

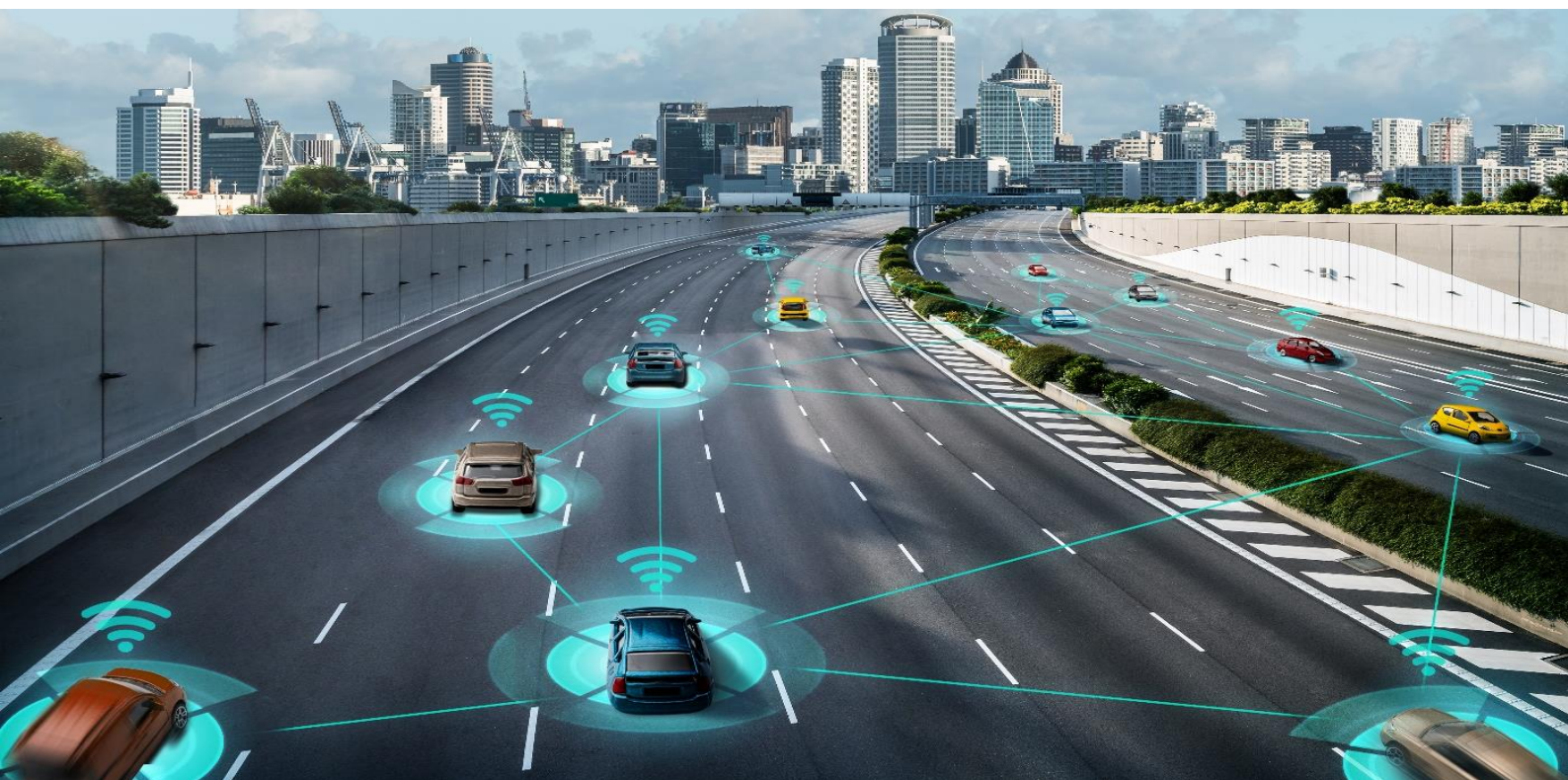


Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

Επίδραση Ευφύων Συστημάτων Μεταφορών στην Ανθεκτικότητα του Αστικού Οδικού Δικτύου



Διπλωματική Εργασία

KANABOY MARIA

Επιβλέπουσα: Ελένη Ι. Βλαχογιάννη,

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής
**Επίδραση Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών στην Ανθεκτικότητα του
Αστικού Οδικού Δικτύου**
Συγγραφέας Διπλωματικής Εργασίας: Μαρία Καναβού
Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ελένη Βλαχογιάννη
Αθήνα, 2022.

National Technical University of Athens
School of Civil Engineering
Department of Transportation Planning and Engineering,
**Impact of Intelligent Transportation Systems to the Resilience of Urban
Road Networks**

Thesis Author: Maria Kanavou
Supervising Professor: Eleni Vlahogianni

Athens, 2022

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 του 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).

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 organisation (L. 5343/1932, art. 202).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας σηματοδοτεί και την ολοκλήρωση των σπουδών μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Ως εκ τούτου, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στη διεκπεραίωσή της αλλά και όσους με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κα Ελένη Βλαχογιάννη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, για το τόσο ενδιαφέρον θέμα που μου εμπιστεύτηκε, καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγηση, και υποστήριξη που μου παρείχε. Επιπρόσθετα οφείλω να την ευχαριστήσω για την καθοδήγηση και τις γενικότερες γνώσεις που μου μετέδωσε κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον κ. Χάρη Χαλκιαδάκη, Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π, για τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε παρά το απαιτητικό του πρόγραμμα. Οι γνώσεις του και οι συμβουλές του ήταν καθοριστικά στοιχεία για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και ιδιαίτερα του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής για τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσαν καθ' όλη την διάρκεια της φοίτησης μου στη σχολή αλλά κυρίως την βοήθεια τους στο να αγαπήσω περισσότερο το αντικείμενο που διάλεξα να σπουδάσω.

Ευχαριστώ πολύ τους φίλους μου για όλες τις στιγμές που περάσαμε μαζί, τις ευχάριστες, τις δυσάρεστες, τις αγωνίες, τις δυσκολίες και τα εμπόδια που ξεπεράσαμε όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ τους γονείς μου για την ψυχική, ηθική και υλική τους συμπαράσταση, καθώς και τα αδέρφια μου που ήταν πάντα δίπλα μου. Τέλος, ιδιαίτερα ευχαριστώ τον παππού μου και την γιαγιά μου, Κωνσταντίνο και Δήμητρα, για την αγάπη, την υπομονή που έδειξαν, και την ηθική και ψυχολογική στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Μαρία Καναβού

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

Επίδραση Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών στην Ανθεκτικότητα του Αστικού Οδικού Δικτύου

Συγγραφέας Διπλωματικής Εργασίας: Καναβού Μαρία

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ελένη Ι. Βλαχογιάννη

Σύνοψη

Η ανθεκτικότητα είναι βασικό στοιχείο για τα δίκτυα μεταφορών, καθώς υποδεικνύει την απόδοση του συστήματος υπό ασυνήθιστες συνθήκες και διαταραχές, όπως τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Η διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του οδικού δικτύου, προϋποθέτει την ανάπτυξη κατάλληλων στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας, με σκοπό την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς του. Τα Συνδεδεμένα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (c-ITS) συντελούν στην αποτελεσματική εφαρμογή τέτοιων στρατηγικών. Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας, και η διερεύνηση της επίδρασής τους, στην ανθεκτικότητα του δικτύου. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκαν σενάρια διαχείρισης κυκλοφορίας που διαφοροποιούνται ως προς τις στρατηγικές c-ITS και τη σύνθεση της κυκλοφορίας και τη συμμετοχή αυτόματων και συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφοριακή ροή. Τα σενάρια αξιολογήθηκαν σε περιβάλλον μικροσκοπικής προσομοίωσης του δικτύου της Αθήνας στο πρόγραμμα προσομοίωσης AIMSUN, που βαθμονομήθηκε με δεδομένα κυκλοφοριακών φόρτων και σηματοδότησης από το Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας της Περιφέρειας Αττικής. Τα αποτελέσματα των διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης της κυκλοφορίας, δείχνουν ότι η εφαρμογή των υπηρεσιών c-ITS οδηγεί σε αποτελεσματικότερη διαχείριση του συγκοινωνιακού δικτύου, βελτιώνοντας τις επιδόσεις του και εξυπηρετώντας μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων κατά τη διάρκεια των διαταραχών.

Λέξεις κλειδιά: Ανθεκτικότητα, Διαχείριση της Κυκλοφορίας, Συνεργατικός και Προσαρμοστικός Έλεγχος Πορείας, αυτόματα οχήματα, Συνδεδεμένα Ευφυή συστήματα Μεταφορών, μικροσκοπική προσομοίωση.

Impact of Cooperative Intelligent Transportation Systems to the Resilience of Urban Road Networks

Thesis Author: Maria Kanavou

Supervising Professor: Eleni Vlahogianni

Abstract

Resilience is a vital element for transportation networks, as it indicates the performance of the system under unusual conditions and disturbances, such as extreme weather events. The assurance of the smooth operation of the road network leads to the development of appropriate traffic management strategies, with the aim of strengthening its resilience. Cooperative Intelligent Transport Systems (c-ITS) contribute to the effective implementation of such strategies. The purpose of this Thesis, is the development of traffic management strategies, and the investigation of their effect on the resilience of the network. Hence, traffic management scenarios were developed that differ in terms of c-ITS strategies and traffic composition and the participation of autonomous and connected vehicles in the traffic flow. For this purpose, a microscopic simulation of the Athens network was developed using the simulation program AIMSUN, which was calibrated with traffic and signaling data from the Traffic Management Center of the Attica Region. The results of the different traffic management scenarios, show that the application of c-ITS services leads to a more efficient management of the transportation network, improving its performance and serving a greater number of vehicles during disturbances.

Keywords: Resilience, Traffic Management, Cooperative Adaptive Cruise Control, automated vehicles, Cooperative Intelligent Transportation Systems, microscopic simulation.

Περίληψη

Η ανθεκτικότητα στις μεταφορές, συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με διαταραχές που προκαλούνται στο δίκτυο, όπως σε περιπτώσεις ύπαρξης ακραίων καιρικών φαινομένων. Η ανάπτυξη στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας, έχει ως στόχο την ομαλή λειτουργία του συστήματος και την απορρόφηση των διαταραχών αυτών. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η διερεύνηση επιρροής των στρατηγικών αυτών, όταν η σύνθεση της κυκλοφορίας, αποτελείται από συμβατικά οχήματα και από διαφορετικά ποσοστά αυτόματων και συνδεδεμένων. Συγκεκριμένα, διερευνάται η μεταβολή κυκλοφοριακών παραμέτρων, όταν τα συμβατικά και αυτόματα οχήματα τεθούν σε διαφορετικά ποσοστά στη σύνθεση της κυκλοφορίας, υπό διαταραχές του συστήματος.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε την στρατηγική της επαναδρομολόγησης πορείας (rerouting), ως μια συχνά εφαρμοζόμενη πολιτική για την αντιμετώπιση των κυκλοφοριακών διαταραχών στο δίκτυο. Επίσης καταγράφηκαν τα μοντέλα με τα οποία αναπαρίσταται η κίνηση, τόσο των συμβατικών, όσο και των αυτόματων οχημάτων, σε μία μικροσκοπική προσομοίωση, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών, τα οποία οδήγησαν στην επιλογή των μοντέλων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Με το τρόπο αυτό επιλέχθηκε το μοντέλο Krauss για τα συμβατικά οχήματα, και το μοντέλο του Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (CACC) για τα αυτόματα οχήματα.

Για τον εντοπισμό των τμημάτων του οδικού δικτύου που υπέστησαν διαταραχές, πάρθηκαν τα δεδομένα 300 φωρατών (για τις ώρες αιχμής) από την κρατική πλατφόρμα (https://data.gov.gr/datasets/road_traffic_attica) για δύο διαφορετικές ημέρες (ημέρα περιστατικού και κανονικών συνθηκών) του Οκτώβρη του 2020. Σε περιβάλλον QGIS, δημιουργήθηκε ένα αρχείο με την διαφορά της ταχύτητας που προέκυψε όταν αφαιρέθηκε η ταχύτητα της ημέρας κανονικών συνθηκών από την ταχύτητα της ημέρας του περιστατικού (extreme speed- normal speed). Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να εντοπιστούν τα τμήματα των οδών που παρουσίασαν μεγάλη μείωση ταχύτητάς, και να κλείσουν στο πλαίσιο της προσομοίωσης.

Στην συνέχεια εκτελέστηκαν μικροσκοπικές προσομοιώσεις στο πρόγραμμα προσομοίωσης Aimsun στο δακτύλιο της Αθήνας. Πιο συγκεκριμένα, αφού εισήχθησαν τα δεδομένα από τους 300 φωρατές στο δίκτυο, ακολούθησε η διαδικασία της βαθμονόμησης και επιλέχθηκε η κατανομή ζήτησης της κυκλοφορίας. Έπειτα αναπτύχθηκαν δώδεκα σενάρια προσομοίωσης, που αφορούσαν την στρατηγική της επαναδρομολόγησης πορείας, για διαφορετικά ποσοστά των οχημάτων (10%, 20%, 30%...100% rerouting). Η αλλαγή πορείας βασίστηκε στην αμέσως πιο σύντομη επιλογή οδικού άξονα, ώστε το όχημα να

φτάσει στον προορισμό του. Τα σενάρια εφαρμόστηκαν σε συμβατικά οχήματα αλλά και σε ποσοστά 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% αυτόματων και συνδεδεμένων (CAV).

Τα αποτελέσματα των σεναρίων έδειξαν ότι η χρήση της στρατηγικής επαναδρομολόγησης πορείας είναι αποδοτική στο δίκτυο, όταν τα ποσοστά των οχημάτων που αλλάζουν πορεία είναι χαμηλά. Ο χρόνος διαδρομής ανά χιλιόμετρο μειώνεται για τα σενάρια με ποσοστό από 10% έως 40% rerouting. Η πτώση του χρόνου διαδρομής ανά χιλιόμετρο ανέρχεται στο 11,4% όταν το ποσοστό των επαναδρομολογούντων οχημάτων είναι 20%. Η είσοδος των αυτόματων και συνδεδεμένων οχημάτων στο δίκτυο μείωσε τους χρόνους διαδρομής και καθυστερήσεων στα προαναφερθέντα σενάρια, όταν τα ποσοστά διείσδυσης τους ήταν υψηλά (70%-100%). Επίσης αυξήθηκε η κυκλοφοριακή ροή του δικτύου, ενώ όπως και στην περίπτωση των συμβατικών οι χαμηλότεροι χρόνοι διαδρομής επιτεύχθηκαν για χαμηλά ποσοστά επαναδρομολόγησης. Τα υψηλά ποσοστά διείσδυσης των αυτόματων οχημάτων στην κυκλοφορία, μειώνουν τις καθυστερήσεις και τον χρόνο διαδρομής ανά χιλιόμετρο, καθώς τα οχήματα αυτά έχουν σημαντικά μικρότερους χρόνους αντίδρασης σε σχέση με τα συμβατικά και αυξημένη επιτάχυνση πορείας.

Ολοκληρώνοντας τη διερεύνηση, προέκυψαν ενδιαφέροντα σημεία για περαιτέρω έρευνα. Η αλληλεπίδραση των οχημάτων με τις φάσεις σηματοδότησης, συνδυαστικά με την στρατηγική επαναδρομολόγησης, θα είχε ως στόχο την μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης και την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου αναμονής των οχημάτων. Τέλος ενδιαφέρον θα είχε η ανάπτυξη αλγορίθμου τυχαίας επιλογής διαδρομών για τα οχήματα που χρειάζονται αλλαγή πορείας, με στόχο την αποφυγή της συμφόρησης που αλλάζει από έναν δρόμο σε έναν άλλο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Η σημασία	1
1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας	3
1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας	3
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	6
2.1 Εισαγωγή	6
2.1.1 Ακραία καιρικά φαινόμενα	6
2.1.2 Επιπτώσεις ΑΚΦ στο οδικό δίκτυο και την κυκλοφοριακή ροή	7
2.2 Η Ανθεκτικότητα οδικού δικτύου στο πλαίσιο των ακραίων καιρικών Φαινομένων (ΑΚΦ)	9
2.2.1 Στρατηγική Διαχείρισης της Κυκλοφορίας. Επαναδρομολόγηση οχημάτων (rerouting)	12
2.3 Τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών	14
2.3.1 Αυτόματα Συνδεδεμένα Οχήματα	14
2.4 Συμπεράσματα βιβλιογραφίας	18
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	19
3.1 Περιγραφή της διαδικασίας	19
3.1.2 Δημιουργία Σεναρίων Προσομοίωσης	20
3.2 Μετρικές Απόδοσης Οδικού Δικτύου	21
3.3 Θεωρητικό υπόβαθρο	21
3.3.1 Μικροσκοπικό Μοντέλο Προσομοίωσης	21
3.4 Στρατηγική Επαναδρομολόγησης	23
3.5 Μοντέλα ακολουθούντων οχημάτων	24
3.5.1 Μοντέλο Krauss	25
3.5.2 Μοντέλο Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας	26
Συνεργατικό και προσαρμοστικό σύστημα πλοήγησης (Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)	27
Λειτουργία Cooperative adaptive cruise control (CACC) συστήματος	28
3.6 Θεμελιώδης Σχέση Κυκλοφοριακής Ροής	29
3.7 Εργαλεία Προσομοίωσης και Προγραμματισμού	32
4. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	34

4.1 Συλλογή δεδομένων	34
4.2 Δημιουργία Αρχείου Προσομοίωσης	38
4.2.1 Βαθμονόμηση δικτύου	39
4.2.2 Τα σενάρια προσομοίωσης	41
4.2.3 Στρατηγική επαναδρομολόγησης πορείας (Rerouting)	42
4.3 Παραμετροποίηση μοντέλων	43
5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	45
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	53
6.1 Εισαγωγή.....	53
6.2 Βασικά Συμπεράσματα	53
Βιβλιογραφία	56

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Εφαρμογές παρακολούθησης καιρικών συνθηκών μέσω των ITS (Πηγή Ibáñez et al., 2018)	2
Εικόνα 2.1: Στρατηγική Επαναδρομολόγησης (Πηγή: Wang et al., 2016)	12
Εικόνα 2.2 : Επίπτωση του ποσοστού διείσδυσης της επαναδρομολόγησης στο μέσο χρόνο ταξιδιού (Πηγή: Wang et al., 2018)	13
Εικόνα 2.3: Ταξινόμηση ευφυών οχημάτων CACC, CAV και AV (Πηγή: Do et al., 2019)...	14
Εικόνα 2.4: Cooperative adaptive cruise control (CACC)(Πηγή Sljivo et al., 2017)	15
Εικόνα 2.5: Χωρητικότητα λωρίδας συμβατικών και αυτόματων συνεργατικών οχημάτων (Πηγή: Olia et al., 2017)	16
Εικόνα 2.6: Χωρητικότητα υπό ποσοστά διείσδυσης CACC στην κυκλοφορία. (Πηγή: Liu et al., 2018)	16
Εικόνα 2.7: Χωρητικότητα υπό χαμηλά ποσοστά διείσδυσης CACC και στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας. (Πηγή: Liu et al., 2018)	17
Εικόνα 2.8: Στιγμιαίοι και αθροιστικοί χρόνοι ταξιδιού για διαφορετικά επίπεδα αυτόματων οχημάτων. (Πηγή: Kesting et al., 2007)	17
Εικόνα 3.1: Γενικό διάγραμμα αναπαράστασης ακολουθούντος οχήματος (Πηγή: Harri, 2010)	25
Εικόνα 3.2 : Συνεργατικό και προσαρμοστικό σύστημα πλοήγησης CACC (Πηγή Lee et al., 2021)	28
Εικόνα 3.3: Σύστημα ροής επικοινωνίας στο CACC σύστημα (Πηγή Wang et al., 2018)..	29
Εικόνα 3.4: Θεμελιώδη Διαγράμματα Κυκλοφοριακής Ροής (Πηγή: Φραντζεσκάκης, Γκόλιας, Πιτσιάβα-Λατινοπούλου, (2009), Κυκλοφοριακή Τεχνική)	31
Εικόνα 4.1 Δακτύλιος Αθήνας	34
Εικόνα 4.2: Απόσπασμα δεδομένων που αντλήθηκαν από κρατική πλατφόρμα	35
Εικόνα 4.3: Οι φωρατές κυκλοφορίας σε περιβάλλον QGIS.....	36
Εικόνα 4.4: Οπτικοποίηση διαφοράς ταχυτήτων σε περιβάλλον QGIS.....	37

Εικόνα 4.5: Το μοντέλο του οδικού δικτύου της Αττικής σε περιβάλλον Aimsun.Next ...	38
Εικόνα 4.6: Περιοχής Μελέτης σε περιβάλλον Aimsun.Next.....	39
Εικόνα 4.7: Πίνακας προορισμού (OD matrix).....	40
Εικόνα 4.8: Μεταφορά σε υποδίκτυο (traversal)	40
Εικόνα 4.9: Στιγμιότυπο από το περιβάλλον του Aimsun ενώ εκτελείται το σενάριο	41
Εικόνα 5.1: Στιγμιότυπο στρατηγικής Επαναδρομολόγησης του περιβάλλοντος Aimsun.Next.....	45
Εικόνα 5.2 Στιγμιότυπα αποτελεσμάτων μία εκ των προσομοιώσεων σε περιβάλλον Aimsun.Next	
Εικόνα 7: Στιγμιότυπο στρατηγικής Επαναδρομολόγησης του περιβάλλοντος Aimsun.Next.....	45
Εικόνα 5.2 Στιγμιότυπα αποτελεσμάτων μία εκ των προσομοιώσεων σε περιβάλλον Aimsun.Next.....	46
Εικόνα 5.2 Στιγμιότυπα αποτελεσμάτων μία εκ των προσομοιώσεων σε περιβάλλον Aimsun.Next.....	46

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Επιπτώσεις πλημμύρας στην κυκλοφοριακή ροή και στην ταχύτητα	8
Πίνακας 2.2 : Επιρροή της βροχής στην ταχύτητα.....	9
Πίνακας 2.3: Ορισμός της Ανθεκτικότητας. Πηγή Gonçaves et al., 2020	10
Πίνακας 2.4: Χαρακτηριστικά Ανθεκτικότητας Αστικών Συγκοινωνιών. Πηγή Gonçaves et al., 2020.....	11
Πίνακας 3.1: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μακροσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης.....	22
Πίνακας 3.2: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μικροσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης.....	22
Πίνακας 3.3: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μεσοσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης.....	23
Πίνακας 4.1: Αρτηρίες που παρουσίασαν την μέγιστη μείωση ταχύτητας	37
Πίνακας 4.2: Σενάρια προσομοίωσης για συμβατικά οχήματα	42
Πίνακας 4.3: Σενάρια προσομοίωσης για αυτόματα και συνδεδεμένα οχήματα CAVs ...	43
Πίνακας 4.4: Παράμετροι Μοντέλου Krauss	43
Πίνακας 4.5: Παράμετροι Μοντέλου CACC	44

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.1: Πορεία Διπλωματικής Εργασίας.....	3
Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα μεθοδολογικής προσέγγισης.....	19
Διάγραμμα 3.2: Διάγραμμα αναδρομολόγησης. (Πηγή Stolfi et al., 2014.).....	24
Διάγραμμα 5.1: Χρόνος καθυστέρησης ανά σενάριο επαναδρομολόγησης συμβατικών οχημάτων.....	47
Διάγραμμα 5.2: Χρόνος καθυστέρησης ανά σενάριο επαναδρομολόγησης 100% συμβατικών οχημάτων	48

Διάγραμμα 5.3 Χρόνος καθυστέρησης ανά Σενάριο μεταξύ 100% συμβατικών και 100% αυτόματων οχημάτων	49
Διάγραμμα 5.4: Χρόνος ταξιδιού ημέρας συμβάντος σε σχέση με το ποσοστό των αυτόματων (CAVs) οχημάτων στην κυκλοφορία	50
Διάγραμμα 5.5 : Κυκλοφοριακός φόρτος ημέρας συμβάντος σε σχέση με το ποσοστό διείσδυσης των αυτόματων και συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία	51
Διάγραμμα 5.6: Χρόνος ταξιδιού για όλα τα ποσοστά επαναδρομολόγησης σε σχέση με το ποσοστό αυτομάτων και συμβατικών οχημάτων στο δίκτυο	52

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η σημασία

Οι μεταφορές αποτελούν τομέα ζωτικής σημασίας μιας κοινωνίας, αφού συνεισφέρουν τόσο στην εξυπηρέτηση των πολιτών καθημερινά όσο και στην οικονομία. Ο ρυθμός ανάπτυξης των μητροπόλεων κάθε χώρας είναι συνεχώς αυξανόμενος, με αποτέλεσμα να πολλαπλασιάζονται οι ανάγκες των πολιτών για ασφαλή και γρήγορη μετακίνηση.

Η ανθεκτικότητα είναι βασικό στοιχείο για τα δίκτυα μεταφορών, καθώς επιτρέπει τον ποσοτικό προσδιορισμό της συμπεριφοράς τους υπό διαταραχές, όπως τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Η επίδραση της κακοκαιρίας στην κυκλοφορία έχει ως αποτέλεσμα σημαντική συμφόρηση και καθυστέρηση λόγω μειωμένων υπηρεσιών, μειωμένη αξιοπιστία ταξιδιού και μεγαλύτερο κίνδυνος ατυχήματος. Σύμφωνα με τους (Radović & Iglesias, 2019) τα ακραία καιρικά φαινόμενα (ΑΚΦ) είναι μερικές από τις πιο κοινές διαταραχές τα τελευταία χρόνια, καθώς ο καιρός γίνεται ακόμη πιο απρόβλεπτος παγκοσμίως. Επίσης οι επιπτώσεις τους είναι ακόμη πιο ορατές λόγω της συνεχώς αυξανόμενης συχνότητας που συμβαίνουν τέτοιες διαταραχές. Είναι προφανές λοιπόν, ότι όλα τα συστήματα που διαπερνούν τη λειτουργία των σύγχρονων πόλεων, συμπεριλαμβανομένων των συγκοινωνιακών δικτύων, αντιμετωπίζουν τις επιπτώσεις τέτοιων διαταραχών. Τα ΑΚΦ οδηγούν σε διακοπές στη λειτουργία των δικτύων μεταφορών. Τα τρία κύρια στοιχεία/μεταβλητές των συστημάτων μεταφοράς που επηρεάζονται από τα ΑΚΦ είναι: i) η ζήτηση μεταφορών, ii) η ασφάλεια και iii) η κυκλοφοριακή ροή.

Λόγω των σημαντικών επιπτώσεων των ΑΚΦ στα δίκτυα οδικών μεταφορών, είναι καίριο να εξεταστούν κατάλληλες στρατηγικές διαχείρισης της κυκλοφορίας, που δύναται να εφαρμοστούν προκειμένου να μετριαστούν οι επιδράσεις των διαταραχών αυτών.

Συνδυαστικά με τις στρατηγικές διαχείρισης της κυκλοφορίας στα συμβατικά οχήματα εντάσσονται τα αυτόματα και συνδεδεμένα οχήματα (CAVs). Τα Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (Intelligent Transportation Systems ITS), τα οποία ως στόχο έχουν την ανάδειξη της δυναμικής των μεταφορών, φέρνουν στο προσκήνιο την καινοτομία του αυτόματου και του συνδεδεμένου οχήματος. Τα οχήματα αυτά παρέχουν την δυνατότητα ελέγχου της πορείας του οχήματος, μέσω της επικοινωνίας με άλλα οχήματα και με την υποδομή.

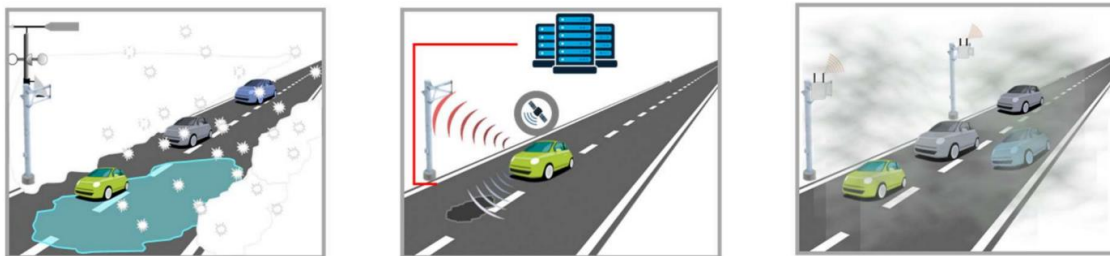
Σε περιπτώσεις ΑΚΦ, όπως έντονη βροχόπτωση οι εφαρμογές των ITS μπορούν να προβούν σε μετρήσεις και να αποστείλουν προειδοποιητικά/ενημερωτικά

μηνύματα (VMS). Οι εφαρμογές πρόβλεψης καιρού βασίζονται στην επιτήρηση, την παρακολούθηση και την πρόβλεψη του καιρού και τις συνθήκες του οδοστρώματος για την εφαρμογή των κατάλληλων διαχειριστικών ενεργειών που βελτιώνουν την οδική εμπειρία και μετριασμό των επιπτώσεων τυχόν δυσμενών συνθηκών. Επίσης χρησιμοποιούν προηγμένες εφαρμογές συστήματος πληροφοριών καιρού με χρησιμότητα τόσο στο ταξίδι όσο και στον προγραμματισμό του.

Τα συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα μπορούν να μειώσουν αισθητά τον χρόνο διαδρομής και γι' αυτό το λόγο η πλειοψηφία των σύγχρονων πόλεων, στις οποίες ο πληθυσμός αυξάνεται ραγδαία, κάνουν σημαντικές προσπάθειες για την γρήγορη ενσωμάτωση τέτοιων οχημάτων στην κυκλοφορία. Ως εκ τούτου είναι ιδιαίτερα σημαντική η έρευνα για να αξιολογηθεί το αντίκτυπο της ενσωμάτωσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, υπό ακραία καιρικά φαινόμενα (Εικόνα 1.1). Σύμφωνα με τους Agarwal et al. (2005) και Zang et al. (2005) η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των δυσμενών καιρικών συνθηκών στο δίκτυο αποτελούσε βασικό στοιχείο της ανάπτυξης των ITS.

Πρωτογενής στόχος της ενσωμάτωσης αυτόματων και συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία είναι (Aria et al., 2016):

- ❖ Διασφάλιση και η βελτίωση της ασφάλειας
- ❖ Μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης
- ❖ Ελάττωση των εκπομπών ρύπων
- ❖ Βελτίωση της κυκλοφοριακής ροής



Εικόνα 1.1: Εφαρμογές παρακολούθησης καιρικών συνθηκών μέσω των ITS (Πηγή Ibáñez et al., 2018)

1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, είναι η διερεύνηση της επιρροής των στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας στην ανθεκτικότητα του οδικού δικτύου της Αθήνας.

Η ανθεκτικότητα είναι ένα χαρακτηριστικό που υποδεικνύει την απόδοση του συστήματος υπό ασυνήθιστες συνθήκες, την ταχύτητα ανάκτησής του και το μέγεθος της εξωτερικής βοήθειας που απαιτείται για την αποκατάσταση στην αρχική του λειτουργική κατάσταση. Οι μεταβλητές απόδοσης που λαμβάνονται υπόψιν είναι ο χρόνος διαδρομής, η χωρητικότητα, η απόσταση διαδρομής, το κόστος διαδρομής. Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκε η περιοχή του δακτυλίου της Αθήνας και δεδομένα κυκλοφοριακών φόρτων για την δημιουργία μίας μικροσκοπικής προσομοίωσης σε περιβάλλον AIMSUN. Το δίκτυο κωδικοποιείται και βαθμονομείται με πραγματικές μετρήσεις κυκλοφορίας και αναπτύσσονται σενάρια στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας. Με κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης προέκυψαν οι τιμές των επιθυμητών μεγεθών, οδηγώντας στα τελικά συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα βασίζονται στην αξιολόγηση των τιμών των κυκλοφορικών μεγεθών, όπως ο ρυθμός ροής (flow), η κατάληψη (occupancy), η μέση ταχύτητα (average speed) και ο χρόνος διαδρομής ανά χιλιόμετρο (travel time per kilometer) ανά σενάριο προσομοίωσης.

1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Τα κεφάλαια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι έξι και η πορεία τους απεικονίζεται στο Διάγραμμα 1.



Διάγραμμα 1.1: Πορεία Διπλωματικής Εργασίας

Κεφάλαιο 1

Το πρώτο κεφάλαιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αποτελεί την εισαγωγή. Αναφέρονται οι στόχοι των Στρατηγικών Διαχείρισης Κυκλοφορίας, οι οποίοι βασίζονται στην βελτίωση και την ανθεκτικότητα των οδικών μεταφορών κάτω από ακραία καιρικά φαινόμενα. Η υλοποίηση τους αφορά τόσο συμβατικά όσο και αυτόματα και συνδεδεμένα οχήματα. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο στόχος της εργασίας και αναφέρονται τα μεγέθη που θα τον υλοποιήσουν.

Κεφάλαιο 2

Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Εκεί, παρουσιάζονται οι επιπτώσεις των ακραίων καιρικών φαινομένων στην κυκλοφορία, στρατηγικές διαχείρισης περιστατικών καθώς και ιδιότητες του αυτόματου και συνδεδεμένου οχήματος. Παρουσιάζονται επίσης, τα μοντέλα με τα οποία προσομοιάζεται η κίνηση των συμβατικών και των αυτόματων οχημάτων.

Κεφάλαιο 3

Αποτελεί τη μεθοδολογική προσέγγιση. Σε αυτό, παρουσιάζεται η μεθοδολογία με την οποία διερευνήθηκε η επιρροή των στρατηγικών διαχείρισης κυκλοφορίας στο οδικό δίκτυο της Αθήνας και το θεωρητικό υπόβαθρο, με βάση το οποίο εφαρμόστηκε η επιλεχθείσα μέθοδος.

Κεφάλαιο 4

Αναφέρεται στη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων. Σε αυτό, παρουσιάζονται οι πηγές των δεδομένων του δικτύου, των κυκλοφοριακών φόρτων και η περιγραφή των σεναρίων που καταστρώθηκαν ώστε να εισαχθούν στο λογισμικό AIMSUN.

Κεφάλαιο 5

Αφορά την ανάλυση και τα αποτελέσματα της Διπλωματικής Εργασίας. Περιγράφονται εκτενώς τα χαρακτηριστικά του λογισμικού προσομοίωσης και της κυκλοφοριακής ζήτησης, της βαθμονόμησης και της παραμετροποίησης των μοντέλων. Τέλος, αναλύονται τα παράγωγα της προσομοίωσης, η βάση δεδομένων και τα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 6

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της Διπλωματικής Εργασίας καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, οι οποίες

προέκυψαν κυρίως από τις δυσκολίες που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια υλοποίησής της.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Οι καιρικές καταστροφές αποτελούσαν ανέκαθεν μείζον ζήτημα της κοινωνίας λόγω των επιπτώσεών τους στην ανθρώπινη ζωή και στις δραστηριότητες. Τυφώνες, πλημμύρες, σεισμοί και άλλα περιστατικά, μπορεί να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές σε υποδομές, απώλεια ζωών και διακοπή της λειτουργίας πολλών δραστηριοτήτων (Konstantinidou et al. 2014). Το αντίκτυπο αυτών των καταστροφών έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια έχοντας επιπτώσεις στην κοινωνία και την οικονομία. Τα δίκτυα μεταφορών έχουν κρίσιμο ρόλο, στις καιρικές καταστροφές, καθώς είναι μέσο εκκένωσης, απόκρισης έκτακτης ανάγκης, παροχής βοήθειας κλπ. Το δίκτυο μεταφορών είναι το μοναδικό μέσο για την εξασφάλιση πρόσβασης σε πληγείσες περιοχές. Τέλος οι οδικές υποδομές είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε καταστροφές και επομένως η χωρητικότητα και η λειτουργικότητά τους θα μειώνονται σημαντικά (Konstantinidou et al. 2014).

2.1.1 Ακραία καιρικά φαινόμενα

Τα Ακραία Καιρικά Φαινόμενα (ΑΚΦ) αποτελούν μία από τις πιο κοινές διαταραχές τα τελευταία χρόνια, καθώς ο καιρός γίνεται ακόμη πιο απρόβλεπτος παγκοσμίως (Radonić and Iglesias, 2019). Τέτοια συμβάντα συχνά εμποδίζουν τη λειτουργία και τη λειτουργικότητά του δικτύου καθιστώντας το ευάλωτο (Stamos et al., 2015).

Οι πλημμύρες κατατάσσονται στους πιο επικίνδυνους φυσικούς κινδύνους, καθώς επηρεάζουν άμεσα την ανάπτυξη μιας περιοχής και κατ' επέκταση την ανθρώπινη ζωή. Παγκοσμίως τα γεγονότα που σχετίζονται με τις πλημμύρες έχουν προκαλέσει το μεγαλύτερο αριθμό θανάτων και υλικών καταστροφών (CEOS 2003). Συγκεκριμένα, οι πλημμύρες ήταν η μεγαλύτερη φυσική καταστροφή στις ΗΠΑ τον 20^ο αιώνα τόσο για τις ανθρώπινες ζωές όσο και για τις υλικές καταστροφές (Perry, 2000). Οι Ashley και Ashley (2008) υπολόγισαν ότι το ποσοστό 63% όλων των θανάτων που προκαλούνται από πλημμύρες στις ΗΠΑ συγκρίνοντας τα ευρήματα των Maples και Tienfenbacher (2009) σχετικά με την περιοχή του Τέξας, δείχνοντας μια αύξηση των θανάτων που σχετίζονται με οχήματα. Επιπλέον οι Malilay, Rullan και Noji (1994) βρήκαν ότι το 87% των αποθανόντων από τις ξαφνικές πλημμύρες του 1992 στο Πουέρτο Ρίκο ήταν επιβάτες οχημάτων. Ο Rappaport (2000) υποστήριξε ότι τουλάχιστον το 23% όλων των απωλειών ζωής που σχετίζεται με τους τροπικούς κυκλώνες του Ατλαντικού στις Ηνωμένες Πολιτείες, αποδίδεται σε άτομα που πεθαίνουν στην

προσπάθειά τους να εγκαταλείψουν τα οχήματά τους. Οι Jonkman και Kelman (2005) έδειξαν ότι το 38,5% του συνόλου των 247 θανάτων από πλημμύρες στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες αφορούσαν οχήματα. Τα στατιστικά στοιχεία δείχνουν ότι οι συνολικές απαιτήσεις για ασφάλεια κατά της πλημμύρας ήταν κατά μέσο όρο πάνω από 1,9 δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως, από το 2006 έως το 2015 (NFIP Statistics, 2016). Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να προκαλέσει περισσότερες πλημμύρες καθώς τα φαινόμενα βροχοπτώσεων αναμένεται να γίνουν πιο συχνά (Melillo et al., 2014).

Συνεπώς οι πλημμύρες στις αστικές περιοχές γίνονται όλο και πιο σημαντικό ζήτημα, καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται και αυτό έχει αντίκτυπο στις υποδομές. Οι περισσότερες χώρες της Μεσογείου όπως η Ελλάδα (Diakakis et al., 2012), η Ιταλία (Salvati et al., 2010) και η Ισπανία (Barriendos and Rodrigo, 2006; Llasat et al., 2010α) παρουσιάζουν υψηλό αριθμό καταγραφών πλημμυρικών φαινομένων που είναι αιτία σημαντικού αριθμού θανάτων και αξιοσημείωτων οικονομικών απωλειών. (Barredo, 2007). Συγκεκριμένα στην Αθήνα στις 24 Οκτωβρίου 2014, μια μεγάλης έντασης καταιγίδα εκδηλώθηκε στα δυτικά προάστια της Αθήνας. Το αποστραγγιστικό και αποχετευτικό δίκτυο υπερχείλισαν, προκαλώντας χείμαρρους κατά μήκος του οδικού άξονα, κατακλύζοντας οικίες και επιχειρήσεις, παρασύροντας οχήματα, τραυματίζοντας ανθρώπους και δημιουργώντας εκτεταμένα προβλήματα στο δίκτυο μεταφορών. Αρκετές περιοχές των δυτικών προαστίων, κυρίως σε Ίλιον, Μενίδι, Περιστέρι, Αχαρναί, Κορυδαλλός και Πειραιάς, παρέμειναν πλημμυρισμένες για αρκετές ώρες. Η έκταση που καλύφθηκε με νερό κατά τη διάρκεια του φαινομένου υπολογίστηκε στα 4.9 km^2 ενώ το μέγιστο βάθος που καταγράφηκε φτάνει τα 170 cm (Diakakis et al., 2016).

Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των καταστροφών σχετίζονται με τα συγκοινωνιακά δίκτυα. Ειδικότερα, οι Diakakis και Deligiannakis (2013) αναφέρουν ότι, στην Ελλάδα, από το 1970 έως το 2010 το 39,47% των θυμάτων από πλημμύρες (60 από τους 151 νεκρούς) οφείλεται στη χρήση του οδικού δικτύου κατά τη διάρκεια της εκδήλωσής του.

2.1.2 Επιπτώσεις ΑΚΦ στο οδικό δίκτυο και την κυκλοφοριακή ροή

Τα ΑΚΦ μειώνουν την χωρητικότητα του οδοστρώματος, την κυκλοφοριακή ροή και αυξάνουν την ολισθηρότητα. Επίσης επιτάσσουν μείωση της ταχύτητας το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κυκλοφορικού όγκου του δικτύου και των καθυστερήσεων. Επιπρόσθετα αυξάνεται ο κίνδυνος σύγκρουσης ενώ πολλά οδικά δίκτυα ρίχνουν κατακόρυφα το επίπεδο εξυπηρέτησης τους (Pisano et al., 2014). Σε κακές οδικές καιρικές συνθήκες, ο όγκος της κυκλοφοριακής ροής μπορεί να μειωθεί από έξι έως 30 τοις εκατό, ανάλογα με την ώρα της ημέρας

(Goodwin et al., 2002). Μία έρευνα των καιρικών επιπτώσεων σε αυτοκινητόδρομο του Τέξας έδειξε ότι η βροχή μείωσε τη χωρητικότητα κατά 14 έως 19 τοις εκατό (Gordon et al., 1996). Όλες οι μορφές βροχοπτώσεων μπορούν να επηρεάσουν τις κυκλοφοριακές λειτουργίες. Εκτός από τη μείωση της πρόσφυσης του οχήματος, η έντονη βροχή ή το χιόνι μπορεί να μειώσει την ορατότητα και να προκαλέσει τους οδηγούς την ανάγκη για μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των οχημάτων, μείωση ρυθμού επιτάχυνσης και μείωση των ταχυτήτων του αυτοκινητόδρομου από 16 έως 40 τοις εκατό. Η καθυστέρηση του χρόνου ταξιδιού σε διαδρομές με σηματοδότηση μπορεί να αυξηθεί κατά 11 έως 50, ποσοστό ανάλογα με τη σοβαρότητα των καιρικών φαινομένων (Goodwin, 2002). Τέλος αναλύσεις του χρόνου καθυστέρησης διαδρομής σε αυτοκινητόδρομους της Ουάσιγκτον, έδειξε ότι ο μέσος χρόνος διαδρομής εκτός αιχμής αυξήθηκε κατά 14 τοις εκατό λόγω βροχόπτωσης. Μία πιο λεπτομερής ανάλυση χρησιμοποιώντας δεδομένα ραντάρ Doppler έδειξε ότι, κατά τις περιόδους αιχμής, ο χρόνος ταξιδιού αυξάνεται κατά περίπου 24 τοις εκατό με τη βροχόπτωση (Shah et al., 2003). Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας 2.1, που παρουσιάζει σημαντικές επιπτώσεις της πλημμύρας.

Πίνακας 2.1: Επιπτώσεις πλημμύρας στην κυκλοφοριακή ροή και στην ταχύτητα

Πηγή	Επιπτώσεις στην ροή	Επιπτώσεις στην ταχύτητα
Ibrahim & Hall, 1994	10% - 20% ↓	10 km/h ↓
Brilon & Ponzlet, 1996	8% ↓	-
Maze, Agarwal, & Burchett, 2006	22% ↓	6% ↓
Koetse & Rietveld, 2009	-	25% ↓
HCM 2010 : Highway Capacity Manual	-	32 km/h ↓
Skabardonis, Kopelias, & Papadimitriou, 2013	10% ↓	-
Mitsakis et al., 2014a	5% ↓	5.6% ↓
Goodwin et al., 2002	6%-30% ↓	16%-40% ↓
Martin et al., 2000	-	10% ↓
Andrey et al., 2003	25% ↓	-

Agarwal et al. 2005	-	7%↓
---------------------	---	-----

Επιπροσθέτως παρουσιάζεται ο Πίνακας 2.2, όπου και αναγράφονται οι μετρήσεις του νερού της βροχής (mm), και οι ταχύτητες που αναπτύχθηκαν σε σχέση με αυτό (Pregnoiato et al.,2017).

Πίνακας 2.2 : Επιρροή της βροχής στην ταχύτητα

Πηγή	Βάθος νερού(mm)	Ταχύτητα οχήματος (Km/m)
Morris et al. (2011) Chung (2012)	0	88
Gallaway et al. (1979)	10	77
Ong and Fwa (2008)	87	40
Galatioto et al. (2014)	189	24
EVSTF (2015)	200	16
English (2016)	230	7
Boyce (2012)	250	3
Gissing et al. (2016) Greenflag.com (2016) Pyatkova et al. (2015) Yin et al. (2016)	300	0

2.2 Η Ανθεκτικότητα οδικού δικτύου στο πλαίσιο των ακραίων καιρικών Φαινομένων (ΑΚΦ)

Η ανθεκτικότητα ορίζεται από την Εθνική Ακαδημία Επιστημών (Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας, 2012) και την Προεδρική Πολιτική Οδηγία 21 (Ομπάμα, 2013) ως η ικανότητα προετοιμασίας, απορρόφησης, ανάκαμψης και προσαρμογής σε διαταραχές. Ωστόσο, ενώ η ανθεκτικότητα των μεταφορών έχει

αποτελέσει αντικείμενο πολλαπλών μελετών, αυτές οι προσπάθειες δεν έχουν ακόμη αποδώσει μια σαφή και συμφωνημένη μέθοδο για τον ορισμό και τη μέτρηση της ανθεκτικότητας στις μεταφορές. Οι προσπάθειες για την ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας έχουν παρεμποδιστεί από τη δυσκολία της μοντελοποίησης πολύπλοκων συστημάτων μεταφοράς. Ωστόσο, ενώ η ανθεκτικότητα των μεταφορών έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλαπλών μελετών, αυτές οι προσπάθειες δεν έχουν ακόμη αποδώσει μια σαφή μέθοδο για τον ορισμό και τη μέτρηση της ανθεκτικότητας στις μεταφορές. Οι προσπάθειες για την ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας έχουν παρεμποδιστεί από τη δυσκολία της μοντελοποίησης πολύπλοκων συστημάτων μεταφοράς. Οι υπάρχουσες μέθοδοι ανθεκτικότητας είναι είτε ποιοτικές είτε εξειδικευμένες για κάποια δεδομένα, και συχνά απαιτούν συγκεκριμένες γνώσεις συστήματος (Hughes and Healy, 2014). Η ανθεκτικότητα είναι ένας όρος που σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τις διαταραχές που προκαλούνται στα δίκτυα μεταφορών, όπως αυτές που προκαλούνται από τα ΑΚΦ. Όπως αναφέρθηκε η ανθεκτικότητα δεν είναι ένας εύκολα εξεταζόμενος όρος (Wan et al., 2018, Zhou, Wang, & Yang, 2019), και αυτό οφείλεται κυρίως στην ποικιλία των μετρήσεων που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα που υπάρχει στη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, η προσαρμοστικότητα, η ετοιμότητα, η ευπάθεια και η κρισιμότητα είναι μερικές από τις εν λόγω μετρήσεις που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα.

Πίνακας 2.3: Ορισμός της Ανθεκτικότητας. Πηγή Gonçalves et al., 2020

Ορισμός της Ανθεκτικότητας στο Σύστημα Μεταφορών		
Ορισμός	Research area	Συγγραφείς
Η ανθεκτικότητα είναι ένα χαρακτηριστικό που υποδεικνύει την απόδοση του συστήματος υπό ασυνήθιστες συνθήκες, την ταχύτητα ανάκτησής του και το μέγεθος της εξωτερικής βοήθειας που απαιτείται για την αποκατάσταση στην αρχική του λειτουργική κατάσταση	Transportation Systems	(Murray-Tuite, 2006, p.1398)
Η ανθεκτικότητα ορίζεται ως η ικανότητα του συστήματος να απορροφά τις συνέπειες των διαταραχών, για τη μείωση των επιπτώσεων των διακοπών στο δίκτυο, και διατήρηση της εμπορευματικής κινητικότητας	Freight Transportation Systems	(Ta et al., 2009, p.21)
Η ανθεκτικότητα ορίζεται ως η ζήτηση που μπορεί να καλυφθεί μετά την καταστροφή	Freight Transportation Systems	(Miller-Hooks et al., 2012)

Ο ορισμός της ανθεκτικότητας... είναι η ικανότητα ενός δικτύου μεταφορών να απορροφά γεγονότα διαταραχών, και να επιστρέψει σε επίπεδο εξυπηρέτησης ίσο ή μεγαλύτερο από εκείνο πριν από τη διακοπή, εντός εύλογου χρονικού διαστήματος.	Transportation Infrastructures	(Freckleton et al., 2012, p.110)
Η ανθεκτικότητα είναι η ταχύτητα με την οποία ένα σύστημα επιστρέφει στην ισορροπία μετά από μια διαταραχή.	Railway Transportation Systems	(D'Lima and Medda, 2015, p.38)

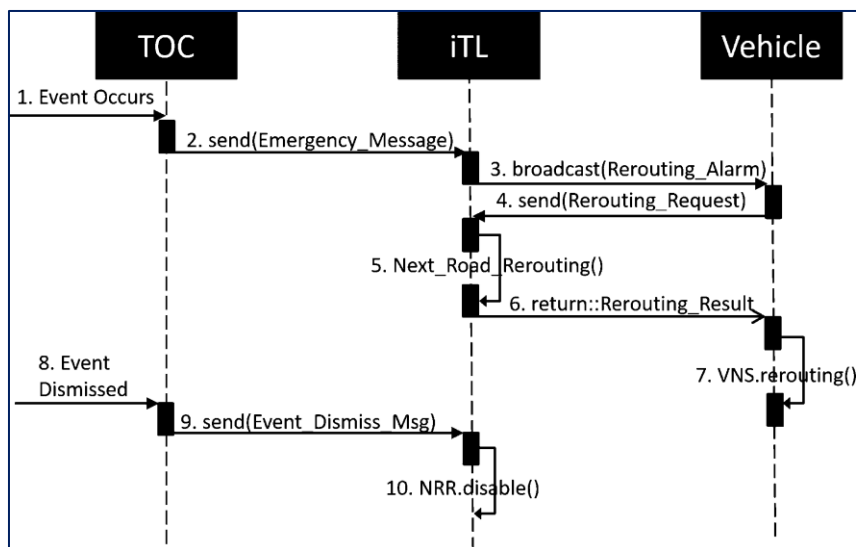
Υπάρχουν πολλά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα, όπως η προσαρμογή, η ετοιμότητα, η αλληλεξάρτηση, και η αποτελεσματικότητα. Στον πίνακα 2.4 μια περίληψη των χαρακτηριστικών που βρίσκονται στην βιβλιογραφία για την περιγραφή της ανθεκτικότητας των συστημάτων αστικών μεταφορών.

Πίνακας 2.4: Χαρακτηριστικά Ανθεκτικότητας Αστικών Συγκοινωνιών. Πηγή Gonçaves et al., 2020

Κύρια χαρακτηριστικά της ανθεκτικότητας των αστικών συγκοινωνιών			
Χαρακτηριστικό	Περιγραφή	Μεταβλητές Απόδοσης	Ερευνητές
Εφεδρεία (Redundancy)	Η ύπαρξη εναλλακτικού σχεδίου, για την επαναφορά του συστήματος στην ισορροπία, όταν υπάρχει διαταραχή	Χρόνος ταξιδιού, χωρητικότητα, απόσταση ταξιδιού, κόστος ταξιδιού	Ta et al., 2009, Berche et al., 2009, Leu et al., 2010
Προσαρμοστικότητα (Adaption)	Προσαρμοστικότητα είναι η ικανότητα του συστήματος να είναι ευέλικτο και να ανταποκρίνεται σε νέες πιέσεις.	χωρητικότητα, κυκλοφοριακός φόρτος, χρόνος ταξιδιού, μέση καθυστέρηση	Miller-Hooks, 2011, Cox et al., 2011
Αποτελεσματικότητα (Efficiency)	Σε συστήματα μεταφοράς, η αποτελεσματικότητα είναι η ικανότητα αντιμετώπισης διαταραχών διατηρώντας παράλληλα ένα επίπεδο εξυπηρέτησης και συνδεσιμότητας.	Χωρητικότητα στοιχείων που απαρτίζουν το δίκτυο, διαδρομές ταξιδιού	Reed et al., 2009, Ta et al., 2009, Ip and Wang, 2011, Omer et al.
Ισχύς (Robustness)	Η ισχύς των στοιχείων του συστήματος για την υποστήριξη ενός συγκεκριμένου επιπέδου ζήτησης, χωρίς υποβάθμιση του συστήματος	Ταχύτητα ελεύθερης ροής, χρόνος ταξιδιού, συχνότητα κινδύνου, αστάθεια ροής	Murray-Tuite, 2006, Reed et al., 2009, Berche et al., 2009, Colicchia et al., 2010

2.2.1 Στρατηγική Διαχείρισης της Κυκλοφορίας. Επαναδρομολόγηση οχημάτων (rerouting)

Κατά την διάρκεια των ωρών αιχμής στις αστικές περιοχές, μπορεί να προκληθεί απρόβλεπτη κυκλοφοριακή συμφόρηση λόγω γεγονότων (π.χ. ατυχήματα) κατά τη διαδρομή. Συνεπώς, αυξάνεται ο χρόνος ταξιδιού των οδηγών και, μειώνεται η αξιοπιστία άφιξης στον προορισμό τους. Το σύστημα αλλαγής δρομολόγησης οχημάτων (rerouting) προτείνεται για να βοηθήσει τους οδηγούς να κάνουν την καταλληλότερη από την ήδη υπάρχουσα επόμενη επιλογή δρόμου, για αποφυγή απροσδόκητων συμφορήσεων. Συγκεκριμένα, η απόφαση αναδρομολόγησης λαμβάνεται βάσει μιας συνάρτησης κόστους που λαμβάνει υπόψη τον προορισμό του οδηγού και τις τοπικές κυκλοφοριακές συνθήκες (Wang et al., 2016). Στην Εικόνα 2.1 φαίνεται η στρατηγική επαναδρομολόγησης που εξετάζεται.

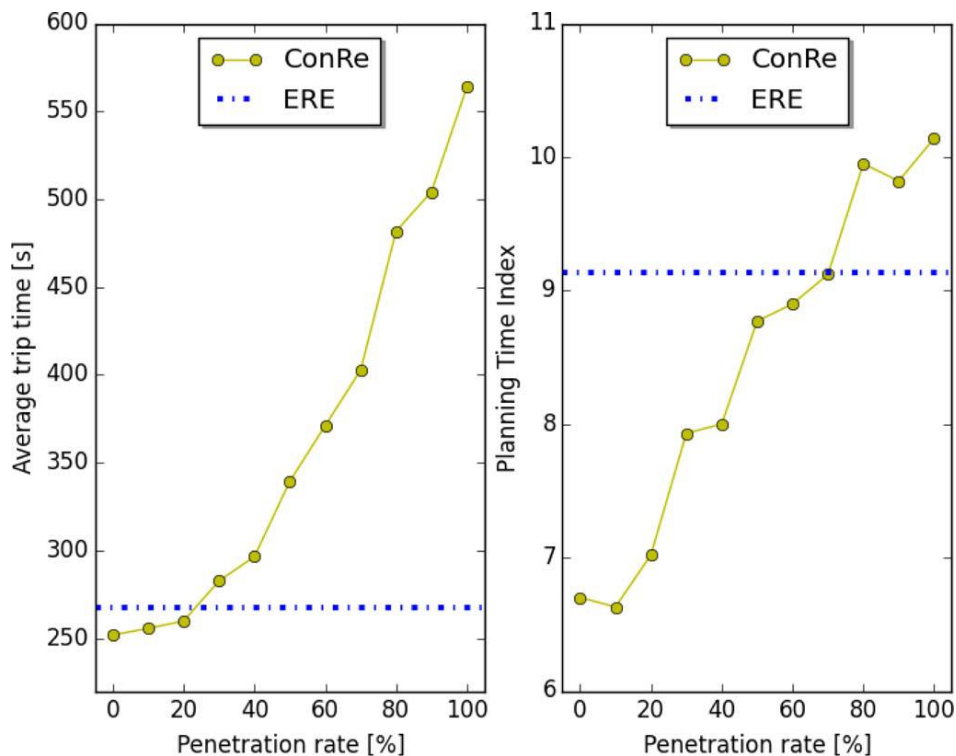


Εικόνα 2.1: Στρατηγική Επαναδρομολόγησης (Πηγή: Wang et al., 2016)

Σύμφωνα με τους Wang et al. (2016) όταν κατά την διαδρομή εξελίσσεται ένα συμβάν το Κέντρο Λειτουργίας Κυκλοφορίας (TOC) το επαληθεύει και ειδοποιεί το σύστημα σηματοδότησης (intelligent Traffic Light (iTL)) που βρίσκεται στο ανάντη του δρόμου όπου το συμβάν προέκυψε. Το (iTL) εκπέμπει τον συναγερμό επαναδρομολόγησης σε όλα τα οχήματα στους δρόμους που ελέγχει. Για κάθε αίτημα αναδρομολόγησης, το iTL χρησιμοποιεί τις πιο πρόσφατες τοπικές πληροφορίες κυκλοφορίας που συλλέγονται από τους φωρατές (detectors), μαζί με τον τοπικό χάρτη, για να υπολογίσει το κόστος δρομολόγησης για κάθε μία από τις πιθανές επόμενες επιλογές δρόμου.

Οι Wang et al. (2016) για να διερευνήσουν την επιρροή της επαναδρομολόγησης στην κυκλοφορία δημιούργησαν τέσσερα σενάρια:

- ❖ Original (ORG): Το σενάριο στο οποίο οι δρόμοι είναι ανοιχτοί και δεν εφαρμόζεται καμία στρατηγική διαχείρισης κυκλοφορίας.
- ❖ En Route Event (ERE): Το σενάριο αυτό είναι το original, με δύο δρόμους κλειστούς για 20 λεπτά.
- ❖ Constant Rerouting (ConRe): Αυτό το σενάριο αντιπροσωπεύει την «εγωιστική» αλλαγή δρομολόγησης (selfish rerouting). Τα οχήματα ενημερώνονται ώστε να λάβουν την ταχύτερη διαδρομή σύμφωνα με τις κυκλοφορικές συνθήκες.
- ❖ Load Balance Rerouting (LoaRe): Αντιπροσωπεύει την αλτρουιστική αλλαγή πορείας, που εστιάζει στην εξισορρόπηση της τοπικής κυκλοφορίας χωρίς να λαμβάνονται μεμονωμένα υπόψη οι προορισμοί των οχημάτων.



Εικόνα 2.2 : Επίπτωση του ποσοστού διείσδυσης της επαναδρομολόγησης στο μέσο χρόνο ταξιδιού (Πηγή: Wang et al., 2018)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2, για υψηλά ποσοστά επιλογής της επαναδρομολόγησης (ERE), το αντίκτυπο είναι αρνητικό για την απόδοση. Συνοπτικά, ακόμη και όταν κλείνει ένα μικρό μέρος του δικτύου, μπορεί να προκληθεί σημαντική υποβάθμιση των συνθηκών κυκλοφορίας. Ωστόσο, ούτε η «εγωιστική», ούτε η «αλτρουιστική» αλλαγή δρομολόγησης είναι κατάλληλες για

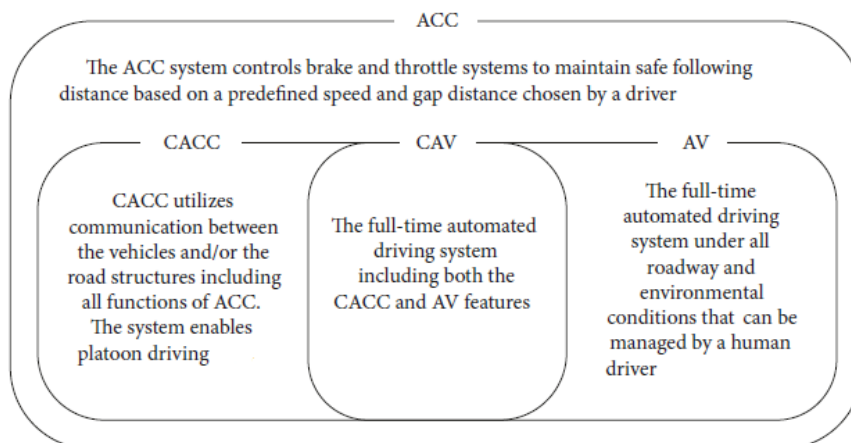
τη βελτίωση του μέσου χρόνου ταξιδιού όταν συμβαίνουν τέτοια συμβάντα, ειδικά με υψηλότερα ποσοστά διείσδυσης.

2.3 Τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών

Πολλές πόλεις υιοθετούν όλο και πιο προηγμένα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ΕΣΜ). Τα ΕΣΜ διαθέτουν συνδεσιμότητα, συντονισμό, προσαρμοστικότητα και αυτοματοποιημένη απόκριση με σκοπό τη βελτιστοποίηση της πολιτικής μεταφορών (Ganin et al., 2019). Οι «έξυπνες πόλεις» στοχεύουν σε αποτελεσματικότερες αστικές μεταφορές και χρησιμοποιούν τεχνολογίες σύνδεσης για τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και τη λήψη προγνωστικών και προσαρμοστικών αποφάσεων. Στόχος είναι η αύξηση της λειτουργικότητας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος μεταφορών (Albino et al., 2015). Τα ΕΣΜ μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στη μείωση των κινδύνων, του υψηλού δείκτη ατυχημάτων, της κυκλοφοριακής συμφόρησης, των εκπομπών άνθρακα, και της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Από την άλλη μεριά, αυξάνεται η ασφάλεια, η αξιοπιστία, η ταχύτητα ταξιδιού ή κυκλοφορική ικανότητα δημιουργώντας ικανοποίηση στους ταξιδιώτες (Qureshi et al., 2013).

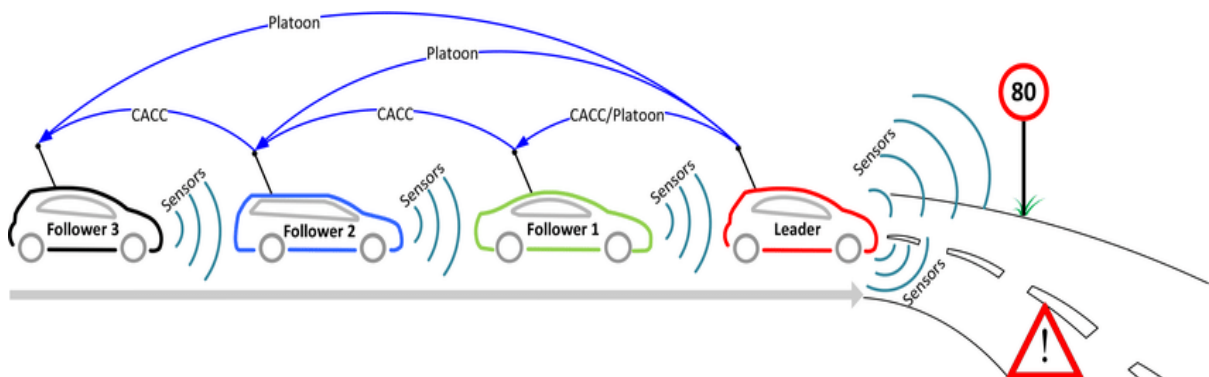
2.3.1 Αυτόματα Συνδεδεμένα Οχήματα

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες εκτιμούν ότι τα αυτόματα και συνδεδεμένα οχήματα (Connected and Automated Vehicles CAVs) θα είναι διαθέσιμα στο εγγύς μέλλον. Ωστόσο, η κοινωνία και τα συστήματα μεταφορών ενδέχεται να μην είναι πλήρως έτοιμα για την εφαρμογή τους σε πτυχές που αφορούν την τεχνολογία, την υποδομή ή/και την πολιτική (Zohng et al., 2020).



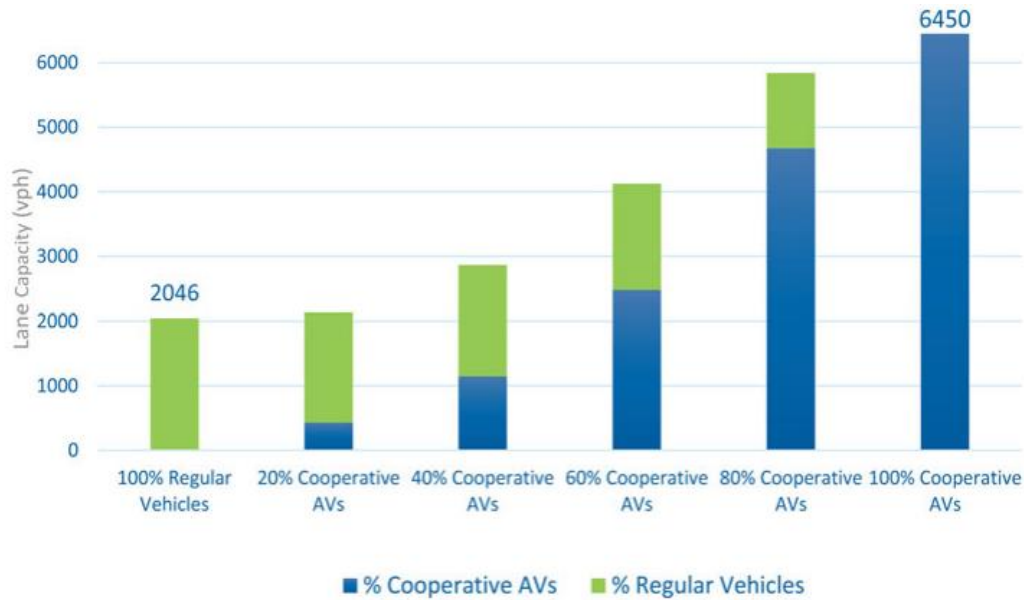
Εικόνα 2.3: Ταξινόμηση ευφυών οχημάτων CACC, CAV και AV (Πηγή: Do et al., 2019)

Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται η ταξινόμηση των ευφυών οχημάτων καθώς και κάποια χαρακτηριστικά τους. Τα CAVs οχήματα συνδυάζουν την συνδεσιμότητα (π.χ. 5G, GPS) και τον αυτοματισμό (π.χ. προηγμένα συστήματα υποστήριξης οδηγού) με σκοπό τα οχήματα αυτά να είναι ικανά να οδηγούν μόνα τους και να επικοινωνούν μεταξύ τους. Η συνδεσιμότητα αναφέρεται στην επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ οχημάτων και υποδομής, η οποία θα συμβάλει στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας στη χρήση της υποδομής μεταφορών και τελικά μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της ασφάλειας και της απόδοσης καυσίμου (Circella et al., 2021). Το συνεργατικό και προσαρμοστικό σύστημα πλοήγησης (Cooperative adaptive cruise control (CACC) όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4 επιτρέπει την σύνδεση μεταξύ των οχημάτων με πολλαπλά επίπεδα επικοινωνίας και αυτοματοποίησης. Το CACC μπορεί να βελτιώσει θετικά την απόδοση της κυκλοφορίας με επαρκή παρουσία, η οποία συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό διείσδυσης στην αγορά (Market Penetration Rate MPR). Επίσης μειώνει τις εκπομπές ρύπων και είναι πιο ασφαλές και βολικό για τους επιβάτες (Wouter et al., 2010).



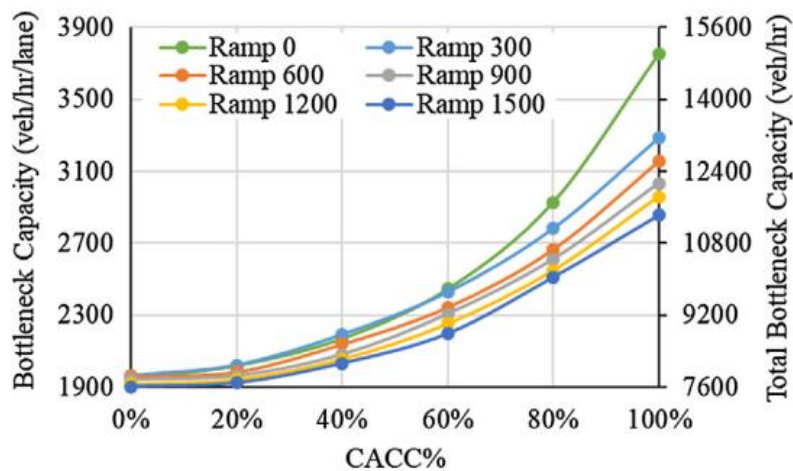
Εικόνα 2.4: Cooperative adaptive cruise control (CACC) (Πηγή Sljivo et al., 2017)

Οι Delis et al. (2016) δείχνουν ύστερα από πειράματα ότι το CACC σταθεροποιεί την κυκλοφοριακή ροή σε σχέση με τις επικρατούσες κυκλοφοριακές διαταραχές. Επιπρόσθετα η χωρητικότητα του συστήματος CACC κατέστειλε την κυκλοφοριακή συμφόρηση ακόμη και με ποσοστό διείσδυσης περίπου 30%. Επιπρόσθετα οι Olia et al., 2018 αναφέρουν πως η αύξηση των αυτόματων οχημάτων CAV θα φέρει σημαντικές αλλαγές στην χωρητικότητα του αυτοκινητόδρομου. Η απόδοση της οδικής χωρητικότητας εξαρτάται από το επίπεδο αυτοματοποίησης, ενώ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5, έδειξαν ότι η χωρητικότητα της λωρίδας αυξάνεται από 2.046 σε 6.450 οχήματα/ώρα/λωρίδα με αύξηση των CAV από 0% σε 100%.

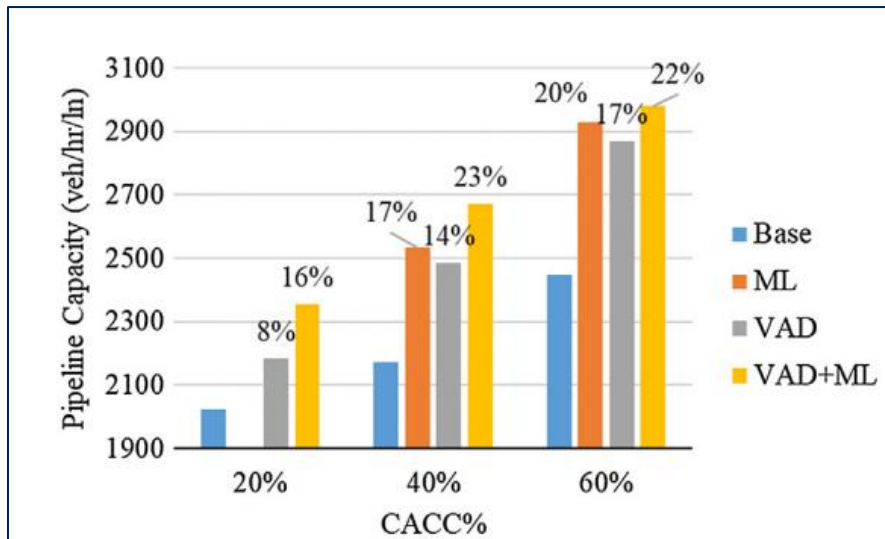


Εικόνα 2.5: Χωρητικότητα λωρίδας συμβατικών και αυτόματων συνεργατικών οχημάτων (Πηγή: Olia et al., 2017)

Ένα χαμηλό έως μέτριο ποσοστό διείσδυσης του CACC, δεν έχει στατιστικά σημαντικό αντίκτυπο στην κυκλοφορία. Τα πλεονεκτήματα που παρατηρήθηκαν αφορούσαν ποσοστό 40% και πάνω διείσδυσης του CACC στο οδικό δίκτυο. Ειδικότερα σε συνθήκες υψηλής κυκλοφορίας παρατηρήθηκε αυξημένη βελτίωση (Ma et al., 2018). Σύμφωνα με τους Liu et al., 2018 η χωρητικότητα του αυτοκινητόδρομου είναι 90% υψηλότερη σε 100% διείσδυση CACC σε σύγκριση με 0%. Επίσης η απουσία στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας οδηγεί σε ασήμαντη αύξηση της χωρητικότητας για χαμηλή έως μεσαία διείσδυση (π.χ. 20–60%) των CACC συστημάτων στην ροή (Εικόνα 2.7).

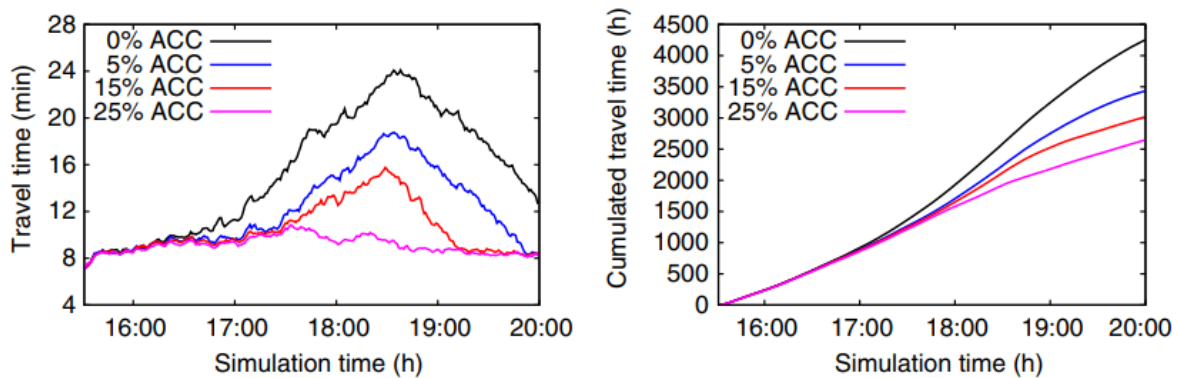


Εικόνα 2.6: Χωρητικότητα υπό ποσοστά διείσδυσης CACC στην κυκλοφορία. (Πηγή: Liu et al., 2018)



Εικόνα 2.7: Χωρητικότητα υπό χαμηλά ποσοστά διείσδυσης CACC και στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας. (Πηγή: Liu et al., 2018)

Η ανάλυση της ροής της κυκλοφορίας έχει ισχυρή επίδραση στο χρόνο διαδρομής (Εικόνα 2.8). Για παράδειγμα, ο αθροιστικός χρόνος διαδρομής χωρίς οχήματα ACC ανέρχεται σε περίπου 4000 ώρες, ενώ στο σενάριο με 25% οχήματα ACC προκύπτει μόνο περίπου 2500 h. Ακόμη και για μόλις 5% αυτόματων οχημάτων, η διακοπή κυκλοφορίας μετατοπίζεται κατά 20 λεπτά αργότερα, σε σύγκριση με τη διακοπή κυκλοφορίας σε (t 17:00 h) στο σενάριο χωρίς οχήματα ACC (Kesting et al., 2007).



Εικόνα 2.8: Στιγμαίοι και αθροιστικοί χρόνοι ταξιδιού για διαφορετικά επίπεδα αυτόματων οχημάτων. (Πηγή: Kesting et al., 2007).

2.4 Συμπεράσματα βιβλιογραφίας

Τα Ακραία Καιρικά Φαινόμενα (ΑΚΦ) αποτελούν μία από τις πιο κοινές διαταραχές τα τελευταία χρόνια και το μεγαλύτερο ποσοστό των καταστροφών σχετίζονται με τα συγκοινωνιακά δίκτυα. Ευθύνονται για σημαντικό ποσοστό των ατυχημάτων, για την μείωση της χωρητικότητας του οδοστρώματος, της κυκλοφοριακής ροής και την αύξηση του χρόνου διαδρομής. Επίσης επιτάσσουν μείωση της ταχύτητας το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κυκλοφορικού όγκου του δικτύου και των καθυστερήσεων.

Η ανθεκτικότητα είναι ένα χαρακτηριστικό που υποδεικνύει την απόδοση του συστήματος υπό ασυνήθιστες συνθήκες και διαταραχές, όπως τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα, είναι η κρισιμότητα, η ετοιμότητα, η αλληλεξάρτηση, και η αποτελεσματικότητα. Ωστόσο οι προσπάθειες για την ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας έχουν παρεμποδιστεί από τη δυσκολία της μοντελοποίησης πολύπλοκων συστημάτων μεταφοράς.

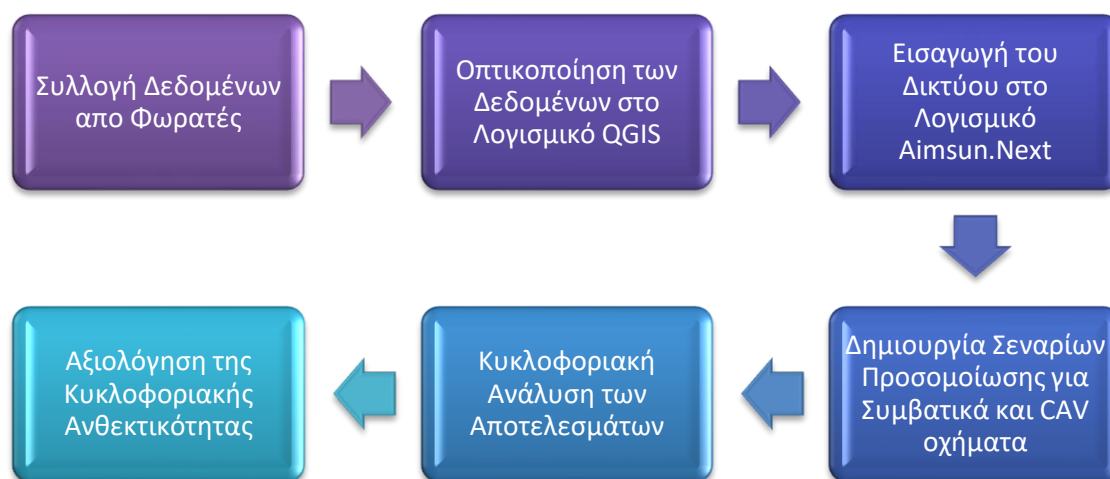
Η χρήση κατάλληλων στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας στοχεύει στην αντιμετώπιση τέτοιων διαταραχών, συμβάλλει στην αύξηση της ανθεκτικότητας του δικτύου και στην διατήρηση του επιπέδου εξυπηρέτησής του. Τα Συνδεδεμένα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (c-ITS) συντελούν στην αποτελεσματική εφαρμογή τέτοιων στρατηγικών.

Η ένταξη των αυτόματων και συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία, φέρει νέες προκλήσεις και ευκαιρίες στα κυκλοφοριακά συστήματα. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επίδρασή τους στην κυκλοφορία είναι τόσο η κατηγορία του δικτύου και η έκτασή του, όσο και η σύνθεση της κυκλοφορίας. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει το ποσοστό διείσδυσης των οχημάτων αυτών στην κυκλοφορία καθώς και η επιλογή του μοντέλου αναπαράστασης τόσο των αυτόματων όσο και των συμβατικών. Επίκεντρα διερεύνησης της επιρροής τους, αποτελούν τόσο κυκλοφοριακά ζητήματα όπως ο χρόνος ταξιδιού, η χωρητικότητα της οδού και η οδική ασφάλεια.

Εν κατακλείδι, η ανάπτυξη στρατηγικών διαχείρισης της κυκλοφορίας υπό την ύπαρξη διαταραχών στο δίκτυο αποτελεί αντικείμενο μείζονος ενδιαφέροντος και έρευνας. Η μελέτη σε, όσο το δυνατόν, πιο ρεαλιστικές συνθήκες κυκλοφορίας και περιβάλλοντος είναι καθοριστική, προκειμένου να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία με την οποία διερευνήθηκε η επίδραση των ακραίων καιρικών φαινομένων στο οδικό δίκτυο, καθώς και η σύγκριση των συμβατικών οχημάτων (Human-Driven Vehicles HDV) με τα αυτόματα οχήματα (CAV) σε περιπτώσεις όπως η προαναφερθείσα. Γίνεται αναφορά στο στα μικροσκοπικά μοντέλα προσομοίωσης καθώς και στα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος παρουσιάζεται ένα διάγραμμα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε.



Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα μεθοδολογικής προσέγγισης

3.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα κυκλοφοριακών φόρτων από φωρατές οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στην περιοχή του δακτυλίου της Αθήνας. Οι φωρατές αυτοί (detectors) λήφθηκαν από την ιστοσελίδα (<https://data.gov.gr/datasets/road-traffic-attica/>). Τα δεδομένα των φωρατών αντιπροσωπεύουν δύο διαφορετικές ημερομηνίες, την ημερομηνία του περιστατικού κάτω από ακραία καιρικά φαινόμενα (έντονη βροχόπτωση) και την ημερομηνία μιας φυσιολογικών καιρικών συνθηκών ημέρας.

Τα παραπάνω δεδομένα εισήχθησαν στο λογισμικό του QGIS ώστε να γίνει οπτικοποίηση των περιοχών του δικτύου οι οποίες παρουσίαζαν το μεγαλύτερο

πρόβλημα, κάτω από τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ποιοι δρόμοι ήταν εκείνοι που παρουσίασαν την μέγιστη πτώση ταχύτητας, και άρα επιλέχθηκαν ως κλειστοί δρόμοι στην ημερομηνία του περιστατικού.

3.1.2 Δημιουργία Σεναρίων Προσομοίωσης

Στην συνέχεια το οδικό δίκτυο στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της κυκλοφορίας εισήχθη στο λογισμικό Aimsun Next. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε διατηρείται από το Εργαστήριο Κυκλοφοριακής Τεχνικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αποτελεί το βασικό οδικό δίκτυο της Αττικής και είναι σχεδιασμένο στο πρόγραμμα προσομοίωσης Aimsun. Συγκεκριμένα, στο μοντέλο περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά του δικτύου (φωρατές, συνολικά οχήματα, περίοδος φωτεινών σηματοδοτών, τμήματα οδών) και τα προγράμματα σηματοδότησης των κόμβων, τις παραμέτρους των οχημάτων (διαστάσεις, ταχύτητα, επιτάχυνση και χρόνος αντίδρασης), αλλά και τις γραμμές και τα δρομολόγια λεωφορείων και τρόλεϊ. Στην συνέχεια εισήχθησαν οι φόρτοι στο δίκτυο του Aimsun μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης (calibration), με χρήση κατάλληλων εργαλείων. Με τον τρόπο αυτό, το δίκτυο φορτίζεται με τις διάφορες κατηγορίες συμβατικών οχημάτων, δημιουργούνται τα ταξίδια τους και τίθενται οι απαραίτητες παράμετροι που καθορίζουν την κίνησή τους. Επιπροσθέτως, το δίκτυο φορτίστηκε με τις γραμμές και τα δρομολόγια των λεωφορείων με χρήση ειδικών εντολών.

Αφού εισήχθησαν τα δεδομένα και βαθμονομήθηκε το δίκτυο δημιουργήθηκαν τα σενάρια μικροσκοπικής προσομοίωσης, με βάση τα οποία θα γίνει η συγκεκριμένη έρευνα. Αναπτύχθηκαν λοιπόν 12 σενάρια, τα οποία απαρτίζονται από συμβατικά, συνδεδεμένα και αυτόματα οχήματα. Τα σενάρια διαφέρουν ως προς το ποσοστό διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόματων οχημάτων στην κυκλοφορία. Τα ποσοστά διείσδυσής τους στην κυκλοφορία είναι 10%, 20%, 30%, 70%, 80%, 90% και 100%. Ως συνδεδεμένα και αυτόματα οχήματα (CAV) ορίστηκαν τα οχήματα ιδιωτικής χρήσεως (I.X.). Επίσης το κάθε σενάριο προσομοίωσης εμπεριείχε ποσοστό επαναδρομολόγησης (reroute) των οχημάτων, από 10% έως 100% reroute. Έτσι εξετάστηκαν τόσο τα συμβατικά όσο και τα CAV οχήματα στις διάφορες στρατηγικές διαχείρισης κυκλοφορίας που εμπεριείχαν επαναδρομολόγηση λόγω των κλειστών από έντονη βροχόπτωση δρόμων. Τέλος, ορίστηκαν μεταβλητές εξόδου της προσομοίωσης, προκειμένου να προκύψουν δεδομένα για τη δημιουργία των θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής. Έτσι, για κάθε ποσοστό διείσδυσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων καταλήγουμε στα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Τα προφίλ οδήγησης των οδηγών των συμβατικών οχημάτων, σύμφωνα με την έρευνα των (Adamidis et al.,2020), είναι τρία :

- ❖ Σύνηθες
- ❖ Επιθετικό
- ❖ Αμυντικό

Για τα συμβατικά οχήματα ορίστηκε ως προφίλ οδήγησης, το σύνηθες προφίλ ενώ για τα CAV το επιθετικό.

3.2 Μετρικές Απόδοσης Οδικού Δικτύου

Η διερεύνηση της επιρροής των Ακραίων Καιρικών Φαινομένων στο δίκτυο τόσο με χρήση συμβατικών οχημάτων όσο και με την χρήση συνδεδεμένων και αυτόματων οχημάτων στην κυκλοφορία θα πραγματοποιηθεί μέσα από την δημιουργία και ανάλυση των θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα ακόλουθα :

- ❖ Κυκλοφοριακός Φόρτος [flow (veh/h)]
- ❖ Πυκνότητα (density)
- ❖ Χρόνος Καθυστέρησης [delay (sec/km)]
- ❖ Μέση Ταχύτητα [average speed (km/h)]
- ❖ Χρόνος ταξιδιού ανά χιλιόμετρο [travel time (sec/km)]

3.3 Θεωρητικό υπόβαθρο

3.3.1 Μικροσκοπικό Μοντέλο Προσομοίωσης

Η προσομοίωση είναι ένας προσιτός τρόπος να μελετηθούν ποικίλα χαρακτηριστικά του δικτύου όπως οι κύκλοι περιόδων των φωτεινών σηματοδοτών, οι αλλαγές στην πορεία των οχημάτων, τα όρια ταχυτήτων και άλλα μεγέθη. Επομένως, δύναται να μοντελοποιήσει τόσο τις αντιδράσεις των χρηστών στις πληροφορίες ελέγχου και στις συγκοινωνιακές πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο όσο και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, επαληθεύοντας και βελτιώνοντας τις πολιτικές διαχείρισης της κυκλοφορίας.

Οι κύριες κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης είναι οι ακόλουθες τρεις:

- ❖ Μικροσκοπικά Μοντέλα
- ❖ Μεσοσκοπικά Μοντέλα
- ❖ Μακροσκοπικά μοντέλα

Βασική προϋπόθεση για την επιλογή του τύπου προσομοίωσης είναι να παράγονται ρεαλιστικά αποτελέσματα κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες. Σε γενικές γραμμές, όσο πιο λεπτομερές είναι ένα δίκτυο τόσο καλύτερα αναπαριστά την πραγματικότητα. Ωστόσο, όσο περισσότερα στοιχεία εντάσσονται, το πρόβλημα γίνεται πιο πολύπλοκο και απαιτούνται περισσότερες πηγές (Taplin, 1997). Ουσιαστικά για εκτιμήσεις του μέσου χρόνου και τις προβλέψεις καθυστερήσεων προτείνεται να χρησιμοποιείται μακροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης, καθώς στο μικροσκοπικό υποτιμώνται τα συνολικά αποτελέσματα (Taori και Rathi, 1997). Παρ' όλ' αυτά, επικρατεί η άποψη ότι η επιλογή του τύπου μοντέλων προσομοίωσης είναι περισσότερο φιλοσοφικό παρά πρακτικό ζήτημα (Rakha και M. Van Aerde, 1997).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης, ωστόσο για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται παρακάτω τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τριών προαναφερθέντων μοντέλων.

Πίνακας 3.1: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μακροσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης

Μακρο-προσομοίωση	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις	Παλαιότερη τεχνολογία
Χρήση για σύντομη αξιολόγηση μεγάλου αριθμού εναλλακτικών σεναρίων	Εφαρμογή κυρίως για μακροπρόθεσμη πρόβλεψη
τεχνολογία με μεγάλο αριθμό υλοποιήσεων	Λίγες δυνατότητες επέκτασης χωρίς μετάβαση σε λύσεις μικρο/μεσοσκοπικού επιπέδου

Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μικροσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης

Μικρο-προσομοίωση	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Πιο λεπτομερές και ακριβές από μεσο/μακροσκοπικά μοντέλα	Υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις

Απαιτήσεις Δυνατότητα ακριβούς προτυποποίησης λεπτομερειών	Απαιτούνται περισσότερα και πιο λεπτομερή δεδομένα
Οι σύγχρονοι μικροσκοπικοί προσομοιωτές έχουν μεταβεί από την προσέγγιση κίνησης οχημάτων μέσω στρεφουσών κινήσεων στην προτυποποίηση με βάση διαδρομών Προέλευσης – Προορισμού.	Αν και οι μικροσκοπικοί προσομοιωτές γίνονται ταχύτεροι, τα αντίστοιχα μεσοσκοπικά μοντέλα θα επιτρέπουν πάντα την προσομοίωση μεγαλύτερων δικτύων, περισσότερων εναλλακτικών, ή/και μεγαλύτερων χρονικών οριζώντων.

Πίνακας 3.3: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μεσοσκοπικού μοντέλου προσομοίωσης

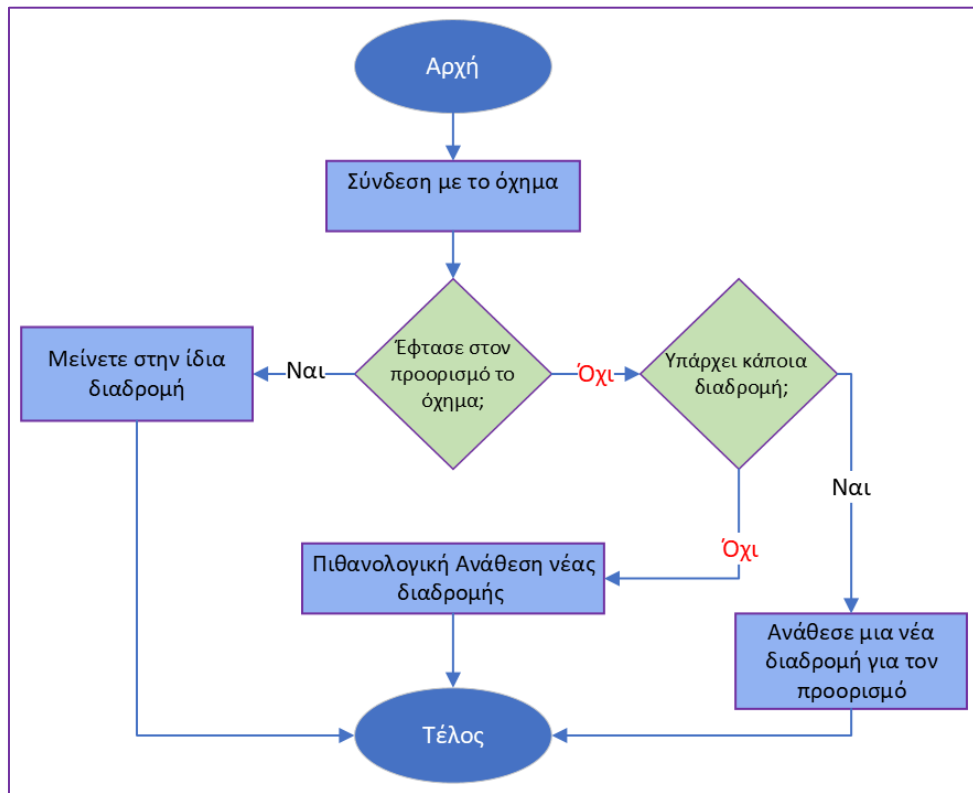
Μεσο-προσομοίωση	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Πρακτική προσομοίωση μεταξύ μικρο- και μακροσκοπικών μοντέλων, συνδυάζοντας συνολικά και λεπτομερή μοντέλα	Απουσία πολλών πρακτικών εφαρμογών μεγάλης κλίμακας που να έχουν ολοκληρωθεί

3.4 Στρατηγική Επαναδρομολόγησης

Στην συγκεκριμένη διπλωματική δημιουργήθηκαν δέκα σενάρια αναδρομολόγησης με σκοπό την βελτίωση της κυκλοφοριακής ροής υπό ακραία καιρικά φαινόμενα. Το κάθε ένα από αυτά είχε άλλο ποσοστό διείσδυσης, δηλαδή από 10% έως 100% αναδρομολόγηση. Σύμφωνα με τους Cao et al., 2017 σε μια ιδανική στρατηγική αναδρομολόγησης, οι παγκόσμιες δυναμικές πληροφορίες κυκλοφορίας είναι επιθυμητές για την αποφυγή συμφόρησης. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή μπορεί να γίνει απαγορευτικά ακριβή όσο το μέγεθος του οδικού δικτύου και ο αριθμός των εμπλεκόμενων οχημάτων αυξάνονται. Διαισθητικά μπορούμε απλώς να αφήσουμε τα οχήματα που αλλάζουν δρομολόγηση να επιλέξουν το δεύτερο καλύτερο μονοπάτι, μόλις προβλεφθεί συμφόρηση σε εκείνο που ήδη βρίσκονται. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση, μια ακόμα συμφόρηση είναι πιθανό να συμβεί για αυτό το λόγο πρέπει να αποφεύγονται οι περιττές παρακάμψεις. Γι' αυτό τον λόγο η στρατηγική αναδρομολόγησης υπολογίζει το κοντινότερο μονοπάτι χρησιμοποιώντας την τις αποστάσεις των οχημάτων που χρειάζονται αναδρομολόγηση. Συγκεκριμένα η πιθανότητα για τα οχήματα v_i να επιλέξουν διαφορετικό μονοπάτι είναι:

$$Pb_j^i = \frac{e^{-\lambda \cdot \tau_j^i}}{\sum_{j=1}^k e^{-\lambda \cdot \tau_j^i}}$$

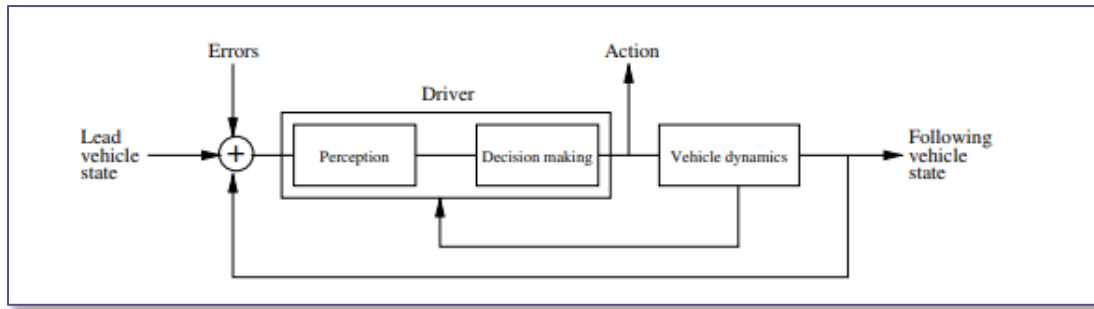
Όπου λ είναι μια παράμετρος βάρους, και τ_j^i είναι το φερόμενο άθροισμα των τωρινών πρώτων l δρόμων στο j -th κοντινότερο μονοπάτι.



Διάγραμμα 3.2: Διάγραμμα αναδρομολόγησης. (Πηγή Stolfi et al., 2014.)

3.5 Μοντέλα ακολουθούντων οχημάτων

Τα μοντέλα ακολουθούντων οχημάτων (Car following models, CFMs) είναι πιθανότατα η πιο αντιπροσωπευτική κατηγορία οδηγικού μοντέλου. Τα μοντέλα αυτά αναπαριστούν το χρόνο, τη θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση ως συνεχείς συναρτήσεις. Επίσης προσαρμόζουν την κίνηση ενός οχήματος με βάση ένα σύνολο κανόνων που στοχεύει την αποφυγή οποιασδήποτε επαφής με το προπορευόμενο όχημα. Ένα γενικό διάγραμμα αναπαρίσταται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Γενικό διάγραμμα αναπαράστασης ακολουθούντος οχήματος (Πηγή: Harri, 2010)

Αντικείμενο των CFMs είναι η αναπαράσταση της κυκλοφορίας των οχημάτων ώστε να αποφεύγονται τα ατυχήματα, μέσα από τον έλεγχο των χαρακτηριστικών οδήγησης καθενός οχήματος ξεχωριστά, καθορίζοντας μία απόσταση ασφαλείας μεταξύ τους, ένα χρονικό διαχωρισμό ή και τα δύο. Ο παραπάνω σκοπός επιτυγχάνεται με τον κανόνα του Pipe:

Ένας καλός κανόνας ώστε να ακολουθήσεις ένα όχημα σε ασφαλή απόσταση, είναι να επιτρέψεις στον εαυτό σου να έχει απόσταση ανάλογη ενός οχήματος με το όχημα μπροστά για κάθε 16,1 χλμ./ώρα ταχύτητας στην οποία ταξιδεύεις (Pipe L.A., 1953).

Η σχέση για την αποφυγή Ατυχήματος (Collision Avoidance) ή την Απόσταση Ασφαλείας (Safety Distance):

$$\Delta x^{safe}(v_i) = L + t \times v_i + \psi \times v_i^2 \quad (1)$$

Όπου L είναι το μήκος του οχήματος, T ο ασφαλής χρονικός διαχωρισμός ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί και ως χρόνος αντίδρασης και όπου $\psi \times v_i^2$ αναπαρίσταται η απόσταση σύγκρουσης. Όταν $\psi = 0$, η απόσταση σύγκρουσης μεταξύ του προπορευόμενου και του ακολουθούντος οχήματος θεωρούνται ίσες, καθώς η ψ μεγιστοποιείται όταν το προπορευόμενο όχημα πλησιάζει σε στάση. Ο ασφαλής χωρικός διαχωρισμός $\Delta x^{safe}(v_i)$ είναι επομένως η μικρότερη απόσταση για έναν οδηγό, συναρτήσει της ταχύτητας v_i , ώστε να σταματήσει εντελώς χωρίς ατύχημα, συμπεριλαμβανομένου του χρόνου αντίδρασης και του χρόνου σύγκρουσης.

3.5.1 Μοντέλο Krauss

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το μοντέλο του (Krauss, 1998) επιλέχθηκε για την αναπαράσταση των συμβατικών οχημάτων. Στο μοντέλο αυτό, η συνάρτηση του χρόνου είναι διακριτή αφού στο μοντέλο δεν υπολογίζει τη στιγμιαία επιτάχυνση αλλά τη μελλοντική ταχύτητα, με βήμα $t + \Delta t$, που αποκτάται από ένα όχημα i . Ορίζοντας ως μεταβλητή εισόδου τη μέγιστη

ταχύτητα v^{max} , τη μέγιστη επιτάχυνση a και επιβράδυνση b και τη στοχαστική παράμετρο μ , ο Krauss ορίζει τις ακόλουθες σχέσεις:

$$v_i^{safe}(t + \Delta t) = v_{i+1}(t) + \frac{\Delta x_i(t) - v_{i+1}(t) \times T}{\Delta v_i(t)/(2 \times b + T)} \quad (2)$$

$$v_i^{des}(t + \Delta t) = \min [v^{max}, v_i(t) + a \times \Delta t, v_i^{safe}(t + \Delta t)] \quad (3)$$

$$v_i(t + \Delta t) = \max [0, v_i^{des}(t + \Delta t) - \mu] \quad (4)$$

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t) \times \Delta t \quad (5)$$

Η σχέση (2) υπολογίζει την ταχύτητα του οχήματος i που απαιτείται για να καθοριστεί μία ασφαλής απόσταση και να αποφευχθεί κάποιο ατύχημα με το προπορευόμενο όχημα $i+1$. Ακόμη, χρειάζεται ένας χρόνος αντίδρασης (T) για να προστεθεί μία διακύμανση στην αντίδραση του ερεθίσματος. Η σχέση (3) αναπαριστά την επιθυμητή ταχύτητα που θα έχει το όχημα μέχρι τον κόμβο i , η οποία και είναι προσαύξηση της προηγούμενης ταχύτητας με άνω όρια τις v_i^{safe} και v^{max} . Η σχέση (4) ενημερώνει την τρέχουσα ταχύτητα για το επόμενο βήμα Δt , σύμφωνα με μία στοχαστική απόκλιση γύρω από την επιθυμητή ταχύτητα μ . Τέλος, η σχέση (5) ενημερώνει τη θέση του οχήματος i για το επόμενο χρονικό βήμα. Αυτή η στοχαστική απόκλιση δημιουργεί τη φυσική χωρητικότητα ώστε να γίνει ορθά η δοθείσα προσαύξηση ταχύτητας, καθώς και να γίνει και η συμμόρφωση του οδηγού σύμφωνα με το μοντέλο.

3.5.2 Μοντέλο Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας

Η ανάπτυξη του μοντέλου αυτού, βασίστηκε στο γεγονός ότι έπρεπε να ξεπεραστούν κάποια ζητήματα στον έλεγχο ειδικών κυκλοφοριακών συνθηκών, τα οποία εμποδίζαν την άμεση μεταφορά ενός πραγματικού ελεγκτή στην προσομοίωση. Ο αλγόριθμος του Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (Adaptive Cruise Control, ACC) αναλύεται στις παρακάτω λειτουργίες.

Λειτουργία ελέγχου ταχύτητας (Speed control mode)

Η λειτουργία του ελέγχου ταχύτητας ενεργοποιείται στην περίπτωση που τα προπορευόμενα οχήματα στην περιοχή που γίνεται έλεγχος από τους αισθητήρες ή υπάρχουν σε απόσταση μεγαλύτερη των 120 m (Xiao et al., 2017; Liu et al., 2018). Η λειτουργία αυτή έχει σκοπό να ελαττώσει την απόκλιση μεταξύ της ταχύτητας του οχήματος και της επιθυμητής ταχύτητας και δίνεται από τη σχέση (6).

$$a_{i,k+1} = k_1(v_d - v_{i,k}), k_1 > 0 \quad (6)$$

Λειτουργία ελέγχου κενού (Gap control mode)

Στην περίπτωση αυτή, η επιτάχυνση στο επόμενο χρονικό βήμα $k + 1$ διαμορφώθηκε ως μία συνάρτηση μεταφοράς δευτέρου βαθμού, βασισμένη στις αποκλίσεις κενού και ταχύτητας σχετικά με το προπορευόμενο όχημα και ορίζεται από τη σχέση (7).

$$a_{i,k+1} = k_2 e_{i,k} + k_3 (v_{i-1,k} - v_{i,k}), \quad k_2, k_3 > 0 \quad (7)$$

Η λειτουργία ελέγχου κενού ενεργοποιείται στην περίπτωση που οι αποκλίσεις κενού και ταχύτητας είναι μικρότερες από 0,2 m και 0,1 m/s αντίστοιχα (Xiao et al., 2017).

Λειτουργία ελέγχου κλεισίματος κενού (Gap-closing control mode)

Η λειτουργία αυτή ενεργοποιείται όταν η απόσταση μεταξύ ενός οχήματος με το προπορευόμενο είναι μικρότερη των 100 m. Στην περίπτωση αυτή ορίζονται $k_2 = 0,04 \text{ s}^{-1}$ και $k_3 = 0,07 \text{ s}^{-1}$. Εάν η μεταξύ τους απόσταση είναι ανάμεσα στα 100 m και 120 m τότε, το υπό έλεγχο όχημα, διατηρεί την προηγούμενη στρατηγική ελέγχου για να παρέχει υστέρηση στο βρόγχο ελέγχου και να πραγματοποιεί μία ομαλή μεταφορά μεταξύ των δύο στρατηγικών (Xiao et al., 2017).

Λειτουργία ελέγχου αποφυγής σύγκρουσης (Collision Avoidance control mode)

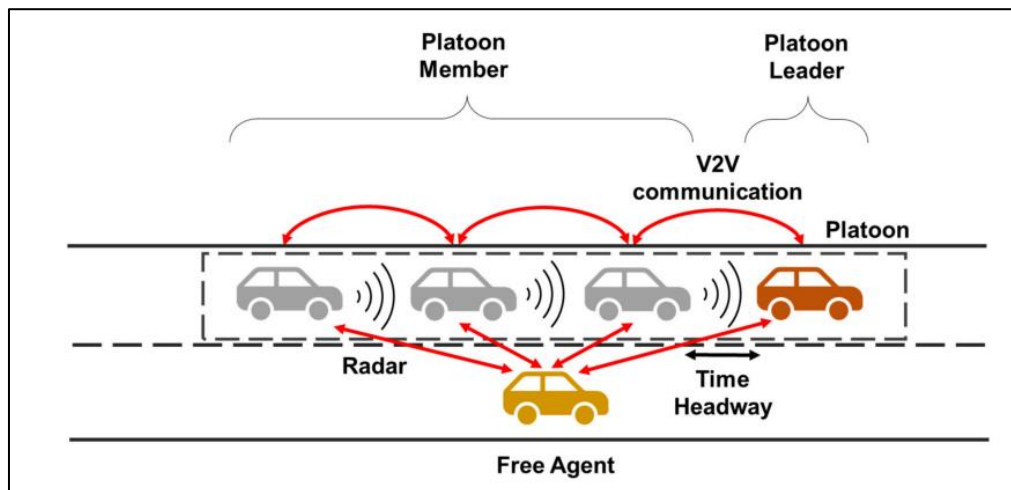
Η λειτουργία αυτή αποτρέπει τις συγκρούσεις από όπισθεν όταν επικρατούν κρίσιμες, για την ασφάλεια, συνθήκες. Ενεργοποιείται όταν η απόσταση με το προπορευόμενο όχημα είναι μικρότερη των 100 m και παράλληλα η απόκλιση κενού είναι αρνητική.

Συνεργατικό και προσαρμοστικό σύστημα πλοήγησης (Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC))

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της βελτίωσης των τεχνολογιών ελέγχου των οχημάτων, το προτύπου του Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (Adaptive Cruise Control, ACC), επιτρέπει σε ένα όχημα να οδηγεί πίσω από ένα όχημα «ηγέτη» (leader) διατηρώντας συγκεκριμένη απόσταση, η οποία βελτιώνει τη χωρητικότητα του οδοστρώματος και την ασφάλεια της κυκλοφορίας. Τόσο η συνδεσιμότητα όσο και ο αυτοματισμός ενσωματώνονται στα αυτόματα οχήματα (CAV), καθιστώντας τα ικανά όχι μόνο να οδηγούν από μόνα τους με ενσωματωμένους αισθητήρες ανίχνευσης, αλλά και επικοινωνούν μεταξύ τους

(vehicle to vehicle V2V). Το συνεργατικό και προσαρμοστικό σύστημα πλοήγησης (CACC), είναι η επέκταση του ACC, και επιτρέπει στα οχήματα να δημιουργούν διμοιρίες, να οδηγούν με εναρμονισμένες ταχύτητες και επιταχύνσεις και να έχουν ορισμένα κενά μεταξύ τους (Wang et al., 2018). Στα συστήματα CACC, τα CAV μοιράζονται τις δικές τους παραμέτρους μαζί με άλλα CAVs στο δίκτυο μέσω επικοινωνιών (vehicle to vehicle, V2V) με αυτόνομο τρόπο χωρίς κεντρικό διαχειριστή (Wischhof et al., 2005). Η κοινή χρήση πληροφοριών μεταξύ των οχημάτων παρουσιάζει τα ακόλουθα οφέλη:

- ❖ Αύξηση της ασφάλειας οδήγησης καθώς οι χρόνοι αντίδρασης είναι μικρότεροι από αυτούς των συμβατικών οχημάτων.
- ❖ Αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, λόγω των μικρών αποστάσεων μεταξύ οχημάτων.
- ❖ Μείωση εκπομπών ρύπων και κατανάλωσης ενέργειας, καθώς μειώνονται οι περιττές εναλλαγές ταχύτητας.



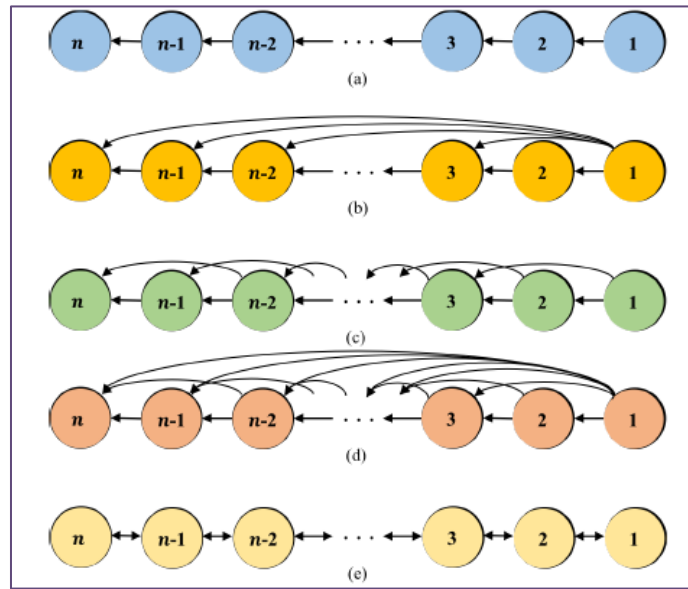
Εικόνα 3.2 : Συνεργατικό και προσαρμοστικό σύστημα πλοήγησης CACC (Πηγή Lee et al., 2021)

Λειτουργία Cooperative adaptive cruise control (CACC) συστήματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το σύστημα CACC εκμεταλλεύεται τις επικοινωνίες μεταξύ των οχημάτων V2V, ώστε τα CAV να σχηματίζουν φάλαγγες/διμοιρίες οχημάτων με εναρμονισμένες ταχύτητες, με μικρότερο χρονικό διάστημα μεταξύ τους και με κοινή χρήση πληροφοριών (επιτάχυνση, ταχύτητα σε συγκεκριμένη θέση κλπ.). Ένα CAV όχημα έχει εγκαταστημένους αισθητήρες, και λαμβάνει πληροφορίες από την μονάδα ασύρματης ασφάλειας (wireless Safety Unit (WSU)). Η μονάδα ασύρματης ασφάλειας (WSU) αποτελείται από δύο μέρη:

- 1) Από δεδομένα που μεταδίδονται από άλλα CAV στο σύστημα CACC μέσω V2V επικοινωνιών όπως ταχύτητα, επιτάχυνση, μεταξύ οχημάτων.
- 2) Από δεδομένα που συλλέγονται από το GPS συμπεριλαμβανομένου του εντοπισμού και της εκχώρησης της θέσης του οχήματος.

Σύμφωνα με την Εικόνα 3.2 παρουσιάζονται κάποιοι τρόποι που το σύστημα CACC λειτουργεί. Μερικοί τρόποι επικοινωνίας των CAVs οχημάτων μεταξύ τους είναι: a) ακολουθώντας τον προηγούμενο, b) ο αρχηγός είναι ο προκάτοχος, c) ακολουθώντας δύο προκατόχους, d) συνδυασμός του b και c συστήματος, e) αμφίδρομο σύστημα επικοινωνίας (Wang et al., 2018).



Εικόνα 3.3: Σύστημα ροής επικοινωνίας στο CACC σύστημα (Πηγή Wang et al., 2018)

3.6 Θεμελιώδης Σχέση Κυκλοφοριακής Ροής

Η θεμελιώδης σχέση που συνδέει τα τρία μακροσκοπικά μεγέθη της κυκλοφορίας είναι:

$$q = k \cdot u_s \quad (3.1)$$

Όπου q είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος, k είναι η πυκνότητα και u_s η ταχύτητα. Η σχέση αυτή προκύπτει με τον τρόπο που περιγράφεται παρακάτω. Έστω ένα μικρό οδικό τμήμα μήκους L , το οποίο διασχίζουν $N(T)$ οχήματα (της ίδιας κατεύθυνσης) κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος T . Η μέση πυκνότητα k κατά το χρονικό διάστημα T δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$k = \frac{\text{μέσος αριθμός οχημάτων στο εξεταζόμενο οδικό τμήμα}}{L} \quad (3.2)$$

Αν το όχημα i διασχίζει το οδικό τμήμα μήκους L σε χρόνο t_i η πιθανότητα P_i το όχημα i να βρίσκεται μέσα στο εξεταζόμενο οδικό τμήμα σε κάποια χρονική στιγμή εντός του διαστήματος T δίνεται από την σχέση:

$$P_i = \frac{t_i}{T} \quad (3.3)$$

Επομένως, ο μέσος αριθμός οχημάτων στο εξεταζόμενο οδικό τμήμα μήκους L προκύπτει ίσος με:

$$\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{T} \quad (3.4)$$

Με βάση τα παραπάνω η σχέση (3.2) γίνεται:

$$k = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{N(T)} t_i}{T}}{L} = \frac{\frac{N(T)}{T}}{\frac{N(T)L}{\sum_{i=1}^{N(T)} t_i}} \quad (3.5)$$

Επίσης η μέση ταχύτητα χώρου (u_s) ορίζεται ως εξής. Αν t_j είναι ο χρόνος που χρειάζεται το όχημα j , από τα $N(T)$ οχήματα που διένυσαν ένα δεδομένο οδικό τμήμα μήκους L σε χρονικό διάστημα T , για να διανύσει το εν λόγω οδικό τμήμα, τότε:

$$u_s = \frac{L}{\frac{\sum_{j=1}^{N(T)} t_j}{N(T)}} = \frac{N(T)L}{\sum_{j=1}^{N(T)} t_j} \quad (3.6)$$

Επειδή το μήκος του εξεταζόμενου οδικού τμήματος L είναι μικρό, είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι ο αριθμός των οχημάτων $N(T)$ που διασχίζουν το οδικό τμήμα στη χρονική περίοδο T είναι ίδιος με τον αριθμό των οχημάτων $n(x)$ που περνούν από μια διατομή στη θέση x του οδικού τμήματος L . Επομένως, η σχέση γίνεται με τη χρήση των σχέσεων (2.3) και (3.6):

$$k \approx \frac{\frac{n(x)}{T}}{\frac{N(T)L}{\sum_{i=1}^{N(T)} t_i}} = \frac{q}{u_s} \quad (3.7)$$

Από τη θεμελιώδη σχέση που συνδέει τα τρία βασικά μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής προκύπτει ότι όταν είναι γνωστά τα δύο από τα τρία μεγέθη, προκύπτει το τρίτο.

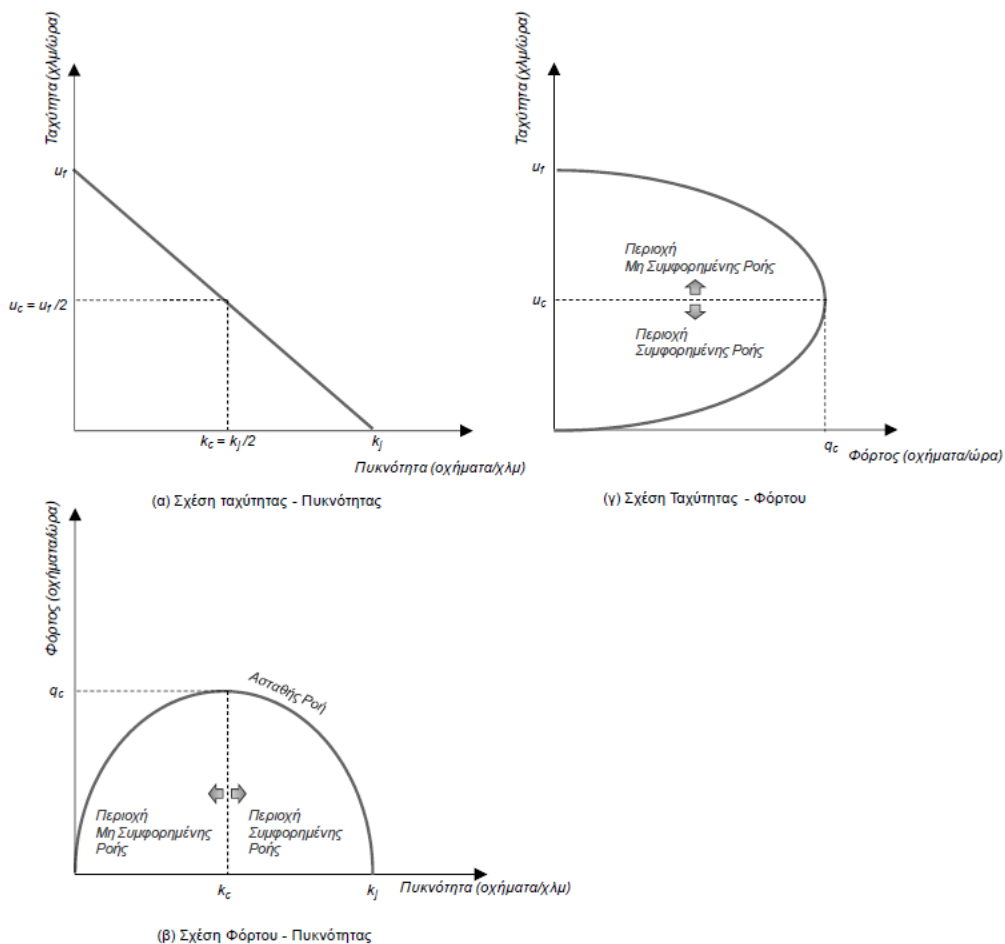
3.6.1 Θεμελιώδη Διαγράμματα Κυκλοφοριακής Ροής

Η θεωρία της κυκλοφοριακής ροής εξετάζει τις κινήσεις των οχημάτων και των πεζών σε μια οδό, σε μακροσκοπικό και μικροσκοπικό επίπεδο. Τα τρία βασικά μακροσκοπικά κυκλοφοριακά μεγέθη είναι: ο κυκλοφοριακός φόρτος, η μέση

ταχύτητα και η πυκνότητα. Ο κυκλοφοριακός φόρτος (traffic volume) είναι ο συνολικός αριθμός οχημάτων που περνούν από ένα σημείο ή διατομή οδού στη μονάδα του χρόνου. Εκφράζεται σε «οχήματα ανά μονάδα χρόνου» για παράδειγμα οχήματα ανά ώρα, ημέρα κ.α.

Βάσει των παραπάνω μεγεθών εξάγονται τα θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η ταχύτητα και η πυκνότητα συνδέονται με μια γραμμική σχέση, παράγονται τα εξής θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής σε επίπεδο οδού:

- ❖ Ταχύτητας-πυκνότητας
- ❖ Ταχύτητας-φόρτου
- ❖ Φόρτου-πυκνότητας



Εικόνα 3.4: Θεμελιώδη Διαγράμματα Κυκλοφοριακής Ροής (Πηγή: Φραντζεσκάκης, Γκόλιας, Πιτσιάβα-Λατινοπούλου, (2009), Κυκλοφοριακή Τεχνική)

Όσο ο φόρτος αυξάνεται η ταχύτητα μειώνεται. Το άνω τμήμα της γραφικής παράστασης αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερης ροής και οριοθετείται στο σημείο που μεγιστοποιείται ο φόρτος q_c . Από το σημείο αυτό και μετά η πυκνότητα υπερβαίνει την τιμή k_c , οπότε ο φόρτος και η ταχύτητα μειώνονται. Οριοθετείται έτσι το κάτω τμήμα της γραφικής παράστασης που αντιστοιχεί σε συνθήκες κορεσμού.

Συνοψίζοντας, υπάρχουν θεμελιώδεις σχέσεις μεταξύ των τριών μακροσκοπικών μεγεθών (φόρτος, ταχύτητα, πυκνότητα). Από τις σχέσεις αυτές προκύπτουν τα θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής που φαίνονται στο Σχήμα 3 θα πρέπει να τονισθεί ότι οι παραπάνω σχέσεις βασίζονται στη θεώρηση ότι η ταχύτητα και η πυκνότητα συνδέονται με γραμμική σχέση. Σημειώνεται ότι και οι τρεις θεμελιώδεις σχέσεις είναι σημαντικές γιατί εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς σε διαφορετικές συγκοινωνιακές εφαρμογές. Για παράδειγμα, η σχέση ταχύτητας πυκνότητας χρησιμοποιείται σε θεωρητικό επίπεδο ως βάση στις θεωρίες κυκλοφοριακής ροής, εξαιτίας του γεγονότος ότι παρέχει μια τιμή ταχύτητας για κάθε τιμή πυκνότητας (μονοσήμαντη σχέση), πράγμα που δεν ισχύει στις άλλες δύο σχέσεις. Η σχέση ταχύτητας-φόρτου χρησιμοποιείται περισσότερο σε περιπτώσεις σχεδιασμού. Για παράδειγμα, στόχος είναι να βρεθεί το σημείο της παροχής του βέλτιστου επιπέδου εξυπηρέτησης (ταχύτητα) σε συνάρτηση με τη ζήτηση (φόρτος).

3.7 Εργαλεία Προσομοίωσης και Προγραμματισμού

Για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω εργαλεία προσομοίωσης και προγραμματισμού:

Aimsun

Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Aimsun.Next της εταιρίας Aimsun. Η Aimsun προσφέρει σε παγκόσμιο επίπεδο λογισμικά και υπηρεσίες για κυκλοφοριακό σχεδιασμό, προσομοίωση της κυκλοφορίας και πρόβλεψη. Η πλατφόρμα Aimsun.Next παρέχει τη δυνατότητα στους χρήστες να μοντελοποιήσουν συγκοινωνιακά δίκτυα κάθε μεγέθους, από έναν κόμβο έως και μία ολόκληρη περιοχή. Δύναται να προσομοιωθούν οι μετακινήσεις συμβατικών οχημάτων, αυτόματων, λεωφορείων κλπ., και να υπολογιστούν ποικίλα κυκλοφορικά μεγέθη, όπως η ροή, η κατάληψη, ο φόρτος και άλλα.

QGIS

Το QGIS λειτουργεί ως λογισμικό που παρέχει γεωγραφικές πληροφορίες (GIS) στους χρήστες. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και να επεξεργασία χωρικών πληροφοριών, και την εξαγωγή γραφικών χαρτών. Το QGIS υποστηρίζει shapefiles, προσωπικές βάσεις γεωγραφικών δεδομένων, dxf, MapInfo, PostGIS και άλλες μορφές αρχείων.

SQLite

Το SQLite είναι από τα πιο διαδεδομένα προγράμματα αποθήκευσης μεγάλων βάσεων δεδομένων και αυτή ήταν η χρήση του στην παρούσα Εργασία.

Google maps

Οι Χάρτες Google (Google Maps) είναι υπηρεσία χαρτογράφησης στο Διαδίκτυο. Η εφαρμογή και η τεχνολογία της υπηρεσίας παρέχεται από την Google. Συγκεκριμένα, προσφέρει χάρτες οδών και σχεδιαστή διαδρομών για μεταφορές ως πεζός, αλλά και με αυτοκίνητο, ποδήλατο ή μέσα μαζικής μεταφοράς. Περιλαμβάνει επίσης εντοπισμό των επιχειρήσεων που βρίσκονται σε πόλεις σε πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο. Τέλος, περιλαμβάνει δορυφορικές εικόνες των οδών και του περιβάλλοντος χώρου.

Excel

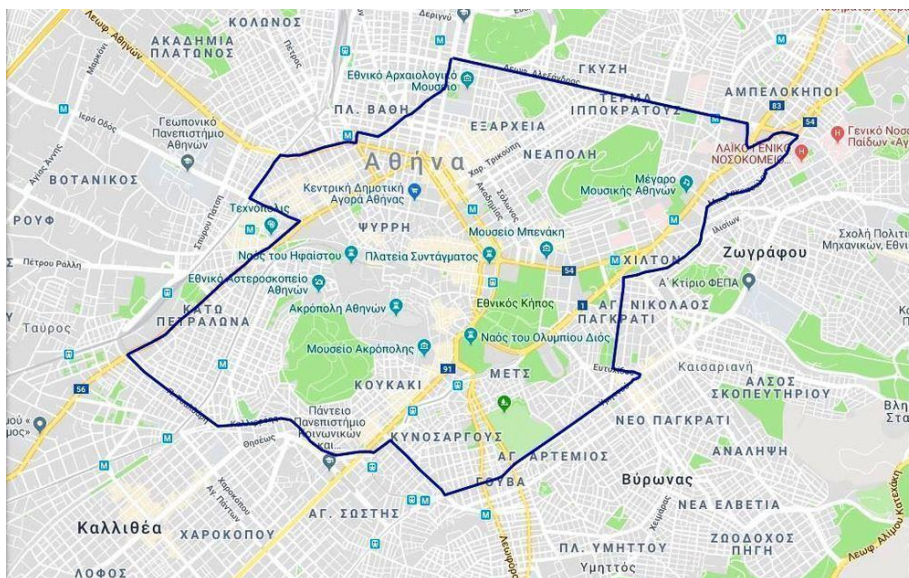
Το Microsoft Excel Έχει πολλές παρεχόμενες λειτουργίες για να ανταποκριθεί σε στατιστικές, μηχανικές και οικονομικές ανάγκες. Επιπλέον, μπορεί να εμφανίζει δεδομένα ως γραμμικά γραφικές παραστάσεις, ιστογράμματα και γραφήματα και με πολύ περιορισμένη τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση. Επιτρέπει τη διατομή των δεδομένων για τη προβολή των εξαρτήσεων τους από διάφορους παράγοντες για διαφορετικές οπτικές γωνίες (χρησιμοποιώντας συγκεντρωτικούς πίνακες περιστροφής και τον διαχειριστή σεναρίων).

4. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται οι πηγές από τις οποίες αντλήθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα, για την πραγματοποίηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Χρειάστηκαν δεδομένα για την προσομοίωση του οδικού δικτύου, των κυκλοφοριακών φόρτων για τα οποία γίνεται αναλυτική περιγραφή. Τέλος, παρουσιάζεται η επεξεργασία του δικτύου προκειμένου αυτό να εισαχθεί σε περιβάλλον Aimsun.Next.

4.1 Συλλογή δεδομένων

Αρχικά τα δεδομένα προέκυψαν από την κρατική πλατφόρμα (https://data.gov.gr/datasets/road_traffic_attica/), όπου εξήχθησαν οι κυκλοφορικοί φόρτοι που είχαν μετρηθεί από διάφορους φωρατές που είναι τοποθετημένοι στο δίκτυο του δακτύλιου της Αθήνας (Εικόνα 4.1). Τα δεδομένα των φωρατών αυτών (detectors) αντιπροσωπεύουν δύο διαφορετικές ημερομηνίες, την ημερομηνία του περιστατικού κάτω από ακραία καιρικά φαινόμενα (έντονη βροχόπτωση) και την ημερομηνία μιας φυσιολογικών καιρικών συνθηκών ημέρας. Η ημερομηνία της κακοκαιρίας που προκάλεσε πλημμύρες στο οδικό δίκτυο της Αθήνας ήταν 14-10-21 (extreme day), και η μέρα φυσιολογικών συνθηκών επιλέχθηκε η 6-10-21 (normal day). Έτσι τα δεδομένα που εξήχθησαν αφορούσαν τις παραπάνω ημερομηνίες με σκοπό την σύγκριση τους. Οι ώρες για τις οποίες πάρθηκαν τα δεδομένα ήταν από 14.00 έως 17.00 , δηλαδή διάστημα τριών ωρών.



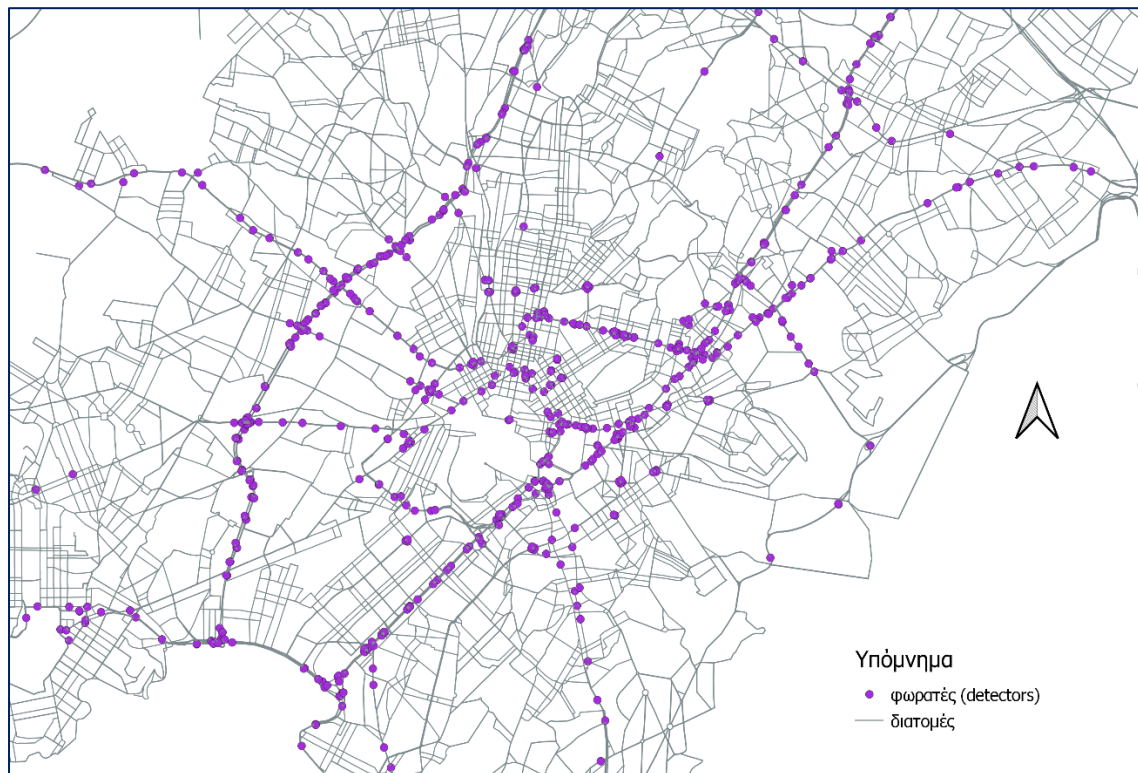
Εικόνα 4.1 Δακτύλιος Αθήνας

Κεφάλαιο 4. Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	EVENT DAY				NORMAL DAY			
2	deviceid	countedcars	appprocesstime: 14:00	average_speed	deviceid	countedcars	appprocesstime 14.00	average_speed
3	d106	18760	2021-10-14 14:00:00+00:00	86,91897655	d106	4563	2021-10-06 14:00:00+00:00	73,24216524
4	d107	3200	2021-10-14 14:00:00+00:00	29,4125	d107	546	2021-10-06 14:00:00+00:00	30,72161172
5	d108	22960	2021-10-14 14:00:00+00:00	19,92857143	d108	4615	2021-10-06 14:00:00+00:00	95,45438787
5	d109	7840	2021-10-14 14:00:00+00:00	42,93877551	d109	776	2021-10-06 14:00:00+00:00	64,04381443
7	d110	19080	2021-10-14 14:00:00+00:00	84,38993711	d110	4584	2021-10-06 14:00:00+00:00	74,88612565
3	d111	3960	2021-10-14 14:00:00+00:00	55,56565657	d111	639	2021-10-06 14:00:00+00:00	50,59937402
9	d112	19920	2021-10-14 14:00:00+00:00	16,82931727	d112	4671	2021-10-06 14:00:00+00:00	91,13830015
0	d113	2720	2021-10-14 14:00:00+00:00	23,94117647	d113	468	2021-10-06 14:00:00+00:00	36,68162393
1	d114	17760	2021-10-14 14:00:00+00:00	93,74099099	d114	3922	2021-10-06 14:00:00+00:00	94,14533401
2	d115	5080	2021-10-14 14:00:00+00:00	49,95275591	d115	1120	2021-10-06 14:00:00+00:00	48,46875
3	d116	10280	2021-10-14 14:00:00+00:00	13,22178988	d116	3211	2021-10-06 14:00:00+00:00	99,45406415
4	d117	4280	2021-10-14 14:00:00+00:00	24,6728972	d117	323	2021-10-06 14:00:00+00:00	64,12383901
5	d118	12720	2021-10-14 14:00:00+00:00	103,9528302	d118	3169	2021-10-06 14:00:00+00:00	105,5288735
6	d119	5640	2021-10-14 14:00:00+00:00	52,45390071	d119	832	2021-10-06 14:00:00+00:00	65,78125
7	d120	10200	2021-10-14 14:00:00+00:00	16,04705882	d120	3232	2021-10-06 14:00:00+00:00	99,42883663
8	d121	440	2021-10-14 14:00:00+00:00	36,72727273	d121	74	2021-10-06 14:00:00+00:00	43,33783784
9	d122	12960	2021-10-14 14:00:00+00:00	100,4012346	d122	3214	2021-10-06 14:00:00+00:00	100,4576851
0	d123	1520	2021-10-14 14:00:00+00:00	44,05263158	d123	150	2021-10-06 14:00:00+00:00	50,01333333
1	d124	8520	2021-10-14 14:00:00+00:00	24,76056338	d124	2650	2021-10-06 14:00:00+00:00	107,5249057
2	d125	1120	2021-10-14 14:00:00+00:00	12,03571429	d125	602	2021-10-06 14:00:00+00:00	25,12126246
3	d126	14000	2021-10-14 14:00:00+00:00	77,00857143	d126	3327	2021-10-06 14:00:00+00:00	75,43642922
4	d127	13440	2021-10-14 14:00:00+00:00	28,87202381	d127	3924	2021-10-06 14:00:00+00:00	80,53950051
5	d128	5640	2021-10-14 14:00:00+00:00	88,38297872	d128	1040	2021-10-06 14:00:00+00:00	91,16346154
6	d129	7600	2021-10-14 14:00:00+00:00	83,90526316	d129	2224	2021-10-06 14:00:00+00:00	81,76933453
7	d130	10040	2021-10-14 14:00:00+00:00	10,05179283	d130	3152	2021-10-06 14:00:00+00:00	66,32106599
8	d131	5560	2021-10-14 14:00:00+00:00	39,48920863	d131	839	2021-10-06 14:00:00+00:00	48,47437426
9	d132	5480	2021-10-14 14:00:00+00:00	61,48905109	d132	885	2021-10-06 14:00:00+00:00	61,22146893
0	d133	7960	2021-10-14 14:00:00+00:00	81,6281407	d133	2281	2021-10-06 14:00:00+00:00	77,59622972
1	d134	400	2021-10-14 14:00:00+00:00	72,2	d134	55	2021-10-06 14:00:00+00:00	66,14545455
2	d140	1280	2021-10-14 14:00:00+00:00	61,875	d140	247	2021-10-06 14:00:00+00:00	60,93522267
3	d141	4920	2021-10-14 14:00:00+00:00	89,78861789	d141	822	2021-10-06 14:00:00+00:00	95,32603406
4	d142	4960	2021-10-14 14:00:00+00:00	3,451612903	d142	1636	2021-10-06 14:00:00+00:00	101,1858191
5	d143	2560	2021-10-14 14:00:00+00:00	3,0625	d143	24	2021-10-06 14:00:00+00:00	55,45833333
6	d144	4680	2021-10-14 14:00:00+00:00	3,914529915	d144	1629	2021-10-06 14:00:00+00:00	97,59975445
7	d145	960	2021-10-14 14:00:00+00:00	53,33333333	d145	212	2021-10-06 14:00:00+00:00	52,99528302
8	d151	1640	2021-10-14 14:00:00+00:00	96,07317073	d151	353	2021-10-06 14:00:00+00:00	92,41076487

Εικόνα 4.2: Απόσπασμα δεδομένων που αντλήθηκαν από κρατική πλατφόρμα

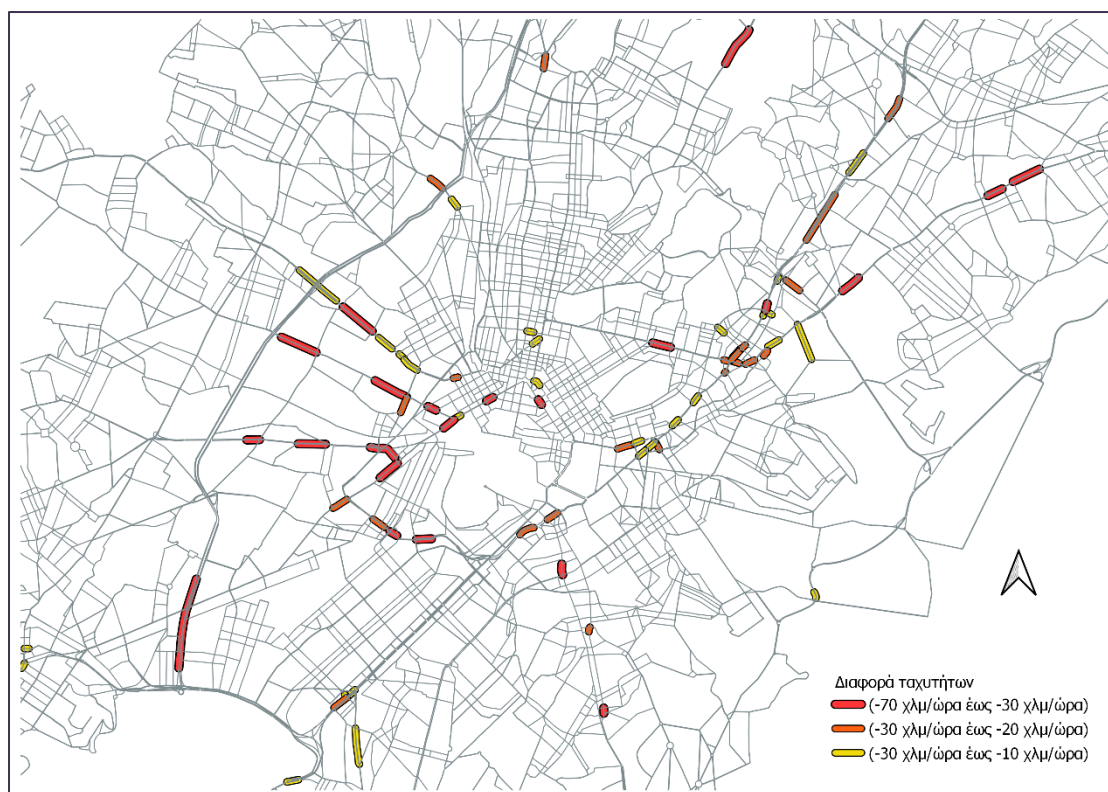
Στην συνέχεια, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.2, αντλήθηκαν τα δεδομένα 300 φωρατών (που βρίσκονταν στην περιοχή της Αττικής) τα οποία αφορούσαν το αριθμό οχημάτων που διέσχισαν την επικείμενη διατομή δρόμου που βρίσκονταν καθώς και την μέση ταχύτητα που είχαν αναπτύξει. Ακολούθως, τα δεδομένα μετρήσεων, συγκεκριμένα οι μέσες ταχύτητες που αναπτύχθηκαν στο διάστημα των τριών ωρών, εισήχθησαν σε περιβάλλον QGIS όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3: Οι φωρατές κυκλοφορίας σε περιβάλλον QGIS

Βάσει των δεδομένων των ταχυτήτων για κάθε φωρατή έγινε οπτικοποίηση της διαφοράς ταχύτητάς τους, αφαιρώντας την ταχύτητα που είχε καταγραφεί την ημέρα των φυσιολογικών συνθηκών από εκείνη του περιστατικού (extreme speed- normal speed). Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να εντοπιστούν τα οδικά δίκτυα στα οποία η μείωση την ταχύτητας θα ήταν πολύ μεγάλη, και με αυτόν τον τρόπο να αποδειχτεί η ύπαρξη περιστατικού. Ο εντοπισμός των δρόμων αυτών, και το κλείσιμο τους θα συμβάλλει ώστε να προσομοιωθεί στην συνέχεια η κυκλοφορία την ημέρα του περιστατικού. Η διαφορά των ταχυτήτων ταξινομήθηκε σε τρεις κλάσεις:

- ❖ Αρνητική $\Rightarrow$ Μείωση της ταχύτητας
- ❖ Μηδενική $\Rightarrow$ Διατήρηση της ταχύτητας
- ❖ Θετική $\Rightarrow$ Αύξηση της ταχύτητας



Εικόνα 4.4: Οπτικοποίηση διαφοράς ταχυτήτων σε περιβάλλον QGIS

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.4 οι δρόμοι που παρουσίασαν την μέγιστη μείωση ταχύτητας είναι αυτοί του χρώματος μοβ και πορτοκαλί. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται αναλυτικά ποια οδικά δίκτυα παρουσίασαν το μεγαλύτερο πρόβλημα κατά την διάρκεια του περιστατικού. Όσο η πυκνότητα αυξάνεται, η ταχύτητα μειώνεται έως ότου η πυκνότητα πάρει τη μέγιστη τιμή της που αντιστοιχεί σε συνθήκες ακινητοποίησης οχημάτων, οπότε η ταχύτητα μηδενίζεται. Τμήματα των αρτηριών αυτών θεωρήθηκαν συμφορημένα και μη ικανά να διαχειριστούν επικείμενη ζήτηση.

Πίνακας 4.1: Αρτηρίες που παρουσίασαν την μέγιστη μείωση ταχύτητας

Αρτηρίες με μέγιστη μείωση ταχύτητας
Λεωφόρος Κηφισίας
Λεωφόρος Μεσογείων
Ιερά Οδός
Οδός Κωνσταντινουπόλεως
Οδός Παναγή Τσαλδάρη
Λεωφόρος Αθηνών
Λεωφόρος Πέτρου Ράλλη
Λεωφόρος Πειραιώς
Λεωφόρος Βασιλίσσης Σοφίας

4.2 Δημιουργία Αρχείου Προσομοίωσης

Αναφορικά με το δίκτυο, ακολούθησε η διαδικασία μετάβασής του στο λογισμικό προσομοίωσης Aimsun.Next, όπου και εισήχθησαν τα δεδομένα των φωρατών της φυσιολογικών καιρικών συνθηκών ημέρας. Στο Εργαστήριο Κυκλοφοριακής Τεχνικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου διατηρείται μοντέλο σχεδιασμένο στο πρόγραμμα προσομοίωσης AIMSUN του βασικού οδικού δικτύου της Αττικής καθώς και πίνακας προέλευσης-προορισμού (1824 κεντροειδών) και 24 ωρών (σε οχήματα). Επίσης, έχουν καταχωρηθεί τα βασικά χαρακτηριστικά και οι παράμετροι του δικτύου (χωρητικότητες, ταχύτητες ελεύθερης ροής, μέγιστες ταχύτητες κλπ.). Τα στοιχεία για τα οδικά τμήματα ενδεικτικά περιλαμβάνουν μήκος, πλάτος, αριθμό λωρίδων οδών, ταχύτητα ελεύθερης ροής, χωρητικότητα. Αντίστοιχα, τα στοιχεία για τους κόμβους ενδεικτικά περιλαμβάνουν επιτρεπόμενες κινήσεις, αριθμό λωρίδων ανά κίνηση, ρύθμιση προτεραιότητας, προγράμματα σηματοδότησης, ταχύτητα ελεύθερης ροής και χωρητικότητα. Το μοντέλο του οδικού δικτύου της Αττικής παρουσιάζεται στην Εικόνα 4 και η περιοχή που μελετήθηκε για την παρούσα διπλωματική εργασία είναι το υποδίκτυο του δακτυλίου Αθηνών (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5: Το μοντέλο του οδικού δικτύου της Αττικής σε περιβάλλον Aimsun.Next



Εικόνα 4.6: Περιοχής Μελέτης σε περιβάλλον Aimsun.Next

4.2.1 Βαθμονόμηση δικτύου

Στα συστήματα κυκλοφορίας, η συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος ορίζεται συνήθως ως προς τις μεταβλητές κυκλοφορίας όπως η ροή, η ταχύτητα, η κατάληψη, τα μήκη ουρών και ούτω καθεξής, τα οποία μπορούν να μετρηθούν από ανιχνευτές κυκλοφορίας σε συγκεκριμένες τοποθεσίες στο οδικό δίκτυο. Για την επικύρωση του μοντέλου προσομοίωσης κυκλοφορίας, ο προσομοιωτής θα πρέπει να μπορεί να μιμηθεί τη διαδικασία ανίχνευσης κυκλοφορίας και να παράγει μια σειρά προσομοιωμένων παρατηρήσεων. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται μια στατιστική σύγκριση με τις πραγματικές μετρήσεις για να προσδιοριστεί εάν επιτυγχάνεται η επιθυμητή ακρίβεια στην αναπαραγωγή της συμπεριφοράς του συστήματος. Αρχικά το Aimsun απαιτεί την εισαγωγή ζήτησης (demand) στο δίκτυο για να υπάρξει η δυνατότητα εκτέλεσης των επιθυμητών προσομοιώσεων. Δημιουργήθηκε ο πίνακας προέλευσης-προορισμού (OD matrix, Εικόνα 4.7) ώστε να κατανεμηθεί η ζήτηση και στην συνέχεια προσαρμόστηκαν τα πραγματικά δεδομένα από τους φωρατές (detectors).

Κεφάλαιο 4. Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων

Main	Cels	Histogram	Path Assignment	Parameters	Attributes																		
Headers: ID: Name						Grouping Category: None																	
☐ Show All Centroids						☐ Hide Empty Rows						☐ Hide Empty Columns						☐ Draw Desire Lines					
		574450		574452		574454		574456		574458		574460		574462		574464		574466		574468		574470	
574450		9,7		5,15		5,76		7,58		2,73		3,94		6,36		3,94		4,24		1,82		2,24	
574452		4,85		3,64		2,73		4,85		2,12		2,12		3,33		2,12		2,73		0,3		1,66	
574454		5,76		3,33		3,64		4,85		2,73		3,03		4,55		2,12		1,82		1,21		1,66	
574456		7,58		4,24		4,85		123,95		2,42		3,64		5,76		3,64		3,03		2,12		1,66	
574458		3,64		2,12		2,42		3,64		1,82		1,82		2,73		1,82		1,21		0,3		0,52	
574460		3,94		2,12		2,73		3,64		1,82		50,91		3,03		1,82		2,42		1,52		1,44	
574462		5,15		3,64		4,55		5,46		3,03		3,03		4,55		3,03		3,03		1,82		1,9	
574464		3,94		2,12		3,03		3,64		0,61		1,82		3,03		7,58		2,42		1,52		0,04	
574466		3,33		2,42		1,52		4,24		1,82		2,42		3,33		1,52		22,12		0,91		0,08	
574468		2,12		1,52		0,3		1,52		1,21		0,91		0,61		1,52		1,21		11,52		0,24	
574470		2,7		2,1		2,1		2,1		1,48		0,89		1,49		1,18		0,5				77,47	
574472		4,53		2,71		3,02		3,32		1,8		1,51		3,01		1,26		1,83		0,6		3,97	
574474		4,85		2,73		3,33		3,64		2,12		2,12		3,94		2,11		2,12		0,61		3,36	
574476		1,18		0,59		0,88		1,77		0,89		1,18		1,18		0,59		0,6				1,22	
574478		3,32		2,32		1,33		2,99		0,56		1,19		1,49		1,36		0,55		0,59		2,54	
574480		1,31		2,31		2,31		2,33		2,35		2,37		2,39		2,41		2,43		2,45		2,47	

Εικόνα 4.7: Πίνακας προορισμού (OD matrix)

Ως συνέχεια του ορισμού της κυκλοφοριακής ζήτησης, ακολούθησε η διαδικασία της βαθμονόμησης (calibration). Μέσω της βαθμονόμησης, μπορούν να εισαχθούν οι πραγματικοί κυκλοφοριακοί φόρτοι, οι οποίοι μετρήθηκαν από φωρατές σε σημεία του δακτυλίου της Αθήνας, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.

Ακολούθως ορίστηκε το υποδίκτυο (subnetwork) της Εικόνας 4.6, στο οποίο οι πίνακες προέλευσης προορισμού, η ζήτηση, η διαμόρφωση των κεντροειδών αποτελούν μια μεταφορά από το κύριο δίκτυο (Εικόνα 4.5). Η μεταφορά στο υποδίκτυο (traversal) απαιτεί δεδομένα εισόδου από ένα στατικό πείραμα που είχε εκτελεστεί προηγουμένως, ή την αναπαραγωγή μιας δυναμικής προσομοίωσης του πλήρους δικτύου ώστε να παραχθούν τα δεδομένα ζήτησης του υποδικτύου.

Generate Dynamic Traversal

Output Parameters

☐ Include OD Routes

Input Parameters

Replication: 65549: Replication 65549

Help OK Cancel

Generate Static Traversal

Input Parameters

Assignment Experiment: 10538: Static Assignment Experiment Car

Public Transport Travel Time Calculation: Travel Time in Free Flow Conditions

Output Parameters

Internal Centroid Percentages (Dynamic): Keep Original Percentages

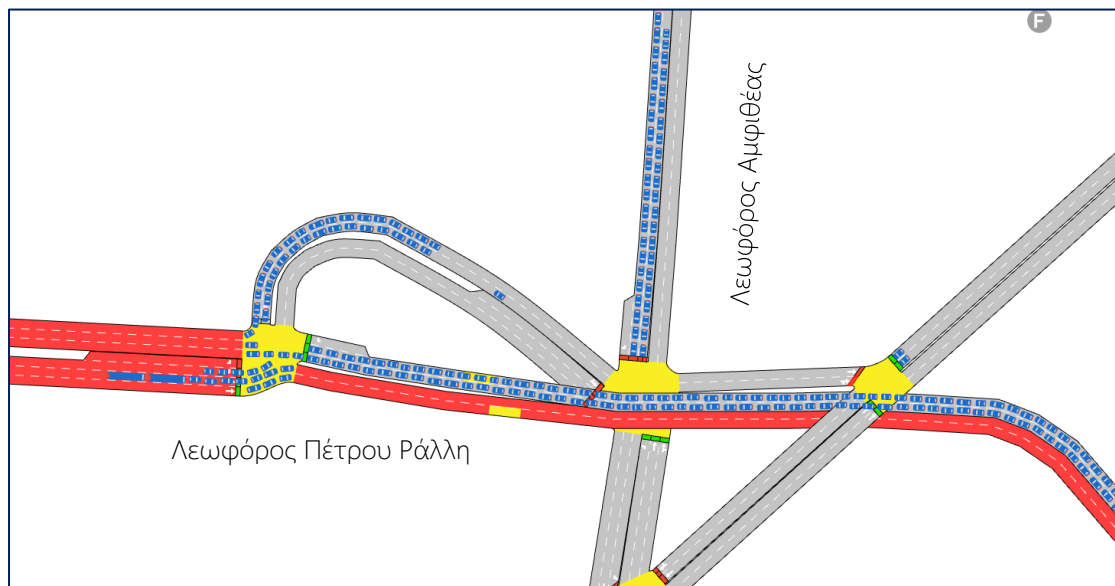
Help OK Cancel

Εικόνα 4.8: Μεταφορά σε υποδίκτυο (traversal)

4.2.2 Τα σενάρια προσομοίωσης

Με δεδομένη την κατανομή της ζήτησης που επιλέχθηκε, υλοποιήθηκαν δώδεκα σενάρια σε μικροσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης για τα συμβατικά οχήματα και δώδεκα για τα αυτόματα (CAVs). Τα σενάρια αυτά αφορούν στρατηγικές διαχείρισης της κυκλοφορίας με σκοπό την διαχείριση της συμφόρησης που είναι απόρροια των ακραίων καιρικών φαινομένων.

Αρχικά για να προσομοιωθεί η μέρα του περιστατικού στα σενάρια προσομοίωσης έκλεισαν τμήματα των οδικών δικτύων του Πίνακα 4.1. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.9 με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η Λεωφόρος Πέτρου Ράλλη η οποία και κλείστηκε ώστε να μην διέρχονται οχήματα, προσομοιάζοντας έτσι την ημέρα του περιστατικού. Η κίτρινη επιφάνεια αναπαριστά τις διασταυρώσεις οδών, ενώ τα κόκκινα και πράσινα σημεία που βρίσκονται στις διασταυρώσεις δείχνουν τις ενδείξεις των φωτεινών σηματοδοτών τη συγκεκριμένη στιγμή.



Εικόνα 4.9: Στιγμιότυπο από το περιβάλλον του Aimsun ενώ εκτελείται το σενάριο

Σε κάθε ένα από τα δώδεκα σενάρια, εκτελέστηκαν δέκα επαναλήψεις, ώστε να προκύψουν όσο το δυνατόν πιο ορθά αποτελέσματα. Αρχικά, υλοποιήθηκε ένα σενάριο βάσης αναφοράς (normal day scenario – BL). Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται το δίκτυο με τις υπάρχουσες συνθήκες, δηλαδή με συμβατικά οχήματα, και καμία στρατηγική διαχείρισης κυκλοφορίας. Στο δεύτερο σενάριο περιγράφεται το δίκτυο με κλειστά τμήματα αρτηριών και καμία στρατηγική επαναδρομολόγησης (extreme day). Στα υπόλοιπα δέκα σενάρια εντάσσεται η στρατηγική επαναδρομολόγησης (reroute strategy) σε ποσοστό από 10% έως

100%. Επίσης για τα δώδεκα αυτά σενάρια εισάγονται με ποσοστά διείσδυσης από 10% έως 100% τα αυτόματα και συνδεδεμένα οχήματα (CAVs).

4.2.3 Στρατηγική επαναδρομολόγησης πορείας (Rerouting)

Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, αυτή η στρατηγική της επαναδρομολόγησης, αναγκάζει τα οχήματα να επιλέξουν μια εναλλακτική διαδρομή για να φτάσουν στον προορισμό τους από την τρέχουσα ενότητα. Αυτό συμβαίνει καθώς λόγω του περιστατικού ,κάποιες αρτηρίες είναι ακατάλληλες να δεχθούν φόρτο, και άρα κλείνουν, και έτσι τα οχήματα πρέπει να ακολουθήσουν διαφορετική διαδρομή. Στην εν λόγω διπλωματική εργασία, το ποσοστό των υποψήφιων οχημάτων για αναγκαστική αλλαγή πορείας από αυτή που θα ακολουθούσαν, ήταν για κάθε ένα από τα σενάρια 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% ,70% , 80%, 90%και 100%. Στους Πίνακες 4.2 και 4.3 παρουσιάζονται τα σενάρια που αναπτύχθηκαν για τα συμβατικά και τα αυτόματα και συνδεδεμένα οχήματα.

Πίνακας 4.2: Σενάρια προσομοίωσης για συμβατικά οχήματα

Σενάρια προσομοίωσης		
Συμβατικά οχήματα	1	Normal day
	2	Extreme day
	3	Επαναδρομολόγηση 10%
	4	Επαναδρομολόγηση 20%
	5	Επαναδρομολόγηση 30%
	6	Επαναδρομολόγηση 40%
	7	Επαναδρομολόγηση 50%
	8	Επαναδρομολόγηση 60%
	9	Επαναδρομολόγηση 70%
	10	Επαναδρομολόγηση 80%
	11	Επαναδρομολόγηση 90%
	12	Επαναδρομολόγηση 100%

Πίνακας 4.3: Σενάρια προσομοίωσης για αυτόματα και συνδεδεμένα οχήματα CAVs

Σενάρια προσομοίωσης		
Αυτόματα και συνδεδεμένα οχήματα (CAVs)	(10%-100% CAVs)	Normal day
	(10%-100% CAVs)	Extreme day
	(10%-100% CAVs)	Επαναδρομολόγηση 10%
	(10%-100% CAVs)	Επαναδρομολόγηση 20%
	(10%-100% CAVs)	Επαναδρομολόγηση 30%
	(10%-100% CAVs)	Επαναδρομολόγηση 40%
	(10%-100% CAVs)	Επαναδρομολόγηση 50%
	(10%-100% CAVs)	Επαναδρομολόγηση 60%
	(10%-100% CAVs)	Επαναδρομολόγηση 70%
	(10%-100% CAVs)	Επαναδρομολόγηση 80%
	(10%-100% CAVs)	Επαναδρομολόγηση 90%
	(10%-100% CAVs)	Επαναδρομολόγηση 100%

4.3 Παραμετροποίηση μοντέλων

Για την προσομοίωση των σεναρίων της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκαν μικροσκοπικά πρότυπα μελέτης, καθώς αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως για την έρευνα της επίδρασης των τεχνολογιών επικοινωνίας στα οδικά δίκτυα. Συγκεκριμένα για την αναπαράσταση των συμβατικών οχημάτων επιλέχθηκε το μικροσκοπικό πρότυπο ακολουθούντων οχημάτων του Krauss. Σύμφωνα με τους Adamidis et al. (2020) τα προφίλ οδήγησης είναι: σύνηθες, επιθετικό και αμυντικό. Καθένα από αυτά τα προφίλ παραμετροποιήθηκε σύμφωνα με τους Πίνακες 4.4 και 4.5.

Πίνακας 4.4: Παράμετροι Μοντέλου Krauss

Παράμετροι Krauss	Περιγραφή	Σύνηθες	Επιθετικό	Αμυντικό
sigma	Το σφάλμα του οδηγού κατά την οδήγηση (μεταξύ 0 και 1).	0,5	0,5	0,5
reaction time (s)	Ο επιθυμητός (ελάχιστος) χρόνος αντίδρασης του οδηγού. Βασίζεται στον καθαρό χώρο μεταξύ προπορευόμενου και ακολουθούντος οχήματος	1	1	1
accel(m/s ²)	Η επιτάχυνση των οχημάτων	2,46	3,84	1,79
Decel(m/s ²)	Η επιβράδυνση των οχημάτων.	2,82	4,15	4,15
speedFactor	Ο πολλαπλασιαστής ταχύτητας των οχημάτων, για όρια ταχύτητας της λωρίδας.	1	1	1

Επιπρόσθετα για την αναπαράσταση των συνδεδεμένων οχημάτων επιλέχθηκε το πρότυπο Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (CACC) , του οποίου οι παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5 (Arem et al., 2006).

Πίνακας 3.5: Παράμετροι Μοντέλου CACC

Παράμετροι CACC	Τιμή
sigma	0
reaction time (s)	0,1-0,2
accel(m/s ²)	2
Decel(m/s ²)	3
speedFactor	1
safe time gap (s)	0,9-2,5
emergencyDecel	9
speedControlGain	0,4
gapClosingControlGainGap	0,005
gapClosingControlGainGapDot	0,05
gapControlGainGap	0,45
gapControlGainGapDot	0,0125
collisionAvoidanceGainGap	0,45
collisionAvoidanceGainGapDot	0,05

Οι προαναφερθείσες παράμετροι του μοντέλου ορίζονται ώστε να πραγματοποιηθούν τα δώδεκα σενάρια. Αρχικά οι προσομοιώσεις ακολουθούν το μικροσκοπικό πρότυπο ακολουθούντων οχημάτων του Krauss για όλες τις στρατηγικές διαχείρισης της κυκλοφορίας. Στην συνέχεια τα συνδεδεμένα οχήματα σύμφωνα με το πρότυπο Συνεργατικού Προσαρμοστικού Ελέγχου Πορείας (CACC) εισέρχονται στην κυκλοφορία με ποσοστό από 10% έως 100% που αυξάνει ανά 10%

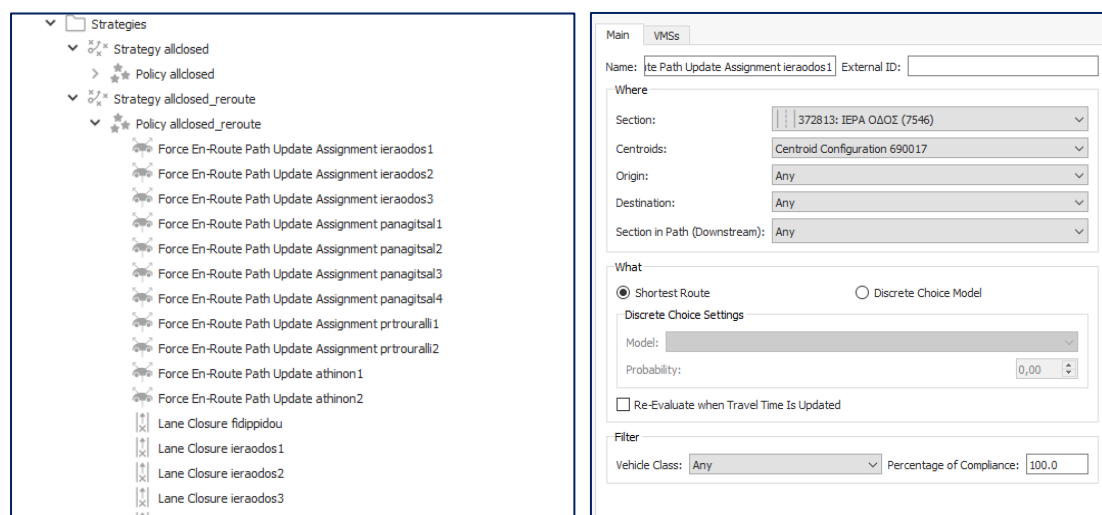
5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα, όπως αυτά αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4. Για τη βαθμονόμηση απομονώθηκαν οι μετρήσεις των 300 φωρατών , για το χρονικό διάστημα των 3 ωρών 14.00-17.00μ.μ. , και φορτίστηκε το δίκτυο.

Στην συνέχεια τα οχήματα ακολούθησαν δώδεκα σενάρια προσομοίωσης ακολουθώντας τις εξής περιπτώσεις:

- ❖ 100% συμβατικά οχήματα για την κανονική ημέρα (normal day)
- ❖ 100% συμβατικά οχήματα για την ημέρα του περιστατικού (event day)
- ❖ Αυτόματα και συνδεδεμένα οχήματα σε ποσοστό 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% και 100% για την κανονική ημέρα (normal day)
- ❖ Αυτόματα και συνδεδεμένα οχήματα σε ποσοστό 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% και 100% για την ημέρα του περιστατικού (event day)
- ❖ 100% συμβατικά οχήματα με ποσοστό επαναδρομολόγησης 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% και 100%
- ❖ Αυτόματα και συνδεδεμένα οχήματα σε ποσοστό 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% και 100%, που ακολουθούν στρατηγικές επαναδρομολόγησης για ποσοστό 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% και 100%

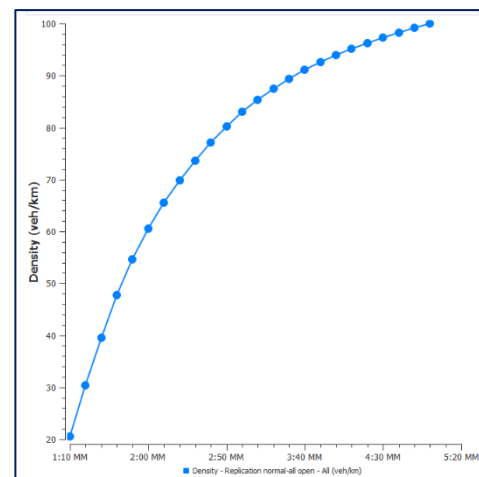
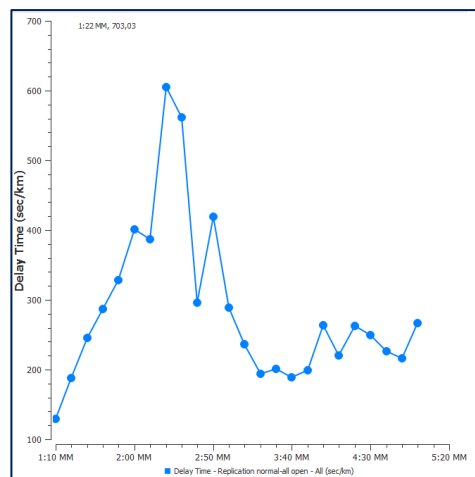
Παρακάτω παρουσιάζεται στιγμιότυπο της στρατηγικής επαναδρομολόγησης από το περιβάλλον Aimsun.Next.



Εικόνα 5.1: Στιγμιότυπο στρατηγικής Επαναδρομολόγησης του περιβάλλοντος Aimsun.Next

Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζονται τα εξαγόμενα αρχεία, μετά το πέρας μίας εκ των προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα στο παραγόμενο αρχείο αναγράφονται αναλυτικά κυκλοφορικά μεγέθη όπως η ροή, ο χρόνος ταξιδιού, οι καθυστερήσεις των οχημάτων, η συνολική απόσταση που διανύθηκε και πολλά άλλα. Επιπρόσθετα όλα τα χαρακτηριστικά αυτά παρουσιάζονται ανά δέκα λεπτά για το συνολικό τρίωρο της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα εξάγονται και σε μορφή γραφημάτων.

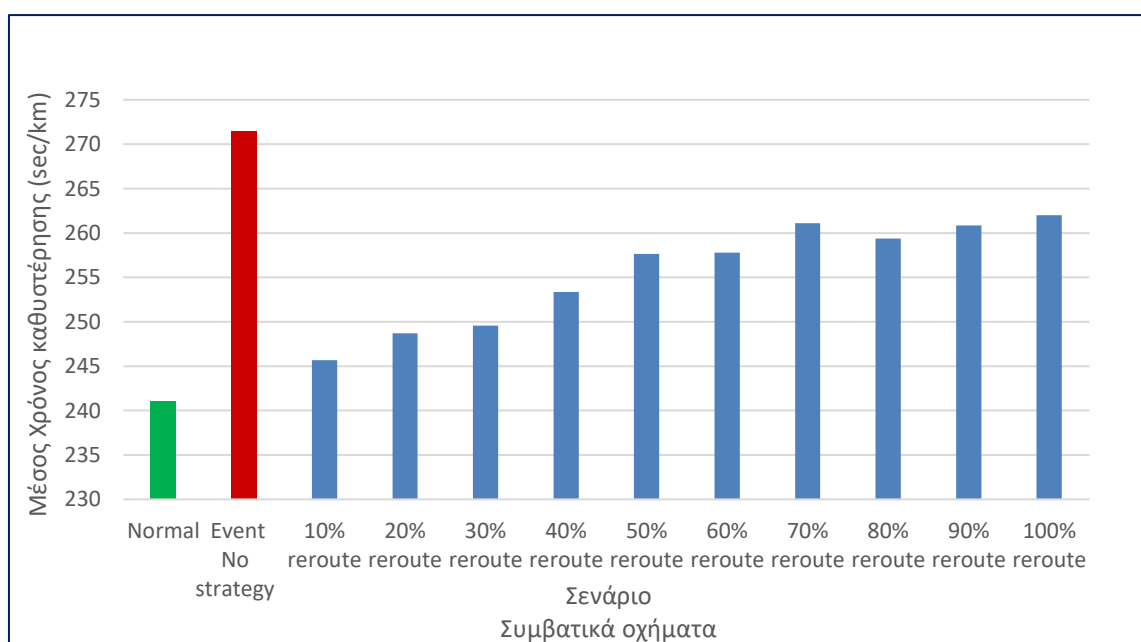
Time Series	Value	Standard Deviation	Units
Delay Time - All	249,76	534,76	sec/km
Delay Time - Car	250,29	535,48	sec/km
Delay Time - Bus	105,42	237,86	sec/km
Density - All	76,19	N/A	veh/km
Density - Car	75,54	N/A	veh/km
Density - Bus	0,65	N/A	veh/km
Flow - All	8239,25	N/A	veh/h
Flow - Car	8208,75	N/A	veh/h
Flow - Bus	30,5	N/A	veh/h
Harmonic Speed - All	11,16	12,47	km/h
Harmonic Speed - Car	11,16	12,48	km/h
Harmonic Speed - Bus	13,2	9,25	km/h
Input Count - All	87162	N/A	veh
Input Count - Car	86583	N/A	veh
Input Count - Bus	579	N/A	veh
Input Flow - All	21790,5	N/A	veh/h
Input Flow - Car	21645,75	N/A	veh/h
Input Flow - Bus	144,75	N/A	veh/h
Mean Queue - All	47557,08	N/A	veh
Mean Queue - Car	47180,71	N/A	veh
Mean Queue - Bus	376,35	N/A	veh



Εικόνα 5.2 Στιγμιότυπα αποτελεσμάτων μία εκ των προσομοιώσεων σε περιβάλλον Aimsun.Next

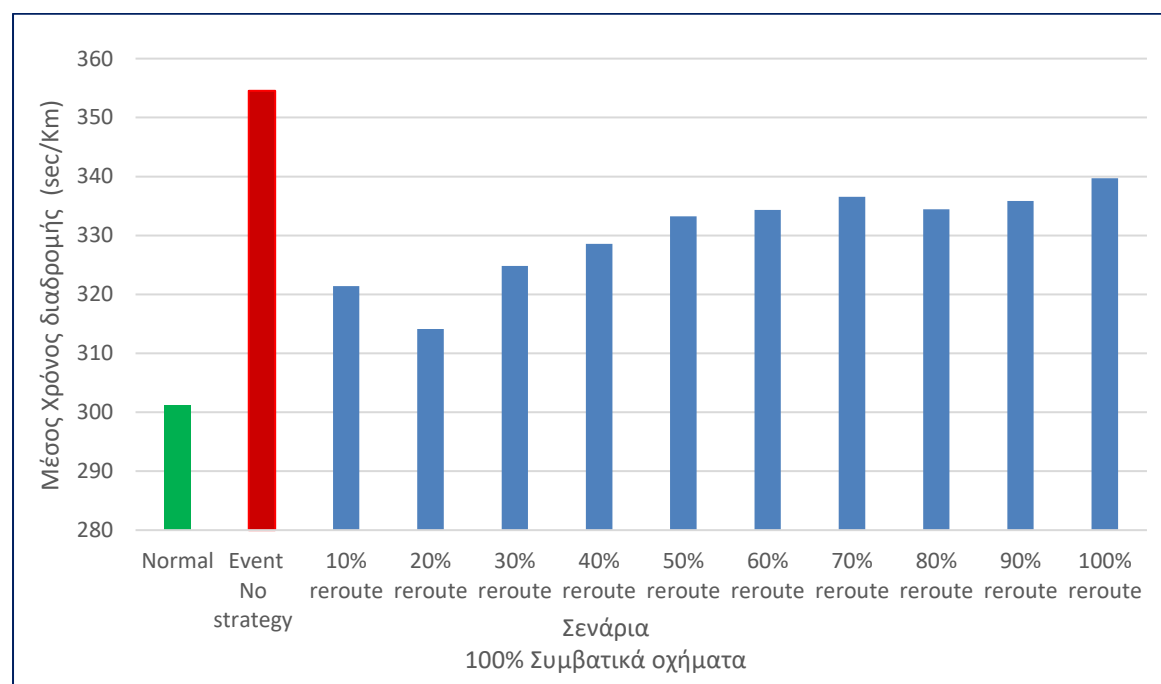
Βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφηκε παραπάνω και των σεναρίων που αναπτύχθηκαν, δημιουργήθηκαν κατάλληλοι πίνακες στο excel με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Από τους πίνακες αυτούς αντλήθηκαν τα δεδομένα για την δημιουργία των παρακάτω γραφημάτων.

Στο Διάγραμμα 5.1 παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος καθυστέρησης (sec/km) των συμβατικών οχημάτων για το κάθε σενάριο που αναπτύχθηκε. Αναλυτικότερα το πρώτο σενάριο αντιπροσωπεύει την κανονική μέρα (normal day), στην οποία όλοι οι δρόμοι είναι ανοιχτοί οπότε και οι καθυστερήσεις είναι οι μικρότερες συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια. Στο σενάριο που αντιπροσωπεύει την ημέρα του περιστατικού (event no strategy), τμήματα αρτηριών του οδικού δικτύου κλείνουν ενώ δεν ακολουθείται καμία στρατηγική διαχείρισης της κυκλοφορίας, και γι' αυτό είναι λογικό να παρουσιάζεται η μεγαλύτερη καθυστέρηση. Τα σενάρια που ακολουθούν παρουσιάζουν την στρατηγική της επαναδρομολόγησης από 10% έως 100%, ενώ οι αρτηρίες παραμένουν κλειστές. Όπως αποδεικνύεται η στρατηγική επαναδρομολόγησης βοηθάει ώστε να μειωθούν οι καθυστερήσεις της ημέρας του συμβάντος. Συγκεκριμένα υπάρχει πτώση 10,5% του χρόνου καθυστέρησης με την εφαρμογή του σεναρίου 10% reroute και 9,16% πτώση με την εφαρμογή του 20% reroute σεναρίου. Αντιθέτως ο μέσος χρόνος καθυστέρησης αυξάνει από το ποσοστό 40% επαναδρομολόγησης και πάνω, αφού η συμφόρηση μεγαλώνει, γεγονός που ταιριάζει με την βιβλιογραφία.



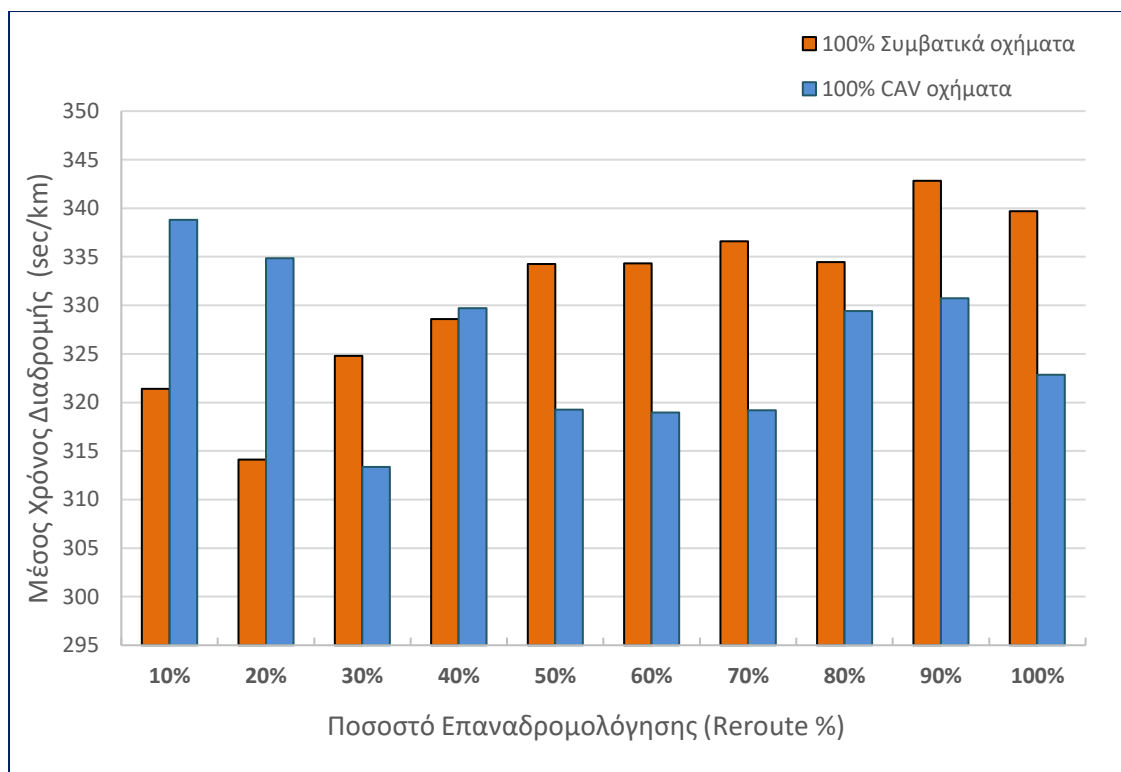
Διάγραμμα 5.1: Μέσος Χρόνος καθυστέρησης ανά σενάριο επαναδρομολόγησης συμβατικών οχημάτων

Στο Διάγραμμα 5.2 παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος διαδρομής (sec/km) των συμβατικών οχημάτων για το κάθε σενάριο που αναπτύχθηκε. Τα σενάρια που παρουσιάζονται είναι τα προαναφερθέντα, και ο μέσος χρόνος διαδρομής με την μεγαλύτερη διάρκεια είναι αυτός της ημέρας του συμβάντος (event day). Η στρατηγική επαναδρομολόγησης της πορείας μειώνει τον χρόνο διαδρομής κατά 11,4% στην περίπτωση του σεναρίου 20% επαναδρομολόγηση. Τα σενάρια με ποσοστό επαναδρομολόγησης παραπάνω από το 50% των οχημάτων δεν βοηθούν στην μείωση του μέσου χρόνου διαδρομής, όσο εκείνα με ποσοστό από 10% έως 40%. Ωστόσο ο μέσος χρόνος διαδρομής παραμένει μικρότερος από την ημέρα που δεν εφαρμόστηκε καμία στρατηγική διαχείρισης της κυκλοφορίας.



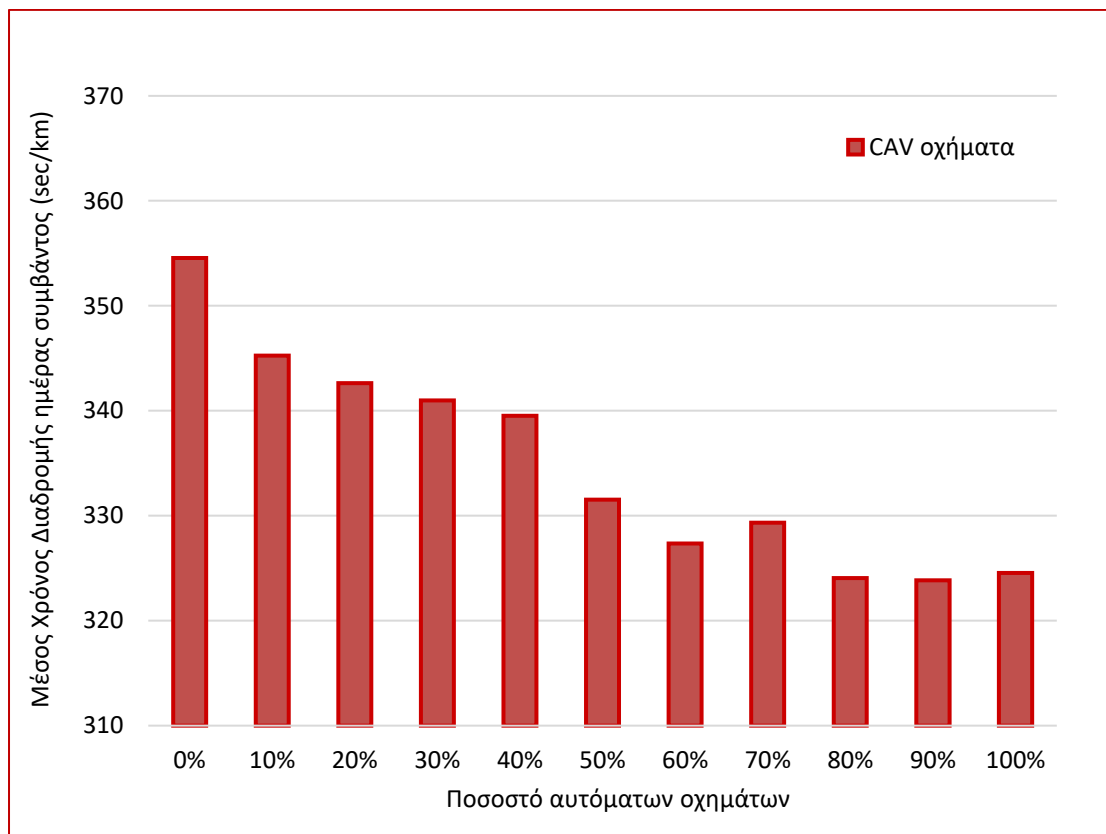
Διάγραμμα 5.2: Μέσος Χρόνος διαδρομής ανά σενάριο επαναδρομολόγησης 100% συμβατικών οχημάτων

Στο Διάγραμμα 5.3 συγκρίνεται ο μέσος χρόνος διαδρομής (sec/km) όταν υπάρχουν μόνο συμβατικά οχήματα σε σχέση με τον μέσο χρόνο διαδρομής όταν υπάρχουν μόνο αυτόματα, όταν εφαρμόζεται η στρατηγική επαναδρομολόγησης της πορείας. Στο διάγραμμα φαίνεται πως τα αυτόματα οχήματα με ποσοστό επαναδρομολόγησης 30% παρουσιάζουν την μεγαλύτερη πτώση του χρόνου διαδρομής (sec/km) . Επίσης στα μεγαλύτερα ποσοστά επαναδρομολόγησης (50% και άνω), η ύπαρξη μόνο αυτόματων οχημάτων στην κυκλοφορία μειώνει τους αντίστοιχους χρόνους ταξιδιού, σε σχέση με την ύπαρξη μόνο συμβατικών για τα ίδια ποσοστά επαναδρομολόγησης. Αυτό συμβαίνει καθώς η είσοδος υψηλού ποσοστού CAV στο δίκτυο αυξάνει την χωρητικότητα και μειώνει τους χρόνους διαδρομής.



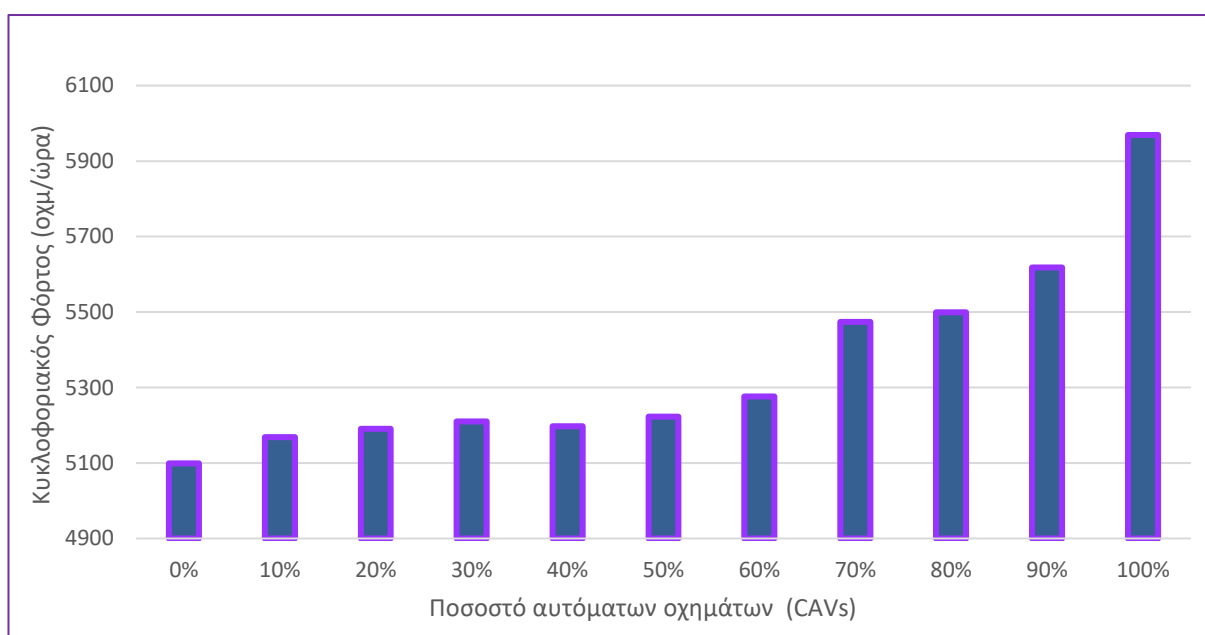
Διάγραμμα 5.3 Μέσος Χρόνος διαδρομής ανά σενάριο μεταξύ 100% συμβατικών και 100% αυτόματων οχημάτων

Στο διάγραμμα 5.4 παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος διαδρομής (sec/km) της ημέρας του συμβάντος, χωρίς να ακολουθείται καμία στρατηγική διαχείρισης της κυκλοφορίας, για τα ποσοστά διείσδυσης των αυτόματων οχημάτων (CAVs) στην κυκλοφορία. Συγκεκριμένα για 0% αυτόματα, άρα 100% συμβατικά, ο μέσος χρόνος διαδρομής παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή. Με την εισαγωγή των αυτόματων οχημάτων, παρουσιάζεται σταδιακή πτώση του μέσου χρόνου διαδρομής, ενώ οι καλύτερες τιμές επιτυγχάνονται για υψηλότερα ποσοστά διείσδυσης στην κυκλοφορία (80%-100%). Για 10% αυτόματα παρουσιάζεται πτώση 2,62%, ενώ για 90% αυτόματα η πτώση του μέσου χρόνου διαδρομής είναι 9%.



Διάγραμμα 5.4: Μέσος Χρόνος Διαδρομής ημέρας συμβάντος σε σχέση με το ποσοστό των αυτόματων (CAVs) οχημάτων στην κυκλοφορία

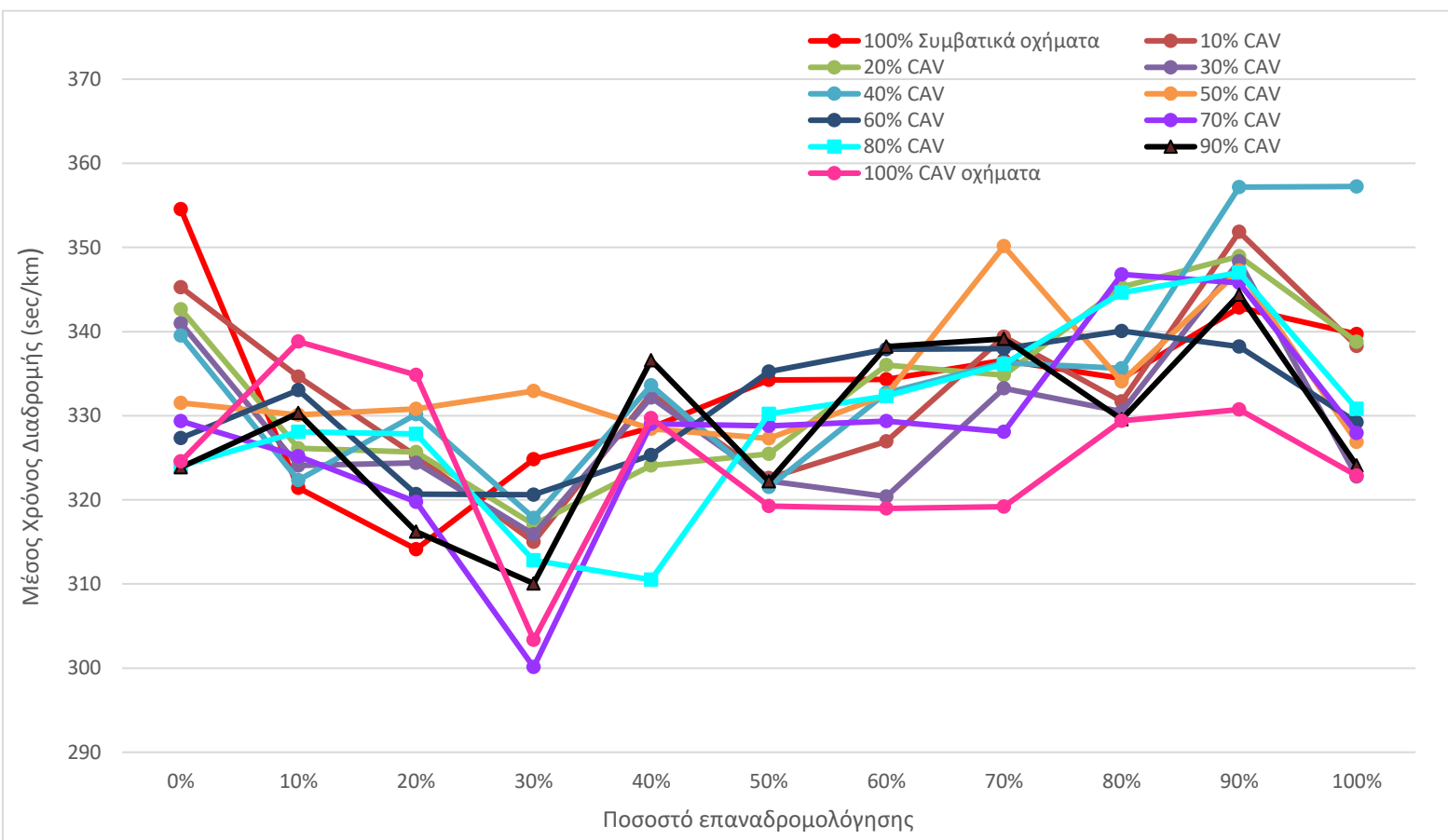
Στο διάγραμμα 5.5 παρουσιάζεται ο κυκλοφοριακός φόρτος (flow veh/h) της ημέρας του συμβάντος, χωρίς να ακολουθείται καμία στρατηγική διαχείρισης της κυκλοφορίας, για τα ποσοστά διείσδυσης των αυτόματων οχημάτων (CAVs) στην κυκλοφορία. Πιο συγκεκριμένα, για 0% αυτόματα, άρα 100% συμβατικά, ο φόρτος παρουσιάζει την μικρότερη τιμή του και άρα το χαμηλότερο επίπεδο εξυπηρέτησης. Όσο αυξάνεται το ποσοστό διείσδυσης αυτόματων και συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία, αυξάνει σταδιακά ο κυκλοφοριακός φόρτος. Για σημαντικά ποσοστά ένταξης των CAVs στην κυκλοφορία (70%-100%), επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση των οχημάτων ανά ώρα στο δίκτυο. Η αύξηση του φόρτου για 100% αυτόματα και συνδεδεμένα είναι 14,60%, και για 90% αυτόματα και συνδεδεμένα είναι 9,30%. Τα χαμηλά ποσοστά CAV στο δίκτυο δεν επηρεάζουν σημαντικά τον κυκλοφοριακό φόρτο (οχημ/ώρα).



Διάγραμμα 5.5 : Κυκλοφοριακός φόρτος ημέρας συμβάντος σε σχέση με το ποσοστό διείσδυσης των αυτόματων και συνδεδεμένων οχημάτων στην κυκλοφορία

Στο Διάγραμμα 5.6 παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος διαδρομής (sec/km), για όλα τα σενάρια επαναδρομολόγησης πορείας (0%-100%), για όλα τα ποσοστά διείσδυσης των αυτομάτων οχημάτων (0%-100% CAV) στην κυκλοφορία. Οι χαμηλότερες τιμές του μέσου χρόνου διαδρομής σημειώνονται για χαμηλότερα ποσοστά επαναδρομολόγησης (20%-40%). Ο μέσος χρόνος διαδρομής των συμβατικών οχημάτων μειώνεται κατά 11,4% για επαναδρομολόγηση πορείας 20% των οχημάτων. Επίσης για 70% CAV οχήματα ο χρόνος μειώνεται κατά 15,35% για ποσοστό επαναδρομολόγησης 30%. Αντιθέτως, ο μέσος χρόνος αυξάνεται για υψηλότερα ποσοστά επαναδρομολόγησης (70%-100%).

Το γεγονός αυτό οφείλεται στην δημιουργία συμφόρησης στην επόμενη επιλεχθείσα διαδρομή, καθώς όλο και μεγαλύτερος αριθμός οχημάτων την επιλέγουν. Οι τιμές του μέσου χρόνου διαδρομής για υψηλά ποσοστά επαναδρομολόγησης είναι παρόμοιες με τις τιμές εκείνες που καταγράφηκαν όταν δεν εφαρμόζεται καμία στρατηγική διαχείρισης της κυκλοφορίας. Συνεπώς η στρατηγική της επαναδρομολόγησης πορείας είναι αποδοτική όταν χρησιμοποιείται από ένα χαμηλό ποσοστό οχημάτων. Για αυξημένο ποσοστό CAV στην κυκλοφορία (90%-100%) παρουσιάζονται χαμηλότεροι μέσοι χρόνοι διαδρομής τόσο για χαμηλά όσο και για υψηλά ποσοστά επαναδρομολόγησης. Η βελτίωση του χρόνου διαδρομής οφείλεται στον χρόνο αντίδρασης του οδηγού που είναι 0,1-0,2 για τα αυτόματα και 1 για τα συμβατικά.



Διάγραμμα 5.6: Μέσος Χρόνος Διαδρομής για όλα τα ποσοστά επαναδρομολόγησης σε σχέση με το ποσοστό αυτομάτων και συμβατικών οχημάτων στο δίκτυο

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η επίδραση των ευφύων συστημάτων μεταφορών στην ανθεκτικότητα του αστικού οδικού δικτύου. Η ανθεκτικότητα είναι ένα χαρακτηριστικό που υποδεικνύει την απόδοση του συστήματος υπό ασυνήθιστες συνθήκες, όπως τα ακραία καιρικά φαινόμενα, και την ικανότητα του συστήματος να απορροφά τις διαταραχές διατηρώντας τα επίπεδα κινητικότητας.

Λήφθηκαν δεδομένα κυκλοφοριακών φόρτων και σηματοδότησης για την προετοιμασία του δικτύου της Αθήνας, που επιλέχθηκε, σε περιβάλλον AIMSUN. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε η προσομοίωση, με τα κατάλληλα σενάρια διαχείρισης της κυκλοφορίας, από την οποία εξήχθησαν τα αποτελέσματα της. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψαν τα διαγράμματα μέσου χρόνου ταξιδιού ανά χιλιόμετρο και καθυστερήσεων σε σχέση με το ποσοστό των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία και το ποσοστό επαναδρομολόγησης που επιλέχθηκε.

6.2 Βασικά Συμπεράσματα

Οι στρατηγικές διαχείρισης της κυκλοφορίας, όπως η επαναδρομολόγηση των οχημάτων, συμβάλλουν υπό προϋποθέσεις ώστε να διατηρηθεί η αξιοπιστία και η απόδοση του δικτύου, όταν υπάρχει διαταραχή (πχ κλείσιμο δρόμων λόγω καιρικών φαινομένων). Συγκεκριμένα τα χαμηλά ποσοστά επαναδρομολόγησης οχημάτων (10-40%) έχουν θετικό αντίκτυπο στην κυκλοφορία, καθώς μειώνονται οι μέσοι χρόνοι καθυστερήσεων και διαδρομής έως και 11,4%. Για υψηλότερα ποσοστά επαναδρομολόγησης ο μέσος χρόνος διαδρομής αυξάνει, τόσο για τα συμβατικά οχήματα όσο και για τα αυτόματα. Ωστόσο ο μέσος χρόνος διαδρομής παραμένει μικρότερος από την ημέρα που δεν εφαρμόστηκε καμία στρατηγική διαχείρισης της κυκλοφορίας.

Για αυξημένο ποσοστό αυτομάτων οχημάτων στην κυκλοφορία (70%-100%), μειώνεται ο μέσος χρόνος διαδρομής ανά χιλιόμετρο και ο μέσος χρόνος καθυστέρησης ανά χιλιόμετρο. Επιπλέον αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος (οχήματα/ώρα) έως και 14,6% για ποσοστό διείσδυσης 100% αυτόματων και συνδεδεμένων οχημάτων. Η χαμηλότερη τιμή του μέσου χρόνου διαδρομής σημειώνεται για ποσοστό επαναδρομολόγησης 30%, και ποσοστό 70%

αυτόματων οχημάτων στο οδικό δίκτυο. Τα αυτόματα οχήματα σημειώνουν πιο χαμηλούς χρόνους διαδρομής όταν το ποσοστό επαναδρομολόγησης είναι υψηλό σε σχέση με τα συμβατικά. Όμως και στις δύο περιπτώσεις οι χαμηλότεροι χρόνοι επιτυγχάνονται για μειωμένα ποσοστά επαναδρομολόγησης της πορείας των οχημάτων. Τα υψηλά ποσοστά διεύθυνσης των αυτόματων οχημάτων στην κυκλοφορία, μειώνουν τις μέσες καθυστερήσεις και τον μέσο χρόνο διαδρομής ανά χιλιόμετρο, καθώς τα οχήματα αυτά έχουν σημαντικά μικρότερους χρόνους αντίδρασης σε σχέση με τα συμβατικά, και αυξημένες τιμές επιτάχυνσης. Τέλος για σημαντικά ποσοστά ένταξης των CAVs στην κυκλοφορία (70%-100%), επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση των οχημάτων ανά ώρα στο δίκτυο.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Για τη βαθύτερη διερεύνηση του αντικειμένου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, τα παρακάτω αποτελούν σημαντικά σημεία για περαιτέρω διερεύνηση.

Επαναδρομολόγηση οχημάτων με έλεγχο φάσεων σηματοδότησης

Εκτός από την επαναδρομολόγηση των οχημάτων, ο έλεγχος των φωτεινών σηματοδοτών χρησιμεύει επίσης ως αποτελεσματική προσέγγιση για τη διαχείριση της κυκλοφοριακής ροής. Οι φάσεις σηματοδότησης προσαρμόζονται ανάλογα με την επιλογή της διαδρομής των οδηγών (smart traffic light control). Η αλληλεπίδραση των οχημάτων με τις φάσεις σηματοδότησης, έχει ως στόχο την μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης και την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου αναμονής των οχημάτων.

Επαναδρομολόγηση οχημάτων με τυχαία επιλογή διαδρομής

Ενδιαφέρον θα είχε η ανάπτυξη αλγορίθμου τυχαίας επιλογής διαδρομών για τα οχήματα που χρειάζονται επαναδρομολόγηση. Με τον μηχανισμό αυτό, δύναται να αποφευχθεί η συμφόρηση που αλλάζει από έναν δρόμο σε έναν άλλο, όταν ένας σημαντικός αριθμός οχημάτων ακολουθεί την ίδια καθοδήγηση πορείας.

Διερεύνηση του αντίκτυπου των παραμέτρων κλειστών δρόμων

Η εξέταση διαφορετικών παραμέτρων, όπως μήκος, σχήμα, σχετική θέση σε οδικό δίκτυο κ.λπ., των αποκλεισμένων δρόμων, βοηθάει στην επιλογή του καταλληλότερου χρόνου της εφαρμογής της στρατηγικής επαναδρομολόγησης, για την καλύτερη απόδοση του δικτύου.

Στρατηγική διαχείρισης περιστατικών βάσει των καιρικών συνθηκών

Οι διαχειριστές της κυκλοφορίας επικεντρώνονται στο περιστατικό λόγω καιρού παρά στην ζήτηση, και ερευνούν στρατηγικές που τροποποιούνται δυναμικά με βάση τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες. Συνεπώς διερευνάται η σημασία της ενσωμάτωσης της πρόβλεψης και της απόφασης σε πραγματικό χρόνο.

Προσθήκη Μέσων Μαζικής Μεταφοράς στην Προσομοίωση

Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε, η ενσωμάτωση Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, που θα κάνουν χρήση των υπηρεσιών των συνεργατικών ευφυών συστημάτων μεταφοράς, και η διερεύνηση της επιρροής τους στο δίκτυο υπό δυσμενή συνθήκες κυκλοφορίας.

Προσθήκη Πεζών στην Προσομοίωση

Έρευνα για την επιρροή της ενσωμάτωσης πεζών στην προσομοίωση, ώστε να εξεταστεί η αλληλεπίδραση που έχουν οι πεζοί με τα συνδεδεμένα οχήματα, ιδιαίτερα όταν οι πεζοί κάνουν και αυτοί χρήση των υπηρεσιών των συνεργατικών ευφυών συστημάτων μεταφοράς.

Βιβλιογραφία

1. Adamidis, F., Mantouka, E. and Vlahogianni, E., 2020. Effects of controlling aggressive driving behavior on network-wide traffic flow and emissions. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 9(3), pp.263-276.
2. Arem, B., C. J. G. van Driel and Visser, R., 2006. "The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 429-436.
3. Barredo J.I., 2007. Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Nat Hazards*, 42, 125–148.
4. Barriendos M. & Rodrigo F.S. Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data. *Hydrol Sci J* 2006, 51, (5), 765–783
5. Barriendos, M., Coeur, D., Lang M., Llasat M.C., Naulet R., Lemaitre F. & Barrera A. 2003. Stationarity analysis of historical flood series in France and Spain (14th–20th centuries). *Nat Hazards Earth Syst Sci* 2003, 3, 583–592.
6. Brilon, W., & Ponzlet, M. (1996). Variability of Speed-Flow Relationships on German Autobahns. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1555(1), 91–98.
7. Cao, Z., Jiang, S., Zhang, J., and Guo H., 2017. "A Unified Framework for Vehicle Rerouting and Traffic Light Control to Reduce Traffic Congestion," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 7, pp. 1958-1973.
8. Chung, Y., 2012. Assessment of non-recurrent congestion caused by precipitation using archived weather and traffic flow data. *Transp. Policy* 19 (1), 167–173.
9. Circella, G., Jaller, M., Sun, R., Qian, X., & Alemi, F. (2021). Emissions Impact of Connected and Automated Vehicle Deployment in California. *UC Davis: Institute of Transportation Studies*.
10. Delis, A., Nikolos, I., and Papageorgiou M., 2016. "Simulation of the penetration rate effects of ACC and CACC on macroscopic traffic dynamics," 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 336-341,
11. Diakakis, M., Deligiannakis, G., 2013. Vehicle-related flood fatalities in Greece, *Environmental Hazards*, 12(3-4), 278-290.
12. Diakakis, M., Deligiannakis, G., Katsetsiadou, K., Lekkas, E., Melaki, M., & Antoniadis, Z. (2016). mapping and classification of direct effects of the flood of October 2014 in Athens. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 50(2), 681–690.
13. Diakakis, M., Mavroulis, S. & Deligiannakis, G. Floods in Greece, (2012), a statistical and spatial approach. *Nat Hazards* 62, 485–500.

14. Do, W., Rouhani, M., Moreno , L., 2019. Simulation-Based Connected and Automated Vehicle Models on Highway Sections: A Literature Review. *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2019, Article ID 9343705, 14 pages.
15. English, A., 2016. How to Drive Through Floods.
16. EVSTF, 2015. EVS GTR on “protection against water. 8th EVS GTR IWG meeting, Electric Vehicle Safety Task Forces (EVSTF), Changchun (China).
17. Galatioto, F., Glenis, V., Roberts, R., Kilsby, C., 2014. Exploring and modelling the impacts of rainfall and flooding on transport network. The case study of Newcastle upon Tyne. In: 2nd International Conf. on Urban Sustainability and Resilience (USAR 2014). London, UK.
18. Ganin, A., Avi ,C., Mersky, Jin, A., Kitsak, M., Keisler, Z., Linkov, I.,2019. Resilience in Intelligent Transportation Systems (ITS), *Transport. Res. Part C: Emerging Technologies*,100, 318-329.
19. Gissing, A., Haynes, K., Coates, L., Keys, C., 2016. Motorist behaviour during the 2015 Shoalhaven floods. *Aust. J. Emerg. Manage.* 31 (2).
20. Gonçalves, L., Ribeiro, P., 2020. Resilience of urban transportation systems. Concept, characteristics, and methods. *Journal of Transport Geography*, 85.
21. Goodwin, L., , December 2002 Weather Impacts on Arterial Traffic Flow, Mitretek Systems.
22. Gordon, R. L., 1996. *Traffic Control Systems Handbook*, prepared by Dunn Engineering Associates,4-18.
23. Greenflag.com, 2015. Expert advice: Driving through flood water. Available at: <http://blog.greenflag.com/2015/expert-advice-driving-through-flood-water/>, (Accessed: 22/09/2016).
24. Guerrero-Ibáñez, J., Zeadally, S., Contreras-Castillo, J. 2018. Sensor Technologies for Intelligent Transportation Systems. *Sensors* ,18,(4).
25. Härrä, J.: Vehicular Mobility Modeling for VANET, pp. 107–156 (2009).
26. Ibrahim, A., & Hall, F. (1994). Effect of Adverse Weather Conditions on Speed-Flow-Occupancy Relationships. *Transportation Research Record*.
27. Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M., Helbing, D., 2008. Adaptive cruise control design for active congestion avoidance. *Transport. Res. Part C: Emerg. Technol.* 16 (6), 668–683.
28. Koetse, M. J., & Rietveld, P. (2009). The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), 205–221.
29. Konstantinidou, M., Kepaptsoglou, K., Karlaftis, M., 2014. Transportation network post-disaster planning and management: a review part I: post-disaster transportation network performance. *Int. J. Transp.* 2014; 2(3), 1-16.
30. Krauss, S., 1998. Microscopic modeling of traffic flow: investigation of collision free vehicle dynamics. PhD thesis. Mathematical Institute, Universitat zu Koln.

31. Lee, G., Jung, J., 2021. Decentralized Platoon Join-in-Middle Protocol Considering Communication Delay for Connected and Automated Vehicle. *Sensors*
32. Li, T., Guo, F., Krishnan, R., Sivakumar, A., Polak, P., 2020. Right-of-way reallocation for mixed flow of autonomous vehicles and human driven vehicles, *Transport. Res. Part C: Emerging Technologies*, 115.
33. Liu, H., Kan, X., Shladover, S., Lu, X., Ferlis, R., 2018. Modeling impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on mixed traffic flow in multi-lane freeway facilities. *Transp. Res. Part C: Emerging Technologies*, 95, 261-279.
34. Liu, Y., Wang, W., Hua, X., Wang, S. 2020. Safety Analysis of a Modified Cooperative Adaptive Cruise Control Algorithm Accounting for Communication Delay. *Sustainability*, 12, 7568.
35. Ma, J., Zhou, F., Huang, Z., Melson, C. L., James, R., & Zhang, X. 2018. Hardware-in-the-Loop Testing of Connected and Automated Vehicle Applications: A Use Case for Queue-Aware Signalized Intersection Approach and Departure. *Transportation Research Record*, 2672(22), 36–46.
36. Maze, T. H., Agarwal, M., & Burchett, G. (2006). Whether Weather Matters to Traffic Demand, Traffic Safety, and Traffic Operations and Flow. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1948(1), 170–176.
37. Melillo, M., Richmond, T., Yohe, G., Climate Change Impacts in the United States: 6 The Third National Climate Assessment, 2013. U.S. Global Change Research Program.
38. Mitsakis, E., Papanikolaou, A., Ayfadopoulou, G., Salanova, J., Doll, C., Giannopoulos, G., & Zerefos, C. (2014b). An integrated framework for linking climate change impacts to emergency adaptation strategies for transport networks. *European Transport Res. Review*, 6(2), 103–111
39. Mitsakis, E., Salanova, J., Stamos, I., & Chaniotakis, E. (2015). Network Criticality and Network Complexity Indicators for the Assessment of Critical Infrastructures During Disasters. In I. S. Kotsireas, A. Nagurney, & P. M. Pardalos (Eds.), *Dynamics of Disasters—Key Concepts, Models, Algorithms, and Insights* (pp. 191–205).
40. Mitsakis, E., Stamos, I., Diakakis, M., & Salanova, J. (2014a). Impacts of high-intensity storms on urban transportation: Applying traffic flow control methodologies for quantifying the effects. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(8), 2145–2154.
41. Mitsakis, E., Stamos, I., Papanikolaou, A., Aifadopoulou, G., & Kontoes, H. (2014c). Assessment of extreme weather events on transport networks: Case study of the 2007 wildfires in Peloponnesus. *Natural Hazards*, 72(1), 87–107.
42. Morris, B., Boddington, K., Notley, S., Rees, T., 2011. External factors affecting motorway capacity. TRL Report.

43. Morsy, M., Goodall, J., O'Neil, J., Sadler, J., Voce, D., Hassan, G., Huxley, C., 2018. A cloud-based flood warning system for forecasting impacts to transportation infrastructure systems. *Environmental Modelling & Software*, 107, pp.231-244.
44. Olia, A., S. Razavi, B. Abdulhai, and H. Abdelgawad. 2018. "Traffic Capacity Implications of Automated Vehicles Mixed with Regular Vehicles." *Journal of Intelligent Transportation Systems* 22 (3): 244–262.
45. Ong, G.P., Fwa, T.F., 2008. Hydroplaning Risk Management for Grooved Pavements. In: 7th International Conference on Managing Pavement Assets, 23–28.
46. Pisano, P., 2004. Research Needs for Weather-Responsive. Traffic Management Federal Highway Administration (FHWA), Office of Operations Road Weather Management.
47. Pregolato, M., Ford, A., Wilkinson, S., Dawson, R., 2017. The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. *Transport. Res. Part D: Transport and Environment*, 55, ISSN 1361-9209, 67-81.
48. Qureshi, K. and Abdullah, A., 2013. A Survey on Intelligent Transportation Systems. *Middle-East Journal of Scientific Research* 15,(5),629-642.
49. Rakha, H., and M.W. Van Aerde, "Comparison of simulation modules of TRANSYT and INTEGRATION models", *Transportation Research Record*, 1566, 1997.
50. Salvati, P., C. Bianchi, M. Rossi, and F. Guzzetti, 2010. "Societal landslide and flood risk in Italy". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (10), 465-483.
51. Schakel, W., Arem, B., and Netten B. D., 2010. "Effects of Cooperative Adaptive Cruise Control on traffic flow stability," *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 759-764
52. Sljivo, I., Gallina, B., Kaiser, B. (2017). Assuring Degradation Cascades of Car Platoons via Contracts. In: Tonetta, S., Schoitsch, E., Bitsch, F. (eds) *Computer Safety, Reliability, and Security . SAFECOMP 2017. Lecture Notes in Computer Science()*, vol 10489. Springer, Cham.
53. Stamos, I., Mitsakis, E., Salanova, M., Aifadopoulou, G., 2015. Impact assessment of extreme weather events on transport networks. *Transport. Res. Part D: Transport and Environment*, 34, pp.168-178.
54. Stern, A., Shah, and Goodwin, I., Pisano, P., 2003. Analysis of Weather Impacts on Traffic Flow in Metropolitan Washington, DC, National Transport. Library.
55. Stolfi, D., Alba, E., 2014. "Red Swarm: Reducing travel times in smart cities by using bio-inspired algorithms", *Applied Soft Computing*, 24, 181-195.
56. Taori, S., and A.K. Rathi, "Comparison of NETSIM, NETFLO I, and NETFLO II traffic simulation models for fixed-time signal control", *Transportation Research Record*, 1997.
57. Taplin J., "SIMULATION MODELS OF TRAFFIC FLOW", 2008.

58. Wan, C., Yang, Z., Zhang, D., Yan, X., and Fan, S., 2018. "Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions". *Transport Reviews*, 38(4), pp.479-498.
59. Wang, S., Djahel, S., Zhang, Z. and McManis J., 2016. "Next Road Rerouting: A Multiagent System for Mitigating Unexpected Urban Traffic Congestion," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 10, pp. 2888-2899.
60. Wang, Z., Wu, G. and Barth, M. J, 2018."A Review on Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) Systems: Architectures, Controls, and Applications," *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 2884-2891.
61. Wischhof, I., Ebner, A., and Rohling, H., 2005. "Information dissemination in self-organizing intervehicle networks," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 90-101.
62. Xiao, L., Wang, M., Schakel, W. and van Arem, B., 2018. Unravelling effects of cooperative adaptive cruise control deactivation on traffic flow characteristics at merging bottlenecks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 96, pp.380-397.
63. Zhong, Z., Lee, E., Nejad, M., Lee, J., 2020. Influence of CAV clustering strategies on mixed traffic flow characteristics: An analysis of vehicle trajectory data, *Transp. Res. Part C: Emerging Technologies*, 115.
64. Zhu, Y., Zhao, D. and Zhong Z., 2019. "Adaptive Optimal Control of Heterogeneous CACC System with Uncertain Dynamics," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 1772-1779.
65. ΦΡΑΝΤΖΕΣΚΑΚΗΣ, Ι., ΠΙΤΣΙΑΒΑ-ΛΑΤΙΝΟΠΟΥΛΟΥ, Μ. and ΓΚΟΛΙΑΣ, Ι., 2009. Κυκλοφοριακή Τεχνική. Παπασωτηρίου.