("rJava")
install.packages("MLmetrics")


##LOAD PACKAGES
library(XLConnect)
library(XLConnectJars)
library(dplyr) #(for recode)
library(Hmisc) #(for describe)
library(ggplot2)
library(ggthemes)
library(plyr)
library(dplyr)
library(lattice)
library(leaps)
library(GGally)
library(car)
library(lmtest)
library(e1071)
library(plotly)
```

```
library(rlang)
library(pscl)
library(pROC)
library(caret)
library(reshape2)
library(leaps)
library(foreign)
library(nnet)
library(visreg)
library(rJava)
library(MLmetrics)
```

##WORKING DIRECTORY

```
setwd("C:/Users/User/Desktop/3o Meros Ergasias")
getwd()
```

##INSERT DATA FROM EXCEL

```
Data <- readWorksheetFromFile("Synopsh_Apotelesmatwn.xlsx", sheet=1)
str(Data)
names(Data)
```

##CORRELATION TEST BETWEEN ALL VARIABLES (1 response & 28 independent variables)

```
cor(Data,method=c("pearson"))
Pearson_cor=cor(Data,method=c("pearson"))
#Write Pearson_cor into .csv
write.csv(Pearson_cor,"C:/Users/User/Desktop/3o Meros Ergasias/Pearson_Data_1.csv" )
```

##BOXPLOT

```
boxplot_Ddkombou<-boxplot(Data$Ddkombou,ylab="Ddkombou(sec/veh)",
col="lightgreen")
boxplot_Ddkombou
##############################################################################
#########
FortosSB <- Data$FortosSB
FortosWB <- Data$FortosWB
FortosNB <- Data$FortosNB
FortosEB <- Data$FortosEB
Fortoi <- cbind(FortosSB, FortosWB, FortosNB, FortosEB)
boxplot_Fortoi <- boxplot(Fortoi, ylab="Fortoi (veh/h)", col="lightblue")
boxplot_Fortoi
##############################################################################
#########
Sright <- Data$Sright
Sstraight <- Data$Sstraight
Sleft <- Data$Sleft
```

```
movementsSB <- cbind(Sright, Sstraight, Sleft)
boxplot_movementsSB <- boxplot(movementsSB , ylab="Katanomh tou FortosSB (veh/h)",
col="red")
boxplot_movementsSB
##############################################################################
#########
Wright <- Data$Wright
Wstraight <- Data$Wstraight
Wleft <- Data$Wleft
movementsWB <- cbind(Wright, Wstraight, Wleft)
boxplot_movementsWB <- boxplot(movementsWB , ylab="Katanomh tou FortosWB (veh/h)",
col="yellow")
boxplot_movementsWB
##############################################################################
#########
Nright <- Data$Nright
Nstraight <- Data$Nstraight
Nleft <- Data$Nleft
movementsNB <- cbind(Nright, Nstraight, Nleft)
boxplot_movementsNB <- boxplot(movementsNB , ylab="Katanomh tou FortosNB (veh/h)",
col="orange")
boxplot_movementsNB
##############################################################################
#########
Eright <- Data$Eright
Estraight <- Data$Estraight
Eleft <- Data$Eleft
movementsEB <- cbind(Eright, Estraight, Eleft)
boxplot_movementsEB <- boxplot(movementsEB , ylab="Katanomh tou FortosEB (veh/h)",
col="purple")
boxplot_movementsEB
```

##TRAINING & TEST SETS

```
bound <- floor((nrow(Data)/10)*6) #defines % of training and test set
Data <- Data[sample(nrow(Data)), ]
Data.train <- Data[1:bound, ] #defines training set
Data.test <- Data[(bound+1):nrow(Data), ] #defines test set
t.test(Data.train$Ddkombou,Data.test$Ddkombou) #determines if the means of the two sets
are equal
var.test(Data.train$Ddkombou,Data.test$Ddkombou) #determines if the ratio of variances of
the populations is equal to 1


##############################################################################
#####################################

##############################################################################
#####################################
```

```
##MULTIPLE LINEAR REGRESSION
#reg0 with 16 out of 28 independent variables (without the 12 percentages)
reg0 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright +
Sstraight + Sleft + Wright + Wstraight + Wleft + Nright + Nstraight + Nleft + Eright + Estraight
+ Eleft, data= Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg0,scale = "adjr2")
plot(reg0,scale="bic")

##############################################################################
#############################

#reg1 without reg0's Sstaight, Wright, Wleft, Nleft & Eleft (11 independent variables)
reg1 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft +
Wstraight + Nright + Nstraight + Eright + Estraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1,
nvmax=30)
plot(reg1,scale = "adjr2")
plot(reg1,scale="bic")

#reg11 without reg0's Sstaight (15 independent variables)
reg11 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft
+ Wstraight + Wright + Wleft+ Nright + Nstraight + Nleft + Eright + Estraight + Eleft, data=Data,
weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg11,scale = "adjr2")
plot(reg11,scale="bic")


#reg12 without reg0's Sright, Sstraight, Wright, Wleft, Nright, Nstraight, Nleft & Eleft (8
independent variables)
reg12 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft +
Wstraight + Eright + Estraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg12,scale = "adjr2")
plot(reg12,scale="bic")


#reg13 without reg0's Wright tou reg0 (15 independent variables)
reg13 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright +
Sstraight + Sleft + Wstraight + Wleft + Nright + Nstraight +  Nleft + Eright + Estraight + Eleft,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg13,scale = "adjr2")
plot(reg13,scale="bic")


#reg14 without reg0's Wleft (15 independent variables)
reg14 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright +
Sstraight + Sleft + Wright + Wstraight + Nright + Nstraight +  Nleft + Eright + Estraight + Eleft,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg14,scale = "adjr2")
plot(reg14,scale="bic")
```

```
#reg15 without reg0's Nleft (15 independent variables)
reg15 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright +
Sstraight + Sleft + Wright + Wstraight + Wleft + Nright + Nstraight + Eright + Estraight + Eleft,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg15,scale = "adjr2")
plot(reg15,scale="bic")


#reg16 without reg0's Eleft (15 independent variables)
reg16 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright +
Sstraight + Sleft +  Wright + Wstraight + Wleft + Nright + Nstraight + Nleft + Eright + Estraight,
data= Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg16,scale = "adjr2")
plot(reg16,scale="bic")


#reg17 without reg0's Sright, Sstraight, Sleft, Wright, Wleft, Nright, Nstraight, Eright,
#Estraight & Eleft (6 independent variables)
reg17 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Wstraight +
Nleft, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg17,scale = "adjr2")
plot(reg17,scale="bic")

##############################################################################
#############################

#reg2 without reg1's Sright, Sleft & Estraight (8 independent variables)
reg2 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Wstraight +
Nright + Nstraight + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg2,scale = "adjr2")
plot(reg2,scale="bic")

#reg21 without reg1's Estaigh (10 independent variables)
reg21 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft
+ Wstraight +  Nright + Nstraight + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg21,scale = "adjr2")
plot(reg21,scale="bic")

#reg22 without reg11's Wright, Wleft, Nstraight & Nleft (11 independent variables)
reg22 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft
+ Wstraight + Nright + Eright + Estraight + Eleft, data=Data, weights =NULL, nbest=1,
nvmax=30)
plot(reg22,scale = "adjr2")
plot(reg22,scale="bic")


#reg23 without reg12's Estraigh (7 independent variables)
reg23 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft +
Wstraight + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
```

```
plot(reg23,scale = "adjr2")
plot(reg23,scale="bic")

#reg24 without reg13's Sleft, Wleft & Estraight (12 independent variables)
reg24 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright +
Sstraight + Wstraight + Nright + Nstraight + Nleft + Eright + Eleft, data=Data, weights =NULL,
nbest=1, nvmax=30)
plot(reg24,scale = "adjr2")
plot(reg24,scale="bic")

#reg25 without reg14's Nright & Nstraight (13 independent variables)
reg25 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright +
Sstraight + Sleft + Wright + Wstraight + Nleft + Eright + Estraight + Eleft, data=Data, weights
=NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg25,scale = "adjr2")
plot(reg25,scale="bic")

#reg26 without reg15's Sright, Sstraight & Wright (12 independent variables)
reg26 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft +
Wstraight + Wleft + Nright + Nstraight + Eright + Estraight + Eleft, data=Data, weights =NULL,
nbest=1, nvmax=30)
plot(reg26,scale = "adjr2")
plot(reg26,scale="bic")

##############################################################################
#############################

#reg3 without reg2's Eright (7 independent variables)
reg3 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Wstraight +
Nright + Nstraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg3,scale = "adjr2")
plot(reg3,scale="bic")

#reg31 without reg21's Sleft & Eright (8 independent variables)
reg31 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright +
Wstraight + Nright + Nstraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg31,scale = "adjr2")
plot(reg31,scale="bic")

#reg32 without reg21's Eright (9 independent variables)
reg32 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft
+ Wstraight + Nright + Nstraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg32,scale = "adjr2")
plot(reg32,scale="bic")
```

```
#reg33 without reg22's Sright, Sleft & Eleft (8 independent variables)
reg33 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Wstraight +
Nright + Eright + Estraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg33,scale = "adjr2")
plot(reg33,scale="bic")

#reg34 without reg23's Eright (6 independent variables)
reg34 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft +
Wstraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg34,scale = "adjr2")
plot(reg34,scale="bic")

#reg35 without reg23's Wstraight (6 independent variables)
reg35 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft + Eright,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg35,scale = "adjr2")
plot(reg35,scale="bic")

#reg36 without reg21's Sright (9 independent variables)
reg36 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB +] FortosEB + Sleft +
Wstraight + Nright + Nstraight + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg36,scale = "adjr2")
plot(reg36,scale="bic")

#reg37 without reg24's Sright (11 independent variables)
reg37 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sstraight +
Wstraight + Nright + Nstraight + Nleft + Eright + Eleft, data=Data, weights =NULL, nbest=1,
nvmax=30)
plot(reg37,scale = "adjr2")
plot(reg37,scale="bic")

#reg38 without reg25's Sstraight& Eleft (11 independent variables)
reg38 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft
+ Wright + Wstraight + Nleft + Eright + Estraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1,
nvmax=30)
plot(reg38,scale = "adjr2")
plot(reg38,scale="bic")

#reg39 without reg26's Estraight (11 independent variables)
reg39 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft +
Wstraight + Wleft + Nright + Nstraight + Eright + Eleft, data=Data, weights =NULL, nbest=1,
nvmax=30)
plot(reg39,scale = "adjr2")
plot(reg39,scale="bic")
```

```
##############################################################################
#############################
#reg4 without reg3's Nstraight (6 independent variables)
reg4 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Wstraight +
Nright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg4,scale = "adjr2")
plot(reg4,scale="bic")

#reg41 without reg31's Wstraight (7 independent variables)
reg41 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Nright
+ Nstraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg41,scale = "adjr2")
plot(reg41,scale="bic")

#reg42 without reg32's Sleft (8 independent variables)
reg42 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright +
Wstraight + Nright + Nstraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg42,scale = "adjr2")
plot(reg42,scale="bic")

#reg43 without reg32's Wstraight (8 independent variables)
reg43 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft
+ Nright + Nstraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg43,scale = "adjr2")
plot(reg43,scale="bic")

#reg44 without reg33's Wstraight (7 independent variables)
reg44 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Nright + Eright
+ Estraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg44,scale = "adjr2")
plot(reg44,scale="bic")

#reg45 without reg34's Wstraight (5 independent variables)
reg45 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg45,scale = "adjr2")
plot(reg45,scale="bic")

#reg46 without reg35's Eright (5 independent variables)
reg46 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg46,scale = "adjr2")
plot(reg46,scale="bic")
```

```
#reg47 without reg35's FortosNB (5 independent variables)
reg47 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosEB + Sleft + Eright, data=Data,
weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg47,scale = "adjr2")
plot(reg47,scale="bic")

#reg48 without reg35's FortosEB (5 independent variables)
reg48 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + Sleft + Eright, data=Data,
weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg48,scale = "adjr2")
plot(reg48,scale="bic")

#reg49 without reg36's Nstraight (8 independent variables)
reg49 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft +
Wstraight + Nright + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg49,scale = "adjr2")
plot(reg49,scale="bic")

#reg410 without reg32's Sright (8 independent variables)
reg410 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft +
Wstraight + Nright + Nstraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg410,scale = "adjr2")
plot(reg410,scale="bic")

#reg411 without reg37's Eleft (10 independent variables)
reg411 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sstraight +
Wstraight + Nright + Nstraight + Nleft + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg411,scale = "adjr2")
plot(reg411,scale="bic")

#reg412 without reg38's Nleft (10 independent variables)
reg412 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft
+ Wright + Wstraight + Eright + Estraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg412,scale = "adjr2")
plot(reg412,scale="bic")

#reg413 without reg39's Wstraight, Wleft, Nright & Eleft (7 independent variables)
reg413 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft +
Nstraight + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg413,scale = "adjr2")
plot(reg413,scale="bic")
```

```
##############################################################################
#############################
#reg5 without reg4's Wstraight (5 independent variables)
reg5 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Nright,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg5,scale = "adjr2")
plot(reg5,scale="bic")

#reg51 without reg41's Nright (6 independent variables)
reg51 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright +
Nstraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg51,scale = "adjr2")
plot(reg51,scale="bic")

#reg52 without reg43's Sleft (7 independent variables)
reg52 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Nright
+ Nstraight,  data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg52,scale = "adjr2")
plot(reg52,scale="bic")

#reg53 without reg43's Nright (7 independent variables)
reg53 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft
+ Nstraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg53,scale = "adjr2")
plot(reg53,scale="bic")

#reg54 without reg44's Estraight (6 independent variables)
reg54 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Nright +
Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg54,scale = "adjr2")
plot(reg54,scale="bic")

#reg55 without reg45's FortosNB (4 independent variables)
reg55 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosEB + Sleft, data=Data, weights
=NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg55,scale = "adjr2")
plot(reg55,scale="bic")

#reg56 without reg47's FortosWB (4 independent variables)
reg56 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosEB + Sleft + Eright, data=Data, weights
=NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg56,scale = "adjr2")
plot(reg56,scale="bic")
```

```
#reg57 without reg48's FortosNB (4 independent variables)
reg57 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + Sleft + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg57,scale = "adjr2")
plot(reg57,scale="bic")

#reg58 without reg47's FortosEB (4 independent variables)
reg58 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + Sleft + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg58,scale = "adjr2")
plot(reg58,scale="bic")

#reg59 without reg49's Eright (7 independent variables)
reg59 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft + Wstraight + Nright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg59,scale = "adjr2")
plot(reg59,scale="bic")

#reg510 without reg410's Nstraight (7 independent variables)
reg510 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft + Wstraight + Nright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg510,scale = "adjr2")
plot(reg510,scale="bic")

#reg511 without reg411's Nleft (9 independent variables)
reg511 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sstraight + Wstraight + Nright + Nstraight + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg511,scale = "adjr2")
plot(reg511,scale="bic")

#reg512 without reg412's Wright (9 independent variables)
reg512 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft + Wstraight + Eright + Estraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg512,scale = "adjr2")
plot(reg512,scale="bic")

#reg513 without reg413's Nstraight (6 independent variables)
reg513 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg513,scale = "adjr2")
plot(reg513,scale="bic")
```

```
##############################################################################
#############################
#reg6 without reg5's FortosSB (4 independent variables)
reg6 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + FortosEB + Nright, data=Data, weights
=NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg6,scale = "adjr2")
plot(reg6,scale="bic")

#reg61 without reg51's Nstraight (5 independent variables)
reg61 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg61,scale = "adjr2")
plot(reg61,scale="bic")

#reg62 without reg53's Sleft (6 independent variables)
reg62 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright +
Nstraight, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg62,scale = "adjr2")
plot(reg62,scale="bic")

#reg63 without reg53's Nstraight (6 independent variables)
reg63 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg63,scale = "adjr2")
plot(reg63,scale="bic")

#reg64 without reg52's Sright & Nstraight (5 independent variables)
reg64 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Nright,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg64,scale = "adjr2")
plot(reg64,scale="bic")

#reg65 without reg53's Sright & Sleft (5 independent variables)
reg65 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Nstraight,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg65,scale = "adjr2")
plot(reg65,scale="bic")

#reg66 without reg54's FortosEB (5 independent variables)
reg66 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + Nright + Eright,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg66,scale = "adjr2")
plot(reg66,scale="bic")
```

```
#reg67 without reg55's FortosWB (3 independent variables)
reg67 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosEB + Sleft, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
summary(reg67)
plot(reg67,scale = "adjr2")
plot(reg67,scale="bic")

#reg68 without reg56's FortosEB (3 independent variables)
reg68 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + Sleft + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg68,scale = "adjr2")
plot(reg68,scale="bic")

#reg69 without reg56's FortosSB (3 independent variables)
reg69 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosEB + Sleft + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg69,scale = "adjr2")
plot(reg69,scale="bic")

#reg610 without reg57's FortosWB (3 independent variables)
reg610 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + Sleft + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg610,scale = "adjr2")
plot(reg610,scale="bic")

#reg611 without reg59's Wstraight (6 independent variables)
reg611 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft + Nright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg611,scale = "adjr2")
plot(reg611,scale="bic")

#reg612 without reg510's Wstraight (6 independent variables)
reg612 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft + Nright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg612,scale = "adjr2")
plot(reg612,scale="bic")

#reg613 without reg511's Nstraight (8 independent variables)
reg613 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sstraight + Wstraight + Nright + Eright,data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg613,scale = "adjr2")
plot(reg613,scale="bic")
```

```
#reg614 without reg512's Estraight (8 independent variables)
reg614 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft
+ Wstraight + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg614,scale = "adjr2")
plot(reg614,scale="bic")

##############################################################################
#############################

#reg7 without reg6's Nright (3 independent variables)
reg7 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + FortosEB, data=Data, weights =NULL,
nbest=1, nvmax=30)
plot(reg7,scale = "adjr2")
plot(reg7,scale="bic")


#reg71 without reg61's Sright (4 independent variables)
reg71 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB, data=Data,
weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg71,scale = "adjr2")
plot(reg71,scale="bic")


#reg72 without reg63's Sleft (5 independent variables)
reg72 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg72,scale = "adjr2")
plot(reg72,scale="bic")


#reg73 without reg64's FortosSB (4 independent variables)
reg73 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + FortosEB + Nright, data=Data,
weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg73,scale = "adjr2")
plot(reg73,scale="bic")



#reg74 without reg63's FortosSB (5 independent variables)
reg74 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft, data=Data,
weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg74,scale = "adjr2")
plot(reg74,scale="bic")


#reg75 without reg63's FortosWB (5 independent variables)
reg75 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft, data=Data,
weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg75,scale = "adjr2")
plot(reg75,scale="bic")
```

```
#reg76 without reg63's FortosNB (5 independent variables)
reg76 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosEB + Sright + Sleft, data=Data,
weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg76,scale = "adjr2")
plot(reg76,scale="bic")

#reg77 without reg66's FortosSB (4 independent variables)
reg77 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + Nright + Eright, data=Data, weights
=NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg77,scale = "adjr2")
plot(reg77,scale="bic")

#reg78 without reg67's FortosSB (2 independent variables)
reg78 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosEB + Sleft, data=Data, weights =NULL, nbest=1,
nvmax=30)
plot(reg78,scale = "adjr2")
plot(reg78,scale="bic")

#reg79 without reg69's Eright (2 independent variables)
reg79 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosEB + Sleft, data=Data, weights =NULL, nbest=1,
nvmax=30)
plot(reg79,scale = "adjr2")
plot(reg79,scale="bic")

#reg710 without reg611's Nright (5 independent variables)
reg710 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg710,scale = "adjr2")
plot(reg710,scale="bic")

#reg711 without reg612's Nright (5 independent variables)
reg711 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg711,scale = "adjr2")
plot(reg711,scale="bic")

#reg712 without reg613's Eright (7 independent variables)
reg712 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sstraight +
Wstraight + Nright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg712,scale = "adjr2")
plot(reg712,scale="bic")

#reg713 without reg614's Sright (7 independent variables)
reg716 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft +
Wstraight + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
```

```
plot(reg716,scale = "adjr2")
plot(reg716,scale="bic")

##############################################################################
#############################

#reg8 without reg7's FortosWB (2 independent variables)
reg8 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosNB + $FortosEB, data=Data, weights =NULL, nbest=1,
nvmax=30)
plot(reg8,scale = "adjr2")
plot(reg8,scale="bic")


#reg81 without reg71's FortosSB (3 intependent variables)
reg81 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + FortosEB, data=Data, weights
=NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg81,scale = "adjr2")
plot(reg81,scale="bic")


#reg82 without reg74's FortosNB (4 independent variables)
reg82 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosWB + FortosEB + Sright + Sleft, data=Data, weights
=NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg82,scale = "adjr2")
plot(reg82,scale="bic")

#reg83 without reg75's Sleft (4 independent variables)
reg83 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosNB + FortosEB + Sright, data=Data, weights
=NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg83,scale = "adjr2")
plot(reg83,scale="bic")

#reg84 without reg75's FortosNB (4 independent variables)
reg84 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosEB + Sright + Sleft, data=Data, weights
=NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg84,scale = "adjr2")
plot(reg84,scale="bic")

#reg85 withot reg76's Sleft (4 independent variables)
reg85 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosEB + Sright, data=Data,
weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg85,scale = "adjr2")
plot(reg85,scale="bic")
#reg86 without reg76's FortosWB (4 independent variables)
reg86 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosEB + Sright + Sleft, data=Data, weights
=NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg86,scale = "adjr2")
plot(reg86,scale="bic")
```

```
#reg87 without reg77's Nright (3 independent variables)
reg87 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg87,scale = "adjr2")
plot(reg87,scale="bic")


#reg88 without reg710's FortosNB (4 independent variables)
reg88 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosEB + $Sleft, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg88,scale = "adjr2")
plot(reg88,scale="bic")

#reg89 without reg711's FortosNB (4 independent variables)
reg89 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosEB + Sleft, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg89,scale = "adjr2")
plot(reg89,scale="bic")

#reg810 without reg712's Wstraight (6 independent variables)
reg810 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sstraight + Nright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg810,scale = "adjr2")
plot(reg810,scale="bic")


#reg811 without reg713's Wstraight (6 independent variables)
reg811 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg811,scale = "adjr2")
plot(reg811,scale="bic")

##############################################################################
#############################

#reg9 without reg81's FortosWB (2 independent variables)
reg9 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosNB + FortosEB, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg9,scale = "adjr2")
plot(reg9,scale="bic")

#reg91 without reg82's FortosWB (3 independent variables)
reg91 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosEB + Sright + Sleft, data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg91,scale = "adjr2")
plot(reg91,scale="bic")
```

```
#reg92 without reg84's Sleft (3 independent variables)
reg92 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosEB + Sright, data=Data, weights =NULL,
nbest=1, nvmax=30)
plot(reg92,scale = "adjr2")
plot(reg92,scale="bic")

#reg93 without reg85's Sright (3 independent variables)
reg93 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosEB, data=Data, weights =NULL,
nbest=1, nvmax=30)
plot(reg93,scale = "adjr2")
plot(reg93,scale="bic")

#reg94 without reg87's FortosWB  (2 independent variables)
reg94 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosNB + Eright, data=Data, weights =NULL, nbest=1,
nvmax=30)
plot(reg94,scale = "adjr2")
plot(reg94,scale="bic")

#reg95 without reg88's FortosWB (3 independent variables)
reg95 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosEB + Sleft, data=Data, weights =NULL,
nbest=1, nvmax=30)
plot(reg95,scale = "adjr2")
plot(reg95,scale="bic")
#reg96 without reg89's FortosWB (3 independent variables)
reg96 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosEB + Sleft, data=Data, weights =NULL,
nbest=1, nvmax=30)
plot(reg96,scale = "adjr2")
plot(reg96,scale="bic")

#reg97 without reg810's Nright (5 independent variables)
reg97 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sstraight,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg97,scale = "adjr2")
plot(reg97,scale="bic")

#reg98 without reg811's Eright (5 independent variables)
reg98 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft,
data=Data, weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg98,scale = "adjr2")
plot(reg98,scale="bic")

##############################################################################
#############################
```

```
#reg10 without reg93's FortoSB (2 independent variables)
reg10 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosWB + FortosEB, data=Data, weights =NULL, nbest=1,
nvmax=30)
plot(reg10,scale = "adjr2")
plot(reg10,scale="bic")

#reg101 without reg97's FortosNB (4 independent variables)
reg101 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosEB + Sstraight, data=Data,
weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg101,scale = "adjr2")
plot(reg101,scale="bic")

#reg102 without reg98's FortosNB (4 independent variables)
reg102 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosEB + Sleft, data=Data,
weights =NULL, nbest=1, nvmax=30)
plot(reg102,scale = "adjr2")
plot(reg102,scale="bic")

##############################################################################
#############################

#reg11 without reg101's FortosWB (3 independent variables)
reg11 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosEB + Sstraight, data=Data, weights =NULL,
nbest=1, nvmax=30)
plot(reg11,scale = "adjr2")
plot(reg11,scale="bic")


#reg111 without reg102's FortosWB (3 independent variables)
reg111 <- regsubsets(Ddkombou ~ FortosSB + FortosEB + Sleft, data=Data, weights =NULL,
nbest=1, nvmax=30)
plot(reg111,scale = "adjr2")
plot(reg111,scale="bic")

##############################################################################
#############################

##############################################################################
#############################

##LINEAR MODELS
#Reg1 - FortosWB, FortosNB, FortosEB, Sright, Sleft
Reg1 <-lm(Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright + Sleft, data=Data.train)
summary(Reg1)
#############################################################
Reg1_pre <- predict(Reg1, Data.test)
absresiduals1 <- abs(Reg1_pre - Data.test$Ddkombou)
Pe1 <- absresiduals1/Data.test$Ddkombou
MAPE1 <- mean(Pe1)
```

```
MAPE1
#create vector of VIF values
vif(Reg1)
vif_values1 <- vif(Reg1)
sqrt(vif(Reg1))

#Reg2 - FortosSB, FortosWB, FortosNB, FortosEB, Sleft
Reg2 <-lm(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sleft, data=Data.train)
summary(Reg2)
##############################################################
Reg2_pre <- predict(Reg2, Data.test)
absresiduals2 <- abs(Reg2_pre - Data.test$Ddkombou)
Pe2 <- absresiduals2/Data.test$Ddkombou
MAPE2 <- mean(Pe2)
MAPE2
#create vector of VIF values
vif(Reg2)
vif_values2 <- vif(Reg2)
sqrt(vif(Reg2))

#Reg3 - FortosSB, FortosWB, FortosNB, FortosEB, Nstraight
Reg3 <-lm(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Nstraight,
data=Data.train)
summary(Reg3)
  ##############################################################
Reg3_pre <- predict(Reg3, Data.test)
absresiduals3 <- abs(Reg3_pre - Data.test$Ddkombou)
Pe3 <- absresiduals3/Data.test$Ddkombou
MAPE3 <- mean(Pe3)
MAPE3
#create vector of VIF values
vif(Reg3)
vif_values3 <- vif(Reg3)
sqrt(vif(Reg3))

#Reg4 - FortosSB, FortosWB, FortosNB, FortosEB, Sright
Reg4 <-lm(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sright, data=Data.train)
summary(Reg4)
##############################################################
Reg4_pre <- predict(Reg4, Data.test)
absresiduals4 <- abs(Reg4_pre - Data.test$Ddkombou)
Pe4 <- absresiduals4/Data.test$Ddkombou
MAPE4 <- mean(Pe4)
MAPE4
#create vector of VIF values
vif(Reg4)
```

```
vif_values4 <- vif(Reg4)
sqrt(vif(Reg4))

#Reg5 - FortosSB, FortosWB, FortosNB, Sleft, Eright
Reg5 <-lm(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + Sleft + Eright, data=Data.train)
summary(Reg5)
##############################################################
Reg5_pre <- predict(Reg5, Data.test)
absresiduals5 <- abs(Reg5_pre - Data.test$Ddkombou)
Pe5 <- absresiduals5/Data.test$Ddkombou
MAPE5 <- mean(Pe5)
MAPE5
#create vector of VIF values
vif(Reg5)
vif_values5 <- vif(Reg5)
sqrt(vif(Reg5))

#Reg6 - FortosSB, FortosWB, FortosNB, FortosEB, Wstraight
Reg6 <-lm(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Wstraight,
data=Data.train)
summary(Reg6)
##############################################################
Reg6_pre <- predict(Reg6, Data.test)
absresiduals6 <- abs(Reg6_pre - Data.test$Ddkombou)
Pe6 <- absresiduals6/Data.test$Ddkombou
MAPE6 <- mean(Pe6)
MAPE6
#create vector of VIF values
vif(Reg6)
vif_values6 <- vif(Reg6)
sqrt(vif(Reg6))


#Reg7 - FortosSB, FortosWB, FortosNB, FortosEB, Nright
Reg7 <-lm(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Nright, data=Data.train)
summary(Reg7)
##############################################################
Reg7_pre <- predict(Reg7, Data.test)
absresiduals7 <- abs(Reg7_pre - Data.test$Ddkombou)
Pe7 <- absresiduals7/Data.test$Ddkombou
MAPE7 <- mean(Pe7)
MAPE7
#create vector of VIF values
vif(Reg7)
vif_values7 <- vif(Reg7)
sqrt(vif(Reg7))
```

```
#Reg8 - FortosWB, FortosNB, Sstraight, Wstraight, Nleft
Reg8 <-lm(Ddkombou ~ FortosWB + FortosNB + Sstraight + Wstraight + Nleft, data=Data.train)
summary(Reg8)
##############################################################
Reg8_pre <- predict(Reg8, Data.test)
absresiduals8 <- abs(Reg8_pre - Data.test$Ddkombou)
Pe8 <- absresiduals8/Data.test$Ddkombou
MAPE8 <- mean(Pe8)
MAPE8
#create vector of VIF values
vif(Reg8)
vif_values8 <- vif(Reg8)
sqrt(vif(Reg8))

#Reg9 - FortosSB, FortosWB, FortosNB, FortosEB, Sstraight
Reg9 <-lm(Ddkombou ~ FortosSB + FortosWB + FortosNB + FortosEB + Sstraight,
data=Data.train)
summary(Reg9)
##############################################################
Reg9_pre <- predict(Reg9, Data.test)
absresiduals9 <- abs(Reg9_pre - Data.test$Ddkombou)
Pe9 <- absresiduals9/Data.test$Ddkombou
MAPE9 <- mean(Pe9)
MAPE9
#create vector of VIF values
vif(Reg9)
vif_values9 <- vif(Reg9)
sqrt(vif(Reg9))

#Reg10 - FortosSB, FortosNB, Wleft, Nright, Nstraight
Reg10 <-lm(Ddkombou ~ FortosSB + FortosNB + Wleft + Nright + Nstraight, data=Data.train)
summary(Reg10)
##############################################################
Reg10_pre <- predict(Reg10, Data.test)
absresiduals10 <- abs(Reg10_pre - Data.test$Ddkombou)
Pe10 <- absresiduals10/Data.test$Ddkombou
MAPE10 <- mean(Pe10)
MAPE10
#create vector of VIF values
vif(Reg10)
vif_values10 <- vif(Reg10)
sqrt(vif(Reg10))
```

```
#Reg11 - FortosSB, FortosNB, Nright, Nstraight, Nleft
Reg11 <-lm(Ddkombou ~ FortosSB + FortosNB + Nright + Nstraight + Nleft, data=Data.train)
summary(Reg11)
##############################################################
Reg11_pre <- predict(Reg11, Data.test)
absresiduals11 <- abs(Reg11_pre - Data.test$Ddkombou)
Pe11 <- absresiduals11/Data.test$Ddkombou
MAPE11 <- mean(Pe11)
MAPE11
#create vector of VIF values
vif(Reg11)
vif_values11 <- vif(Reg11)
sqrt(vif(Reg11))
```