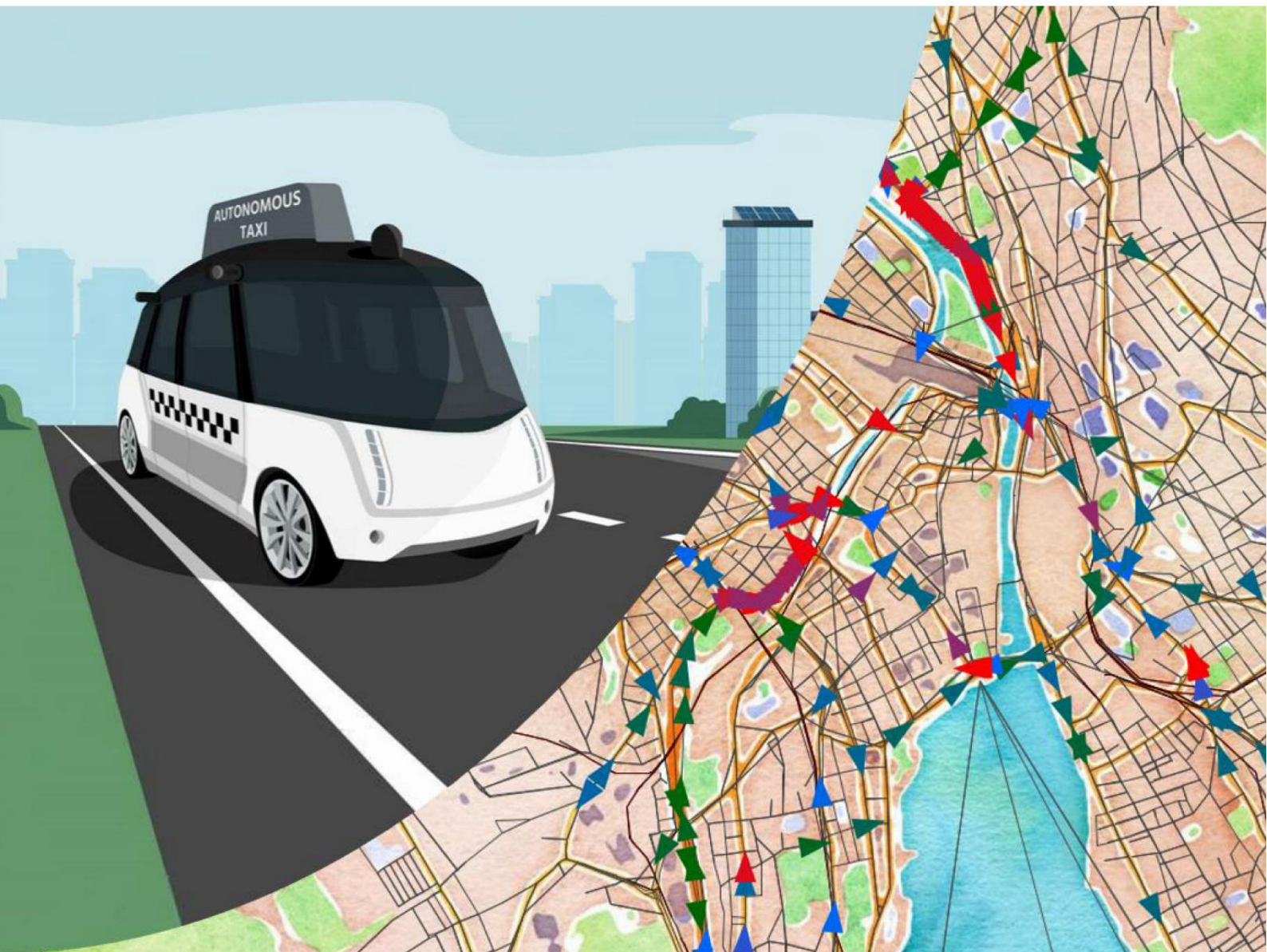




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ



Αξιολόγηση της Κυκλοφοριακής Ανθεκτικότητας στην εποχή των Αυτόνομων Οχημάτων

Διπλωματική Εργασία

Βασίλειος Μουρτάκος

Επιβλέπουσα: Ελένη Ι. Βλαχογιάννη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Συνεπιβλέποντες: Dr. Milos Balac & Sebastian Horl, ETH Zurich

Αθήνα, Ιούλιος 2020

Copyright © Βασίλειος Μουρτάκος, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Vasileios Mourtakos, 2020

All Rights Reserved

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

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

Ευχαριστίες

Χωρίς την κ. Ελένη Βλαχογιάννη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π, την εμπειρία, τη διορατικότητα και την αποφασιστικότητά της, δεν θα είχα καταφέρει να ολοκληρώσω αυτήν την τόσο απαιτητική Διπλωματική εργασία. Όποτε συναντούσα κάποιες φαινομενικά απροσπέραστες δυσκολίες, κατάφερνε να με εμπνεύσει με την μοναδική της ικανότητα να βλέπει την προοπτική και την αξία κάθε κατάστασης και να με οδηγήσει στην σωστή κατεύθυνση. Δε μπορώ λοιπόν, παρά να την ευχαριστήσω ολόψυχα. Μου πρόσφερε επίσης την μοναδική ευκαιρία να συνεργαστώ με δύο εξαιρετικούς επιστήμονες του πανεπιστημίου ΕΤΗ, Zurich, οι οποίοι τελικά έγιναν και συνεπιβλέποντες αυτής της εργασίας.

Ο Dr. Milos Balac μαζί με τον Sebastian Horl, που ειδικεύονται πάνω σε έρευνες συγκοινωνιακού χαρακτήρα με το πρόγραμμα MATSim, με φιλοξένησαν στο πανεπιστήμιό ΕΤΗ, μετά από την ευγενική πρόσκληση του Dr. Balac, αφιέρωσαν μέρος του πολύτιμου χρόνου τους ώστε να σχεδιάσουμε μαζί το τελικό πλάνο της εργασίας και μου έδωσαν τα απαραίτητα δεδομένα ώστε να μπορέσω να το υλοποιήσω. Στο μικρό χρονικό διάστημα που έμεινα εκεί, αλλά και για μήνες αφού έφυγα, μου παρείχαν λύσεις και απαντήσεις στα προβλήματα που συναντούσα. Το σίγουρο είναι πως δίχως της βοήθειά τους, το θέμα αυτής της Διπλωματικής εργασίας δε θα είχε προχωρήσει πέρα από τις αρχικές μπερδεμένες μου σκέψεις και ιδέες και τους ευγνωμονώ βαθύτατα για αυτό.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης εκείνους που με κάποιο τρόπο συνέβαλαν στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας. Ευχαριστώ λοιπόν τον Dr. Marcel Rieser που, μετά από μεσολάβηση των συνεπιβλεπόντων μου, μου πρόσφερε πρόσβαση στην πλήρη έκδοση του εξαιρετικά χρήσιμου προγράμματος Simunto Via, μέχρι να ολοκληρώσω την έρευνά μου. Τους Dr. Michal Maciejewski, Dr. Thibaut Dubernet, Dr. Rieser και Dr. Εμμανουήλ Μπαρμπουνάκη, για τις πολύτιμες συμβουλές που μου έδωσαν μέσω e-mail ή μέσω των Issues του GitHub, τόσο στην αρχή της προσπάθειάς μου, όσο και αργότερα. Τον Dr. Αναστάσιο Κουβέλα για τις συμβουλές και καθησυχαστική του παρουσία κατά τη διάρκεια της επίσκεψής μου στο ΕΤΗ, Zurich. Τον Χριστόφορο Αποστολόπουλο για τις συμβουλές του πάνω σε θέματα προγραμματισμού και τα κομμάτια κώδικα που διόρθωσε ή έγραψε εξ' ολοκλήρου.

Τέλος, δε μπορεί κανείς να μην είναι ευγνώμων για την διαρκή υπομονή, υποστήριξη και ενθάρρυνση των κοντινών του ανθρώπων. Θα ήθελα λοιπόν να πω ένα ακόμα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τους αγαπημένους μου φίλους, που στους μήνες που ασχολήθηκα με αυτή τη Διπλωματική εργασία, άντεξαν τον εκνευρισμό και την κούρασή μου, που πίστευαν σε εμένα όταν δυσκολευόμουν να το κάνω ο ίδιος και που είχαν πάντα τη διάθεση να με βοηθήσουν όπως μπορούν.

Αθήνα, Ιούλιος 2020

Βασίλης Μουρτάκος

Αξιολόγηση της Κυκλοφοριακής Ανθεκτικότητας στην εποχή των Αυτόνομων Οχημάτων

Διπλωματική Εργασία

Βασίλης Μουρτάκος

Επιβλέπουσα: Ελένη Ι. Βλαχογιάννη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Συνεπιβλέποντες: Dr. Milos Balac & Sebastian Horl, ETH Zurich

Σύνοψη

Σε μια εποχή που γίνεται αγώνας δρόμου ώστε να δημιουργηθούν και να εισαχθούν στη κυκλοφορία πλήρως αυτόνομα οχήματα, ύψιστης σημασίας είναι τα συστήματα διαχείρισης αυτής της κυκλοφορίας να είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν σε αυτή την αλλαγή και ειδικά κατά τη μεταβατική περίοδο, όπου θα κυκλοφορούν τόσο συμβατικά όσο και αυτοματοποιημένα οχήματα, διαφόρων επιπέδων αυτοματισμού, στις οδούς. Στόχος αυτής της Διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνηθεί η ανθεκτικότητα του κυκλοφοριακού συστήματος μιας περιοχής 30 χιλιομέτρων γύρω από κεντρικό σημείο της Ζυρίχης της Ελβετίας, κατά την αντικατάσταση μετακινήσεων με συμβατικά μέσα μεταφοράς από αυτόνομα οχήματα. Για την επίτευξή του, έγινε η προσομοίωση ενός πολύ-πρακτορικού συστήματος, μέσω του MATSim, για το αρχικό σενάριο της περιοχής μελέτης, που περιείχε μόνο συμβατικά μέσα μεταφοράς, και για ακόμα 36 νέα σενάρια που δημιουργήθηκαν και περιέχουν από 800 ως 15000 πλήρως αυτόνομα ταξί και για 5% ως 100% πιθανότητα αντικατάστασης μιας μετακίνησης με συμβατικό μέσο μεταφοράς από αυτόνομο ταξί. Για όλα τα σενάρια, έγινε πλήρης ανάλυση των χαρακτηριστικών των δεδομένων εισόδου του και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις. Επίσης αξιοποιήθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο της κυκλοφοριακής ροής και οι εφαρμογές του σε μακροσκοπικό επίπεδο, ώστε μέσω της κυκλοφοριακής ανάλυσης που έγινε στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, να προκύψουν τα μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα για κάθε σενάριο. Ως κριτήρια αξιολόγησης της κυκλοφοριακής ανθεκτικότητας κάθε σεναρίου, ορίστηκαν η πραγματοποίηση τουλάχιστον του 95% των σχεδιασμένων μετακινήσεων με αυτόνομο ταξί, ο χρόνος αναμονής για την άφιξη αυτόνομου ταξί να μην υπερβαίνει τα 25 λεπτά και η κυκλοφοριακή ικανότητα να προκύπτει μεγαλύτερη από αυτή του αρχικού σεναρίου. Βάσει αυτών των κριτηρίων, 5 από τα 36 σενάρια προέκυψαν ανθεκτικά. Τελικά, το κυκλοφοριακό σύστημα της Ζυρίχης αξιολογείται ως μη ανθεκτικό, αφού τα σενάρια που απέκλιναν από το σχεδιασμό, δεν ικανοποιούσαν τα παραπάνω κριτήρια.

Λέξεις κλειδιά: προσομοίωση, αυτόνομα ταξί, πολύ-πρακτορικό σύστημα, MATSim, κυκλοφοριακή ροή, μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα, κριτήρια ανθεκτικότητας, πολιτικές λειτουργίας

Traffic Resilience Assessment in the age of Autonomous Vehicles

Diploma Thesis

Vasilis Mourtakos

Supervisor: Eleni I. Vlahogianni, Associate Professor NTUA

Co-Supervisors: Dr. Milos Balac & Sebastian Horl, ETH Zurich

Abstract

In an age where there is a race in order to create and deploy fully autonomous vehicles in traffic, making sure that the traffic management systems are able to withstand this shift, especially during the transitional period, when there will be both conventional and automated vehicles, of varied levels of automation, in traffic, is of high importance. The objective of this Diploma thesis, is to assess the resilience of the traffic system of an area that is 30 kilometers around a central point in Zurich, Switzerland, when some of the trips conducted by conventional modes of transport are replaced by trips with autonomous vehicles. In order to accomplish this objective, a multi-agent system was simulated, using MATSim, for the initial scenario of the area of study, where only conventional modes of transport were available, and for 36 newly created scenarios that contain 800 to 1500 fully autonomous taxis and for which there is 5% to 100% probability of a trip carried out by a conventional vehicle to be replaced by a trip by an autonomous taxi. For every scenario, a complete analysis was conducted regarding the characteristics of its input data and the simulation results. Moreover, making use of traffic flow's knowledge base and its implementations on a macroscopic level, a traffic analysis was also carried out for every scenario and their macroscopic fundamental diagrams (MFD) were created. Completion of at least 95% of the trips that were designed to be conducted by autonomous taxis, waiting times for autonomous taxis under 25 minutes and increased traffic flow capacity, compared to the initial scenario, were set as criteria for the traffic resilience assessment of every scenario. Findings reveal that 5 out of 36 scenarios are resilient. Ultimately, Zurich's traffic system is assessed as not resilient, since the scenarios that diverged from their design, failed to satisfy the resilience criteria.

Keywords: simulation, autonomous taxis, multi-agent system, MATSim, traffic flow, macroscopic fundamental diagrams (MFD), resilience criteria, operation policies

Περίληψη

Οι τεχνολογίες αυτοματοποίησης των αυτοκινήτων αναπτύσσονται διαρκώς τα τελευταία χρόνια και οι ενέργειες που έχει να κάνει ο οδηγός μειώνονται ή γίνονται ολοένα και ευκολότερες. Τελικώς στόχος αυτής της ανάπτυξης είναι το πλήρως αυτόνομο όχημα, στο οποίο δεν θα υπάρχει οδηγός, παρά μόνο επιβάτες. Μεγάλες εταιρείες, όπως η Waymo και η Uber, ήδη υπόσχονται πλήρως αυτόνομα ταξί στη διάθεση του επιβατικού κοινού στο κοντινό μέλλον. **Στόχος της παρούσας εργασίας** είναι να γίνει η αξιολόγηση της ανθεκτικότητας ενός κυκλοφοριακού συστήματος στο οποίο κυκλοφορούν πλήρως αυτόνομα οχήματα. Θα γίνει η σύγκριση, δηλαδή, της απόδοσης της κυκλοφορίας του ίδιου συστήματος κατά την μετακίνηση συμβατικών μέσων μεταφοράς και των μεταβολών που θα προκύψουν από την σταδιακή αντικατάσταση αυτών των μετακινήσεων με αυτόνομα οχήματα, καθώς και την αύξηση του αριθμού των διαθέσιμων αυτόνομων οχημάτων. Τα αυτόνομα οχήματα που θα εξεταστούν θα είναι μέρος ενός στόλου αυτόνομων ταξί μιας υπηρεσίας παροχής μετακινήσεων ατόμων, ενώ βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας είναι η δημιουργία των μακροσκοπικών θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής και ειδικά αυτό της σχέσης Φόρτου – Πυκνότητας.

Προφανώς, για μια τόσο σημαντική εξέλιξη όπως τα πλήρως αυτόνομα οχήματα, υπάρχει μεγάλη υποστήριξη από την επιστημονική κοινότητα και για αυτό ένας μεγάλος αριθμός ερευνών επικεντρώνεται στους τρόπους λειτουργίας και στις επιπτώσεις που θα επιφέρουν. **Κάποια βασικά συμπεράσματα** που προκύπτουν **από την ανασκόπηση αυτών των ερευνών**, είναι πως η αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων από αυτόνομα σε ποσοστό μεγαλύτερο του 75% δεν προβλέπεται να συμβεί πριν το 2040, πως κατά την πλήρη αντικατάσταση των μετακινήσεων με συμβατικά οχήματα από αυτόνομα, ένα αυτόνομο ταξί θα μπορεί να αντικαταστήσει 10 συμβατικά αυτοκίνητα και πως τα συνολικά οχηματο-χιλιόμετρα που θα διανύονται προβλέπεται να αυξηθούν μέχρι κατά 35%. Επίσης, προβλέπεται πως όσο αυξάνεται η διεύθυνση των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, θα αυξάνεται και η κυκλοφοριακή ικανότητα των οδών, ειδικά κάτω από συνθήκες συμφόρησης.

Για την επίτευξη των στόχων της εργασίας, έγινε **προσομοίωση σεναρίων** μέσω του προγράμματος MATSim και εξετάζοντας τις δραστηριότητες και τις μετακινήσεις ενός πολύ-πρακτορικού συστήματος. Το αρχικό σενάριο αφορά μια περιοχή 30 χιλιομέτρων γύρω από ένα κεντρικό σημείο της Ζυρίχης της Ελβετίας, περιλαμβάνει 209.391 πράκτορες, που είναι το 10% του πραγματικού πληθυσμού της περιοχής, και για τις μετακινήσεις τους χρησιμοποιούνται συμβατικά μέσα μεταφοράς, εκ των οποίων το 37,1% αφορά το αυτοκίνητο. Με δεδομένο την ύπαρξη μιας υπηρεσίας πλήρως αυτόνομων ταξί, δημιουργήθηκαν 36 νέα σενάρια, τα οποία διαθέτουν 800, 3000, 6000, 9000, 12000 και 15000 αυτόνομα ταξί και 5%, 20%, 40%, 60%, 80% και 100% πιθανότητα αντικατάστασης των μετακινήσεων. Κάθε αύξηση του μεγέθους του στόλου σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να ικανοποιήσει την αντίστοιχη αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης. Στο περιβάλλον του MATSim, μόνο τα αυτόνομα οχήματα και τα συμβατικά αυτοκίνητα προσομοιώνονται στην κυκλοφορία και αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, ενώ τα υπόλοιπα διαθέσιμα μέσα μεταφοράς τηλεμεταφέρονται στον προορισμό τους.

Τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες του MATSim, ενώ το κάνουν κατάλληλο για τέτοιου είδους συγκοινωνιακές έρευνες, στην παρούσα εργασία οδήγησαν σε κάποιους περιορισμούς, κυρίως εξαιτίας της μεγάλης καμπύλης μάθησης που απαιτεί η ουσιαστική χρήση του για έρευνες όπως η παρούσα. Πιο συγκεκριμένα, το MATSim για να λειτουργήσει χρειάζεται κάποια αρχεία εισαγωγής. Αυτά είναι αρχεία τύπου xml, συνήθως σε συμπιεσμένη μορφή, που περιγράφουν σημαντικά χαρακτηριστικά του σεναρίου που πρόκειται να προσομοιωθεί, όπως τον πληθυσμό των πρακτόρων και τα χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου. Απαραίτητος είναι επίσης ο κώδικας με τον οποίο εκτελούνται οι προσομοιώσεις. Η κυκλοφορία προσομοιώνεται με ένα μοντέλο ουρών, χωρίς να προσομοιώνονται αναλυτικά οι κινήσεις των οχημάτων μέσα στις οδούς, μα καταγράφοντας μόνο τα συμβάντα εισόδου και εξόδου από αυτές, και οι επιλογές των πρακτόρων βαθμολογούνται και

επανασχεδιάζονται αν δεν λάβουν καλή βαθμολογία, επειδή για παράδειγμα άργησαν να φτάσουν σε κάποια δραστηριότητα. Από τις προσομοιώσεις προκύπτουν κάποια αρχεία, επίσης συμπιεσμένα, τύπου xml, τα οποία περιέχουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που χρειάζονται για την κατανόηση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Βασικοί περιορισμοί που δεσμεύουν αυτή την εργασία αφορούν στην απουσία ενός συστήματος βαθμολόγησης και επανασχεδιασμού, που σημαίνει πως το πολύ-πρακτορικό σύστημα προσομοιώνεται μόνο για μία επανάληψη και άρα η κυκλοφορία δεν φτάνει σε μια βέλτιστη κατάσταση, και την χρήση του προσομοιωτή κυκλοφορίας QSim αντί του JDEQSim. Βασική διαφορά τους είναι πως στον πρώτο προσομοιωτή, ενώ είναι ο προεπιλεγμένος του προγράμματος και οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα, δεν μπορεί να τεθεί ταχύτητα επιστροφής μιας κενής θέσης στην ουρά αναμονής μιας οδού, αφού αυτή ελευθερωθεί. Χωρίς αυτή τη ταχύτητα, τα μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα δε μπορούν να προκύψουν με την κατάλληλη μορφή. Ενώ και οι δύο αυτοί περιορισμοί θα μπορούσαν να επιλυθούν, αυτό δεν κατέστη δυνατό.

Μέσω όμως κάποιων διορθωτικών ενεργειών, αυξάνοντας τον ρυθμό των οχημάτων που μπορούν να εξέλθουν από κάποιο οδικό τμήμα, μέσα σε ένα χρονικό διάστημα, και εξετάζοντας μόνο μία από τις δύο αιχμές της κυκλοφοριακής συμφόρησης, κατάφεραν να προκύψουν **ικανοποιητικά αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις**. Στο περιβάλλον του MATSim, δίνεται η δυνατότητα κάποιοι σύνδεσμοι να μπορούν να δεχτούν παραπάνω οχήματα από αυτά που τους υπαγορεύει η αποθηκευτική τους χωρητικότητα οχημάτων. Αυτό το χαρακτηριστικό, ενώ τελικά ήταν ένας από τους λόγους που κατάφεραν να προκύψουν ικανοποιητικές μορφές των ζητούμενων διαγραμμάτων, οδήγησε 2%, κατά μέγιστο, των οδών να παρουσιάσει παραβιασμένη χωρητικότητα κατά 750%, κατά μέσο όρο.

Για το 1% ως 7% των πρακτόρων, ματαιώθηκε το πλάνο τους στο τέλος της προσομοίωσης, δηλαδή δεν κατάφεραν να ολοκληρώσουν το σύνολο των προγραμματισμένων τους δραστηριοτήτων και μετακινήσεων, ένα μέρος των μετακινήσεων που είχαν σχεδιαστεί να γίνουν με αυτόνομα ταξί, το οποίο έφτασε μέχρι 82%, δεν κατάφεραν να πραγματοποιηθούν και από τους πράκτορες που κατάφεραν να εξυπηρετηθούν ο μέσος χρόνος αναμονής έφτασε τις 2 ώρες. Προφανώς αυτές οι μέγιστες τιμές αφορούν σενάρια στα οποία η υπηρεσία προκύπτει ανεπαρκής και σε σενάρια που το κυκλοφοριακό σύστημα προκύπτει ανθεκτικό, οι μετακινήσεις που δεν πραγματοποιούνται δεν ξεπερνούν το 5% και ο μέσος χρόνος αναμονής είναι 11 λεπτά. Τα οχηματο-χιλιόμετρα που διανύθηκαν αυξήθηκαν κατά 23,5%, κατά μέγιστο, από το αρχικό σενάριο.

Στη συνέχεια έγινε η **κυκλοφοριακή ανάλυση** αυτών των αποτελεσμάτων αξιοποιώντας τις γενικευμένες εξισώσεις του Edie. Από αυτές, προκύπτουν τα βασικά μακροσκοπικά μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής, δηλαδή των μέσων τιμών της πυκνότητας, του κυκλοφοριακού φόρτου και της ταχύτητας, για όλο το εξεταζόμενο οδικό δίκτυο. Οι τιμές αυτών των μεγεθών καθώς και οι θεμελιώδεις σχέσεις ταχύτητας – πυκνότητας, φόρτου – πυκνότητας και ταχύτητας – φόρτου, αφού υπολογίστηκαν, τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα διαγράμματα, ώστε να διευκολυνθεί η κατανόησή τους. Ύστερα, με περαιτέρω ανάλυση αυτών των διαγραμμάτων, προέκυψε η σύγκριση των τιμών της κυκλοφοριακής ικανότητας, που είναι ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος που παρατηρείται, της κρίσιμης πυκνότητας, που είναι η πυκνότητα που αντιστοιχεί στον μέγιστο φόρτο, και της μέγιστης πυκνότητας, μεταξύ του αρχικού και των 36 νέων σεναρίων.

Από την κυκλοφοριακή ανάλυση προκύπτει πως οι τιμές της ταχύτητας είναι σχετικά υψηλές και οι τιμές της πυκνότητας αρκετά χαμηλές, που είναι αποτέλεσμα της αύξησης του αριθμού των οχημάτων που μπορούν να εξέλθουν από τις οδούς σε κάποιο χρονικό διάστημα. Οι τιμές της κυκλοφοριακής ικανότητας κυμάνθηκαν σε φυσιολογικά πλαίσια και αυξάνονταν, κατά μέγιστο, όσο αυξανόταν ο διαθέσιμος στόλος αυτόνομων ταξί.

Τελικά, η **ανθεκτικότητα** του κυκλοφοριακού συστήματος κάθε σεναρίου αξιολογήθηκε με βάση κάποια κριτήρια που θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικά. Έτσι για να θεωρηθεί ένα σενάριο ανθεκτικό

στην αλλαγή που του επιβλήθηκε, πρέπει οι μετακινήσεις που είχαν ανατεθεί να γίνουν με αυτόνομο ταξί και δεν πραγματοποιήθηκαν να μην ξεπερνούν το 5%, ο μέσος χρόνος αναμονής για αυτόνομο ταξί να μην ξεπερνά τα 25 λεπτά και η κυκλοφοριακή του ικανότητα να είναι μεγαλύτερη αυτής του αρχικού σεναρίου. Τελικά από τα 36 σενάρια που εξετάστηκαν, μόνο 7 προέκυψαν ανθεκτικά. Κάθε μέγεθος στόλου των ανθεκτικών σεναρίων αντιστοιχεί μόνο σε ένα ποσοστό αντικατάστασης των μετακινήσεων, ίσο ή μικρότερο από αυτό για το οποίο σχεδιάστηκε, εκτός του στόλου των 15000 αυτόνομων ταξί, που αντιστοιχεί σε δύο, μικρότερα από αυτά του σχεδιασμού, ποσοστά.

Στα **βασικά συμπεράσματα** που προκύπτουν από αυτή την εργασία είναι πως η προσομοίωση ενός πολύ-πρακτορικού συστήματος είναι ιδανική μέθοδος για να διερευνηθεί ένα τόσο πολυδιάστατο ζήτημα, όπως αυτό που εξετάστηκε. Το γεγονός ότι μπορεί να γίνει επισκόπηση και επεξεργασία των χαρακτηριστικών του εξεταζόμενου πληθυσμού στο επίπεδο της διάρκειας και του τύπου των δραστηριοτήτων τους, για παράδειγμα, παρέχει, ειδικά μέσω του MATSim, τη δυνατότητα δημιουργίας σεναρίων που μπορούν να αναπαραστήσουν την πραγματικότητα με κάθε επιθυμητή λεπτομέρεια.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει επίσης πόσο επηρεάζει την απόδοση της κυκλοφορίας η αλληλεπίδραση μεταξύ των μέσων που προσομοιώνονται σε αυτή. Έτσι, γίνεται σαφές πως για να μπορέσουν να προκύψουν τα πλέον αξιόπιστα συμπεράσματα, πρέπει να μπορούν να αλληλοεπιδράσουν όλα τα διαθέσιμα μέσα μεταφοράς και όχι μόνο τα αυτοκίνητα και τα αυτόνομα ταξί. Τα συνολικά οχηματο-χιλιόμετρα που διανύθηκαν φαίνεται να αυξάνονται για τα σενάρια που προκύπτουν ανθεκτικά, τα οποία, επειδή τα αυτόνομα ταξί σταθμεύουν αμέσως μόλις αφήσουν κάποιο πράκτορα στον προορισμό του, στην πραγματικότητα θα ήταν ακόμα περισσότερα, αφού θα έπρεπε να αναζητήσουν θέση στάθμευσης. Από τις τιμές της κρίσιμης και της μέγιστης πυκνότητας, προκύπτει πως γίνεται μεγαλύτερη χρήση του οδικού δικτύου και μεγαλώνει το διάστημα που η κυκλοφορία βρίσκεται σε συνθήκες μη συμφορημένης ροής, όσο μεγαλώνει ο διαθέσιμος στόλος αυτόνομων οχημάτων.

Κατά την τελική αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του κυκλοφοριακού συστήματος της Ζυρίχης, αυτό προκύπτει ως μη ανθεκτικό. Αυτό διότι σε καταστάσεις πέραν του σχεδιασμού, το κυκλοφοριακό σύστημα δεν είχε ικανοποιητική απόδοση, συγκριτικά με το αρχικό σενάριο.

Τέλος, σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από αυτή τη Διπλωματική εργασία, είναι πως για την βέλτιστη εισαγωγή των αυτόνομων οχημάτων σε ένα κυκλοφοριακό σύστημα, πρέπει να γίνεται σωστή πρόβλεψη της ζήτησης και σχεδιασμός με βάση την ανθεκτικότητα. Από τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της ανθεκτικότητας, ως μη ανθεκτικά προκύπτουν σενάρια των οποίων η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από αυτή για την οποία σχεδιάστηκε ο στόλος των αυτόνομων ταξί τους. Ως μη ανθεκτικά προκύπτουν όμως και σενάρια για τα οποία η ζήτηση είναι αρκετά χαμηλότερη αυτής του σχεδιασμού, όπως αυτό με 15000 αυτόνομα ταξί και 5% αντικατάσταση μετακινήσεων, στο οποίο η κυκλοφοριακή ικανότητα προέκυψε χαμηλότερη αυτής του αρχικού σεναρίου. Φαίνεται λοιπόν, πως όταν η υπηρεσία των αυτόνομων ταξί δεν μπορεί να ανταπεξέλθει σε καταστάσεις που δεν προβλέφθηκαν από τον σχεδιασμό της, επιβαρύνεται τόσο η ίδια η υπηρεσία, αφού δεν μπορεί να εξυπηρετήσει τους πελάτες της, όσο και το κυκλοφοριακό σύστημα και οι υπόλοιποι χρήστες του. Έτσι, συμπεραίνεται πως για να προκύψουν οι βέλτιστες συνθήκες, θα πρέπει οι διαχειριστές των κυκλοφοριακών συστημάτων σε συνεργασία με τις εταιρείες που θα παρέχουν υπηρεσίες αυτόνομων ταξί, να θέσουν από κοινού κάποιους κανόνες και πολιτικές για την κυκλοφορία των αυτόνομων ταξί.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενική Ανασκόπηση.....	1
1.2 Στόχοι, Μεθοδολογία και Χρησιμότητα	4
1.3 Βασικά μεγέθη Κυκλοφοριακής Ροής.....	6
1.4 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας Συνοπτικά	6
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	9
2.1 Προσομοίωση Αυτόνομων Οχημάτων και Επιπτώσεις	9
2.2 Ανθεκτικότητα κυκλοφοριακών συστημάτων	13
2.3 Μακροσκοπικά Θεμελιώδη Διαγράμματα	14
2.4 Σύνοψη.....	17
Κεφάλαιο 3: Θεωρητικό Υπόβαθρο	18
3.1 Μεθοδολογική Προσέγγιση	18
3.2 Προσομοιώσεις με συστήματα πρακτόρων	18
3.3 MATSim	19
3.3.1 Το MATSim συνοπτικά.....	19
3.3.2 Αρχεία Εισαγωγής.....	21
3.3.3 Μέσα Μεταφοράς	25
3.3.4 Μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας.....	26
3.3.5 Αρχεία που Εξάγονται.....	28
3.3.6 Δημιουργία ενός ρεαλιστικού Σεναρίου MATSim.....	29
3.3.7 Οπτικοποίηση	31
3.4 Θεμελιώδες Διάγραμμα Φόρτου - Πυκνότητας	32
3.4.1 Θεμελιώδη Διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής.....	32
3.4.2 Διάγραμμα Φόρτου – Πυκνότητας και MATSim	34
Κεφάλαιο 4: Δεδομένα Εισαγωγής και Προσομοιώσεις	36
4.1 Αρχικό Σενάριο	36
4.1.1 Χαρακτηριστικά Οδικού Δικτύου	39
4.1.2 Τοποθεσίες Δραστηριοτήτων	40
4.1.3 Χαρακτηριστικά Αρχικού Πληθυσμού	42
4.2 Μεθοδολογία Δημιουργίας Νέων Σεναρίων	43
4.2.1 Νέα χαρακτηριστικά πληθυσμών	46
4.3 Προσομοιώσεις	49
4.3.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	50
Κεφάλαιο 5: Κυκλοφοριακή Ανάλυση και Ανθεκτικότητα	60

5.1	Μεθοδολογία Κυκλοφοριακής Ανάλυσης	60
5.1.1	Αποτελέσματα Κυκλοφοριακής Ανάλυσης.....	63
5.1.2	Χαρακτηριστικά μεγέθη Διαγραμμάτων Πυκνότητας - Φόρτου.....	68
5.2	Αξιολόγηση της Κυκλοφοριακής Ανθεκτικότητας	71
Κεφάλαιο 6:	Συμπεράσματα	75
6.1	Σύνοψη Αποτελεσμάτων.....	75
6.2	Τελικά Συμπεράσματα	78
6.3	Περιορισμοί.....	80
6.4	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	80
Βιβλιογραφία	83
Παραρτήματα	86
Παράρτημα 1:	Χαρακτηριστικά Οδικού Δικτύου – python	86
Παράρτημα 2:	Οπτικοποίηση Χαρακτηριστικών Οδικού Δικτύου	88
Παράρτημα 3:	Στατιστικά Στοιχεία Πληθυσμών – java	89
Παράρτημα 4:	Δημιουργία Νέων Πληθυσμών – java	95
Παράρτημα 5:	Κυκλοφοριακή Ανάλυση – python	98
Παράρτημα 6:	Διαγράμματα Κυκλοφοριακής Ανάλυσης - python.....	103
Παράρτημα 7:	Διαγράμματα Κυκλοφοριακής Ανάλυσης	105
7.2	Ταχύτητα - Πυκνότητα	106
7.3	Ταχύτητα - Φόρτος	107
7.4	Πυκνότητα.....	108
7.5	Φόρτος	109
7.6	Ταχύτητα	110

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Επίπεδα αυτονομίας (Πηγή: (SAE International Technical Standard Provides Terminology for Motor Vehicle Automated Driving Systems, 2020))	1
Εικόνα 2: Αριστερά, αυτόνομη οδήγηση επιπέδου 4. Δεξιά, Αυτόνομη στάθμευση. (Πηγή: (Mauer, Gerdes, Lenz, & Winner, 2015)).....	2
Εικόνα 3: Οδικό Δίκτυο MATSim της Ελβετίας. Με μπλε, 30χλμ γύρω από κεντρικό σημείο της Ζυρίχης	37
Εικόνα 4: Οδικό δίκτυο MATSim της περιοχής μελέτης, η οποία εμφανίζεται με μπλε. Με κόκκινο, η πόλη της Ζυρίχης. Με πορτοκαλί, πυκνοκατοικημένες περιοχές γύρω από την Ζυρίχη . Μέσω Via.	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 5: Αριστερά, με ροζ οι εγκαταστάσεις των δραστηριοτήτων (facilities). Δεξιά, το άθροισμα των εγκαταστάσεων ακτίνας 1500μ και σε χρωματική κλίμακα: άσπρο: 0+, μπλε: 500-5000, κόκκινο: >5000 εγκαταστάσεις. Μέσω Via.	41
Εικόνα 6: Πάνω, το άθροισμα των δραστηριοτήτων που αφορούν στην κατοικία-home σε ακτίνα 1500μ. Κάτω, το άθροισμα όων είναι outside, με την ίδια ακτίνα. Ίδια χρωματική κλίμακα με Εικόνα 5. Μέσω Via.	41
Εικόνα 7: Μία εγκατάσταση μπορεί να εξυπηρετεί πάνω από μία δραστηριότητες. Μέσω Via. ...	41
Εικόνα 8: Πάνω, κυκλοφορία με την παράμετρο lanes = false. Κάτω, κυκλοφορία με την παράμετρο lanes = true. (Πηγή: (Horni, Nagel, & Axhausen, The Multi-Agent Transport Simulations MATSim, 2016))	49
Εικόνα 9: Αριστερά, συμφόρηση αρχικού σεναρίου στις 7:30 το πρωί. Δεξιά, συμφόρηση σεναρίου 15χλμ αυτόνομων ταξί και 60% αντικατάστασης για την ίδια ώρα. Μέσω Via.....	51
Εικόνα 10: Ταχύτητα Ελεύθερης Ροής συνδέσμων σε χλμ/ώρα. Χρωματική κλίμακα: κόκκινο: 0-30, κίτρινο:47-76, μπλε:76-112, πράσινο:>112. Μέσω Via.	88
Εικόνα 11: Μέγιστοι ρυθμοί ροής εξόδου συνδέσμων σε οχήματα/ώρα. Χρωματική κλίμακα: κόκκινο: 0-300, μπλε:1000 -2000, πράσινο:>2000. Μέσω Via.	88

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Διάγραμμα Ροής Κεφαλαίων Διπλωματικής εργασίας.....	8
Διάγραμμα 2: Χρόνοι αναμονής κατά την αιχμή της κυκλοφορίας, για διαφορετικά ποσοστά διεύθυνσης και βαθμούς βελτίωσης της κυκλοφοριακής ροής από τη χρήση αυτόνομων οχημάτων. (Πηγή: (Maciejewski & Bischoff, 2016)).....	10
Διάγραμμα 3: Αριστερά, σχέση αριθμού οχημάτων στόλου με αριθμό εξυπηρετούμενων μετακινήσεων, για σταθερή και δυναμική κοστολόγηση. Δεξιά σχέση αριθμού οχημάτων στόλου με τιμή χρήσης σε ευρώ/χλμ. (Πηγή: (Horl, Balac , & Axhausen, 2019)).....	13
Διάγραμμα 4: Σύγκριση των μετρήσεων της αποδοτικότητας(μπλε) και της ανθεκτικότητας(πορτοκαλί), για βλάβη στο 5% των οδικών τμημάτων των δικτύων τους. (Πηγή: (Ganin, και συν., 2017)).....	14
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα πυκνότητας-φόρτου του πραγματικού δικτύου (Πηγή: (Lu, Tettamanti, Horcher, & Varga, 2019)).....	16
Διάγραμμα 6: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε.	18
Διάγραμμα 7: Θεμελιώδη Διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής: (α) Σχέση Ταχύτητας – Πυκνότητας, (β) Σχέση Φόρτου – Πυκνότητας, (γ) Σχέση Ταχύτητας – Φόρτου (Πηγή: (Φρατζεσκάκης, Γκόλιας, & Πιτσιάβα-Λατινοπούλου, 2009)).	33
Διάγραμμα 8: Πειραματικά διαγράμματα φόρτου – πυκνότητας (Πηγή: Μη καθορισμένη).....	34
Διάγραμμα 9 : Θεμελιώδες Διάγραμμα Φόρτου – Πυκνότητας του MATSim (Πηγή: (Horni, Nagel, & Axhausen, The Multi-Agent Transport Simulations MATSim, 2016)).....	35
Διάγραμμα 10: Ποσοστιαία χρήση μεταφορικών μέσων για κάθε ποσοστό αντικατάστασης μετακινήσεων.	48
Διάγραμμα 11: Οχήματα που επηρεάζουν την κυκλοφορία, για κάθε εξεταζόμενο σενάριο.....	48
Διάγραμμα 12: Πράκτορες που βρίσκονται εν κινήσει με κάποια βασικά μεταφορικά μέσα, ανά 15 λεπτά της ώρας, για το αρχικό σενάριο χωρίς αυτόνομα οχήματα. Δεδομένα μέσω Via.	52
Διάγραμμα 13: Αριθμός συνδέσμων με παραβιασμένη αποθηκευτική χωρητικότητα.....	54
Διάγραμμα 14: Ποσοστό υπέρβασης της αποθηκευτικής χωρητικότητας των παραβιασμένων συνδέσμων.....	54
Διάγραμμα 15: Πράκτορες που στο τέλος της προσομοίωσης το πλάνο τους ματαιώθηκε και οδηγήθηκαν σε συμβάν stuckAndAbort. Εμφανίζεται το σύνολο αυτών των πρακτόρων, αυτοί που βρίσκονταν στην κίνηση με αυτόκίνητο και εκείνοι που βρίσκονταν στην κίνηση με αυτόνομο ταξί.	55
Διάγραμμα 16: Σύγκριση μεταξύ των σχεδιασμένων μετακινήσεων με αυτόνομα ταξί, των κλήσεων για αυτόνομα ταξί που έγιναν και των μετακινήσεων που τελικά και έφτασαν στον προορισμό τους. Εμφανίζεται επίσης το ποσοστό των μετακινήσεων που δεν έφτασαν στον προορισμό τους ως προς τις συνολικές μετακινήσεις σχεδιασμού.	57
Διάγραμμα 17: Αναμονή των πρακτόρων για τον ερχομό ενός αυτόνομου ταξί, σε ώρες.....	57
Διάγραμμα 18: Συνολικά Οχηματο-χιλιόμετρα και οχηματο-χιλιόμετρα που διανύθηκαν χωρίς επιβάτη, για όλα τα σενάρια.	59
Διάγραμμα 19: Διαγράμματα βασικών μεγεθών και θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής για το αρχικό σενάριο της Ζυρίχης.	64
Διάγραμμα 20: Μακροσκοπικά Θεμελιώδη Διαγράμματα Φόρτου – Πυκνότητας για όλα τα νέα εξεταζόμενα σενάρια. Σε κάθε διάγραμμα διατηρείται σταθερός ο στόλος των αυτόνομων ταξί και μεταβάλλεται το ποσοστό αντικατάστασης των μετακινήσεων.....	67
Διάγραμμα 21: Πάνω, η κυκλοφοριακή ικανότητα για κάθε σενάριο. Κάτω, η διαφορά της αφαίρεσης της κυκλοφοριακής ικανότητας του αρχικού σεναρίου από την κυκλοφοριακή ικανότητα των νέων σεναρίων.....	68

Διάγραμμα 22: Πάνω, η κρίσιμη πυκνότητα κάθε σεναρίου. Κάτω, η διαφορά της αφαίρεσης της κρίσιμης πυκνότητας του αρχικού σεναρίου από την κρίσιμη πυκνότητα των νέων σεναρίων.	70
Διάγραμμα 23: Πάνω, η μέγιστη πυκνότητα κάθε σεναρίου. Κάτω, η διαφορά της αφαίρεσης της μέγιστης πυκνότητας του αρχικού σεναρίου από την μέγιστη πυκνότητα των νέων σεναρίων.	71
Διάγραμμα 24: Σενάρια που η υπηρεσία αυτόνομων ταξί εκπλήρωσε τουλάχιστον το 95% των μετακινήσεων που της είχαν ανατεθεί.	72
Διάγραμμα 25: Σενάρια που ο μέσος χρόνος αναμονής για αυτόνομο ταξί δεν ξεπερνά τα 25 λεπτά.	73
Διάγραμμα 26: Κυκλοφοριακή ικανότητα των σεναρίων που πέρασαν όλους τους ελέγχους. Οι αριθμοί πάνω από τις στήλες είναι η διαφορά της αφαίρεσης της κυκλοφοριακής ικανότητας του αρχικού σεναρίου από τη κυκλοφοριακή ικανότητα των νέων σεναρίων.	74
Διάγραμμα 27: Σενάρια των οποίων το κυκλοφοριακό σύστημα κρίθηκε ανθεκτικό στην επιβαλλόμενη αλλαγή.	74
Διάγραμμα 28: Συγκεντρωτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στα παραπάνω κεφάλαια.	75
Διάγραμμα 29: Σενάρια με ανθεκτικό κυκλοφοριακό σύστημα.	77

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά Οδικού Δικτύου	40
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά και στατιστικά στοιχεία αρχικού πληθυσμού.....	42
Πίνακας 3: AnReplace κάθε μέσου ως προς κάποιες χαρακτηριστικές τιμές, για κάθε νέο πληθυσμό.	47

Ευρετήριο Τυπικών μορφών αρχείων

Τυπική μορφή αρχείου 1: Αρχείο διαμόρφωσης: ομάδα, παράμετροι και τιμές.	22
Τυπική μορφή αρχείου 2: Αρχείο Οδικού Δικτύου: κόμβος.	23
Τυπική μορφή αρχείου 3: Αρχείο Οδικού Δικτύου: σύνδεσμος.	23
Τυπική μορφή αρχείου 4: Αρχείο Πληθυσμού: πλάνο πράκτορα.	24
Τυπική μορφή αρχείου 5: Αρχείο συμβάντων: συμβάντα.	29

Ευρετήριο Αλγορίθμων σε ψευδογλώσσα

Αλγόριθμος σε Ψευδογλώσσα 1: Τροποποίηση του αρχικού πληθυσμού. Διαγραφή των δραστηριοτήτων rt interaction και διατήρηση της διαδρομής για τις μετακινήσεις με περπάτημα.	45
Αλγόριθμος σε Ψευδογλώσσα 2: Αντικατάσταση μετακινήσεων με συμβατικά μέσα από μετακινήσεις με αυτόνομο ταξί.	46

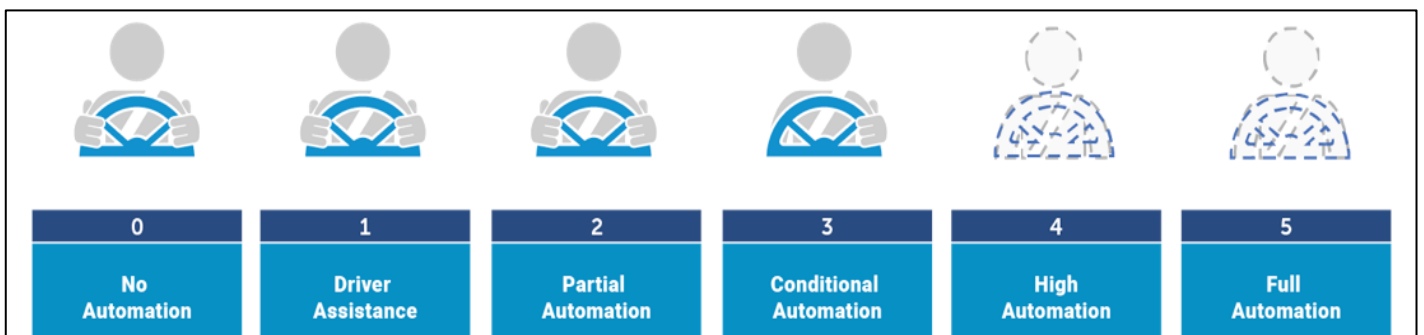
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενική Ανασκόπηση

Η εισαγωγή των αυτόνομων οχημάτων στην αγορά είτε ως ιδιωτικά οχήματα, (Tesla, 2020), είτε ως υπηρεσίες μετακίνησης, (Uber, 2020), (Waymo, 2020), αναμένεται να επιφέρει αλλαγές σε αρκετές διαστάσεις του κυκλοφοριακού συστήματος. Με τον καιρό η τεχνολογία αυτή θα εδραιώνεται σταδιακά στην καθημερινότητα των ατόμων που μετακινούνται και οι αλλαγές αυτές θα γίνονται πιο αισθητές. Εκτιμάται ότι η αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων από αυτόνομα, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50%, και την κίνηση αυτόνομων οχημάτων χωρίς την παρουσία νόμιμου οδηγού ή χωρίς επιβάτες γενικώς, σε δημόσιες οδούς, προβλέπεται να συμβεί μετά το 2050 (Bierstedt, και συν., 2014). Το προβλεπόμενο αυτό ποσοστό όμως έχει μεγάλες διακυμάνσεις μεταξύ των ερευνητών, για παράδειγμα σε άλλες πηγές να φτάνει το 75% μέχρι το 2040 (Pinjari, Menon, & Bertho, 2014).

Με τον όρο αυτόνομα ή αυτοματοποιημένα οχήματα ή οχήματα-ρομπότ, περιγράφονται τα οχήματα τα οποία αξιοποιώντας διάφορες τεχνολογίες, όπως αισθητήρες απόστασης και GPS, μπορούν να κατανοήσουν τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος γύρω τους και να αναλάβουν ως κάποιιο βαθμό την δυναμική δραστηριότητα της οδήγησης. (Self-Driving car, 2020). Ο όρος αυτοματοποιημένα οχήματα είναι πιο ορθός από τον όρο αυτόνομα. Αυτό γιατί ένα πραγματικά αυτόνομο όχημα θα μπορεί να έχει τις δικές τους σκέψεις και στόχους, όπως για παράδειγμα να αποφασίσει να πάει κάπου με δική του πρωτοβουλία. Παρόλα αυτά, τα οχήματα που θα εξεταστούν, στην πλέον εξελιγμένη μορφή τους, θα δέχονται τουλάχιστον μία οδηγία από τον χρήστη τους: τον προορισμό της πορείας τους. Σε αυτή την εργασία, θα χρησιμοποιείται μόνο ο όρος αυτόνομα οχήματα, εξαιτίας της ευρύτατα διαδεδομένης χρήσης του, τόσο από το ευρύ κοινό, όσο και από τη βιβλιογραφία.

Η δυναμική δραστηριότητα της οδήγησης, που αναφέρθηκε παραπάνω, αφορά λειτουργικές και πρακτικές διαστάσεις της οδήγησης, όπως το φρενάρισμα και το πότε να χρειάζεται το όχημα να αλλάξει λωρίδα, αλλά όχι στρατηγικές διαστάσεις, όπως είναι η απόφαση του προορισμού, σύμφωνα με την αναγνωρισμένη οργάνωση SAE, Society of Automotive Engineers. Η ίδια οργάνωση έχει καθορίσει και μια αναλυτική κλίμακα με τα επίπεδα (0-5) αυτονομίας της αυτόνομης οδήγησης, (SAE International Technical Standard Provides Terminology for Motor Vehicle Automated Driving Systems, 2020).



Εικόνα 1: Επίπεδα αυτονομίας (Πηγή: (SAE International Technical Standard Provides Terminology for Motor Vehicle Automated Driving Systems, 2020))

Πιο αναλυτικά τα επίπεδα αυτονομίας:

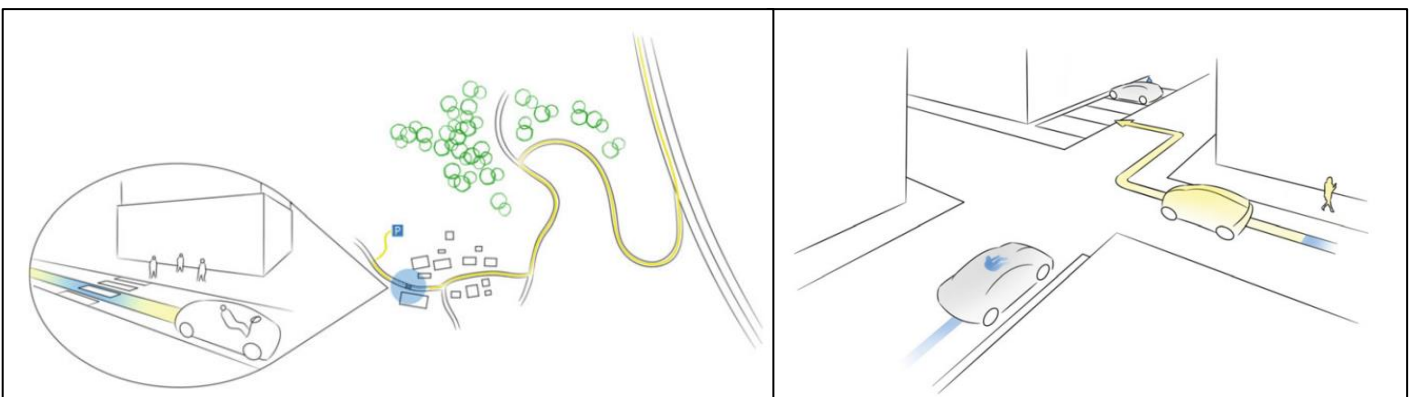
- **Επίπεδο 0:** Καμία αυτονομία.
- **Επίπεδο 1:** Κάποια συστήματα υποβοήθησης του οδηγού, όπως ο προσαρμοσμένος έλεγχος πορείας (ACC-Adaptive Cruise Control).

- **Επίπεδο 2:** Μερική αυτονομία. Το όχημα παρέχει συστήματα αυτονομίας, όπως αυτόνομη διατήρηση πορείας, αλλά ο οδηγός πρέπει να επιτηρεί διαρκώς και ενεργά το περιβάλλον του και να είναι σε θέση να επέμβει ανά πάσα στιγμή.
- **Επίπεδο 3:** Αυτονομία υπό προϋποθέσεις. Ο οδηγός δεν χρειάζεται να προσέχει το περιβάλλον γύρω του, αλλά πρέπει να είναι διαρκώς σε θέση να πάρει τον έλεγχο του οχήματος.
- **Επίπεδο 4:** Υψηλή αυτονομία. Το όχημα είναι σε θέση να κινηθεί εντελώς αυτόνομα κάτω από καθορισμένες συνθήκες, όπως σε μια πλήρως χαρτογραφημένη και δοκιμασμένη περιοχή.
- **Επίπεδο 5:** Πλήρης αυτονομίας, χωρίς καμία ανάγκη παρέμβασης του οδηγού. Τα άτομα μέσα στο όχημα μπορούν να είναι απλώς επιβάτες.

Ερευνώντας τις αλλαγές που θα επιφέρουν τα αυτόνομα οχήματα στην κυκλοφορία, σημαντική απόφαση είναι ο τρόπος που θα μοντελοποιηθεί η εισαγωγή τους στην πραγματικότητα της μετακίνησης και σε ποιο επίπεδο αυτονομίας. Όπως είναι λογικό, οι πρώτες προσπάθειες των αυτόνομων οχημάτων στην αγορά αφορούν στα **επίπεδα αυτονομίας 2 και 3**, όπως για παράδειγμα η εταιρεία Tesla, (Tesla, 2020), η οποία βρίσκεται στη μετάβαση από το επίπεδο αυτονομίας 2 στο επίπεδο 3. Τα οχήματα της συγκεκριμένης εταιρείας, διαθέτουν ήδη περιορισμένη αυτονομία για κυκλοφορία αποκλειστικά σε αυτοκινητοδρόμους, με απαραίτητη την πλήρη επιτήρηση του οδηγού.

Στα ανώτερα επίπεδα αυτονομίας 4 και 5, ο χρήστης του οχήματος θα μπορεί να ενεργοποιήσει την αυτόνομη λειτουργία του οχήματός του και να ασχοληθεί με κάποια άλλη δραστηριότητα όσο εκείνο τον πάει στον προορισμό του, χωρίς να χρειάζεται να επέμβει σε καμία περίπτωση σε επίπεδο αυτονομίας 5 ή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις σε επίπεδο αυτονομίας 4. Θα μπορεί επίσης μόλις φτάσει στον προορισμό του να αφήνει το όχημά του να πάει να σταθμεύσει μόνο του, σε κάποιο καθορισμένο χώρο στάθμευσης, καθώς και να επιστρέψει να τον παραλάβει, πάλι αυτόνομα, Εικόνα 2.

Τέλος, και μόνο για επίπεδο αυτονομίας 5, ο χρήστης δεν θα επεμβαίνει στην οδήγηση σε καμία περίπτωση και όταν θέλει να μετακινηθεί, **θα καλεί ένα όχημα να τον παραλάβει**. Κάποιο από τα οχήματα που είναι διαθέσιμα, και που ανήκουν είτε σε κάποια εταιρεία που παρέχει υπηρεσίες μετακίνησης είτε από χρήστες που έχουν επιλέξει να μοιράζονται το όχημα τους, θα τον παραλάβει, θα τον μεταφέρει στον προορισμό του και θα ξανά γίνει διαθέσιμο. (Mauer, Gerdes, Lenz, & Winner, 2015)



Εικόνα 2: Αριστερά, αυτόνομη οδήγηση επιπέδου 4. Δεξιά, Αυτόνομη στάθμευση. (Πηγή: (Mauer, Gerdes, Lenz, & Winner, 2015)

Η τελευταία από τις παραπάνω χρήσεις, είναι και αυτή, πάνω στην οποία επικεντρώνεται μεγάλο μέρος της μελέτης των αυτόνομων οχημάτων, συμπεριλαμβανομένης και της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, έχοντας παρόμοια χαρακτηριστικά με τις υπηρεσίες που προσφέρουν αυτή την στιγμή τα ταξί, γίνεται η προσπάθεια να **μοντελοποιηθεί η χρήση των αυτόνομων οχημάτων ως υπηρεσία παροχής μετακίνησης**. Αυτή η μοντελοποίηση έχει διερευνηθεί με διάφορους τρόπους, που θα εξεταστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Από το εύρος των αλλαγών που θα επιφέρει η αυτόνομη οδήγηση στην καθημερινότητα, την παρούσα εργασία ενδιαφέρουν κυρίως αυτές που επηρεάζουν την συγκοινωνιακή υποδομή. Η απορρόφηση μέρους των μετακινήσεων από κοινόχρηστες υπηρεσίες αυτόνομων οχημάτων και άρα η μείωση της χρήσης ιδιωτικών οχημάτων, θα οδηγήσει στην **ελάττωση**, και τελικά στην εξάλειψη, **της ανάγκης για στάθμευση** στις οδούς και σε ιδιωτικές εγκαταστάσεις. Αυτό με τη σειρά του θα οδηγήσει στην απελευθέρωση σημαντικών εκτάσεων γης της, μεγαλύτερης του 20% όπως έχει εκτιμηθεί στις Η.Π.Α, οι οποίες θα γίνουν διαθέσιμες για άλλες χρήσεις και θα επηρεάσει τελικώς την συνολική σύσταση και τις ιδιότητες των υποδομών των πόλεων, όπως την μείωση των τιμών της στέγασης (Larson & Weihua, 2019), (Duarte & Ratti, 2018).

Παράλληλα, όμως, τα αυτόνομα οχήματα που θα προσφέρουν αυτές τις υπηρεσίες, θα βρίσκονται εν κινήσει για το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας, χωρίς να μεταφέρουν πάντα κάποιον επιβάτη, αφού κατά την διαδρομή για να παραληφθεί κάποιος επιβάτης, το όχημα θα κινείται άδειο. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που **τα οχηματο-χιλιόμετρα που θα διανύονται προβλέπεται να αυξηθούν μέχρι και ως 35%**. Άλλοι λόγοι είναι η ευκολία που θα παρέχεται κατά τη μετακίνηση και η αύξηση της ζήτησης για μετακίνηση, με τη δυνατότητα, για παράδειγμα, ηλικιωμένων και ανήλικων να μετακινηθούν ασυνόδευτοι. (Kockelman, et al., 2017), (Bierstedt, και συν., 2014).

Ακόμα, με την **συνεχόμενη αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων (Cembalest, 2018)** και την **γενική συσχέτισή τους με τα αυτόνομα οχήματα**, θα πρέπει να προστεθεί σε αυτές τις διαφοροποιήσεις των χρήσεων γης και η δημιουργία κατάλληλων υποδομών φόρτισης των μπαταριών αυτών των οχημάτων καθώς και ο κατάλληλος συντονισμός αυτής της φόρτισης σε επίπεδο στόλου οχημάτων (Iacobucci, McLellan, & Tezuka, 2018), (Chen, Kockelman, & Hanna, 2016).

Σημαντική επίσης είναι η ενημέρωση των **Συστημάτων Ευφυών Μεταφορών (Intelligent Transport Systems - ITS)** σχετικά με την λειτουργία των αυτόνομων οχημάτων. Οι διασταυρώσεις των οδικών τμημάτων γενικώς αλλά και ειδικότερα στις περιπτώσεις που συμπεριλαμβάνονται κινήσεις πεζών, θα πρέπει να διαμορφωθούν. Αφενός για να αξιοποιηθούν οι δυνατότητες των αυτόνομων οχημάτων, όπως τεχνολογίες επικοινωνίας μεταξύ οχημάτων (Vehicle-to-Vehicle V2V) και μεταξύ των οχημάτων και της υποδομής του οδικού δικτύου (Vehicle-to-Infrastructure V2I), και αφετέρου για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη και η ασφαλής κυκλοφορία, τόσο για τα οχήματα όσο για τους πεζούς. (Hult, και συν., 2016), (Monreal, 2016)

Οι παραπάνω βασικές αλλαγές, είναι σε θέση να επηρεάσουν αισθητά **τις αποδόσεις του κυκλοφοριακού συστήματος**, όπως την κυκλοφοριακή ικανότητα των αυτοκινητοδρόμων. Προβλέπεται πως σε αρχικό στάδιο, η ικανότητα αυτή, είτε δεν θα επηρεαστεί ή θα χειροτερέψει. Μόλις όμως επιτευχθεί ικανοποιητική διείσδυση των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία και αξιοποιηθούν όλες τους οι δυνατότητες, όπως η επικοινωνία και η συνεργασία μεταξύ τους, τότε η κυκλοφοριακή ικανότητα και απόδοση προβλέπεται να βελτιωθεί αισθητά (Bierstedt, και συν., 2014).

Για να γίνουν πραγματικά αισθητές οι επιπτώσεις των παραπάνω αλλαγών, πρέπει η διείσδυση των αυτόνομων οχημάτων στην πραγματικότητα της μετακίνησης να φτάσει κάποια σημαντικά επίπεδα. Είναι λοιπόν επιτακτική η ανάγκη να διερευνηθεί, η ρεαλιστική και όχι πολύ μακρινή προοπτική της εισαγωγής αυτόνομων οχημάτων είτε μεμονωμένα είτε ως υπηρεσία σε ένα συγκοινωνιακό περιβάλλον που θα αποτελείται κατά τα άλλα από συμβατικά μέσα μεταφοράς, όπως μέσα μαζικής μεταφοράς. Σε ανταπόκριση αυτής της ανάγκης, ένας **αυξανόμενος αριθμός ερευνών επικεντρώνεται στην προσομοίωση με μοντέλα αυτόνομων οχημάτων**, ώστε να βγάλουν συμπεράσματα για τις πιθανές επιπτώσεις και για να εντοπιστούν οι βέλτιστοι τρόποι αξιοποίησής τους.

Για αυτήν την προσπάθεια υπάρχουν και έχουν αξιοποιηθεί διάφορα **μοντέλα και προγράμματα προσομοίωσης**. Το κλασικό μοντέλο των 4-βημάτων, χρησιμοποιεί συγκεντρωτικές τεχνικές για να εξάγει μακροσκοπικά μεγέθη της κυκλοφορίας. Για την μοντελοποίηση και ανάλυση μικροσκοπικών μεγεθών, όπως η ανάλυση των κινήσεων κάθε οχήματος ξεχωριστά, υπάρχουν προγράμματα όπως

το ελεύθερου κώδικα SUMO (SUMO, 2020) ή το αρκετά πιο εξελιγμένο, μα επί πληρωμή VISSIM (PtvGroup, 2020), το οποίο μπορεί να διαχειριστεί επιπλέον και αναλύσεις μεσοσκοπικού χαρακτήρα, δηλαδή μελέτες ενδιάμεσης κλίμακας.

Η μελέτη ενός καινούργιου και σύνθετου φαινομένου σαν τα αυτόνομα οχήματα, τα οποία προβλέπεται να επηρεάσουν την κυκλοφορία και σε μακροσκοπικό και σε μικροσκοπικό επίπεδο, καθιστά και τις δύο αυτές κλίμακες ανάλυσης σημαντικές. Μια λύση που μέχρι ένα βαθμό συνδυάζει αυτές τις δύο κλίμακες, είναι η δημιουργία και η **προσομοίωση μοντέλων με συστήματα πρακτόρων**¹ (Boesch & Ciari, 2015). Οι πράκτορες αυτοί προσομοιώνουν πραγματικά άτομα που μετακινούνται, έχοντας στόχους και πλάνα, αξιολογούν και επανασχεδιάζουν τις επιλογές της μετακίνησής τους. Έτσι αυτά τα μοντέλα είναι ιδανικά για την μελέτη των επιπτώσεων των αυτόνομων οχημάτων, καθώς με την εκτίμηση της ζήτησης για μετακίνηση από τις δραστηριότητες και τα πλάνα των πρακτόρων και την δυναμική κατανομή της σε μεταφορικά μέσα, μοντελοποιείται η ατομική συμπεριφορά και επιλογή των μετακινούμενων. Ταυτόχρονα προκύπτουν και τα ζητούμενα μακροσκοπικά κυκλοφοριακά μεγέθη. Σε αυτή την εργασία θα αξιοποιηθεί το πρόγραμμα ελεύθερου κώδικα MATSim (MATSim, 2020), που αφορά σε μεσοσκοπικής και μακροσκοπικής κλίμακας ανάλυση, με προσομοίωση συστημάτων πρακτόρων.

Με την προσομοίωση αυτών των πολύ-πρακτορικών συστημάτων, **είναι δυνατή η δημιουργία σεναρίων για την εισαγωγή της αυτόνομης οδήγησης** στην κυκλοφορία και η μελέτη των επιπτώσεών της. Με βάση αυτά τα σενάρια θα καταστεί δυνατόν να διερευνηθούν πολλά και κρίσιμα ζητήματα αναφορικά με τα αυτόνομα οχήματα, όπως το πως θα επηρεαστεί η κυκλοφοριακή ικανότητα των οδών από την σταδιακή προτίμηση των αυτόνομων οχημάτων έναντι των συμβατικών.

1.2 Στόχοι, Μεθοδολογία και Χρησιμότητα

Με βάση τα παραπάνω, **κύριος στόχος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας** είναι να αξιολογηθεί η ανθεκτικότητα ενός σύγχρονου κυκλοφοριακού συστήματος κατά την εισαγωγή μιας υπηρεσίας μετακίνησης ατόμων, η οποία θα αξιοποιεί πλήρως αυτόνομα οχήματα. Ο τρόπος που θα γίνει αυτή η αξιολόγηση είναι με την προσομοίωση των δραστηριοτήτων και των μετακινήσεων ενός πολύ-πρακτορικού συστήματος στο οδικό δίκτυο της Ζυρίχης, της Ελβετίας. Τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν έχουν διερευνηθεί εκτενώς και έχουν επαληθευτεί με πραγματικά στοιχεία ώστε να αντικατοπτρίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια την πραγματικότητα (Rieser-Schussler, Bosch, Horni, & Balmer, 2016).

Πιο συγκεκριμένα, θα δημιουργηθούν **σενάρια αντικατάστασης των μετακινήσεων** που πραγματοποιούν οι πράκτορες **με συμβατικά μέσα, από μετακινήσεις χρησιμοποιώντας την υπηρεσία αυτόνομων οχημάτων**. Μεταξύ των σεναρίων θα διαφοροποιούνται τα ποσοστά αντικατάστασης αυτών των μετακινήσεων και το μέγεθος του στόλου των οχημάτων που διαθέτει η υπηρεσία.

Με αυτόν τον τρόπο στο οδικό δίκτυο θα επιβληθεί ένα εύρος κυκλοφοριακών αλλαγών, των οποίων στόχος είναι να απεικονίσουν το σύνολο των προβλεπόμενων και απρόβλεπτων αποτελεσμάτων μιας τέτοιας υπηρεσίας μετακίνησης. Για παράδειγμα η εταιρεία μπορεί να έχει προβλέψει να εξυπηρετήσει ένα συγκεκριμένο ποσοστό από μετακινήσεις και να έχει διαστασιολογήσει τον στόλο της ανάλογα. Παρόλα αυτά μπορεί η υπηρεσία να είναι τόσο ελκυστική ώστε να προσελκύσει πολλές περισσότερες μετακινήσεις ή το αντίθετο.

Στα εξεταζόμενα σενάρια δεν θα γίνει προσπάθεια να επηρεαστεί η ελκυστικότητα της υπηρεσίας των αυτόνομων οχημάτων ως μεταφορικό μέσο ώστε να την επιλέγουν περισσότεροι ή λιγότεροι

¹ Ο όρος “Πράκτορας” (agent) και “Πολύ-πρακτορικό σύστημα” (multi-agent system) καθιερώθηκε στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης σαν η αφηρημένη έννοια μίας αυτόνομης οντότητας που αντιλαμβάνεται τα ερεθίσματα του περιβάλλοντος και αντιδρά σε αυτά θέλοντας να εκπληρώσει κάποιον σκοπό.

πράκτορες. Αντίθετα θα γίνει απευθείας ανάθεση της υπηρεσίας των αυτόνομων οχημάτων ως μέσο μετακίνησης στο επιθυμητό ποσοστό μετακινήσεων των πρακτόρων. Έτσι οι προς εξέταση συνθήκες, θα δημιουργηθούν συστηματικά, ακριβώς όπως είναι επιθυμητές.

Με την προσομοίωση όλων των πιθανών εκβάσεων της κυκλοφορίας, σύμφωνα με τα παραπάνω σενάρια, θα εντοπιστούν οι συνθήκες που το κυκλοφοριακό σύστημα της Ζυρίχης αντιμετωπίζει ικανοποιητικά την αλλαγή που του επιβλήθηκε, καθώς και εκείνες που προκύπτει ανεπαρκές. **Η αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του συστήματος** θα γίνει με την σύγκριση των χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας που θα προκύψουν από την προσομοίωση των νέων σεναρίων, με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του αρχικού, μη τροποποιημένου σεναρίου. Βασικό κριτήριο θα αποτελέσει η δημιουργία και η εξέταση των μακροσκοπικών θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής, τα οποία παρουσιάζουν μια συνολική εικόνα της απόδοσης της κυκλοφορίας του δικτύου, παρέχοντας συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά, όπως την κυκλοφοριακή του ικανότητα.

Δευτερεύων στόχος, ο οποίος απορρέει από τον κύριο, αποτελεί να επισημανθούν τα χαρακτηριστικά και ο σχεδιασμός των σεναρίων για τα οποία προκύπτει ανθεκτικό κυκλοφοριακό σύστημα. Τελικά, μέσω της επίτευξης των παραπάνω στόχων, θα καταστεί σαφές το γεγονός πως η επιτυχής εισαγωγή των αυτόνομων οχημάτων στην πραγματικότητα της μετακίνησης, εξαρτάται τόσο από την τεχνολογία του ίδιου του οχήματος, όσο από τη συγκοινωνιακή υποδομή του οδικού δικτύου. Αυτή η υποδομή περιλαμβάνει τόσο τις υποδομές του οδικού δικτύου, όπως για παράδειγμα τα Συστήματα Ευφώνων Μεταφορών, όσο και τα συστήματα διαχείρισης της κυκλοφορίας.

Ο λόγος που θα καταστεί σαφές, είναι διότι τα αυτόνομα οχήματα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία έχουν όλα τις ίδιες ιδιότητες μεταξύ τους. Έτσι, τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας κάθε εξεταζόμενου σεναρίου, αποτελούν αποτέλεσμα του σχεδιασμού της λειτουργίας των στόλων των αυτόνομων οχημάτων, τόσο από πλευράς των διαχειριστών της κυκλοφορίας σε επίπεδο οδικού δικτύου, όπως για παράδειγμα με την δημιουργία και την επιβολή κανόνων για την κυκλοφορία αυτών των οχημάτων, όσο από την εταιρεία που παρέχει την υπηρεσία, αναφορικά με την πρόβλεψη της ζήτησης και τον σχεδιασμό του κατάλληλου στόλου.

Η βασική χρησιμότητα που αποσκοπεί να έχει αυτή η εργασία, αφορά στα συστήματα διαχείρισης της κυκλοφορίας των πόλεων που πρόκειται να υποδεχτούν τέτοιου είδους υπηρεσίες. Χρησιμότητα είτε ως μεθοδολογία για την αξιολόγηση των αντοχών κάποιου κυκλοφοριακού συστήματος, είτε για μια πρώτη εκτίμηση των επιπτώσεων της λειτουργίας μια υπηρεσίας αυτόνομων οχημάτων σε αυτό.

Με την εκτίμηση των ορίων και των αντοχών των κυκλοφοριακών συστημάτων, οι διαχειριστές τους, σε συνεργασία με τις εταιρείες που θα παρέχουν υπηρεσίες μετακινήσεις με αυτόνομα οχήματα, θα μπορούν να προετοιμάσουν πολιτικές και κανόνες, αναφορικά με αυτές τις υπηρεσίες, ώστε να εξασφαλίσουν την ικανοποιητική λειτουργία της κυκλοφορίας, ακόμα και κάτω από απρόβλεπτες συνθήκες. Επίσης μπορούν να προβούν έγκαιρα σε κατάλληλους εκσυγχρονισμούς της συγκοινωνιακής υποδομής, εκμεταλλευόμενοι τις δυνατότητες των αυτόνομων οχημάτων, όπως την μειωμένη απόσταση που προβλέπεται πως θα μπορούν να διατηρούν μεταξύ τους ή την δυνατότητα επικοινωνίας των οχημάτων αυτών με την υποδομή του οδικού δικτύου.

Δευτερευόντως κάποια εταιρεία που αποσκοπεί να παρέχει τέτοιου είδους υπηρεσίες μετακίνησης, μπορεί να αποκτήσει μια γενική εικόνα για το πως η συσχέτιση του αριθμού των οχημάτων που διαθέτει και των μετακινήσεων που αποσκοπεί να προσελκύει, επηρεάζουν την κυκλοφορία. Φυσικά, όπως θα φανεί παρακάτω, υπάρχουν πολύ πιο αναλυτικές έρευνες αναφορικά με την διαστασιολόγηση και την κοστολόγηση στόλων αυτόνομων οχημάτων.

Επιπλέον, αυτή η εργασία μπορεί να αποτελέσει **αφορμή για περαιτέρω έρευνα στο πεδίο της ανθεκτικότητας** των κυκλοφοριακών συστημάτων, στην εποχή των αυτόνομων οχημάτων. Για μια τόσο σύνθετη τεχνολογία που έχει τις προοπτικές να αλλάξει πολλές σταθερές στην αλληλεπίδραση

μεταξύ των οχημάτων, της συγκοινωνιακής υποδομής και των πεζών, πρέπει να υπάρχει έρευνα όχι μόνο για την αναμενόμενη απόδοση των συστημάτων που την υποστηρίζουν, αλλά και για την ανθεκτικότητά τους για όλες τις πιθανές καταστάσεις που ενδέχεται να βρεθούν.

Τέλος, στη παρούσα Διπλωματική εργασία αναλύονται σημαντικά χαρακτηριστικά και λειτουργίες του MATSim και δημιουργούνται τα απαραίτητα τμήματα κώδικα για την επεξεργασία των δεδομένων εισαγωγής των προσομοιώσεων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων τους. Έτσι κάποιος που θα επιλέξει να χρησιμοποιήσει αυτό το πρόγραμμα, θα μπορέσει να βρει ένα αναλυτικό θεωρητικό υπόβαθρο και εκτενή εξήγηση των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν για να προκύψουν αυτά τα τελικά αποτελέσματα, στα ελληνικά. Επίσης θα βρει κομμάτια κώδικα με χρήσιμες εντολές και διαδικασίες, όπως αυτά παρουσιάζονται στα Παραρτήματα.

1.3 Βασικά μεγέθη Κυκλοφοριακής Ροής

Για την καλύτερη κατανόηση των επόμενων κεφαλαίων, χρήσιμο είναι να δοθούν οι ορισμοί κάποιων σημαντικών κυκλοφοριακών μεγεθών:

- **Ο κυκλοφοριακός φόρτος:** είναι ο αριθμός των οχημάτων που περνούν από ένα σημείο της οδού σε κάποιο καθορισμένο χρονικό διάστημα. Εκφράζεται σε οχήματα ανά κάποια μονάδα χρόνου, όπως η ώρα.
- **Ο ρυθμός ροής:** είναι ο αριθμός των οχημάτων που περνούν από ένα σημείο της οδού σε κάποιο χρονικό διάστημα μικρότερο της ώρας, ανηγμένος στην ώρα (ισοδύναμος ωριαίος κυκλοφοριακός φόρτος). Εκφράζεται σε οχήματα/ώρα. Είναι αρκετά χρήσιμο μέγεθος καθώς, για παράδειγμα μπορεί στην συνολική μέτρηση του αριθμού των διερχόμενων οχημάτων μιας διατομής κάποιας οδού για μια ώρα, δηλαδή ο κυκλοφοριακός φόρτος, να προκύψουν 4200 οχήματα/ώρα και η μεγαλύτερη μέτρηση της ίδιας οδού σε περιόδους 15 λεπτών να είναι 1200 οχήματα/15λεπτά. Ο τελευταίος αριθμός ανηγμένος στην ώρα, δηλαδή πολλαπλασιασμένος επί 4, κάνει 4800 οχήματα/ώρα. Ο ρυθμός ροής είναι που εμφανίζεται και στις ιδιότητες των συνδέσμων του MATSim.
- **ΜΕΑ – Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων:** με βασική μονάδα το σύνηθες επιβατικό όχημα, οι ΜΕΑ, αφορούν τη μετατροπή των διαφόρων κατηγοριών οχημάτων, όπως για παράδειγμα τα λεωφορεία, σε συγκρίσιμες μονάδες αναφορικά με την επίδρασή τους στην κυκλοφορία.
- **Πυκνότητα:** είναι ο αριθμός οχημάτων που υπάρχουν στο τμήμα μιας οδού τη δεδομένη στιγμή της μέτρησης. Εκφράζεται σε οχήματα ανά μονάδα μήκους, συνήθως οχήματα/χιλιόμετρο.
- **Κατάληψη:** είναι το ποσοστό του χρόνου που μια διατομή της οδού καταλαμβάνεται από κάποιο όχημα. Είναι μέγεθος που μπορεί να μετρηθεί ευκολότερα και χρησιμοποιείται για τη μελέτη διαγραμμάτων φόρτου – κατάληψης έναντι φόρτου – πυκνότητας.
- **Ταχύτητα ελεύθερης ροής:** είναι η μέγιστη ταχύτητα που μπορούν, και επιτρέπεται, να μετακινηθούν τα οχήματα σε μια οδό, κάτω από συνθήκες πολύ χαμηλών κυκλοφοριακών φόρτων.
- **Κυκλοφοριακή Ικανότητα:** είναι ο μέγιστος ωριαίος ρυθμός ροής κάποιου σημείου ενός οδικού τμήματος.

1.4 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας Συνοπτικά

Σε αυτό το πρώτο κεφάλαιο της Εισαγωγής, έγινε μια ανασκόπηση σχετικά με τα αυτόνομα οχήματα, τα επίπεδα αυτονομίας τους, τις υπάρχουσες προβλέψεις και έρευνες σχετικά με την διείσδυσή τους στην κυκλοφορία και τις αλλαγές που πρόκειται να επιφέρουν στην συγκοινωνιακή υποδομή. Στην συνέχεια, προσδιορίστηκε ο στόχος της εργασίας, εξηγήθηκε συνοπτικά η μεθοδολογία για την επίτευξή του και αναφέρθηκε η πιθανή χρησιμότητα που μπορεί να έχει. Τέλος, δόθηκαν οι ορισμοί κάποιων βασικών κυκλοφοριακών μεγεθών.

Παρακάτω, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 1, θα ακολουθήσουν τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί η διαθέσιμη βιβλιογραφία, όπως δημοσιευμένα άρθρα, βιβλία και άλλα, αναφορικά με την μοντελοποίηση και την προσομοίωση των αυτόνομων οχημάτων. Θα εξεταστούν οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους έχουν μοντελοποιηθεί τα αυτόνομα οχήματα κατά την εισαγωγή τους στην κυκλοφορία, τα χαρακτηριστικά αυτών των μοντέλων και οι επιπτώσεις που προκύπτουν. Οι διαθέσιμες έρευνες σχετικά με την ανθεκτικότητα των κυκλοφοριακών συστημάτων και τον υπολογισμό των μακροσκοπικών θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής, είναι επίσης σημεία ενδιαφέροντος αυτού του κεφαλαίου.

Κεφάλαιο 3: Θεωρητικό Υπόβαθρο. Συνεχίζοντας, θα δοθούν οι θεωρητικές βάσεις που απαιτούνται για την κατανόηση των μεθόδων και των εργαλείων που αξιοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία. Θα γίνει κατανοητό γιατί προτιμήθηκε προσομοίωση με σύστημα πρακτόρων και θα εξηγηθούν αναλυτικά όλες οι απαραίτητες διαστάσεις της λειτουργίας του προγράμματος MATSim. Τέλος θα παρουσιαστεί η βασική θεωρία για τα θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής.

Κεφάλαιο 4: Δεδομένα Εισαγωγής και Προσομοιώσεις. Με στατιστικά και άλλα στοιχεία, θα παρουσιαστούν τα δεδομένα εισαγωγής τα οποία αξιοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Στην συνέχεια, θα εξηγηθεί ο τρόπος με τον οποίον αυτά επεξεργάστηκαν για να δημιουργηθούν τα τελικά σενάρια προσομοίωσης και θα παρουσιαστούν οι διαφοροποιήσεις που προκύπτουν. Θα παρουσιαστούν βασικά στοιχεία και παράμετροι των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν και θα γίνει η ανάλυση σημαντικών χαρακτηριστικών των αποτελεσμάτων τους.

Κεφάλαιο 5: Κυκλοφοριακή Ανάλυση και Ανθεκτικότητα. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εξηγηθεί η μεθοδολογία υπολογισμού των ζητούμενων κυκλοφοριακών μεγεθών και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της κυκλοφοριακής ανάλυσης των προσομοιωμένων σεναρίων. Ύστερα θα γίνει η αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του κυκλοφοριακού συστήματος της Ζυρίχης, με βάση την παραπάνω ανάλυση, και θα επιλεγθούν τα σενάρια που έχουν ικανοποιητικές κυκλοφοριακές συνθήκες.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα. Τελικά, με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα προκύψουν τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας. Θα αναφερθούν επίσης οι περιορισμοί που υπήρξαν και πως αυτοί επηρεάζουν τα τελικά αυτά συμπεράσματα. Επιπλέον, θα παρουσιαστούν προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαια 7: Βιβλιογραφία και Κεφάλαιο 8: Παραρτήματα. Η συνολική Βιβλιογραφία πάνω στην οποία βασίστηκε αυτή η εργασία αναφέρεται στο κεφάλαιο 7, ενώ στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται, πλήρως, κάποιοι σημαντικοί κώδικες που δημιουργήθηκαν για την εκτέλεση των προσομοιώσεων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων τους. Στο τελευταίο κεφάλαιο βρίσκονται επίσης, κάποιες παραπάνω πληροφορίες αναφορικά με το οδικό δίκτυο που εξετάστηκε καθώς και τα διαγράμματα όλων των κυκλοφοριακών μεγεθών, για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν.



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα Ροής Κεφαλαίων Διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Ο ερευνητικός χώρος στον οποίο εντάσσεται η παρούσα Διπλωματική εργασία, αποτελείται από έρευνες που **μοντελοποιούν συστήματα αυτόνομων οχημάτων**, στις περισσότερες των περιπτώσεων αξιοποιώντας πολύ-πρακτορικά συστήματα, **τα εισάγουν σε υπάρχοντα κυκλοφοριακά συστήματα**, μεγέθους σύγχρονων ανεπτυγμένων πόλεων, και **μέσω προσομοίωσης, καταδεικνύουν τις επιπτώσεις** της εισαγωγής αυτής, στην λειτουργία των τελευταίων. Αποτελείται ακόμα από έρευνες σχετικά με την **αξιολόγηση της ανθεκτικότητας** των κυκλοφοριακών συστημάτων κατά την επιβολή κάποιων αλλαγών που διαταράζουν την ομαλή τους λειτουργία. Βασικό κριτήριο αυτής της αξιολόγησης, είναι η εξέταση των **θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής σε μακροσκοπικό επίπεδο**.

Σκοπός αυτής της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, είναι να εξεταστεί η ήδη υπάρχουσα ερευνητική προσπάθεια, τόσο αναφορικά με το κάθε ζήτημα που αναφέρθηκε παραπάνω ξεχωριστά, αλλά και στη σύνδεσή μεταξύ τους.

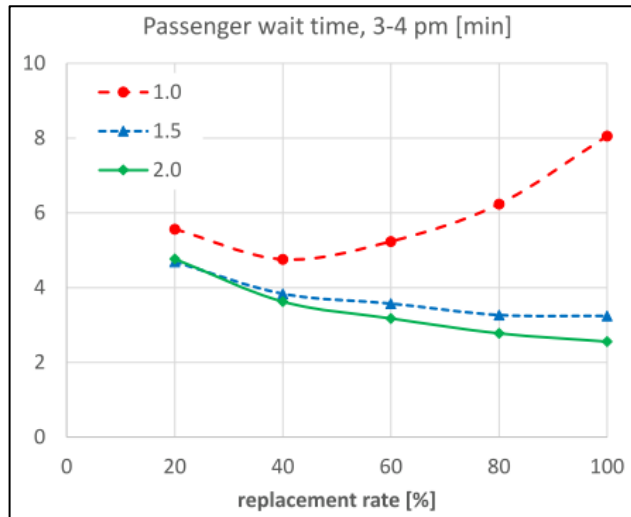
2.1 Προσομοίωση Αυτόνομων Οχημάτων και Επιπτώσεις

Όπως αναφέρθηκε στην Εισαγωγή, σημαντική διείδυση των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία, προβλέπεται να επέλθει σε αρκετά χρόνια. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα μιας τέτοιας εξέλιξης, μπορούν να εκτιμηθούν κατά την **αντικατάσταση όλων των ιδιωτικών αυτοκινήτων με μια υπηρεσία αυτόνομων ταξί στην πόλη του Βερολίνου (Biscoff & Maciejewski, 2016)**. Συγκεκριμένα αφαιρέθηκαν τα υπόλοιπα μέσα εκτός των ιδιωτικών αυτοκινήτων και οι μετακινήσεις των οποίων η διαδρομή ήταν αποκλειστικά μέσα στα όρια της πόλης, μετατράπηκαν σε αυτόνομα ταξί, ενώ οι υπόλοιπες αφέθηκαν ως έχουν. Από τις 4.7 εκατομμύρια μετακινήσεις που παρέμειναν να εξυπηρετηθούν, οι 2.5εκ αφορούσαν αποκλειστικά τα όρια της πόλης και πραγματοποιούνταν από 1.1εκ αυτοκίνητα. Οι τελευταίες μετακινήσεις μετατράπηκαν σε μετακινήσεις με αυτόνομα ταξί. Τα αυτόνομα ταξί καλούνταν ακριβώς την στιγμή που ο πελάτης ήθελε να αναχωρήσει και κατά την αποχώρησή του από το ταξί, αυτό απλώς στάθμευε εκεί που τον άφησε.

Η έρευνα αυτή συμπεραίνει πως οι μετακινήσεις που εξυπηρετούνταν από 1.1εκ αυτοκίνητα, μπορούν να αντικατασταθούν από 90-110χιλ αυτόνομα ταξί. Επίσης πως τα συνολικά οχηματο-χιλιόμετρα αυξήθηκαν κατά 17%, χωρίς να παρατηρείται αύξηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Το τελικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι, ότι το κάθε αυτόνομο ταξί έχει δυνητικά την ικανότητα να αντικαταστήσει δέκα συμβατικά αυτοκίνητα. Σε **αντίστοιχα αποτελέσματα**, 1 αυτόνομο όχημα για κάθε 9.3 συμβατικά και 8% αύξηση των οχηματο-χιλιομέτρων, οδηγείται έρευνα στο Austin, Texas, (Fagnant, Kockelman, & Bansal, 2015), που έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την παραπάνω. Διαφορά αποτελεί πως δεν υπάρχουν άλλου είδους οχήματα εκτός από αυτόνομα ταξί (ή διαμοιραζόμενα οχήματα -Shared Vehicles- όπως αναφέρονται) και τα αυτόνομα οχήματα δεν σταθμεύουν όταν αφήνουν κάποιον πελάτη, μα επανατοποθετούνται στρατηγικά στο δίκτυο.

Με παρόμοια δομή έρευνας, πάλι στην πόλη του Βερολίνου, μα με σταδιακή αντικατάσταση των συμβατικών αυτοκινήτων με αυτόνομα ταξί και τον **συνυπολογισμό της προβλεπόμενης βελτίωσης της κυκλοφοριακής ροής των αυτόνομων οχημάτων**, έγινε η προσπάθεια να βρεθούν **οι επιπτώσεις στην κυκλοφοριακή συμφόρηση (Maciejewski & Bischoff, 2016)**. Συγκεκριμένα έγινε η, υποστηριγμένη από άλλες μελέτες, παραδοχή πως ένα αυτόνομο όχημα επηρεάζει 1.5 με 2 φορές λιγότερο την ροή της κυκλοφορίας. Παραδοχή που έγινε επηρεάζοντας τις Ισοδύναμες Μονάδες Επιβατικού Αυτοκινήτου (ΜΕΑ). Εκτελώντας τις προσομοιώσεις σε κλίμακα 10% των πραγματικών μετακινήσεων, στο 100% της αντικατάστασης των αυτοκινήτων, ο στόλος των αυτόνομων ταξί έφτασε τις 11χιλ.

Η έρευνα συμπεραίνει πως αν δεν μειωθεί ο βαθμός που επηρεάζουν τα αυτόνομα οχήματα την κυκλοφορία, τότε δεν θα είναι εφικτό να εισαχθούν σε μεγάλη κλίμακα καθώς θα επιφέρουν μεγάλη συμφόρηση σε αστικές περιοχές. Παρόλα αυτά, αν μειωθεί έστω και 1.5 φορές δεν θα υπάρχει πρακτικά συμφόρηση παρά τους μεγαλύτερους φόρτους, Διάγραμμα 2. Καταλήγει πως στην μεταβατική περίοδο μέχρι την πλήρη διείσδυση, που θα λειτουργούν σχετικά μικροί στόλοι αυτόνομων οχημάτων, δεν θα υπάρχει ιδιαίτερα παραπάνω συμφόρηση και πως καλό θα ήταν να περιοριστούν οι υπηρεσίες που προσφέρουν στα κέντρα των πόλεων.



Διάγραμμα 2: Χρόνοι αναμονής κατά την αιχμή της κυκλοφορίας, για διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης και βαθμούς βελτίωσης της κυκλοφοριακής ροής από τη χρήση αυτόνομων οχημάτων. (Πηγή: (Maciejewski & Bischoff, 2016))

Με μεγαλύτερη ανάλυση έχει ερευνηθεί αυτή η μείωση της επίδρασης στην κυκλοφοριακή ροή, που σημαίνει αύξηση της κυκλοφοριακής ικανότητας, **ερευνώντας τις ιδιότητες των αυτόνομων και συνδεδεμένων οχημάτων (Connected and Autonomous Vehicles – CAVs)** (Ye & Yamamoto, 2017). Λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση της αναγκαίας απόστασης μεταξύ δυο CAV, από ότι μεταξύ δύο συμβατικών οχημάτων, εξαιτίας των αισθητήρων και της επικοινωνίας μεταξύ τους, και εξετάζοντας για διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης τους, δημιουργήθηκε και προσομοιώθηκε ένα μοντέλο 10χλμ οδικού τμήματος με δύο λωρίδες.

Η εμβέλεια των αισθητήρων, περίπου 120μ, και της τυπικής εμβέλειας των συστημάτων επικοινωνίας, 300μ, που χρησιμοποιούνται από τα των CAVs, καθόρισαν χαρακτηριστικά της κίνησής τους, όπως την μέγιστη ταχύτητά τους. Επίσης, τέθηκε απόσταση ασφαλείας μεταξύ συμβατικών και αυτόνομων οχημάτων, ενώ μεταξύ αυτόνομων όχι. Μαζί με το πλήρες αναλυτικό **μοντέλο κίνησης** των CAVs, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο αλλαγής λωρίδων και υπολογίστηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω της δημιουργίας των θεμελιωδών διαγραμμάτων της οδού.

Τα αποτελέσματα αυτά, έδειξαν πως με την αύξηση της διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων, αυξάνεται και η κυκλοφοριακή ικανότητα. Στην περίπτωση που τα οχήματα κινούνται με ταχύτητες ελεύθερης ροής, δηλαδή χωρίς συμφόρηση, τότε η παρουσία των CAVs δεν αποφέρει κάποια αλλαγή, μα σε συνθήκες συμφόρησης, η παρουσία τους είναι ωφέλιμη. Με μεγαλύτερη διείσδυση, επεκτείνεται η φάση της λειτουργίας της οδού με ταχύτητες ελεύθερης ροής που αυξάνει την κυκλοφοριακή ικανότητα. Τέλος, συμπέρασμα επίσης αποτελεί πως για διεισδύσεις των CAVs μεγαλύτερες του 30%, ο ρυθμός αύξησης της κυκλοφοριακής ικανότητας εξαρτάται σημαντικά και θετικά από το κενό που μπορεί να υπάρξει μεταξύ των οχημάτων, το οποίο δοκιμάστηκε από 0.5-1.1 δευτερόλεπτα.

Πέρα από την μοντελοποίηση και εξέταση μίας διαθέσιμης υπηρεσίας αυτόνομων οχημάτων, παρόμοια με αυτή των ταξί, όπως έγινε και στην παρούσα Διπλωματική εργασία, υπάρχουν και μελέτες που συγκρίνουν διαφορετικές μεθόδους παροχής αυτών των υπηρεσιών, όπως την **συγκεντρωτική**

υπηρεσία ταξί (Horl, 2017). Πέρα από συμβατικούς τρόπους μετακίνησης, αυτοκίνητο, μέσα μαζικής μεταφοράς, περπάτημα, οι πράκτορες μπορούν να επιλέξουν να μετακινηθούν με μια ατομική υπηρεσία ταξί, όπως και σε άλλες περιπτώσεις που διερευνήθηκαν μέχρι τώρα, αλλά μια υπηρεσία ταξί που συγκεντρώνει τις κλήσεις του. Τα οχήματα της δεύτερης υπηρεσίας, έχοντας ήδη κάποιον επιβάτη, δέχονταν όποια επιπλέον κλήση γινόταν αρκεί οι τοποθεσίες παραλαβής του νέου πελάτη και του σημείου παραδόσεως, εκείνου που βρίσκονταν ήδη μέσα, να βρίσκονται σε ακτίνα 400μ μεταξύ τους. Για κάθε υπηρεσία δοκιμάστηκαν από 1000-6000 οχήματα και η πρώτη υπηρεσία κόστιζε 0,48 ελβετικά φράγκα/χλμ ενώ η δεύτερη 0,28.

Προσομοιώνοντας κάθε σενάριο **ξεχωριστά για κάθε υπηρεσία ταξί**, η συγκεντρωτική υπηρεσία, η τιμή της οποίας είχε υπολογιστεί με την εκτίμηση πως θα έχει κατά μέσο όρο 2.6 επιβάτες, ενώ τελικά είχε περίπου 1.3, προσέλυσε λιγότερους πράκτορες από ότι η ατομική υπηρεσία εντός και εκτός περιόδου αιχμής. Επίσης, λόγω των παρακάμψεων για να συγκεντρώσει τους επιβάτες, ο χρόνος μέσα στο όχημα ήταν μεγαλύτερος από την ατομική υπηρεσία ταξί, φτάνοντας τα 4:30 επιπλέον λεπτά στην αιχμή. Ο χρόνος αναμονής των πρακτόρων μεταξύ των δυο υπηρεσιών, ήταν καλύτερος κατά μέσο όρο ενός λεπτού για την συγκεντρωτική.

Κατά την ταυτόχρονη προσομοίωσή τους, οι πράκτορες προτίμησαν την ατομική υπηρεσία σε περιόδους αιχμής και την συγκεντρωτική εκτός αιχμής. Αυτό εξηγήθηκε από το χαμηλότερο κόστος και το γεγονός πως εκτός αιχμής η συγκεντρωτική υπηρεσία δεν χρειάστηκε να κάνει τόσες παρακάμψεις.

Άλλοι τρόποι μοντελοποίησης των αυτόνομων υπηρεσιών είναι το **ταξί-μίνι βαν και το ταξί-λεωφορείο (Martinez & Viegas, 2017)**. Για το ταξί-μίνι βαν ή κοινόχρηστο ταξί, η κλήση γίνεται απευθείας, ο πράκτορας μετακινείται από και προς τις τοποθεσίες της επιλογής του, με μικρές παρακάμψεις, και η μετακίνηση γίνεται σε μίνι βαν όχημα μέχρι 6 θέσεων. Για το ταξί-λεωφορείο, η κλήση-κράτηση γίνεται τουλάχιστον 30 λεπτά πριν την επιβίβαση, οι πράκτορες παραλαμβάνονται και αφήνονται σε στάσεις που βρίσκονται σε ακτίνα 300 μέτρων από τις επιθυμητές τοποθεσίες τους και η μετακίνησή τους γίνεται σε δύο είδη μίνι-λεωφορείων που χωράνε 8 ή 16 άτομα. Τα ταξί-λεωφορεία διαμορφώνουν τις στάσεις που θα κάνουν σε πραγματικό χρόνο.

Με τη προσομοίωση της προσθήκης αυτών των δύο μέσων μετακίνησης, **προέκυψε** πως τα κοινόχρηστα ταξί θα στοιχίζουν 55% λιγότερο από τις κλασσικές υπηρεσίες ταξί, ενώ τα ταξί-λεωφορεία, 45% λιγότερο από τα τωρινά μέσα μαζικής μεταφοράς. Επιπλέον με την εκτέλεση του πλήρως διαμορφωμένου σεναρίου, που αφαιρούνται όλα τα άλλα μέσα μετακίνησης εκτός του περπατήματος και του υπόγειου σιδηρόδρομου, παρατηρείται μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 40%, μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης κατά 30%, αύξηση της χρήσης των οχημάτων από 50 λεπτά τη μέρα, για συμβατικά οχήματα, σε 12 ώρες και αύξηση των οχηματο-χιλιομέτρων από 30χλμ σε 250χλμ.

Σημαντικό κομμάτι αυτών των ερευνών αποτελεί επίσης η διαστασιολόγηση και η κοστολόγηση των στόλων αυτών των υπηρεσιών. Στην προσπάθεια να βρεθεί **ο ελάχιστος στόλος που να καλύπτει όλη τη ζήτηση, για μια συγκεντρωτική υπηρεσία ταξί**, η περιοχή μελέτης, που ήταν η πόλη της Ζυρίχης, χωρίστηκε σε ζώνες και σε χρονικά τμήματα, με βάση τους διαθέσιμους πίνακες Προέλευσης – Προορισμού (Π – Π), υπολογίζοντας πόσες μετακινήσεις ζευγών Π-Π έπρεπε να εξυπηρετηθούν σε κάθε χρονικό τμήμα, (Balac, Horl, & Axhausen, 2019). Τα χρονικά τμήματα που εξετάστηκαν ήταν 7.5 και 15 λεπτών.

Τελικά τα διαθέσιμα αυτόνομα οχήματα που αξιοποιήθηκαν ήταν 2, 5 και 10 θέσεων και οι πράκτορες που χρησιμοποιήσαν την υπηρεσία έπρεπε να περπατήσουν για να φτάσουν στην τοποθεσία παραλαβής και ύστερα από την τοποθεσία παράδοσης μέχρι τον προορισμό τους, από 250μ έως 350μ ανάλογα την ζώνη, που μεταφράζεται σε 3 με 5 λεπτά επιπλέον μετακίνηση. Σε κάθε περίπτωση που δοκιμάστηκε, ο συνολικός στόλος οχημάτων μειώθηκε, συγκρινόμενος με τα συμβατικά

ιδιωτικά αυτοκίνητα, και τα συνολικά οχηματο-χιλιόμετρα, που σε αρκετές άλλες έρευνες φαίνεται να αυξάνονται με την εκτεταμένη χρήση των αυτόνομων οχημάτων, επίσης μειώνονται. **Για παράδειγμα**, στο σενάριο με 15 λεπτά χρονικών τμημάτων, 500μ ακτίνας των ζωνών και κίνηση με ταχύτητες ελεύθερης ροής, θα χρειαζόταν μόλις το 3.7% του αριθμού των συμβατικών οχημάτων που απαιτούνται σήμερα, ενώ με τη θεώρηση συμφορημένης κυκλοφορίας, θα χρειαζόταν το 4.6%. Τα συνολικά οχηματο-χιλιόμετρα μειώθηκαν από 2.6% έως 9.8%.

Για την **κοστολόγηση των υπηρεσιών αυτόνομων ταξί**, έχουν δοκιμαστεί διάφορες στρατηγικές (Chen & Kockelman, 2016). Οι πράκτορες αυτής της προσομοίωσης είχαν να διαλέξουν ανάμεσα σε συμβατικά αυτοκίνητα, μέσα μαζικής κυκλοφορίας και μιας υπηρεσίας κοινόχρηστων αυτόνομων ηλεκτρικών οχημάτων (Shared, Autonomous Electric Vehicles – SAEVs), η οποία έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με τις υπηρεσίες αυτόνομων ταξί που συζητήθηκαν παραπάνω, που κοστολογήθηκε με 4 διαφορετικούς τρόπους. Με βάση την απόσταση που διανύθηκε, με βάση την τοποθεσία προέλευσης ή με βάση της τοποθεσία προορισμού, με κριτήρια που καθορίζονταν από το αν οι τοποθεσίες βρίσκονταν κοντά σε σημεία που υπάρχουν διαθέσιμα οχήματα ή κοντά σε χώρους φόρτισης των οχημάτων, αντίστοιχα, και με συνδυασμό των τελευταίο δύο.

Η κοστολόγηση της υπηρεσίας **με βάση την απόσταση**, με 0.85 δολάρια/μίλι, προέκυψε πως θα πάρει το 27,1% του μεριδίου της αγοράς, με το 89.9% αυτού να προέρχεται από προηγούμενους χρήστες ιδιωτικού αυτοκινήτου. Η κοστολόγηση με βάση **την τοποθεσία προέλευσης**, οδηγεί σε πιο ισορροπημένη προσφορά και ζήτηση των οχημάτων. Παρότι μειώνει κατά 22.3% τις μετακινήσεις χωρίς επιβάτες της κοστολόγησης με βάση την απόσταση, μειώνει και το μερίδιο της αγοράς των SAEVs σε 24.4% και κατά 13.3% τα ημερήσια έσοδα. Μειώνει όμως και την αναμονή των πρακτόρων κατά 19.3%.

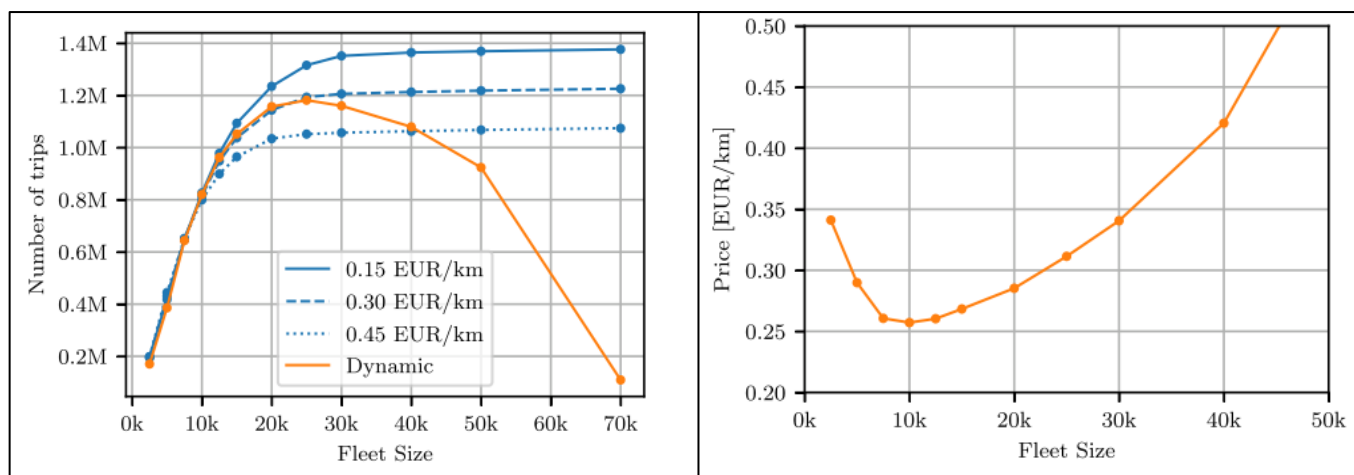
Η κοστολόγηση με βάση **τον προορισμό**, παρότι δεν μείωσε τις μετακινήσεις χωρίς επιβάτη, οδήγησε σε μείωση των μικρών, κοντινών μετακινήσεων με την υπηρεσία αυτόνομων ταξί και αύξηση κατά 11.7% την αξία του χρόνου μετακίνησης, συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες κοστολογήσεις. Τέλος, **η συνδυασμένη κοστολόγηση**, παρουσιάζει μείωση κατά 22.8% των χρόνων αναμονής και αύξηση 18.1% της αξίας του χρόνου μετακίνησης. Η αξιοποίησή της επίσης οδήγησε στη μεγαλύτερη χρήση των μέσων μαζικής μεταφοράς και μικρότερο μερίδιο χρήσης για την υπηρεσία από όλες τις μεθόδους κοστολόγησης. **Το συμπέρασμα** της έρευνας αυτής είναι πως διαφορετικές μέθοδοι κοστολόγησης οδηγούν σε διαφορετικούς συνδυασμούς αποτελεσμάτων και η ιδανική μέθοδος εξαρτάται από τον χειριστή αυτής της υπηρεσίας, για παράδειγμα αν είναι κρατικός και τον ενδιαφέρει η μεγιστοποίηση της χρήσης με λιγότερους χρόνους αναμονής ή ιδιωτικός και τον ενδιαφέρει η μεγιστοποίηση των κερδών.

Τέλος, σημαντική είναι **η δυναμική εκτίμηση της ζήτησης για μετακίνηση με μια τέτοια υπηρεσία αυτόνομων ταξί** (Horl, Balac, & Axhausen, 2019). Σε μια περιοχή του Παρισιού και με ένα μοντέλο διακριτής επιλογής των μεταφορικών μέσων, οι πράκτορες αυτής της προσομοίωσης είχαν να διαλέξουν ανάμεσα στην προσφερόμενη υπηρεσία ατομικών αυτόνομων ταξί, το συμβατικό αυτοκίνητο, τα μέσα μαζικής μεταφοράς, το ποδήλατο και άλλα. Εκτελώντας τρία σενάρια, ένα για να υπολογιστεί η μέγιστη δυνατή στατική ζήτηση της υπηρεσίας αυτόνομων ταξί και να υπάρξει μια πρώτη εκτίμηση του μεγέθους του απαιτούμενου στόλου, ένα με σταθερές τιμές κοστολόγησης των αυτόνομων υπηρεσιών και ένα με δυναμική κοστολόγηση. Η δυναμική αυτή κοστολόγηση καθοριζόταν από τη χρήση και του μέγεθος του στόλου και τις μετακινήσεις χωρίς επιβάτες, μεταξύ άλλων, ώστε να καλυφθούν μόνο τα έξοδα συντήρησης του στόλου, δηλαδή χωρίς κάποιο κέρδος.

Η μέγιστη ζήτηση που μπορεί να εξυπηρετήσει η υπηρεσία αυτόνομων ταξί είναι 2.3εκ μετακινήσεις. Στο αριστερό μέρος του Διαγράμματος 3, φαίνεται πως ανεξάρτητα από την τιμολόγηση, από την υπηρεσία εκλύεται το πολύ περίπου το μισό της μέγιστης ζήτησης. Για την σταθερή τιμολόγηση, μικροί στόλοι, που οδηγούν σε μεγαλύτερους χρόνους αναμονής, δεν προσελκύουν μεγάλη ζήτηση, ενώ από έναν αριθμό αυτόνομων οχημάτων και μετά η εκλυόμενη ζήτηση δεν αυξάνεται περαιτέρω

αλλά φτάνει σε κορεσμό. Με την δυναμική κοστολόγηση, φαίνεται πως υπάρχει ένα βέλτιστο σημείο που η υπολογισμένη τιμή και οι αντίστοιχη εξυπηρέτηση ελκύει τη μέγιστη, για την μέθοδο κοστολόγησης, ζήτηση. Μετά από αυτό το σημείο όμως, τα κόστη για τον στόλο αυξάνονται και άρα η τιμή χρήσης της υπηρεσίας αυξάνεται, με αποτέλεσμα η ζήτηση που προσελκύει να πέφτει.

Στα δεξιά του Διαγράμματος 3, φαίνεται η σχέση τιμής/χλμ σχετικά με τον διαθέσιμο στόλο αυτόνομων οχημάτων της υπηρεσίας. Τελικά **στο βέλτιστο σημείο**, ο στόλος αποτελείται από 25χιλ οχήματα, η τιμή χρήσης της υπηρεσίας ανέρχεται στα 0.27 ευρώ/χλμ και εξυπηρετεί 1.2εκ μετακινήσεις. Η υπολογισμένη αυτή τιμή είναι αρκετά καλύτερη από το 1.07 ευρώ/χλμ που προσφέρουν οι πραγματικές υπηρεσίες ταξί του Παρισιού.



Διάγραμμα 3: Αριστερά, σχέση αριθμού οχημάτων στόλου με αριθμό εξυπηρετούμενων μετακινήσεων, για σταθερή και δυναμική κοστολόγηση. Δεξιά σχέση αριθμού οχημάτων στόλου με τιμή χρήσης σε ευρώ/χλμ. (Πηγή: (Horl, Balac, & Axhausen, 2019))

2.2 Ανθεκτικότητα κυκλοφοριακών συστημάτων

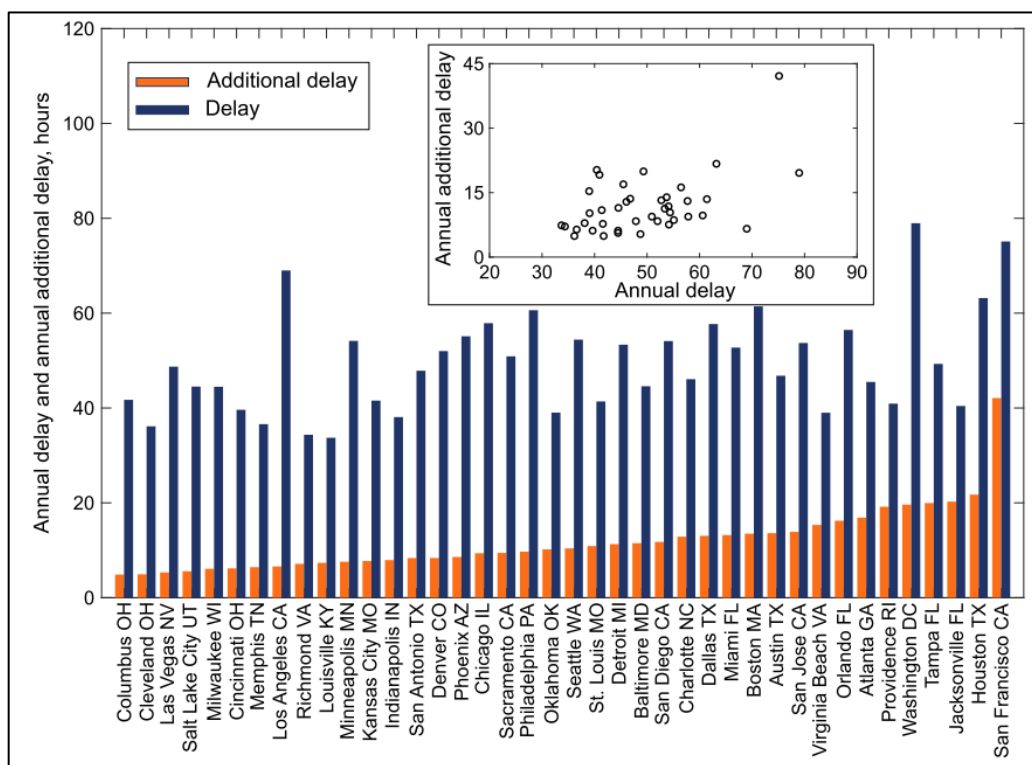
Στην πλειονότητά τους **οι παραπάνω έρευνες**, μαζί με αρκετές άλλες παρόμοιες, **εξετάζουν την αποδοτικότητα** των κυκλοφοριακών συστημάτων που μελετούν, κατά την εισαγωγή υπηρεσιών αυτόνομων οχημάτων. Την εξετάζουν είτε υπολογίζοντας τον βέλτιστο αριθμό οχημάτων στόλου, ή υπολογίζοντας τους χρόνους αναμονής των πρακτόρων που χρησιμοποιούν τις αυτόνομες αυτές υπηρεσίες, μεταξύ άλλων. Και αυτό φυσικά είναι πολύ σημαντικό και αναγκαίο ώστε να υπάρχει η κατάλληλη προετοιμασία και επιστημονική έρευνα για ένα τόσο σύνθετο φαινόμενο.

Όπως όμως και στον σχεδιασμό των κυκλοφοριακών συστημάτων, όσο σημαντικό είναι να υπάρχει μέριμνα για την αποδοτικότητα του συστήματος σε κανονικές συνθήκες, για παράδειγμα να μην υπάρχουν μεγάλες καθυστερήσεις στην μετακίνηση των οχημάτων στις διασταυρώσεις των οδών, **εξίσου σημαντικό είναι να γίνεται μελέτη και επένδυση στην ανθεκτικότητά του**. Απρόσμενη εκτεταμένη συμφόρηση, ατυχήματα, οδικά έργα ή κάποια εκδήλωση, όπως ένα φεστιβάλ, μπορούν να οδηγήσουν σε κατάρρευση του κυκλοφοριακού συστήματος, με ατελείωτες καθυστερήσεις και ουρές.

Κατά την αξιολόγηση λοιπόν ενός κυκλοφοριακού συστήματος, πρέπει εκτός την αποδοτικότητας του σε κανονικές συνθήκες, να εξετάζεται και η ανθεκτικότητά του σε απρόβλεπτες συνθήκες. **Με τον όρο ανθεκτικότητα** για ένα σύστημα, εννοείται η ικανότητά του να μπορεί να δεχτεί, χωρίς να καταρρεύσει, και να προσαρμοστεί σε κάποιες, πέραν του σχεδιασμού, συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, για τα κυκλοφοριακά συστήματα, σημαίνει να μπορεί να διατηρηθεί σε αποδεκτά επίπεδα η στάθμη εξυπηρέτησης τους ή να μπορεί να επανέλθει σε αυτά σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (Ganin, et al., 2017). Η διατήρηση ή η επαναφορά σε αποδεκτά στάθμη εξυπηρέτησης, εξαρτάται από την ύπαρξη επαρκών εναλλακτικών διαδρομών, την ταχύτητα επισκευής των οδικών τμημάτων σε περίπτωση φθορών και άλλα.

Επειδή το εύρος των συνθηκών στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένα κυκλοφοριακό σύστημα δεν μπορεί να προβλεφθεί στο σύνολό του, η ανθεκτικότητα τους πρέπει να αξιολογείται με κάποια αντιπροσωπευτικά σενάρια. Στην εξεταζόμενη έρευνα, αξιολογήθηκε η **ανθεκτικότητα και η αποδοτικότητα των κυκλοφοριακών συστημάτων για 20** από τις 40 κύριες πόλεις των Η.Π.Α. Η αποδοτικότητα των συστημάτων υπολογίστηκε ως η μέση ετήσια καθυστέρηση ανά οδηγό αυτοκινήτου σε περιόδους αιχμής. Αυτό το μέγεθος αφορά στις επιπλέον ώρες για κάθε έτος, που ένας οδηγός περνάει οδηγώντας σε συνθήκες συμφορημένης κυκλοφορίας αντί συνθηκών ελεύθερης ροής. Η ανθεκτικότητα ορίστηκε ως η αύξηση αυτών των καθυστερήσεων κατά την αφαίρεση ή δημιουργία βλάβης κάποιου ποσοστού των οδικών τμημάτων.

Με βάση τα παραπάνω, μικρότερη ετήσια καθυστέρηση σημαίνει μεγαλύτερη αποδοτικότητα και μικρότερη αύξηση των καθυστερήσεων κατά την φόρτιση σημαίνει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Κάποια από τα **συμπεράσματα** είναι πως η ανθεκτικότητα και η αποδοτικότητα είναι συμπληρωματικά, μα διαφορετικά χαρακτηριστικά του κυκλοφοριακού συστήματος και πως παρότι ένα σύστημα μπορεί να έχει ικανοποιητική αποδοτικότητα σε κανονικές συνθήκες, μπορεί να είναι ευάλωτη σε μεγάλες καθυστερήσεις κάτω από μικρές φόρτισης. Παράδειγμα είναι η περίπτωση του San Francisco, η πρώτη περίπτωση από δεξιά του Διαγράμματος 4, που ενώ δεν έχει την χειρότερη αποδοτικότητα, η ανθεκτικότητά του για βλάβη του 5% των οδικών τμημάτων του δικτύου του, είναι πολύ χαμηλή, συγκριτικά με τις υπόλοιπες πόλεις.



Διάγραμμα 4: Σύγκριση των μετρήσεων της αποδοτικότητας(μπλε) και της ανθεκτικότητας(πορτοκαλί), για βλάβη στο 5% των οδικών τμημάτων των δικτύων τους. (Πηγή: (Ganin, και συν., 2017))

2.3 Μακροσκοπικά Θεμελιώδη Διαγράμματα

Ως βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας σε αυτήν την εργασία, θα αξιοποιηθούν τα μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής. Παρότι υπάρχει αναλυτικό θεωρητικό υπόβαθρο για τα θεμελιώδη διαγράμματα σε επίπεδο οδικού τμήματος, που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, η ύπαρξη τους σε μακροσκοπικό επίπεδο, δείχθηκε πειραματικά σχετικά πρόσφατα (Geroliminis & Daganzo, 2008).

Η έρευνα αυτή, αφορούσε περιοχές “γειτονιάς”, δηλαδή περιοχές πόλεων της τάξης των 10 χλμ², με ομογενή κυκλοφοριακή συμπεριφορά, των οποίων η ζήτηση για μετακίνηση μεταβαλλόταν αργά. Η έρευνα βασίστηκε σε μετρήσεις σταθερών μετρητών σε οδούς αλλά και σε οχήματα ταξί εξοπλισμένα με GPS, τα οποία κατέγραφαν την πορεία τους. Αποδεικνύεται μέσα από την επεξεργασία αυτών των μετρήσεων, πως **σε περιοχές με τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορεί να υπάρξουν ικανοποιητικά μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα** που να συνδέουν τα μεγέθη της ταχύτητας, της πυκνότητας και του φόρτου. Μπορούν να υπάρξουν μάλιστα ανεξάρτητα από την ζήτηση για μετακίνηση, που σημαίνει ότι εξαρτώνται μόνο από την προσφορά, δηλαδή το οδικό σύστημα και τα διαθέσιμα μεταφορικά μέσα.

Οι σταθεροί μετρητές της κυκλοφορίας παρείχαν μετρήσεις ανά 5 λεπτά και μετρούσαν τον αριθμό οχημάτων που περνούσαν, δηλαδή τον φόρτο, και την κατάληψη. Οι εξισώσεις που αξιοποιήθηκαν για να προκύψουν τα μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα είναι:

$$q^w = \frac{\sum_i q_i l_i}{\sum_i l_i} \quad (2.1) \quad q^u = \frac{\sum_i q_i}{\sum_i l} \quad (2.3)$$

$$o^w = k^w s = \frac{\sum_i o_i l_i}{\sum_i l_i} \quad (2.2) \quad o^u = k^u s = \frac{\sum_i o_i}{\sum_i l} \quad (2.4)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, για κάθε 5 λεπτά, τα ***i*** και ***l_i*** που αφορούν κάποιο οδικό τμήμα και το μήκος του αντίστοιχα, τα ***q_i*** και ***o_i***, είναι οι ανεπεξέργαστες μετρήσεις του φόρτου και της κατάληψης αντίστοιχα, τα ***q^w*** και ***o^w***, είναι οι αντίστοιχοι σταθμισμένοι μέσοι όροι και ***q^u*** και ***o^u***, οι αστάθμιστοι. Ο σταθμισμένος και ο αστάθμιστος όρος της πυκνότητας ***k^w*** και ***k^u***, προκύπτουν από την διαίρεση της αντίστοιχης κατάληψης με το μέσο μήκος ενός οχήματος ***s*** που τίθεται ίσο με 5,5 μέτρα. Με τις εξισώσεις (2.1) και (2.2) έγινε επίσης και η εξαγωγή του μακροσκοπικού διαγράμματος πυκνότητας-φόρτου στην πόλη της Θεσσαλονίκης (Stamos, Grau, Mitsakis, & Mamarikas, 2015).

Οι μετρήσεις από τα εξοπλισμένα με GPS ταξί, επεξεργάστηκαν συγκεντρωτικά και από αυτές υπολογίστηκαν: η συνολική απόσταση και η συνολική ώρα μετακίνησής τους στην περιοχή μελέτης. Από αυτά τα δεδομένα προέκυψαν άλλα όπως η ταχύτητα, διαιρώντας την απόσταση με τον χρόνο, ώστε να δημιουργηθούν τα μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα.

Οι μετρήσεις που προέκυψαν από τα ταξί μπορούν να χρησιμοποιηθούν αξιοποιώντας τους **γενικευμένους ορισμούς για την μέση πυκνότητα και τον μέσο κυκλοφοριακό φόρτο** σε επίπεδο δικτύου (Edie, 1965):

$$q = \frac{\sum_1^I d_i}{L_n T} \quad (2.5) \quad k = \frac{\sum_1^I t_i}{L_n T} \quad (2.6)$$

Όπου ***I*** είναι ο αριθμός των συνολικών μετακινήσεων που καταγράφηκαν, ***i*** είναι κάθε μία από αυτές τις μετακινήσεις, ***q*** και ***k*** είναι αντίστοιχα ο κυκλοφοριακός φόρτος και η πυκνότητα, ***d_i*** και ***t_i*** είναι η απόσταση και ο χρόνος της κάθε μετακίνησης, ***L_n*** και ***T***, είναι το συνολικό μήκος του οδικού δικτύου και ο χρόνος της κάθε μέτρησης, για παράδειγμα 5 λεπτά. Οι αποστάσεις και οι χρόνοι είναι μετρημένοι σε ίδιες μονάδες, για παράδειγμα χιλιόμετρα και δευτερόλεπτα.

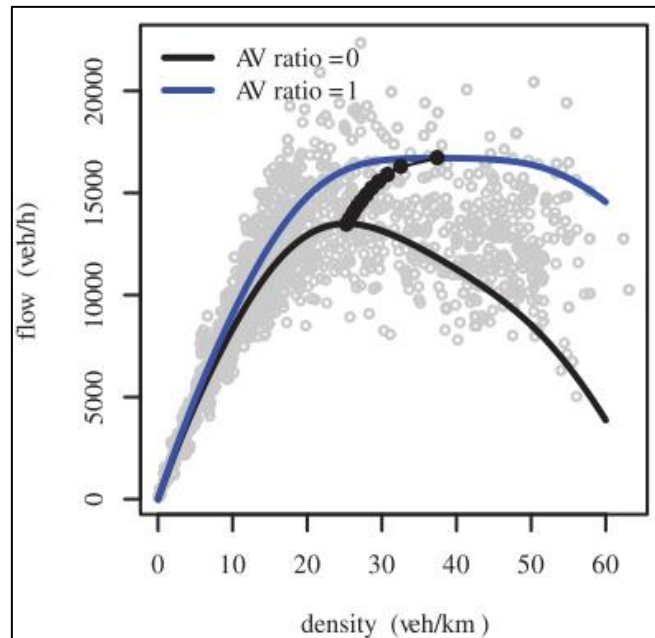
Με παρόμοιο τρόπο έχει γίνει και σε άλλες μελέτες η προσπάθεια δημιουργίας του μακροσκοπικού θεμελιώδους διαγράμματος φόρτου – πυκνότητας, (Du, Rakha, & Gayah, 2015), όπου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από GPS κινητών τηλεφώνων. Και στις δυο περιπτώσεις έπρεπε να γίνουν **προσαρμογές στις εξισώσεις (3.5) και (3.6), ώστε να εκτιμηθεί το ποσοστό διείσδυσης των ταξί και κινητών τηλεφώνων** αντίστοιχα στις περιοχές που βρίσκονταν υπό μελέτη.

Τελικά ο **μόνος τρόπος να καθοριστεί το μακροσκοπικό θεμελιώδες διάγραμμα πυκνότητας-φόρτου, χωρίς συστηματικά σφάλματα**, είναι να υπάρχουν πλήρης δεδομένα για τις πορείες όλων των οχημάτων του δικτύου, κάτι που μπορεί να γίνει μόνο αξιοποιώντας κάποιον προσομοιωτή κυκλοφορίας και να εφαρμοστούν οι γενικευμένες εξισώσεις του Edie (2.5-6), (Leclercq, Chiabaut, & Trinquier, 2014). Σε αυτήν την έρευνα, συγκρίθηκαν δυο μέθοδοι καθορισμού αυτού του διαγράμματος, μια αναλυτική-γραφική και μια προσομοιώνοντας τα δεδομένα που θα έπαιρναν από πραγματικές μετρήσεις κυκλοφορίας, όπως κυκλοφοριακούς φόρτους.

Ως σημείο αναφοράς τέθηκαν τα αποτελέσματα των γενικευμένων εξισώσεων του Edie εφαρμοσμένων για όλες τις πορείες των προσομοιωμένων οχημάτων και προέκυψε πως η αναλυτική μέθοδος βγάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, όπως αν το οδικό δίκτυο αποτελείται από ομογενή οδικά τμήματα χωρίς στροφές. Προέκυψε επίσης πως οι σταθεροί μετρητές της κυκλοφορίας από μόνοι τους δεν οδηγούν σε σωστά αποτελέσματα.

Τέλος, τα μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα έχουν αξιοποιηθεί και για την διερεύνηση της επίπτωσης των αυτόνομων οχημάτων στη κυκλοφοριακή ικανότητα (Lu, Tettamanti, Horcher, & Varga, 2019). Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα μικροσκοπικής προσομοίωσης SUMO, (SUMO, 2020), δημιουργήθηκαν δύο σενάρια προσομοίωσης. Το ένα αφορούσε ένα τεχνητό πλέγμα με 60 κόμβους, εκ των οποίων 36 διασταυρώσεις οχημάτων, και το άλλο ενός πραγματικού δίκτυο εντός 5 κεντρικών οδών στην Βουδαπέστη, εκ των οποίων τα τελικά αποτελέσματα προέκυψαν από την ανάλυση 30 επιλεγμένων οδικών τμημάτων.

Η εισαγωγή των, πλήρως, **αυτόνομων οχημάτων έγινε ως ατομικά οχήματα** με πιο ανεπτυγμένα χαρακτηριστικά από τα συμβατικά οχήματα, όπως μικρότερη απόσταση μεταξύ του εξεταζόμενου οχήματος και του αμέσως μπροστινού του σε συνθήκες συμφόρησης. Για τα αυτόνομα οχήματα εξετάστηκαν διεισδύσεις στην κυκλοφορία από 0% έως 100%, δηλαδή από εξολοκλήρου συμβατικά οχήματα σε εξολοκλήρου αυτόνομα.



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα πυκνότητας-φόρτου του πραγματικού δικτύου (Πηγή: (Lu, Tettamanti, Horcher, & Varga, 2019))

Για την εξαγωγή των μακροσκοπικών θεμελιωδών διαγραμμάτων, κυρίως αυτό της πυκνότητας-φόρτου, χρησιμοποιήθηκε μια νέα ημι-παραμετρική σχέση ταχύτητας-πυκνότητας, συνυπολογίζοντας το ποσοστό διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων, που υπολογίστηκε μέσω γενικευμένων προσθετικών μοντέλων (GAM). Ύστερα, η σχέση εξετάστηκε στατιστικά και οι τιμές που ήταν απαραίτητες υπολογίστηκαν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Έτσι με τη νέα αυτή σχέση και άλλες

Θεμελιώδεις σχέσεις της κυκλοφοριακής ροής, δημιουργήθηκαν τα ζητούμενα διαγράμματα και για τα δύο σενάρια, όπως αυτό στο Διάγραμμα 5.

Η έρευνα αυτή **συμπεραίνει** πως η κυκλοφοριακή ικανότητα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων και για τα δύο σενάρια, κατά 16.01% για 100% διείσδυση στο σενάριο του πλέγματος και κατά 25% στο σενάριο του πραγματικού δικτύου. Η κρίσιμη πυκνότητα επίσης αυξάνεται, αργά στην αρχή και πιο έντονα μετά την αύξηση της διείσδυσης πάνω από 40%. Επομένως, καταλήγει, τα αυτόνομα οχήματα έχουν σημαντική προοπτική να αυξήσουν την κυκλοφοριακή ικανότητα.

2.4 Σύνοψη

Παραπάνω εξετάστηκε η ερευνητική προσπάθεια σχετικά με τα ακόλουθα:

- Μοντελοποίηση και προσομοίωση των τρόπων με των οποίων μπορεί να εισαχθούν στην κυκλοφορία τα αυτόνομα οχήματα, αξιοποιώντας συστήματα πρακτόρων. Τρόπους όπως μεμονωμένα οχήματα, είτε που επικοινωνούν μεταξύ τους είτε όχι, και αυτόνομες υπηρεσίες μετακίνησης, ατομικές ή συγκεντρωτικές.
- Πλήρης αντικατάσταση όλων των συμβατικών μετακινήσεων από αυτόνομες αλλά και μικτή κυκλοφορία αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων.
- Διαστασιολόγηση και κοστολόγηση, στατική και δυναμική, των αυτόνομων υπηρεσιών.
- Εκτίμηση των επιπτώσεων των αυτόνομων οχημάτων αναφορικά με τη συμφόρηση, τα συνολικά οχηματο-χιλιόμετρα που διανύονται, τους χρόνους αναμονής των επιβατών και άλλα.
- Εκτίμηση της ανθεκτικότητας, και η σύγκρισή της με την αποδοτικότητα, κυκλοφοριακών συστημάτων.
- Ύπαρξη και υπολογισμός, πειραματικός και μέσω προσομοίωσης, των μακροσκοπικών θεμελιωδών διαγραμμάτων.

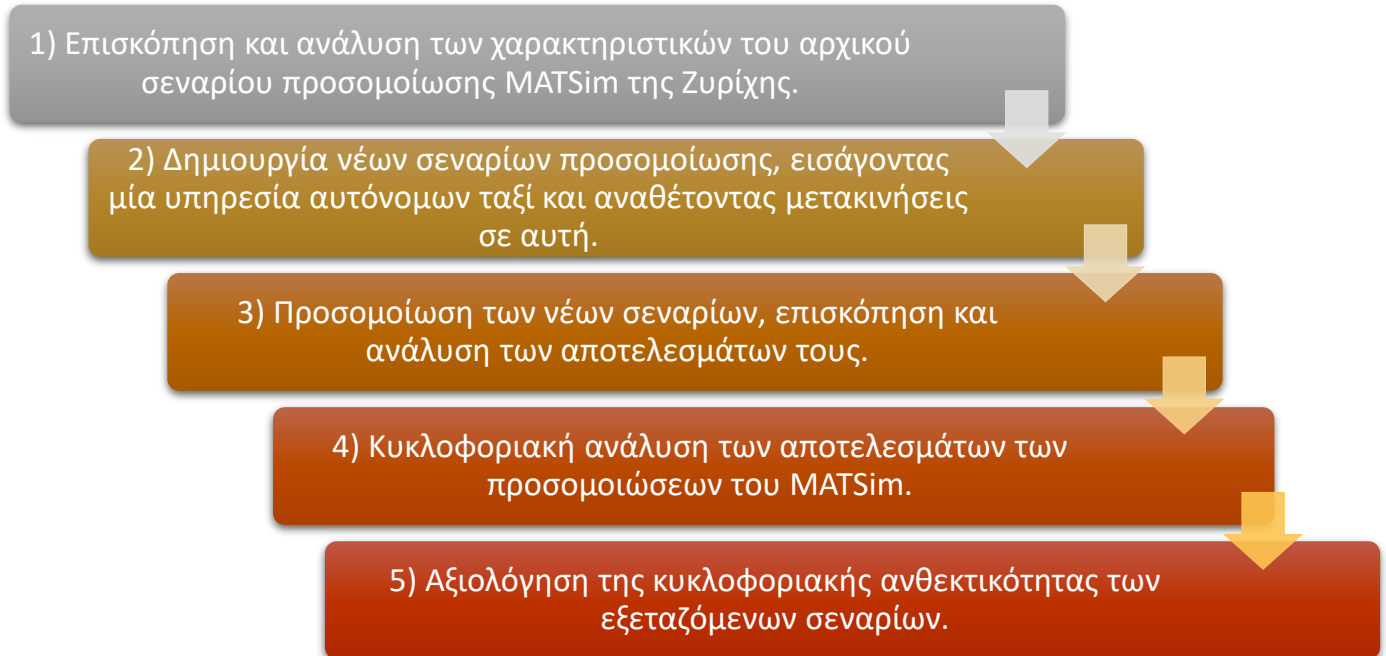
Με βάση την παραπάνω βιβλιογραφική ανασκόπηση της συνεχώς αυξανόμενης έρευνας πάνω στα αυτόνομα οχήματα, γίνεται σαφές πως η εκτεταμένη εισαγωγή τους στην καθημερινότητα της μετακίνησης, θα την αλλάξει ριζικά και συγκεκριμένα, όπως προβλέπεται, προς το καλύτερο. Έτσι, είναι καθοριστικής σημασίας να υπάρξει η καλύτερη δυνατή προετοιμασία πριν αυτή η αλλαγή γίνει πραγματικότητα.

Από την ανάλυση της βιβλιογραφίας προκύπτει ότι οι επιπτώσεις των νέων συστημάτων μεταφορών που στηρίζονται στην αυτόματη κυκλοφορία, το διαμοιρασμό και την δυναμική εξυπηρέτηση της ζήτησης στην κυκλοφοριακή ανθεκτικότητα, **δεν έχουν ευρέως διερευνηθεί**. Συγκεκριμένα, η διερεύνηση ενός εύρους περιπτώσεων εισαγωγής μιας υπηρεσίας αυτόνομων ταξί, σε μικτή κυκλοφορία με άλλα συμβατικά μέσα, με σύγχρονα υπολογιστικά εργαλεία και με βάση της θεμελιώδεις αρχές τις κυκλοφοριακής ροής, είναι σημαντική για την επιτυχή εισαγωγή των νέων συστημάτων μεταφορών στα αστικά δίκτυα.

Κεφάλαιο 3: Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 Μεθοδολογική Προσέγγιση

Με βάση τα παραπάνω, για την επίτευξη των στόχων της παρούσας Διπλωματικής εργασίας, θα αναπτυχθεί μεθοδολογία όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής:



Διάγραμμα 6: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε.

Το αρχικό πολύ-πρακτορικό σενάριο της Ζυρίχης που αξιοποιήθηκε, δημιουργήθηκε από το ΕΤΗ, Zurich. Τα δεδομένα αυτού του σεναρίου βρίσκονταν σε αρχεία kml και σε μορφή αξιοποιήσιμη από το MATSim. Έτσι για την ανάλυση, την τροποποίηση και την προσομοίωσή τους, αναγκαίο ήταν να κατανοηθούν οι βασικές λειτουργίες του προγράμματος **MATSim**. Επιπλέον, ιδιαίτερα χρήσιμη αποδείχθηκε η **οπτικοποίηση** αυτών των αποτελεσμάτων μέσω του προγράμματος Via.

Για την κυκλοφοριακή ανάλυση και την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των νέων σεναρίων που εξετάστηκαν, υπολογίστηκαν κάποια **βασικά κυκλοφοριακά μεγέθη** και δημιουργήθηκαν τα **θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής** σε μακροσκοπικό επίπεδο. Ενώ στην βιβλιογραφική ανασκόπηση δόθηκαν κάποιες βασικές πληροφορίες για την δημιουργία αυτών των διαγραμμάτων σε μακροσκοπικό επίπεδο, παρακάτω θα υπάρξει μια πιο θεωρητική προσέγγιση ώστε να κατανοηθεί η λειτουργία τους σε επίπεδο οδού.

3.2 Προσομοιώσεις με συστήματα πρακτόρων

Η **κλασική προσέγγιση του συγκοινωνιακού σχεδιασμού είναι η διαδικασία των 4-βημάτων**, που εστιάζει στις έννοιες της μετακίνησης, του χρόνου, του χώρου και της αναπαράστασης του μεταφορικού δικτύου, (Σταθόπουλος & Καρλαύτης, 2016). Η διαδικασία αυτή υποδιαιρεί το πρόβλημα του φαινομένου των μετακινήσεων σε 4 διαδοχικά στάδια:

- 1) Γένεση Μετακινήσεων: Εκτίμηση των μετακινήσεων που παράγονται ή έλκονται στις ζώνες της περιοχή μελέτης.
- 2) Κατανομή Μετακινήσεων: Αποτύπωση της ζήτησης των μετακινήσεων και δημιουργία μητρώων Προέλευσης-Προορισμού (Π-Π).
- 3) Επιλογή Μέσου: Διαμερισμός των μητρώων Π-Π ανάλογα με τα διατιθέμενα μέσα μεταφοράς.

4) Καταμερισμός της Ζήτησης: Καταμερισμός της ζήτησης των μετακινήσεων στο δίκτυο.

Αυτή η διαδικασία ήταν η καλύτερη επιλογή την εποχή που υπήρχαν σημαντικά λιγότερα δεδομένα και υπολογιστική δύναμη. Πλέον όμως οι περιορισμοί της κλασικής αυτής προσέγγισης μπορούν να ξεπεραστούν. Βασικό πρόβλημα αυτής της διαδικασίας αποτελεί το γεγονός ότι αγνοεί την διαφορετικότητα των επιλογών μετακίνησης ανάμεσα στα άτομα και αποσκοπεί στην συγκεντρωτική μετακινησιακή συμπεριφορά. Επίσης αγνοεί την ύπαρξη της επιλογής ανάμεσα στα μετακινησιακά βήματα, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε διαφοροποίηση της ζήτησης και της επιλογής των μέσων.

Τα προβλήματα αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν με την δημιουργία και την προσομοίωση μοντέλων με συστήματα πρακτόρων. Τα συστήματα αυτά εκτιμούν τις δραστηριότητες και τις επιλογές μετακίνησης των πρακτόρων με βάση χρονικούς και χωρικούς περιορισμούς και σύμφωνα με τα ατομικά τους χαρακτηριστικά, όπως το φύλο, την ηλικία και άλλα. Οι πράκτορες εκτελούν τις δραστηριότητες και τις μετακινήσεις τους, προσπαθώντας να το κάνουν όσο πιο παραγωγικά για τους ίδιους γίνεται, τόσο σε οικονομικό επίπεδο όσο και από άποψη χρόνου. Όπως ακριβώς δηλαδή θα έκανε και ένα πραγματικό άτομο. Θα προσπαθούσε και θα δοκίμαζε, για παράδειγμα, να βρει τον πιο οικονομικό τρόπο να φτάσει στη δουλειά του, χωρίς να καθυστερήσει, και με τη μεγαλύτερη δυνατή άνεση. Τέλος, μέσω της συγκεντρωτικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης των συστημάτων πρακτόρων, είναι δυνατόν να προκύψουν τα μακροσκοπικά μεγέθη της διαδικασίας των 4-βημάτων, απαλλαγμένα από τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Υπάρχουν πολλά προγράμματα που προσομοιώνουν σύγχρονα συγκοινωνιακά δίκτυα με βάση τους πράκτορες ενός συνθετικού πληθυσμού. Η έρευνα σε αυτήν την Διπλωματική εργασία έγινε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα **MATSim**.

3.3 MATSim

Το MATSim (Multi-Agent Transport Simulation), (MATSim, 2020), παρέχει το πλαίσιο (framework) για την εκτέλεση προσομοιώσεων συγκοινωνιακού χαρακτήρα και είναι σχεδιασμένο για προβλήματα μεγάλης κλίμακας, όπως αυτά μεγάλων και σύγχρονων πόλεων σαν την Ζυρίχη. Είναι γραμμένο εξ' ολοκλήρου σε γλώσσα προγραμματισμού Java, βασίζεται στις δραστηριότητες (activity based) πολλαπλών ευφυών πρακτόρων (multi-agent) και μπορεί να επεκταθεί με επιπλέον δυνατότητες. Διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο όπως επίσης και όλες τις επεκτάσεις του (GitHub). Βασική βιβλιογραφία για το πρόγραμμα διατίθεται δωρεάν, επίσης στο διαδίκτυο (Horni, Nagel, & Axhausen, *The Multi-Agent Transport Simulations MATSim*, 2016).

3.3.1 Το MATSim συνοπτικά

Ο κεντρικός πυρήνας του MATSim δημιουργήθηκε από το ILS (Institute of Land and Sea Transport Systems) του TU του Βερολίνου και το IVT (Institute for Transport Planning and Systems) του ETH της Ζυρίχης. Πλέον όμως στην ομάδα του MATSim έχουν προστεθεί περισσότερες ακαδημαϊκές ομάδες, εταιρείες, καθώς και μια συνεχώς αυξανόμενη κοινότητα από ερευνητικές ομάδες και χρήστες. Εκτός από τα άτομα που βρίσκονται στην βασική ομάδα του προγράμματος, όλα τα μέλη της κοινότητας μπορούν να συνδράμουν στην συνεχή βελτιστοποίηση του κώδικα με δικές τους ιδέες και προτάσεις, αφού αυτές εγκριθούν. Εκεί βρίσκεται και η πραγματική δύναμη του MATSim, αφού οι λειτουργίες του είναι τμηματικά χτισμένες γύρω από ένα κεντρικό πυρήνα και μπορεί κάποιος εύκολα να τις επεξεργαστεί κατάλληλα ώστε να εξετάσει τα σενάρια της έρευνάς του.

Το MATSim λειτουργεί με επαναληπτικό τρόπο, προσομοιώνοντας, συνήθως, 24 ώρες μίας ολόκληρης μέρας σε κάθε επανάληψη. **Η επαναληπτική διαδικασία** αποτελείται από τρία μέρη:

- 1) Εκτέλεση προσομοίωσης. 2) Υπολογισμός βαθμολογίας του πλάνου κάθε πράκτορα. 3) Επανασχεδιασμός και κατάλληλη επιλογή των πλάνων.

Οι επαναλήψεις των προσομοιώσεων συνεχίζουν μέχρι η γενική βαθμολογία του συστήματος των πρακτόρων να φτάσει στη λεγόμενη ισορροπία. Να, χρησιμοποιώντας έναν συν-εξελικτικό αλγόριθμο.

Αρχικά στο πρόγραμμα **φορτώνεται το οδικό δίκτυο**, το οποίο αποτελείται από κόμβους και συνδέσμους που αναπαριστούν διασταυρώσεις και οδικά τμήματα αντίστοιχα. Το οδικό αυτό δίκτυο μπορεί να παραχθεί με μεγάλη ακρίβεια αντλώντας πραγματικά στοιχεία από αξιόπιστους χάρτες όπως αυτούς του OpenStreetMap. Κάθε σύνδεσμος διαθέτει χαρακτηριστικά όπως μήκος και ταχύτητα ελεύθερης ροής που καθορίζουν την κυκλοφοριακή ροή σε εκείνο το σημείο του δικτύου.

Ύστερα το MATSim διαβάζει τις αλληλουχίες των δραστηριοτήτων, ή αλλιώς τα πλάνα, που έχουν προγραμματιστεί να κάνουν οι πράκτορες του εικονικού πληθυσμού μέσα στη μέρα τους. Κάθε πράκτορας του πληθυσμού διαθέτει κάποια βασικά χαρακτηριστικά που έχουν προκύψει συνήθως από πραγματικές έρευνες, όπως το φύλο, η ηλικία, αν διαθέτει δίπλωμα οδήγησης κ.λπ. και τουλάχιστον ένα πλάνο. Η αλληλουχία των δραστηριοτήτων των αρχικών πλάνων των πρακτόρων προκύπτει από έρευνες απογραφής και κατάλληλα μοντέλα πρόβλεψης. Αυτά τα αρχικά πλάνα αποτελούν την **αρχική ζήτηση** που δίνεται στο πρόγραμμα.

Ακολουθεί η αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας, όπου **γίνεται η προσομοίωση μίας τυπικής ημέρας**, γνωρίζοντας για κάθε πράκτορα που θέλει να πάει, τότε και με τι μέσο, που είναι τα αρχικά του πλάνα. Έτσι εκτελείται το σύνολο των προγραμματισμένων δραστηριοτήτων και μετακινήσεων όλων των πρακτόρων, αξιοποιώντας το κυκλοφοριακό μοντέλο του MATSim, μέχρι να ολοκληρωθούν τα πλάνα τους.

Στη συνέχεια, και αφού τελειώσει η μέρα και όλοι οι πράκτορες έχουν ολοκληρώσει τις δραστηριότητές τους, τα πλάνα αυτά, οι αλληλουχίες δηλαδή των δραστηριοτήτων που μόλις εκτελέστηκαν, θα λάβουν από ένα **βαθμό**². Αυτός ο βαθμός είναι αποτέλεσμα μιας οικονομετρικής συνάρτησης και εξαρτάται από τα μεταφορικά μέσα με τα οποία κινήθηκε ο κάθε πράκτορας, το συνολικό χρόνο της μετακίνησής του, αν άργησε σε κάποια από τις δραστηριότητές του κ.α. Αυτός ο βαθμός, το πρόσημο και η τιμή του, κρίνουν την αποτελεσματικότητα του πλάνου του πράκτορα.

Με κάθε πλάνο που εκτελέστηκε να έχει λάβει μια βαθμολογία και τη μέρα να έχει τελειώσει, πριν αρχίσει η επόμενη μέρα και άρα η επόμενη επανάληψη της προσομοίωσης, για ένα μέρος των πρακτόρων, συχνά το 10%, το πλάνο τους θα **τροποποιηθεί** ώστε να καταφέρει να πάρει καλύτερο βαθμό στην επόμενη προσομοίωση. Αυτό γίνεται συνήθως μέσω της τροποποίησης μιας από τις παρακάτω 4 παραμέτρους:

- Της ώρας αναχώρησης από κάποιες δραστηριότητες που το επιτρέπουν.
- Της διαδρομής που είχε επιλεγεί.
- Του μέσου μεταφοράς.
- Του τελικού προορισμού.

Η τροποποίηση της παραμέτρου του τελικού προορισμού, αφορά μόνο προορισμούς δευτερευουσών δραστηριοτήτων, όπως είναι τα ψώνια. Αυτοί οι δευτερεύοντες προορισμοί δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια μέσω ερευνών, όπως για παράδειγμα οι κατοικίες, οπότε έχουν, κατά κύριο λόγο, μοντελοποιηθεί, ώστε να μπορέσουν να αντικατοπτρίσουν όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά το σύνολο της ζήτησης.

² Τα συστήματα της βαθμολόγησης και του επανασχεδιασμού δεν αξιοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία. Έτσι, αυτή η συνοπτική εξήγηση της λειτουργίας τους, θα είναι και η μόνη που θα γίνει.

Οι τροποποιήσεις αυτές γίνονται αλλάζοντας, για παράδειγμα, τυχαία το μέσο μεταφοράς ή τις ώρες αναχώρησης, είτε βρίσκοντας μια καλύτερη διαδρομή με βάση τα δεδομένα από την προηγούμενη προσομοίωση. Έτσι, για την επόμενη προσομοίωση θα επιλεγθεί για κάθε πράκτορα ένα από τα ήδη υπάρχοντα πλάνα τους ή κάποιο από τα τροποποιημένα πλάνα που μόλις δημιουργήθηκαν. Οι τροποποιήσεις συνήθως απενεργοποιούνται μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων και το σύστημα τελικά οδηγείται σε ισορροπία Νας, μέσω του συν-εξελικτικού αλγόριθμου, στην οποία οι βαθμολογίες του συστήματος των πρακτόρων σταθεροποιούνται και οι πράκτορες δεν μπορούν βελτιώσουν άλλο τη βαθμολογία των πλάνων τους, ως σύνολο.

Τέλος, και αφού έχει ολοκληρωθεί η επαναληπτική διαδικασία των προσομοιώσεων του MATSim, μένει η **ανάλυση** των δεδομένων που προέκυψαν από αυτές τις προσομοιώσεις. Το MATSim δημιουργεί ένα φάκελο με όλα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τόσο τα τελικά, όσο και για κάθε επανάληψη που εκτελέστηκε ξεχωριστά. Ένα από τα βασικά αποτελέσματα του MATSim, είναι το αρχείο με συμβάντα (events), στο οποίο καταγράφεται κάθε γεγονός που συμβαίνει στην προσομοίωση, όπως η είσοδος ενός αυτοκινήτου σε έναν σύνδεσμο.

Έτσι, ο χρήστης μπορεί να βγάλει όλα τα συμπεράσματα που επιθυμεί, αναλύοντας τα αρχεία των αποτελεσμάτων είτε μετά το τέλος όλων των προσομοιώσεων ή κατά τη διάρκειά τους, γράφοντας ειδικά κομμάτια κώδικα (EventHandlers). Αυτά τα κομμάτια κώδικα αντιδρούν όποτε εκτελείται ένα συμβάν που ενδιαφέρει τον ερευνητή και κάνουν κάποια ενέργεια, όπως για παράδειγμα, αθροίζουν τα οχήματα που μπαίνουν σε κάποιον σύνδεσμο. Τέλος, το MATSim δημιουργεί αρχεία καταγραφής (log), που καταγράφουν, αναλυτικά και χρονικά, σημαντικά σημεία κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων, όπως διαδικασίες, σφάλματα και προειδοποιήσεις.

3.3.2 Αρχεία Εισαγωγής

Αναλυτικότερα, Το MATSim για να λειτουργήσει και να εκτελέσει τις επιθυμητές προσομοιώσεις, χρειάζεται δύο ομάδες αρχείων. **Τον κώδικα και τα αρχεία εισαγωγής.** Ο απαραίτητος κώδικας, αποτελείται από τον πυρήνα, ο οποίος συντηρείται αποκλειστικά από την ομάδα του MATSim, και οποιεσδήποτε επιπλέον επεκτάσεις επιλέξει ή γράψει μόνος του ο χρήστης. Πρακτικά με τον διαθέσιμο κώδικα που υπάρχει σε ελεύθερη διάθεση στο διαδίκτυο, κάποιος μπορεί, έχοντας τα κατάλληλα αρχεία εισαγωγής, να τρέξει σχεδόν απευθείας τις προσομοιώσεις που επιθυμεί.

Τα αρχεία εισαγωγής είναι τα πλέον σημαντικά για την διεκπεραίωση μιας έρευνας μέσω του MATSim. **Τα ελάχιστα αρχεία που απαιτούνται** είναι: το αρχείο διαμόρφωσης, το αρχείο του οδικού δικτύου και του αρχείο του πληθυσμού. Πέρα από αυτά, διάφορα άλλα αρχεία μπορούν να δοθούν με σκοπό να κάνουν την προσομοίωση πιο πλούσια και ρεαλιστική. Πιο αναλυτικά:

Αρχείο Διαμόρφωσης (config.xml)

Το αρχείο αυτό αποτελεί τον συνδεδεμένο κρίκο ανάμεσα στον κώδικα και τον χρήστη. Με το αρχείο διαμόρφωσης, ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί ένα πολύ μεγάλο εύρος παραμέτρων που καθορίζουν επί της ουσίας όλες τις πτυχές της προσομοίωσης. **Οι παράμετροι που περιέχει**, βρίσκονται ομαδοποιημένες και κάθε ομάδα αποτελείται από ζευγάρια παραμέτρων και των αντίστοιχων τιμών τους. Για παράδειγμα, υπάρχει ξεχωριστή ομάδα που ασχολείται με τις ιδιότητες του οδικού δικτύου. Σε αυτή την ομάδα, υπάρχει παράμετρος που καθορίζει που θα βρεθεί το αρχείο του οδικού δικτύου και η τιμή του είναι η ακριβής τοποθεσία στον υπολογιστή ή στο διαδίκτυο.

Οι διαθέσιμες παράμετροι ενδέχεται να τροποποιούνται με τον καιρό ή να προστίθενται νέες. Έτσι, το MATSim, σε κάθε έκδοση του προγράμματος, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να μπορεί να εξάγει ένα αρχείο διαμόρφωσης, το οποίο περιέχει όλες, μέχρι εκείνη την χρονική στιγμή, παραμέτρους, τις προκαθορισμένες τιμές τους καθώς και επεξηγηματικά σχόλια.

Κάποιες βασικές ομάδες και οι παράμετροί τους είναι:

- **Το οδικό δίκτυο (network):** με παραμέτρους που αφορούν στο γεωγραφικό σύστημα που χρησιμοποιείται, το αρχείο που περιέχει το εικονικό δίκτυο κ.λπ.
- **Τα πλάνα των πρακτόρων (plans):** με παραμέτρους που αφορούν στην τοποθεσία του αρχείου που περιέχει τον πληθυσμό κ.λπ.
- **Τον ελεγκτή των προσομοιώσεων (controller):** με παραμέτρους που επηρεάζουν τον αριθμό των συνολικών προσομοιώσεων, ποιος προσομοιωτής κυκλοφορίας θα χρησιμοποιηθεί κ.λπ.
- **Ο προσομοιωτής της κυκλοφορίας (qsim):** με συντελεστές που μπορούν να επηρεάσουν τον ρυθμό ροής και την αποθηκευτική χωρητικότητα οχημάτων των συνδέσμων κ.λπ.

Έτσι με αυτό το αρχείο, ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί τις επιθυμητές παραμέτρους και να εκτελέσει την έρευνα που επιθυμεί. **Το αρχείο αυτό μπορεί να το επεξεργαστεί** είτε απλώς τροποποιώντας τις τιμές των επιθυμητών παραμέτρων ή προσθέτοντας νέες ομάδες και παραμέτρους, είτε γράφοντας κάποια κατάλληλη εντολή στο πρόγραμμα, περιβάλλον προγραμματισμού (IDE) ή κονσόλα, με το οποίο εκτελείται ο κώδικας του MATSim. Αυτή η εντολή έχει μορφή, για παράδειγμα, `--config: controler.lastIteration 100`, που σημαίνει ότι στο αρχείο config, δηλαδή το αρχείο διαμόρφωσης, στην ομάδα controler, που είναι ο ελεγκτής των προσομοιώσεων, η παράμετρος lastIteration, που καθορίζει πόσες προσομοιώσεις θα εκτελεστούν, να τεθεί ίση με 100.

```
1. <module name="controler" >
2.   <param name="firstIteration" value="0" />
3.   <param name="lastIteration" value="100" />
4.   <param name="mobsim" value="qsim" />
```

Τυπική μορφή αρχείου 1: Αρχείο διαμόρφωσης: ομάδα, παράμετροι και τιμές.

Αρχείο Οδικού Δικτύου (network.xml)

Στο αρχείο αυτό, υπάρχουν όλα τα χαρακτηριστικά του εικονικού οδικού δικτύου στο οποίο πρόκειται να γίνουν οι προσομοιώσεις. **Περιέχει** το σύνολο των κόμβων (nodes) με τις διαστάσεις συντεταγμένες τους, που έχουν ακρίβεια αρκετών δεκαδικών ψηφίων, και το σύνολο των συνδέσμων (links) που ενώνουν αυτούς τους κόμβους. Οι κόμβοι δεν έχουν κάποια χωρική υπόσταση, απλώς συνδέουν τους συνδέσμους μεταξύ τους.

Οι σύνδεσμοι αρχικά **περιέχουν τρεις βασικές παραμέτρους**, το carperiod, το effectivecellsize και το effectivelanewidth. Αυτές αφορούν: στο χρόνο υπολογισμού του ρυθμού ροής, στο μήκος που θεωρείται πως καταλαμβάνει ένα όχημα μίας Ισοδύναμης Μονάδας Επιβατικού Αυτοκινήτου (MEA), και στο πλάτος του δρόμου, αντίστοιχα. Ο χρόνος υπολογισμού του ρυθμού ροής σημαίνει πως αν, για παράδειγμα, ο χρόνος αυτός είναι 1 ώρα, τότε ο ρυθμός ροής εξόδου που αναφέρεται παρακάτω, υπολογίζεται σε οχήματα/ώρα.

Οι σύνδεσμοι συνδέουν πάντα έναν κόμβο με έναν άλλο και η σύνδεση είναι πάντα μονόδρομη. Αν ο δρόμος στον οποίο αναφέρονται είναι δύο κατευθύνσεων, τότε δημιουργούνται δύο σύνδεσμοι, ένας για κάθε κατεύθυνση. Κάθε σύνδεσμος έχει κάποια **χαρακτηριστικά**:

- Το μήκος του σε μέτρα (length).
- Την ταχύτητα ελεύθερης ροής σε μέτρα/δευτερόλεπτο (freespeed).
- Ποια μέσα μεταφοράς μπορεί να δεχτεί (modes).
- Τον μέγιστο ρυθμό ροής εξόδου των οχημάτων από το σύνδεσμο, συνήθως σε οχήματα/ώρα, εξαρτάται από το carperiod (capacity).
- Τις λωρίδες κυκλοφορίας του (permlanes).

Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι πολύ βασικά για την προσομοίωση, αφού **καθορίζουν την κυκλοφορία**. Ο ρυθμός ροής εξόδου ορίζει κάθε πότε ένα όχημα μπορεί να βγει από την ουρά που έχει σχηματιστεί στο σύνδεσμο, το μήκος σε συνδυασμό με τις λωρίδες και το effectivecellsize, πόσα οχήματα μπορούν να χωρέσουν στον σύνδεσμο, η ταχύτητα ελεύθερης ροής ορίζει το νωρίτερο που

μπορεί να βγει ένα όχημα από έναν σύνδεσμο και ο καθορισμός των μέσων που επιτρέπονται σε κάθε σύνδεσμο υποδεικνύει τις διαδρομές που μπορούν να ακολουθήσουν τα διάφορα οχήματα της προσομοίωσης.

```
1. <node id="100016591" x="2680227.8880314995" y="1254504.486642346" >
2. </node>
```

Τυπική μορφή αρχείου 2: Αρχείο Οδικού Δικτύου: κόμβος.

```
1. <links capperiod="01:00:00" effectivecellsize="7.5" effectivecellwidth="3.75">
2.   <link id="1" from="433025486" to="433025379" length="21.497587429069792" freespeed="4.166666666666667" capacity="600.0" permlanes="1.0" oneway="1" modes="car,av,truck,car_passenger" >
3.     <attributes>
4.       <attribute name="avWaitingTimeGroup" class="java.lang.Integer" >0</attribute>
5.       <attribute name="osm:way:highway" class="java.lang.String" >residential</attribute>
6.     </attributes>
7.     <attribute name="osm:way:id" class="java.lang.Long" >37201144</attribute>
8.     <attribute name="osm:way:name" class="java.lang.String" >Bebikon</attribute>
9.   </link>
10. </links>
```

Τυπική μορφή αρχείου 3: Αρχείο Οδικού Δικτύου: σύνδεσμος.

Αρχείο Πληθυσμού (population.xml ή plans.xml)

Περιέχει το σύνολο των πρακτόρων του συνθετικού πληθυσμού που πρόκειται να προσομοιωθεί. Οι πράκτορες αυτοί μπορούν να έχουν διάφορα **χαρακτηριστικά**, όπως φύλο, ηλικία, κατοχή διπλώματος αυτοκινήτου, κατοχή αυτοκινήτου κ.λπ., τα οποία κάνουν πιο ρεαλιστική την προσομοίωση, επιτρέποντας, μεταξύ άλλων, την εξαγωγή πραγματικών στατιστικών στοιχείων για τον πληθυσμό. Σε αυτό το αρχείο καταγράφονται επίσης και τα αναλυτικά πλάνα της μέρας τους.

Ο κάθε πράκτορας μπορεί να έχει παραπάνω από ένα πλάνο, αλλά σε κάθε προσομοίωση επιλέγεται μόνο ένα για να εκτελεστεί. **Τα πλάνα αυτά περιέχουν** την αλληλουχία των δραστηριοτήτων που θα εκτελέσει ο πράκτορας μέσα στη μέρα του, καθώς και τα μέσα μεταφοράς που θα χρησιμοποιήσει για να πάει από τη μία δραστηριότητα στην άλλη.

Στις προσομοιώσεις που θα απασχολήσουν αυτή την εργασία, **κάθε δραστηριότητα** χαρακτηρίζεται από το όνομα της, την ακριβή ώρα που θα αρχίσει και θα τελειώσει (εκτός από την πρώτη και την τελευταία δραστηριότητα που ή μόνο θα τελειώσει ή μόνο θα αρχίσει αντίστοιχα) και τον σύνδεσμο στον οποίο γίνεται αυτή η δραστηριότητα. Η τοποθεσία της μπορεί να δοθεί με συγκεκριμένο όνομα, για το οποίο θα υπάρχουν οι κατάλληλες πληροφορίες στο αρχείο των εγκαταστάσεων (facilities.xml) ή των κατοικιών (households.xml). Σε αυτά τα αρχεία περιέχονται η ονομασία και οι απαραίτητες πληροφορίες για τα μέρη που μπορούν να μεταβούν οι πράκτορες.

Η τοποθεσία της δραστηριότητας μπορεί να δοθεί επίσης με δυσδιάστατες συντεταγμένες ή με τον σύνδεσμο που γίνεται η δραστηριότητα. Τελικώς, το MATSim χρειάζεται μόνο τον σύνδεσμο, γιατί όπως θα αναφερθεί παρακάτω, όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οχημάτων γίνονται στο τέλος των συνδέσμων, οπότε δεν αξιοποιείται περαιτέρω ακρίβεια.

Τα μέσα μεταφοράς χρειάζονται μόνο το όνομα του μέσου για να ξεκινήσει η πρώτη προσομοίωση, για παράδειγμα αυτοκίνητο (car). Για να εκτελεστεί η μεταφορά όμως, πρέπει να υπάρχει και αναλυτικά η διαδρομή που θα ακολουθήσει το μέσο. Την πληροφορία αυτή, καθώς και την ώρα που θα διαρκέσει η μεταφορά, τις υπολογίζει εσωτερικά το MATSim την πρώτη φορά που θα τρέξει η προσομοίωση.

```

1. <person id="»201240007584344«»>
2.   <attributes>
3.     <attribute name="age" class="java.lang.Integer" >52</attribute>
4.     <attribute name="bikeAvailability" class="java.lang.String" >FOR_ALL</attribute>
5.     <attribute name="carAvail" class="java.lang.String" >always</attribute>
6.     <attribute name="employed" class="java.lang.Boolean" >true</attribute>
7.     <attribute name="hasLicense" class="java.lang.String" >yes</attribute>
8.     <attribute name="home_x" class="java.lang.Double" >2677263.0</attribute>
9.     <attribute name="home_y" class="java.lang.Double" >1236646.0</attribute>
10.    <attribute name="isCarPassenger" class="java.lang.Boolean" >false</attribute>
11.    <attribute name="isOutside" class="java.lang.Boolean" >false</attribute>
12.    <attribute name="ptHasGA" class="java.lang.Boolean" >false</attribute>
13.    <attribute name="ptHasHalbtax" class="java.lang.Boolean" >false</attribute>
14.    <attribute name="ptHasStrecke" class="java.lang.Boolean" >false</attribute>
15.    <attribute name="ptHasVerbund" class="java.lang.Boolean" >false</attribute>
16.    <attribute name="sex" class="java.lang.String" >m</attribute>
17.    <attribute name="spRegion" class="java.lang.Integer" >1</attribute>
18.  </attributes>
19.  <plan selected="»yes«»>
20.    <activity type="home" link="»706281" facil-
21.    ity="home201200020002272" x="»2677263.0" y="»1236646.0" end_time="»07:40:29" >
22.    </activity>
23.    <leg mode="»car«»>
24.    <activity type="shop" link="»270549" facil-
25.    ity="»131155" x="»2679346.0" y="»1237533.0" start_time="»07:50:29" end_time="»08:50:29" >
26.    </activity>
27.    <leg mode="»car«»>
28.    <activity type="home" link="»706281" facil-
29.    ity="home201200020002272" x="»2677263.0" y="»1236646.0" start_time="»09:00:29" >
30.    </activity>
31.  </plan>
</person>

```

Τυπική μορφή αρχείου 4: Αρχείο Πληθυσμού: πλάνο πράκτορα.

Άλλα Αρχεία Εισαγωγής

Κάποια άλλα προαιρετικά αρχεία εισαγωγής είναι:

- **Facilities.xml:** Περιέχει την ταυτότητα (id), τον σύνδεσμο και τις ακριβείς διαστάσεις συντεταγμένες των τοποθεσιών στις οποίες εκτελούνται δραστηριότητες, καθώς και ποιες δραστηριότητες μπορούν να εκτελεστούν, για παράδειγμα εργασία (work) και κατοικία (home).
- **Households.xml:** Περιέχει πιο αναλυτικές πληροφορίες για τις τοποθεσίες των κατοικιών, όπως τον αριθμό και τις ταυτότητες (id) των πρακτόρων που διαμένουν σε κάθε κατοικία, το συνολικό μηνιαίο εισόδημα για την κατοικία, πόσα διαθέσιμα αυτοκίνητα υπάρχουν και άλλα.
- **Counts.xml:** Το αρχείο αυτό περιέχει μετρήσεις των κυκλοφοριακών φόρτων από πραγματικούς σταθμούς μέτρησης κυκλοφορίας, οι οποίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές που θα προκύψουν από τις προσομοιώσεις. Έτσι, με τις κατάλληλες διορθώσεις, γίνεται καλύτερη προσαρμογή της προσομοίωσης στην πραγματικότητα.
- **Vehicles.xml:** Αυτό το αρχείο, αν υπάρχει, δίνει τη δυνατότητα να παραχθεί ένας στόλος από μοναδικά οχήματα, εν αντιθέσει του στόλου με ίδια τυπικά οχήματα που θα δημιουργηθούν από το MATSim αν δεν υπάρχει.
- **Transit_vehicles.xml, Transit_schedule.xml:** Αυτά τα δύο αρχεία είναι απαραίτητα για την αξιοποίηση των μέσων μαζικής μεταφοράς. **Το πρώτο** καθορίζει τα οχήματα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, όπως λεωφορεία ή τρένα, μαζί με όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που πρέπει να διαθέτει το κάθε όχημα. **Το δεύτερο** περιέχει τις πληροφορίες για το όνομα και την τοποθεσία των στάσεων, όλες τις γραμμές που διέρχονται από κάθε στάση καθώς και σε ποιες από αυτές (τις στάσεις) σταματούν.

Περιέχει επίσης τους χρόνους αναχώρησης κάθε οχήματος της γραμμής και την ώρα που θα κάνουν αυτά τα οχήματα, για παράδειγμα κάποιο τρένο, να σταματήσουν, να γίνουν η επιβίβαση και η αποβίβαση των πρακτόρων και να αναχωρήσουν από τη στάση.

3.3.3 Μέσα Μεταφοράς

Στις προσομοιώσεις κυκλοφορίας, το **πιο βασικό μέσο μεταφοράς** είναι το συμβατικό αυτοκίνητο. Έτσι, το MATSim όταν ξεκίνησε αυτό ήταν και το μοναδικό μέσο μεταφοράς. Με τον καιρό δημιουργήθηκαν και ενσωματώθηκαν και άλλοι τρόποι μετακίνησης, όπως είναι για παράδειγμα η μοτοσυκλέτα, τα μέσα μαζικής μεταφοράς και τα οχήματα μεταφοράς φορτίων (freights).

Το σύνολο των οχημάτων που χρησιμοποιούνται μπορεί να **έχουν δημιουργηθεί** με δύο τρόπους, ή με συνδυασμό αυτών. Ο πρώτος τρόπος είναι το κάθε όχημα να δημιουργηθεί ξεχωριστά είτε με κοινές είτε με διαφορετικές ιδιότητες για κάθε όχημα ή ομάδα οχημάτων (για παράδειγμα αυτοκίνητα), να δοθεί ένας μοναδικός αριθμός ταυτότητας (id) σε κάθε ένα από αυτά και όλες αυτές οι πληροφορίες να ενσωματωθούν σε ένα αρχείο (vehicles.xml) που θα δίνεται στην αρχή της προσομοίωσης. Αυτός φυσικά είναι και ο πιο ρεαλιστικός τρόπος. Συνήθως, στις έρευνες που γίνονται με το MATSim, δεν απαιτείται τέτοια ακρίβεια.

Έτσι, ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι να δημιουργούνται οχήματα με τυπικές ιδιότητες για κάθε διαφορετικό πράκτορα που θέλει να τα χρησιμοποιήσει. Αυτόματα το MATSim μπορεί να δημιουργήσει τυπικά οχήματα μόνο για αυτοκίνητα, ενώ για άλλα μέσα μεταφοράς πρέπει να γίνουν επιπλέον διαδικασίες. Ειδική περίπτωση αποτελούν τα μέσα μαζικής μεταφοράς.

Χαρακτηριστικά των τυπικών αυτοκινήτων, και οι τιμές τους όπως χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία, που είναι απαραίτητα για την προσομοίωση τους και καταγράφονται ή δημιουργούνται στο αρχείο για τα οχήματα, είναι: το μήκος και το πλάτος του οχήματος, 7,5 και 1 μέτρο αντίστοιχα, ο χρόνος που χρειάζεται ο πράκτορας για να εισέλθει και να εξέλθει από το όχημα, από 1 δευτερόλεπτο, πόσες Ισοδύναμες Μονάδες Επιβατικού Αυτοκινήτου (ΜΕΑ) καταλαμβάνει, 1 ΜΕΑ, και πόσα άτομα χωρούν μέσα στο όχημα, 4 άτομα.

Οι ιδιότητες που καθορίζουν την κίνηση των οχημάτων μέσα στη κυκλοφορία, συνήθως δεν ορίζονται για κάθε ατομικό όχημα (για παράδειγμα η επιτάχυνση ή η μέγιστη ταχύτητα κάθε οχήματος, κάτι που όμως μπορεί να γίνει και να μελετηθεί μια πιο ρεαλιστική κυκλοφορία). Στο αρχείο του οδικού δικτύου, για κάθε σύνδεσμο υπάρχουν οι παράμετροι της ταχύτητας ελεύθερης ροής και του ρυθμού ροής εξόδου από τον κόμβο. Αυτές οι παράμετροι, μαζί με άλλες του αρχείου διαμόρφωσης, όπως για παράδειγμα την `qsim:linkDynamics`, με τιμή π.χ. FIFO³, που καθορίζει την προτεραιότητα μέσα στους συνδέσμους, είναι αυτές που τελικά καθορίζουν την κίνηση των οχημάτων.

Στο MATSim, τα μέσα μεταφοράς **είτε προσομοιώνονται** κανονικά και αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους μέσα στην κυκλοφορία, **είτε τηλεμεταφέρονται**. Αυτό καθορίζεται από τον χρήστη, ο οποίος μπορεί να επιλέξει ποια μέσα μεταφοράς θα εισέλθουν στην κυκλοφορία, προσθέτοντάς τα στη λίστα με τα οχήματα που θα προσομοιωθούν, που είναι παράμετρος του αρχείου διαμόρφωσης (`qsim:mainMode`). **Τηλεμεταφορά**, σημαίνει πως ο πράκτορας και το μέσο με το οποίο μετακινείται δεν θα εισέλθουν στην κυκλοφορία, αλλά απλά θα μεταφερθούν στον επιθυμητό προορισμό. Στο αρχείο διαμόρφωσης υπάρχουν οι κατάλληλες παράμετροι που καθορίζουν για κάθε μέσο που τηλεμεταφέρεται την ταχύτητα και την απόσταση, η οποία μπορεί, για παράδειγμα, να είναι ίση με την απόσταση της ευθείας μεταξύ των σημείων προέλευσης-προορισμού, που θα διανύσουν.

Επομένως οι πράκτορες μπορούν είτε να τηλεμεταφερθούν στον προορισμό τους είτε να μετακινηθούν με ένα μέσο το οποίο μπαίνει στην κυκλοφορία, είτε ως οδηγό ενός οχήματος είτε ως

³ First In First Out, που σημαίνει ότι όταν ένα όχημα μπει σε έναν σύνδεσμο, θα βγει πριν από τα οχήματα που μπήκαν μετά από αυτό.

επιβάτες. Ως επιβάτες μπορούν να βρίσκονται στο όχημα που οδηγεί κάποιος άλλος, σε ένα ταξί ή σε ένα μέσο μαζικής μεταφοράς. Σε αυτή τη περίπτωση και εφόσον η πορεία του οχήματος είναι καθορισμένη από τον οδηγό, η μόνη απόφαση που έχει να πάρει ο πράκτορας που είναι επιβάτης, είναι που θα κατέβει.

Τα μέσα μαζικής μεταφοράς χρειάζονται περισσότερες πληροφορίες από τα υπόλοιπα οχήματα και δεν μπορούν να προσομοιωθούν σε κλίμακα, όπως γίνεται στα αυτοκίνητα για παράδειγμα. Συγκεκριμένα, επιπλέον των ιδιοτήτων που έχουν ήδη αναφερθεί, τα μέσα μαζικής μεταφοράς για να μπορούν να προσομοιωθούν, πρέπει να υπάρχουν και οι πληροφορίες των αρχείων, *transit_vehicles.xml* και *transit_schedule.xml*.

Τέλος, σε αντίθεση με τα μέσα μαζικής μεταφοράς, τα οποία βρίσκονται σε κίνηση και οι πράκτορες επιβιβάζονται και αποβιβάζονται, υπάρχουν τα **μέσα που ανταποκρίνονται δυναμικά στη ζήτηση** και στην ανάγκη για μετακίνηση του κάθε πράκτορα. Αυτά τα μέσα είναι τα ταξί ή τα αυτόνομα ταξί, εκ των οποίων τα τελευταία χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Βασική διαφορά μεταξύ των δύο, στο περιβάλλον του MATSim, είναι ότι σε αντίθεση με τα συμβατικά ταξί, τα αυτόνομα δεν κάνουν διαρκείς μετακινήσεις στην πόλη ψάχνοντας για πελάτες, μα ανταποκρίνονται μόνο στο κάλεσμα κάποιου πράκτορα.

Τα αυτόνομα ταξί της υπηρεσίας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία, (Horl, 2017), δημιουργούνται και διασπείρονται αρχικά στον δίκτυο με βάση την πληθυσμιακή πυκνότητα, σε αντίθεση με τα ιδιωτικά αυτοκίνητα που βρίσκονται αρχικά στο σπίτι του κάθε πράκτορα. Οι **καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται ένα αυτόνομο ταξί είναι:** σε κίνηση, είτε για να πάνε να παραλάβουν έναν πράκτορα είτε για να τον πάνε στον προορισμό του, σε κατάσταση επιβίβασης (AVPickup) ή αποβίβασης (AVDropoff) του πράκτορα και σε αδράνεια (AVStay), όταν δεν έχουν κάποια ενεργή κλήση.

Το σύστημα των αυτόνομων ταξί μπορεί να βρεθεί σε δυο καταστάσεις, είτε ο αριθμός των αυτόνομων ταξί ξεπερνά ή είναι ίσος με τη ζήτηση (OverSupply), είτε είναι μικρότερος (UnderSupply). Στην πρώτη περίπτωση, όταν έρθει κάποια κλήση, το κοντινότερο αυτόνομο ταξί ανταποκρίνεται χωρίς κάποια καθυστέρηση, ενώ στη δεύτερη οι κλήσεις μπαίνουν σε ουρά και το πρώτο αυτόνομο ταξί που θα γίνει διαθέσιμο, στέλνεται στον κοντινότερο πράκτορα που αναμένει. Αυτή η μέθοδος είναι διαφορετική από αυτή που χρησιμοποιούν τα συμβατικά ταξί, δηλαδή να εξυπηρετηθεί πρώτα ο πελάτης που έχει κάνει τη νωρίτερη κλήση, αλλά έχει δειχθεί, (Bischoff & Maciejewski, 2016), πως οδηγεί σε γενικώς καλύτερα αποτελέσματα και αποφεύγεται η υπερδιαστασιολόγηση του στόλου των αυτόνομων ταξί.

3.3.4 Μοντέλα προσομοίωσης κυκλοφορίας

Κατά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης, οι πράκτορες πηγαίνουν στις δραστηριότητές τους με διάφορα μέσα μεταφοράς, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Αυτή την μετακίνηση την αναλαμβάνει ο **προσομοιωτής της κυκλοφορίας** του MATSim (**mobsim** – Mobility Simulation). Το κυκλοφοριακό μοντέλο που χρησιμοποιεί το MATSim, βασίζεται στις **ιδιότητες των συνδέσμων** του. Ο κάθε σύνδεσμος, όπως έχει αναφερθεί, διαθέτει χαρακτηριστικά όπως την ταχύτητα ελεύθερης ροής και τον μέγιστο ρυθμό ροής εξόδου (flow capacity) και μπορεί επίσης να υπολογιστεί το όριο αποθηκευτικής χωρητικότητας οχημάτων (storage capacity), που καθορίζει πόσα οχήματα μπορούν να βρίσκονται στον σύνδεσμο κάθε χρονική στιγμή. Αυτά είναι τα κύρια χαρακτηριστικά που αξιοποιεί ο προσομοιωτής ώστε να διαχειρίζεται την κυκλοφορία.

Για τη μέγιστη απόδοση σε ταχύτητα και χρόνο προσομοίωσης, το πρόγραμμα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να **μην γίνεται προσομοίωση της κάθε κίνησης**, κάθε πράκτορα για κάθε χρονική στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι το MATSim για κάθε δευτερόλεπτο που περνάει, που είναι συνήθως το χρονικό βήμα (Qsim) με το οποίο εκτελούνται οι προσομοιώσεις, ελέγχει αν έχει συμβεί κάποια αλλαγή στην

εκτέλεση των δραστηριοτήτων του πράκτορα και την καταγράφει. Αυτή η προσέγγιση της προσομοίωσης της κυκλοφορίας είναι πολύ χρήσιμη, καθότι υπολογιστικά οικονομική, για τις έρευνες που συνήθως χρησιμοποιείται το MATSim, οι οποίες είναι μακροσκοπικές. Έχουν όμως το μειονέκτημα πως δε μπορούν να γίνουν αναλύσεις μικροσκοπικής κλίμακας, όπως να βρεθεί σε κάθε σημείο η θέση ενός οχήματος.

Αυτή τη στιγμή υπάρχουν **δύο βασικοί προσομοιωτές** διαθέσιμοι στο MATSim: ο QSim και ο JDEQSim. Ο πολυνηματικός (multi-threaded) προσομοιωτής QSim, είναι ο προεπιλεγμένος του προγράμματος και αξιοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία. Βασική διαφορά τους, είναι ότι ο QSim βασίζεται σε χρονικά βήματα, συνήθως 1 δευτερόλεπτο, ενώ JDEQSim σε συμβάντα. Δηλαδή ο τελευταίος δεν θα ελέγχει ανά κάποιο χρόνο τις κινήσεις των πρακτόρων, αλλά τις ελέγχει μόνο όταν αυτοί οδηγούνται σε κάποιο επιθυμητό συμβάν.

Επίσης στον JDEQSim μπορεί να τεθεί ταχύτητα επιστροφής των κενών θέσεων στις ουρές των συνδέσμων, ενώ στον QSim δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα. Αυτό σημαίνει επί της ουσίας, πως ο QSim λειτουργεί με μονή ουρά, δηλαδή ένα όχημα που φεύγει από τον σύνδεσμο αφήνει άμεσα τη θέση του στην ουρά ανοιχτή για να την πάρει ένα άλλο, ενώ ο JDEQSim με διπλή ουρά, που σημαίνει ότι αυτή η θέση ταξιδεύει προς τα πίσω με κάποια ταχύτητα, που συνάδει περισσότερο με την πραγματικότητα. Η ταχύτητα αυτή προκύπτει από το μήκος ενός τυπικού αυτοκινήτου, 7,5 μέτρα, μαζί με ένα χρονικό κενό 2 δευτερολέπτων, μεταξύ των οχημάτων, και είναι ίση με 13,5 χλμ/ώρα.

Οι προσομοιωτές λειτουργούν με βάση τις ουρές που δημιουργούνται σε κάθε σύνδεσμο. Αυτό σημαίνει πως όταν ένα όχημα εισέρχεται σε έναν σύνδεσμο, μπαίνει στην ουρά αναμονής του. Για να προχωρήσει στον επόμενο σύνδεσμο, πρέπει πρώτα να περάσει ο απαιτούμενος χρόνος που θα χρειαζόταν το όχημα για να διανύσει το μήκος του συνδέσμου με την ταχύτητα ελεύθερης ροής του. Έχοντας περάσει αυτός ο χρόνος, αν η ουρά είναι άδεια, τότε το όχημα προχωράει στον επόμενο σύνδεσμο, αλλιώς περιμένει μέχρι να φύγουν τα οχήματα που βρίσκονται μπροστά του και μέχρι ο επόμενος σύνδεσμος να μπορεί να δεχτεί άλλα οχήματα.

Κατά την είσοδο στον επόμενο σύνδεσμο υπάρχουν **δύο σημαντικές παρατηρήσεις**. Αρχικά ενώ ο κάθε σύνδεσμος αναφέρει το όριο των οχημάτων που μπορούν να εξέρχονται από αυτόν ανά κάποια χρονική περίοδο, μέγιστος ρυθμός ροής εξόδου, δεν υπάρχει όριο στα οχήματα που μπορούν να εισέλθουν σε αυτόν (τουλάχιστον όχι στον προσομοιωτή QSim που αξιοποιήθηκε. Στον JDEQSim μπορεί να τεθεί). Επιπλέον, αν η αποθηκευτική χωρητικότητα του επόμενου συνδέσμου είναι γεμάτη, τότε ένα όχημα που θέλει να εισέλθει σε αυτόν, θα περιμένει. Όπως όμως θα αναφερθεί και παρακάτω, αν αυτό το όχημα περιμένει πολύ, τότε θα μεταφερθεί αναγκαστικά στον επόμενο σύνδεσμο, παραβιάζοντας την διαθέσιμη αποθηκευτική χωρητικότητά του.

Αρκετά σημαντικό είναι επίσης, ότι στο MATSim όλες **οι αλληλοεπιδράσεις των οχημάτων με το οδικό δίκτυο, γίνονται στο τέλος των συνδέσμων του**. Αυτό σημαίνει ότι όταν ένα όχημα μπαίνει στο οδικό δίκτυο, για παράδειγμα ο πράκτορας βγαίνει από το γκαράζ του με το όχημα του για να πάει στην δουλειά, τοποθετείται απευθείας στην κορυφή της ουράς και συνήθως προχωράει στον επόμενο σύνδεσμο στο αμέσως επόμενο χρονικό βήμα. Αντίστοιχα, ένα όχημα που θέλει να βγει από την κυκλοφορία, για παράδειγμα ο πράκτορας επιστρέφει και θέλει να μπει στο γκαράζ του, πρέπει να φτάσει στην κορυφή της ουράς του συνδέσμου, είτε το σπίτι του είναι στην αρχή είτε στο τέλος του οδικού τμήματος.

Τέλος, ο QSim διαθέτει ένα εύρος παραμέτρων, που βρίσκονται στο αρχείο διαμόρφωσης, στην ομάδα qsim, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την προσομοίωση. Κάποιες από αυτές είναι:

- **Οι συντελεστές της αποθηκευτικής χωρητικότητας οχημάτων και του μέγιστου ρυθμού ροής εξόδου των συνδέσμων (storageCapacity και flowCapacity αντίστοιχα):** που μπορούν να μειώσουν τις αντίστοιχες τιμές στο επιθυμητό ποσοστό. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, διότι στο

MATSim πολύ συχνά δεν χρησιμοποιείται ο πληθυσμός μια πόλης στο σύνολό του, δηλαδή στο 100%, μα σε ένα μικρότερο ποσοστό για υπολογιστικούς λόγους και λόγους χρόνου, αφού προσομοιώσεις στο σύνολο του πληθυσμού μπορεί να πάρουν αρκετές μέρες να ολοκληρωθούν. Ένα σύνηθες μέγεθος που επιλέγεται είναι το 10% του πληθυσμού. Σε αυτό το ποσοστό, οι παραπάνω συντελεστές θα πάρουν την τιμή 0.1.

- Η **κυκλοφοριακή δυναμική (trafficDynamics)**, που μπορεί να προσομοιωθεί ως εξής:
 - Με βάση τις ουρές, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, που είναι ο πιο συνηθισμένος και ερευνημένος τρόπος.
 - Με βάση τις δημιουργημένες “τρύπες” ή με κινηματικά κύματα, που είναι πιο ρεαλιστικές και λιγότερο ερευνημένες μέθοδοι. Προσομοιώνουν κάθε θέση οχήματος στην ουρά με μια “τρύπα” που όταν φεύγει ένα όχημα από έναν σύνδεσμο δεν διατίθεται κατευθείαν, ώστε να μπορεί ένα άλλο να πάρει τη θέση του στην ουρά, μα “κινείται” με μια ταχύτητα 13,5 χλμ/ώρα μέχρι να φτάσει στην άλλη μεριά του συνδέσμου και τότε γίνεται διαθέσιμη για κάποιο άλλο όχημα.
- Οι ενέργειες που μπορούν να γίνουν σε περίπτωση που το καθορισμένο **μέσο μεταφοράς ενός πράκτορα δεν βρίσκεται στη θέση του (vehicleBehavior)**, για παράδειγμα λείπει το αυτοκίνητό του. Αυτές είναι: να τηλεμεταφερθεί απευθείας στο ζητούμενο προορισμό, να περιμένει το όχημα ή να σταματήσει η προσομοίωση.
- Ο **χρόνος που ένα όχημα θεωρείται ‘κολλημένο’ (stuckTime)** στη θέση του και μεταφέρεται αναγκαστικά στον επόμενο σύνδεσμο, παρότι μπορεί να παραβιάζεται η αποθηκευτική χωρητικότητά του. Υπάρχει επίσης επιλογή να ματαιώσει το πλάνο του, που δεν προτείνεται. Αυτός ο χρόνος συνήθως τίθεται ίσος με 10 δευτερόλεπτα, και παρότι όχι ρεαλιστικός, παρέχει λύση σε καταστάσεις που κανένα όχημα δεν μπορεί να μετακινηθεί πλέον και έχει δειχθεί πως η παράλειψή του οδηγεί σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα.

3.3.5 Αρχεία που Εξάγονται

Μετά το τέλος της εκτέλεσης των προσομοιώσεων, το MATSim **εξάγει** σε έναν φάκελο, η τοποθεσία του οποίου καθορίζεται από τον χρήστη, **ένα σύνολο αρχείων**. Αυτά τα αρχεία αφορούν στην καταγραφή της διαδικασίας και των σφαλμάτων της εκτέλεσης των επαναλήψεων της προσομοίωσης, τα αποτελέσματα που προέκυψαν, κάποια τυπική ανάλυση αυτών, η οποία παράγεται αυτόματα από το πρόγραμμα, και όποια τυχόν πιο ειδική ανάλυση έχει υπαγορεύσει ο χρήστης. Στο φάκελο αυτό, υπάρχουν τα τελικά αρχεία που προέκυψαν από την εκτέλεση όλων των προσομοιώσεων, καθώς και επιμέρους φάκελοι με κάποια ξεχωριστά αρχεία για κάθε επανάληψη που έγινε, όπως κάποια γραφήματα.

Αναφορικά με την καταγραφή της εκτέλεσης των επαναλήψεων της προσομοίωσης, υπάρχει το αρχείο **logfile.log** που περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις διαδικασίες που έγιναν, όπως το ότι ξεκίνησε ή τελείωσε μία επανάληψη, καθώς και τον χρόνο που αυτές έγιναν, με ακρίβεια χιλιοστού του δευτερολέπτου. Περιέχει επίσης τα σφάλματα και τις προειδοποιήσεις που εμφανίζονται κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Αυτές οι πληροφορίες, για την καλύτερη επισκόπηση τυχών προβλημάτων, εξάγονται επίσης και στο αρχείο **logfileWarningsErrors.log**, το οποίο περιέχει μόνο αυτές.

Το κύριο αρχείο που περιέχει τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης, και αυτό που κατά κύριο λόγο είναι απαραίτητο για οποιαδήποτε περαιτέρω ανάλυση, είναι το αρχείο με τα συμβάντα, **output_events.xml**. Περιέχει όλα όσα έγιναν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στην πιο βασική τους μορφή. Αυτό σημαίνει πως περιέχει πληροφορίες οι οποίες, με ακρίβεια δευτερολέπτου, αναφέρουν τις στιγμές που ένας πράκτορας βγήκε από το σπίτι του, μπήκε στο όχημά του, το όχημα μπήκε σε ένα σύνδεσμο, βγήκε από αυτόν κ.λπ. Αναφέρονται λοιπόν η στιγμή που έγινε ένα συμβάν, ο τύπος του, για παράδειγμα αναχώρηση (departure), το όχημα που χρησιμοποιήθηκε, ο σύνδεσμος στον οποίο έγινε το συμβάν και άλλα. Αναλύοντας αυτό το αρχείο, το οποίο όπως είναι εμφανές μπορεί να αποκτήσει τεράστιο όγκο, ο χρήστης μπορεί να εξάγει όποια αποτελέσματα επιθυμεί.

```

1. <event time="0.0" type="actend" person="201240007721961" link="690324" facil-
   ity="home201202300028666" actType="home" />
2.   <event time="0.0" type="departure" person="201240007721961" link="690324" leg-
   Mode="car" />
3.   <event time="0.0" type="PersonEntersVehicle" person="201240007721961" vehi-
   cle="201240007721961" />
4.
5.   <event time="20.0" type="vehicle enters traffic" per-
   son="201240007721961" link="690324" vehicle="201240007721961" networkMode="car" relativePo-
   sition="1.0" />

```

Τυπική μορφή αρχείου 5: Αρχείο συμβάντων: συμβάντα.

Εξάγονται επίσης και αρχεία τα οποία δόθηκαν σαν εισαγωγή στο πρόγραμμα, είτε αυτά περιέχουν αλλαγές είτε όχι. Για παράδειγμα το αρχείο του οδικού δικτύου, **output_network.xml**, το πιθανότερο είναι πως δεν θα διαφοροποιηθεί κατά την διάρκεια των επαναλήψεων. Το αρχείο όμως του πληθυσμού και των πλάνων του, **output_plans.xml**, περιέχει, επιπλέον των αρχικών στοιχείων του, τα τελικά πλάνα των πρακτόρων, όπως αυτά έχουν διαμορφωθεί από την προσομοίωση, την βαθμολόγηση, τον επανασχεδιασμό και την επιλογή τους. Για παράδειγμα σε κάθε μετακίνηση έχει προστεθεί η αναλυτική διαδρομή που ακολουθήθηκε. Επίσης αν δεν είχε δοθεί αρχείο στόλου οχημάτων, ή αν δεν περιείχε όλα τα οχήματα που χρησιμοποιήθηκαν, τότε το σύνολο των οχημάτων της προσομοίωσης, εκτός των μέσων μαζικής μεταφοράς, εξάγονται στο αρχείο **output_vehicles.xml**. Στα οχήματα που δεν έχουν μοναδική ταυτότητα (id), δίνεται η ταυτότητα των πρακτόρων που τα χρησιμοποιήσαν.

Στην **τυπική ανάλυση των αποτελεσμάτων** που κάνει αυτόματα του MATSim, συγκαταλέγονται τα δεδομένα και το γράφημα των υπολογιστικών χρόνων εκτέλεσης διαφόρων διαδικασιών της προσομοίωσης, όπως της προσομοίωσης της κυκλοφορίας, τα δεδομένα της βαθμολόγησης κάθε επανάληψης, μέγιστη, μέση και ελάχιστη βαθμολογία, τα ποσοστά χρήσης των διαφόρων μέσων μεταφοράς και άλλα. Επίσης από το αρχείο διαμόρφωσης, μπορεί να γίνει η επιλογή να εξαχθεί και ένα αρχείο που περιέχει μετρήσεις του αριθμού των οχημάτων και του συνόλου της ώρας που αυτά μετακινήθηκαν, ανά σύνδεσμο.

Τέλος, αν αυτές οι πληροφορίες δεν είναι αρκετές για τον χρήστη, τότε **μπορεί να εξάγει οποιεσδήποτε πληροφορίες επιθυμεί**, γράφοντας την αναγκαία λογική σε κώδικα. Αυτό μπορεί να γίνει γράφοντας τον κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Java και ενσωματώνοντάς τον στην εκτέλεση του MATSim, έτσι ώστε τα ζητούμενα αρχεία να δημιουργηθούν με την ολοκλήρωση των επαναλήψεων της προσομοίωσης. Μπορεί επίσης να γίνει γράφοντας τον κώδικα σε οποιαδήποτε άλλη γλώσσα προγραμματισμού, αξιοποιώντας τα αρχεία που περιέχουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως αυτό που περιέχει τα συμβάντα, **output_events.xml**.

3.3.6 Δημιουργία ενός ρεαλιστικού Σεναρίου MATSim

Για τη ρεαλιστική προσομοίωση της κυκλοφορίας μιας περιοχής, με βάση της δραστηριότητες των πρακτόρων της, πρέπει να δημιουργηθεί ένα σύνολο αρχείων και ρυθμίσεων, κάποια βασικά εκ των οποίων αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή ένα σενάριο MATSim. Φυσικά ένα απλό σενάριο μπορεί να δημιουργηθεί με πολύ λιγότερα δεδομένα και κόπο από αυτά που θα αναφερθούν.

Πρέπει να σημειωθεί πως η σειρά και οι διαδικασίες δημιουργίας ενός τέτοιου σεναρίου, μπορεί να διαφέρουν από περίπτωση σε περίπτωση, ανάλογα με τις διαθέσιμες βάσεις δεδομένων και τις τεχνικές που πρόκειται να χρησιμοποιήσουν οι ερευνητές. Μια πλήρης εικόνα των διαφόρων τεχνικών που έχουν χρησιμοποιηθεί παρουσιάζεται στο βιβλίο του MATSim, ([Horni, Nagel, & Axhausen, The Multi-Agent Transport Simulations MATSim, 2016](#)), όπου δίνεται αναλυτική περιγραφή για έναν μεγάλο αριθμό σεναρίων χωρών και πόλεων.

Τα βασικά δεδομένα που χρειάζονται για τη δημιουργία των αρχείων εισόδου ενός ρεαλιστικού σεναρίου MATSim, είναι:

Το οδικό δίκτυο

Αφού αποφασιστεί η περιοχή μελέτης, πρέπει να γίνει η μοντελοποίηση του οδικού της δικτύου. **Τα δεδομένα για τη δημιουργία του εικονικού οδικού δικτύου μπορεί να προέρχονται** από διαθέσιμες πηγές του δήμου ή της χώρας στην οποία γίνεται η έρευνα, από πηγές με ελεύθερη διάθεση δεδομένων όπως το OpenStreetMap ή από εταιρείες που παράγουν τέτοιου είδους δεδομένα, όπως εταιρείες που παρέχουν υπηρεσίες πλοήγησης. Η εξαγωγή του οδικού δικτύου από τις παραπάνω πηγές, η διαμόρφωση και η διόρθωσή του ώστε να αποκτήσει την κατάλληλη μορφή και να μπορεί να αξιοποιηθεί από το MATSim, αναφέρονται στο βιβλίο του προγράμματος.

Ανάλογα με την έρευνα, μπορούν να δημιουργηθούν **εικονικά δίκτυα με μεγάλο εύρος λεπτομέρειας**, επεκτείνοντας ή εμπλουτίζοντας δηλαδή την βασική συγκοινωνιακή υποδομή για την προσομοίωση της κυκλοφορίας αυτοκινήτων. Αυτό, για παράδειγμα, μπορεί να σημαίνει την προσαρμογή των στάσεων και των γραμμών μέσων μαζικής μεταφοράς, όπως το λεωφορείο και το τραμ, στο υπάρχον οδικό δίκτυο με κόμβους και συνδέσμους που άλλοτε βρίσκονται σε συνύπαρξη με τα αυτοκίνητα και άλλοτε κινούνται σε ξεχωριστό δίκτυο. Επίσης μπορεί να σημαίνει τη δημιουργία ολοκληρωτικά ξεχωριστών κόμβων και συνδέσμων παράλληλα με του υπάρχοντος δικτύου, ώστε να υπολογιστούν οι αλληλεπιδράσεις των ροών πεζών ή ποδηλατών που σε άλλη περίπτωση θα τηλεμεταφέρονταν.

Ο πληθυσμός και οι χρήσεις γης

Για τις προσομοιώσεις, **το οδικό δίκτυο** είναι κάτι που στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν διαφοροποιείται κατά τις επαναλήψεις. Αντίστοιχα, **ο πληθυσμός** που περιλαμβάνει η περιοχή μελέτης καθώς και **οι χρήσεις γης**, είναι στοιχεία που, κατά κύριο λόγο, **δεν μεταβάλλονται**. Τα τρία αυτά στοιχεία αποτελούν την βάση για την εκτίμηση της ζήτησης και τελικά την πλήρη προσομοίωση της κυκλοφορίας.

Η δημιουργία του συνόλου των πρακτόρων, καθώς και των χαρακτηριστικών τους, όπως κατοχή διπλώματος οδήγησης, που θα αποτελέσουν τον πληθυσμό της προσομοίωσης, εξαρτάται από τα διαθέσιμα δεδομένα που έχει στη διάθεσή του ο ερευνητής. Αν υπάρχει μια πλήρης δημογραφική έρευνα για όλο τον πληθυσμό της περιοχής μελέτης, τότε ο ερευνητής δεν έχει παρά να μεταφράσει αυτή την έρευνα σε μορφή αναγνωρίσιμη από το MATSim. Σε άλλη περίπτωση, πρέπει να αξιοποιηθούν οι διαθέσιμες πηγές δεδομένων, όπως δειγματοληπτικές δημογραφικές έρευνες, και με κατάλληλες τεχνικές και μοντέλα, να παραχθεί ένας συνθετικός πληθυσμός με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά.

Για τον καθορισμό των **βασικών χρήσεων γης**, που είναι οι κατοικίες και οι τοποθεσίες εργασίας και εκπαίδευσης, η διαδικασία και πάλι εξαρτάται στα διαθέσιμα στοιχεία που είναι διαθέσιμα για την περιοχή μελέτης. Σε κάποιες χώρες, υπάρχουν εκτεταμένες έρευνες που γίνονται σε όλο τον πληθυσμό και καλύπτουν τις βασικές αυτές χρήσεις γης, ενώ παράλληλα αντιστοιχίζουν ένα μεγάλο μέρος του πληθυσμού σε διευθύνσεις κατοικίας, ή συγκεντρωτικές περιοχές με μικρό αριθμό κατοικιών, καθώς και σε χώρους εργασίας και εκπαίδευσης. Σε άλλες χώρες, υπάρχουν καταχωρημένες σε επίπεδο χώρας ή δήμου οι βασικές αυτές χρήσεις γης. Αν δεν υπάρχουν τέτοιες πλήρεις βάσεις δεδομένων, πρέπει να αξιοποιηθούν άλλες διαθέσιμες πηγές, όπως το OpenStreetMap, για να δημιουργηθεί μια εικόνα για τις τοποθεσίες κατοικίας, εργασίας και εκπαίδευσης. **Οι δευτερεύουσες χρήσεις γης**, όπως είναι τοποθεσίες για ψώνια, χώροι εστίασης και άλλα, συνήθως εξάγονται από πηγές του δήμου ή της χώρας, πηγές όπως το OpenStreetMap και εταιρείες παροχής υπηρεσιών πλοήγησης, και αναφέρονται συνήθως ως σημεία ενδιαφέροντος.

Τέλος, σημαντικό είναι **τα συστήματα των συντεταγμένων** που θα χρησιμοποιηθούν στη δημιουργία του εικονικού οδικού δικτύου και στον καθορισμό των χρήσεων γης, να ταιριάζουν μεταξύ τους.

Η ζήτηση για μετακίνηση

Η εκτίμηση της ζήτησης για μετακίνηση, είναι επί της ουσίας η εκτίμηση της αλληλουχίας των δραστηριοτήτων που θα κάνουν οι πράκτορες κατά τη διάρκεια της μέρας τους και η μετακίνησή τους σε αυτές. Και πάλι πρέπει να γίνει ο διαχωρισμός μεταξύ των κύριων και των δευτερευόντων δραστηριοτήτων. Αυτό είναι λογικό αφού οι αιχμές των κυκλοφοριακών φόρτων, στο περιβάλλον του MATSim που συνήθως προσομοιώνεται μια τυπική καθημερινή μέρα, παρουσιάζονται τις ώρες που γίνονται οι μετακινήσεις από και προς την δουλειά ή την εκπαίδευσή, δηλαδή το πρωί και το απόγευμα. Επίσης η μετακίνηση από και προς την εργασία, μπορεί να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη συνέπεια και ακρίβεια από μια μετακίνηση για ψώνια.

Οπότε **πλέον σημαντικό** στην εκτίμηση της ζήτησης για μετακίνηση, είναι η **αντιστοίχιση των πρακτόρων στις κατοικίες τους και στις τοποθεσίες της δουλειάς και της εκπαίδευσής τους**. Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες έχουν γίνει ειδικές έρευνες και υπάρχουν τα απαραίτητα δεδομένα, που αυτή η αντιστοίχιση και η δημιουργία του πληθυσμού, γίνονται στο ίδιο βήμα. Σε άλλες περιπτώσεις, η αντιστοίχιση αυτή πρέπει να γίνει με μοντέλα και δοκιμές και αξιοποιώντας εσωτερικά εργαλεία του MATSim, όπως είναι το Cadyts, σε συνδυασμό με την τροφοδότηση μετρήσεων κυκλοφοριακών μεγεθών της πραγματικής κυκλοφορίας.

Για να ολοκληρωθεί το πλάνο της ημέρας ενός πράκτορα, πρέπει να εκτιμηθούν και οι μετακινήσεις σε **δευτερεύουσες δραστηριότητες**. Σπανίως υπάρχουν δεδομένα για αυτές τις μετακινήσεις και αν υπάρχουν, όπως για παράδειγμα αν υπάρχουν κάποια αναλυτικά ημερολόγια μετακινήσεων, αυτά αφορούν μικρό κομμάτι του πληθυσμού. Έτσι το είδος και η αλληλουχία αυτών των δραστηριοτήτων πρέπει να μοντελοποιηθούν με βάση κοινωνικό-οικονομικά και άλλα κριτήρια, όπως την ελκυστικότητα κάθε δραστηριότητας.

Πραγματικές μετρήσεις κυκλοφοριακών συνθηκών

Για να συμπύπτει η εκτίμηση της ζήτησης για μετακίνηση που έγινε παραπάνω με την πραγματική ζήτηση, είναι αναγκαίο να υπάρχουν δεδομένα από μετρήσεις κάποιων βασικών μεγεθών της πραγματικής κυκλοφορίας των οχημάτων στην περιοχή μελέτης. Δεδομένα που μπορούν να αξιοποιηθούν είναι **μετρήσεις από σταθμούς μέτρησης κυκλοφοριακών μεγεθών και πίνακες Προέλευσης – Προορισμού** που έχουν δημιουργηθεί για την περιοχή. Με βάση αυτές τις πραγματικές μετρήσεις, πραγματοποιούνται δοκιμές, έλεγχος και διόρθωση των δημιουργημένων πλάνων των πρακτόρων, με εργαλεία όπως το Cadyts.

Τέλος, εκτός από τα παραπάνω βασικά δεδομένα, υπάρχουν και άλλα που μπορούν να μοντελοποιηθούν για να δημιουργηθεί μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση, όπως η δημόσια συγκοινωνία. Σημαντικές επίσης είναι οι μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα στις περιοχές με τις οποίες συνορεύει η περιοχή μελέτης καθώς και οι μετακινήσεις των οχημάτων μεταφοράς φορτίων, όπως είναι τα φορτηγά.

3.3.7 Οπτικοποίηση

Μετά τη δημιουργία και την προσομοίωση ενός σεναρίου MATSim, τα αποτελέσματα αποτελούνται, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, από κάποια αρχεία που περιέχουν μεταξύ άλλων όλες τις κινήσεις των πρακτόρων και των οχημάτων σε πολύ βασική μορφή, όπως “ο πράκτορας μπήκε στο όχημά του”. Ακόμα και με τη δημιουργία διαγραμμάτων και συγκεντρωτικών πινάκων, κάποιος που δεν έχει κυκλοφοριακές γνώσεις, αλλά θέλει να αποκτήσει μια ξεκάθαρη εικόνα για το πως εξελίσσεται η κυκλοφορία, θα δυσκολευτεί. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αλλά και σε περιπτώσεις που ο

ερευνητής επιθυμεί να παρατηρήσει ζωντανά την εξέλιξη της κυκλοφορίας, είναι **πολύ χρήσιμη η οπτικοποίηση** των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Αυτή τη στιγμή για το MATSim, υπάρχουν δύο εναλλακτικές οπτικοποίησης.

Αρχικά υπάρχει το **OTFVis** (On the Fly Visualizer), που είναι μια επέκταση ελεύθερου κώδικα που προσφέρει το MATSim. Με αυτή την επέκταση, ο χρήστης μπορεί να εισάγει το οδικό δίκτυο και το αρχείο των συμβάντων και να παρακολουθήσει την προσομοίωση της εικονικής μέρας των πρακτόρων ζωντανά, καθώς και να εξάγει βίντεο της προσομοίωσης. Υπάρχουν και άλλες δυνατότητες, όπως να γίνουν ειδικές αναλύσεις, για παράδειγμα να εμφανιστεί η συνολική διαδρομή που έχει ακολουθήσει ένας πράκτορας, αλλά το περιβάλλον εργασίας και η δομή της επέκτασης κάνουν την αξιοποίηση τους κάπως δύσκολη.

Το **Simunto Via**, είναι ένα πρόγραμμα που διατίθεται επί πληρωμή, το οποίο παρέχει όλες τις δυνατότητες του OTFVis, μαζί με αρκετές άλλες, σε ένα φιλικό περιβάλλον για το χρήστη. Μπορούν να πραγματοποιηθούν κάθε είδους αναλύσεις στα δεδομένα που έχουν δοθεί, όπως ανάλυση κυκλοφορίας συνδέσμου ή κόμβου, ανάλυση επισκεψιμότητας κάποιας εγκατάστασης (facility), να παραχθούν συγκεντρωτικοί πίνακες και χάρτες, να τοποθετηθεί ο πραγματικός χάρτης πίσω από το εικονικό δίκτυο και άλλα. Υπάρχουν επίσης ειδικές επιλογές για την ανάλυση των μέσων μαζικής μεταφοράς, την ανάλυση των εκπομπών καυσαερίων και τη δημιουργία πινάκων Προσέλευσης – Προορισμού. Το Via διαθέτει μια δωρεάν έκδοση με περιορισμένες δυνατότητες.

3.4 Θεμελιώδες Διάγραμμα Φόρτου - Πυκνότητας

Σε αυτήν την εργασία, βασικό μέσο για την αξιολόγηση των διαφορετικών περιπτώσεων κυκλοφορίας που θα προκύψουν από τις προσομοιώσεις, είναι το μακροσκοπικό θεμελιώδες διάγραμμα φόρτου – πυκνότητας. Παρακάτω θα δοθεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο των θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής σε επίπεδο οδού, ([Φρατζεσκάκης, Γκόλιας, & Πιτσιάβα-Λατινοπούλου, 2009](#)), καθώς και τα χαρακτηριστικά του MATSim που επηρεάζουν την δημιουργία τους.

3.4.1 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. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην μακροσκοπική κίνηση των οχημάτων. Τα τρία βασικά μακροσκοπικά κυκλοφοριακά μεγέθη είναι: ο κυκλοφοριακός φόρτος, η μέση ταχύτητα και η πυκνότητα. Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία τους, θα εξεταστούν τα αντίστοιχα μεγέθη σε επίπεδο οδού.

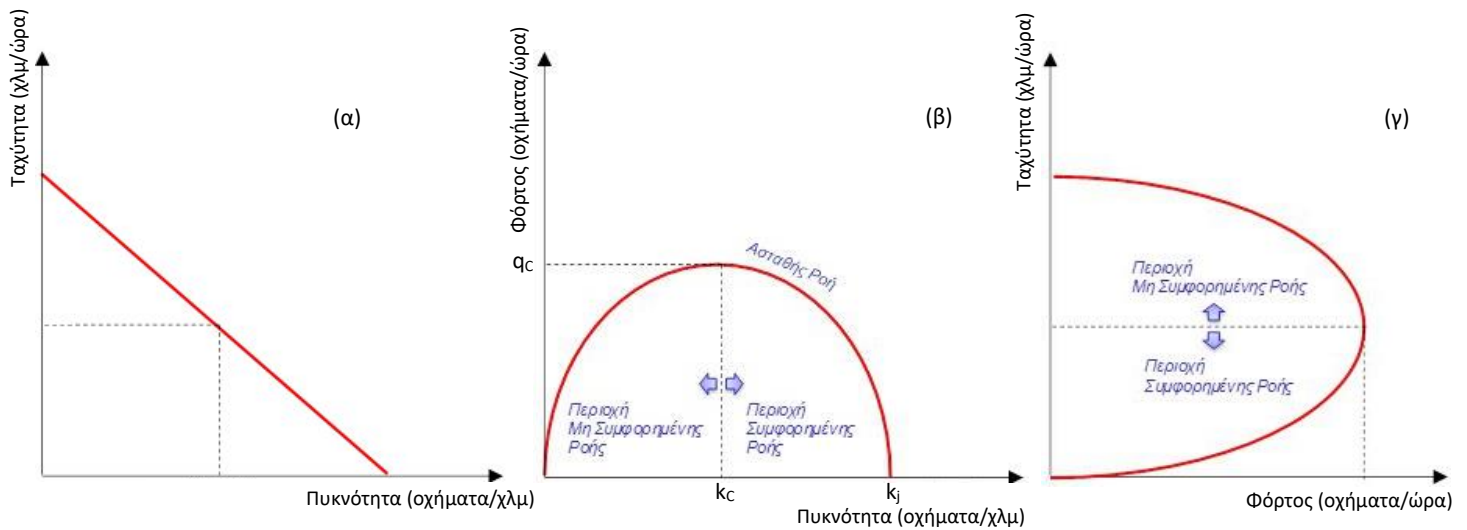
Με τη θεώρηση ότι η ταχύτητα και η πυκνότητα συνδέονται με μια γραμμική σχέση, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7(α), παράγονται τα εξής θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής, σε επίπεδο οδού:

- Ταχύτητας – Πυκνότητας (Διάγραμμα 7(α))
- Ταχύτητας – Φόρτου (Διάγραμμα 7(β))
- Φόρτου – Πυκνότητας (Διάγραμμα 7(γ))

Από αυτά τα διαγράμματα, αναλυτικότερα θα εξεταστεί το διάγραμμα Φόρτου – Πυκνότητας, διότι από αυτό προκύπτουν σημαντικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας, όπως η κυκλοφοριακή ικανότητα. Αυτά τα χαρακτηριστικά αποτυπώνουν ικανοποιητικά την απόδοσή της κυκλοφορίας και μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους όταν εξετάζονται διαφορετικές συνθήκες κυκλοφορίας του ίδιου οδικού δικτύου.

Έτσι, στο **Διάγραμμα 7(β)**, που παρουσιάζεται η τυπική μορφή της σχέσης Φόρτου – Πυκνότητας, **εμφανίζονται δύο διαφορετικές περιοχές**. Στα αριστερά υπάρχει η περιοχή μη συμφορημένης ή ελεύθερης ροής και δεξιά η περιοχή συμφορημένης ροής ή κορεσμού. Όπως είναι προφανές, για

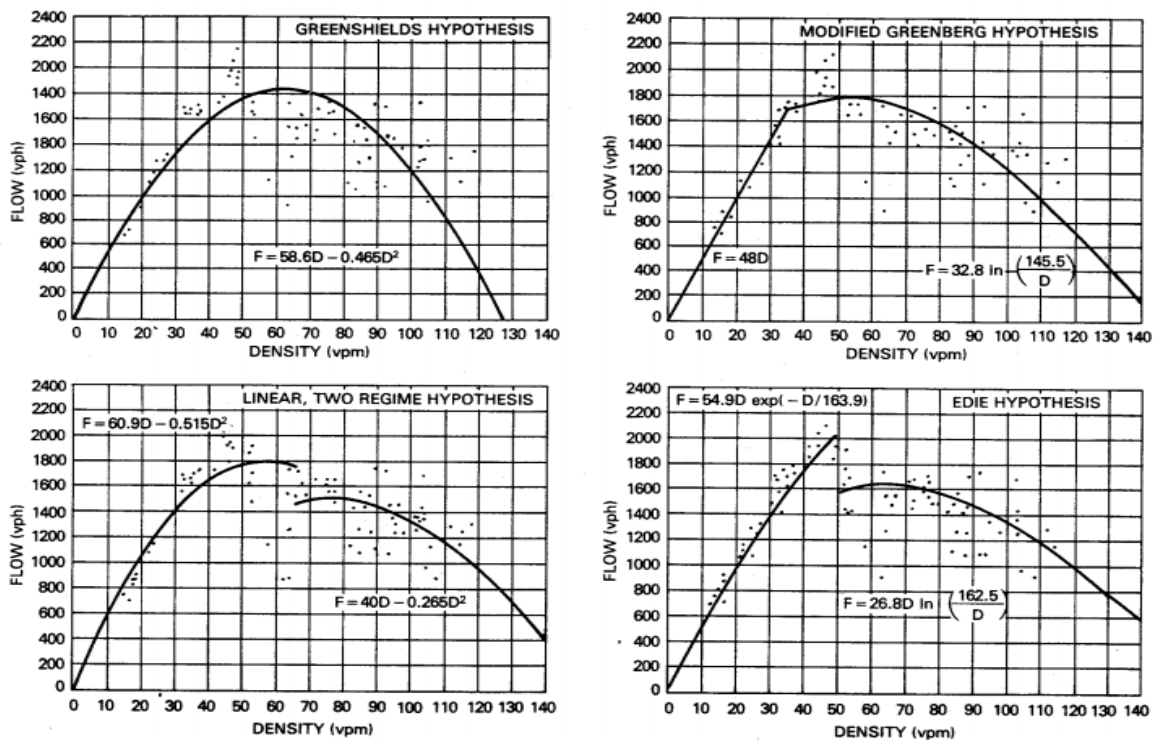
μηδενικό φόρτο, δηλαδή όταν κανένα όχημα δεν περνάει από το οδικό τμήμα που εξετάζεται, η πυκνότητα του τμήματος είναι επίσης μηδενική. Μηδενικός φόρτος όμως παρουσιάζεται και στο σημείο k_j του διαγράμματος, δηλαδή της μέγιστης πυκνότητας κορεσμού. Αυτό σημαίνει πως το οδικό τμήμα είναι πλήρως κατειλημμένο από οχήματα και πως αυτά είναι ακινητοποιημένα.



Διάγραμμα 7: Θεμελιώδη Διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής: (α) Σχέση Ταχύτητας – Πυκνότητας, (β) Σχέση Φόρτου – Πυκνότητας, (γ) Σχέση Ταχύτητας – Φόρτου (Πηγή: (Φρατζεσκάκης, Γκόλιας, & Πιτσιάβα-Λατινοπούλου, 2009)).

Στη μέση του Διαγράμματος 7(β), υπάρχουν τα σημεία q_c , που είναι ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος ή η κυκλοφοριακή ικανότητα, και k_c , που είναι η κρίσιμη πυκνότητα ή το ήμισυ της πυκνότητας κορεσμού. Γίνεται η παρατήρηση πως ξεκινώντας με μηδενικό φόρτο και μηδενική πυκνότητα και αυξάνοντας τον φόρτο, η πυκνότητα αυξάνεται επίσης, μέχρι το σημείο του μέγιστου φόρτου και της κρίσιμης πυκνότητας. Μέχρι δηλαδή το σημείο του μέγιστου φόρτου που μπορεί να εξυπηρετήσει το οδικό τμήμα, δηλαδή την κυκλοφοριακή του ικανότητα. Από εκείνο το σημείο και ύστερα, τα οχήματα αρχίζουν και συσσωρεύονται, η πυκνότητα συνεχίζει να αυξάνεται, η ταχύτητα συνεχίζει να μειώνεται λόγω της γραμμικότητας, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7(α), και ο φόρτος μειώνεται.

Φυσικά όλα τα παραπάνω έχουν προκύψει από τη θεώρηση πως οι θεμελιώδεις σχέσεις μεταξύ των μακροσκοπικών μεγεθών της κυκλοφορίας προκύπτουν από ομογενή και στάσιμη κυκλοφορία. Όπως είναι προφανές, πραγματικές μετρήσεις της κυκλοφορίας δείχνουν πως αυτή δεν είναι ούτε ομογενής ούτε στάσιμη. Προσπάθειες δημιουργίας του διαγράμματος φόρτου – πυκνότητας από πραγματικά στοιχεία, έχουν την μορφή του Διαγράμματος 8. Για παράδειγμα, στο διάγραμμα που βρίσκεται στη 2^η σειρά, 2^η στήλη, φαίνεται η ασυνεχής συμπεριφορά στις υψηλές τιμές του φόρτου. Τέλος, αναφέρεται πως οι σύγχρονες πρακτικές μελετούν τα διαγράμματα φόρτου – κατάληψης έναντι των διαγραμμάτων φόρτου – πυκνότητας, εξαιτίας της ευκολότερης μέτρησης της κατάληψης, τα οποία παρουσιάζουν παρόμοια μορφή και στα οποία εμφανίζεται επίσης η διάκριση των περιοχών συμφορημένης και μη συμφορημένης ροής.



Διάγραμμα 8: Πειραματικά διαγράμματα φόρτου – πυκνότητας (Πηγή: Μη καθορισμένη)

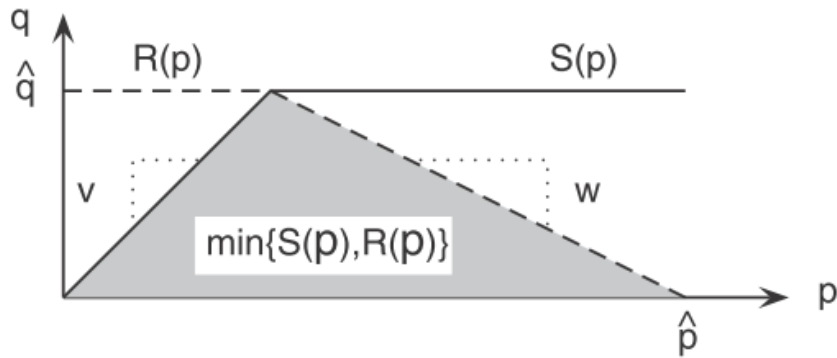
3.4.2 Διάγραμμα Φόρτου – Πυκνότητας και MATSim

Το θεμελιώδες διάγραμμα φόρτου – πυκνότητας στο περιβάλλον του MATSim, καθορίζεται από το ελάχιστο των συναρτήσεων αποχώρησης $S(\rho)$ και άφιξης $R(\rho)$ των οχημάτων στον σύνδεσμο. Εξαρτάται από:

- Την μέγιστη ταχύτητα v , ή ταχύτητα ελεύθερης ροής, που είναι χαρακτηριστικό του κάθε συνδέσμου.
- Την μέγιστη πυκνότητα ρ , που προκύπτει διαιρώντας το συνολικό αριθμό των λωρίδων του συνδέσμου, το με το μήκος οχήματος (το οποίο είναι επίσης χαρακτηριστικό του κάθε συνδέσμου, effectivecellsize). Αυτή η πυκνότητα αφορά οχήματα/μέτρο. Σε οχήματα/χιλιόμετρο θα ήταν, για μία λωρίδα, 1000μέτρα οδού/7,5μέτρα οχήματος, δηλαδή 133,3 οχ/χλμ.
- Την ταχύτητα της επιστροφής των κενών θέσεων στις ουρές των συνδέσμων w , δηλαδή την ταχύτητα με την οποία αφού αποχωρήσει ένα όχημα από την ουρά του συνδέσμου, η θέση του μπορεί να γίνει διαθέσιμη για κάποιο άλλο όχημα.

Όπως έχει αναφερθεί στο 3.3.4 στον προσομοιωτή κυκλοφορίας που χρησιμοποιήθηκε, QSim, δεν μπορεί να τεθεί ταχύτητα επιστροφής των κενών θέσεων στις ουρές των συνδέσμων. Επίσης δεν μπορεί να τεθεί όριο στον αριθμό των οχημάτων που εισέρχονται ταυτόχρονα στον σύνδεσμο, που θα έπρεπε να είναι ο μέγιστος ρυθμός ροής του συνδέσμου, που είναι η κορυφή του τριγωνικού Διαγράμματος 9. Για πλήρη συνέπεια με τις πραγματικές συνθήκες, θα έπρεπε να υπάρχουν και οι δύο παραπάνω δυνατότητες.

Έτσι, χρησιμοποιώντας τον QSim, το αντίστοιχο διάγραμμα που μπορεί να δημιουργηθεί για κάποιο σύνδεσμο αποτελείται μόνο από την καμπύλη $S(\rho)$, δηλαδή την συνάρτηση αποχώρησης των οχημάτων από τον σύνδεσμο. Επιπλέον, όταν η πυκνότητα πλησιάσει το μέγιστο της, τότε η καμπύλη αυτή θα πάει προς το μηδέν πολύ απότομα.



Διάγραμμα 9 : Θεμελιώδες Διάγραμμα Φόρτου – Πυκνότητας του MATSim (Πηγή: (Horni, Nagel, & Axhausen, *The Multi-Agent Transport Simulations MATSim*, 2016))

Παρόλα αυτά, στους στόχους αυτής της εργασίας δεν είναι η δημιουργία των θεμελιωδών διαγραμμάτων για κάποια συγκεκριμένα οδικά τμήματα, μα η αξιολόγηση της κυκλοφορίας όλου του εξεταζόμενου οδικού δικτύου. Έτσι θα γίνει η προσπάθεια εξαγωγής των επιθυμητών Μακροσκοπικών Θεμελιωδών Διαγραμμάτων Φόρτου – Πυκνότητας (MFD – Macroscopic Fundamental Diagram) του οδικού δικτύου, για κάθε εξεταζόμενο σενάριο.

Αξιοποιώντας τη δομή και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του MATSim, είναι δυνατόν να εξαχθούν δεδομένα όπως ο μέσος φόρτος και η μέση πυκνότητα των συνδέσμων σε επίπεδο δικτύου, ώστε να **αξιοποιηθούν οι εξισώσεις** (2.1-4) του Κεφαλαίου 2.3 . Επίσης είναι δυνατόν να μετρηθούν η απόσταση και ο χρόνος μετακίνησης των οχημάτων, ώστε να αξιοποιηθούν οι εξισώσεις (2.5-6), χωρίς να χρειάζονται κάποια προσαρμογή, καθώς τα αποτελέσματα αφορούν στο σύνολο των οχημάτων που κινούνται στο δίκτυο.

Κεφάλαιο 4: Δεδομένα Εισαγωγής και Προσομοιώσεις

4.1 Αρχικό Σενάριο

Για την εξέταση των ζητούμενων κυκλοφοριακών συνθηκών, αξιοποιήθηκε **το λεπτομερές σενάριο MATSim της Ζυρίχης**, το οποίο είναι μέρος του σεναρίου ολόκληρης της Ελβετίας, (Rieser-Schussler, Bosch, Horni, & Balmer, 2016). Τα σενάρια αυτά, μαζί με πολύτιμες συμβουλές και εκτενή καθοδήγηση, αποτελούν ευγενική προσφορά των Dr. Milos Balac και Sebastian Horl, μέσω του πανεπιστημίου ETH Zurich και συγκεκριμένα του τμήματος Institute for Transport Planning and Systems.

Οι χάρτες και κάποια διαγράμματα που θα εμφανιστούν παρακάτω δημιουργήθηκαν μέσω του **Simunto Via**, (Simunto, 2020). Η πλήρης έκδοση, με όλες τις λειτουργίες που προσφέρει το πρόγραμμα, ήταν, για την περίοδο της εκπόνησης της Διπλωματικής εργασίας, ευγενική προσφορά του Dr. Marcel Rieser.

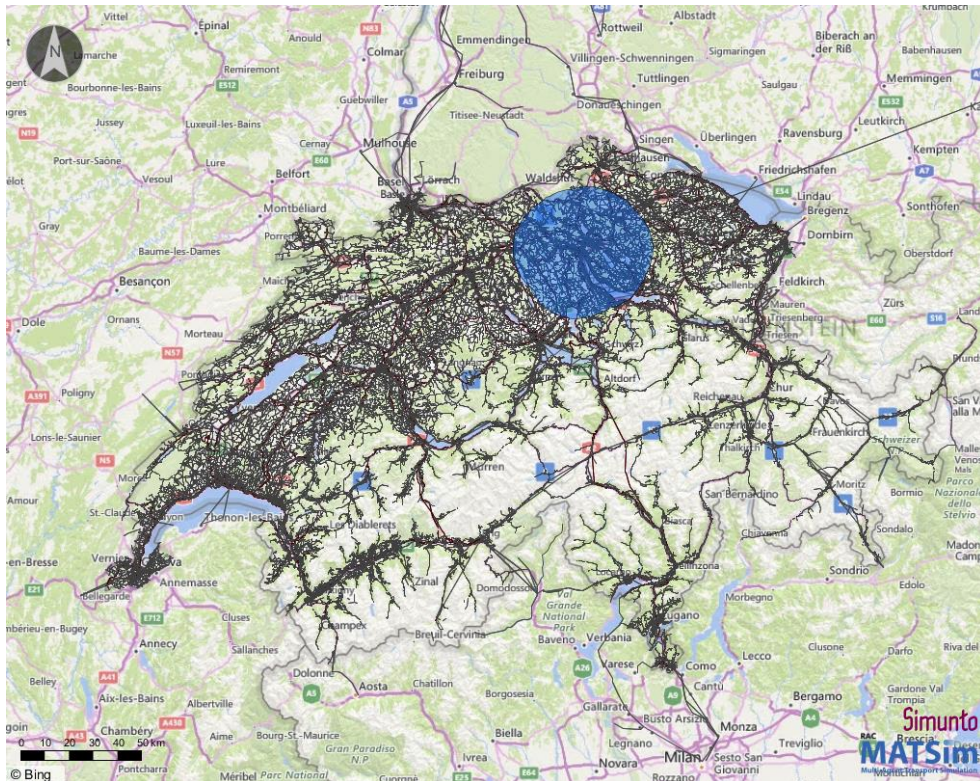
Οι βάσεις δεδομένων για τους κώδικες σε γλώσσα προγραμματισμού java, που αξιοποιήθηκαν για την επεξεργασία και την κατανόηση στοιχείων του εξεταζόμενου σεναρίου MATSim, αποκτήθηκαν μέσω του Github και επεξεργάστηκαν μέσω του προγράμματος Eclipse, (Eclipse, 2020). Συγκεκριμένα αυτές οι βάσεις δεδομένων αποκτήθηκαν μέσω των αποθετηρίων (repositories) matsim-code-examples, (GitHub, 2020), και eqasim-java, (GitHub, 2020). Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε και το API (Application Programming Interface – Διασύνδεση προγραμματισμού εφαρμογών) του MATSim, (MATSim, 2020), για επιπλέον κατανόηση του κώδικα.

Το σενάριο της Ελβετίας, Εικόνα 3, αποτελείται από περίπου 7.5εκ πράκτορες, που προέκυψαν από την δημογραφική έρευνα της Ελβετίας του 2000. Η περιοχή μελέτης αφορά όλη τη χώρα, αλλά οι χώρες που συνορεύει δεν παρείχαν πληροφορίες προσφοράς και ζήτησης των μετακινήσεων, γεγονός που δυσκολεύει τις συνοριακές μελέτες. Οι τοποθεσίες των κατοικιών καθορίστηκαν σε επίπεδο εκταρίου και της εργασίας σε επίπεδο δήμου, μέσω ενός ειδικού τμήματος της ίδιας δημογραφικής έρευνας.

Το οδικό δίκτυο προέκυψε από δεδομένα κρατικών πηγών και εταιρειών παροχής υπηρεσιών πλοήγησης και χαρτών, με βασικά μέσα που προσομοιώνονταν να είναι το αυτοκίνητο και τα μέσα μαζικής μεταφοράς, ενώ το περπάτημα και το ποδήλατο τηλεμεταφέρονταν. Η ζήτηση για μετακίνηση προέκυψε από εθνικές έρευνες μετακινήσεων. Τέλος ο έλεγχος και η προσαρμογή των δεδομένων σε πραγματικές μετρήσεις έγινε αναφορικά με την χρήση των μέσων μεταφοράς και την απόσταση της μετακίνησης, μέσω 600 συνδέσμων σε όλη την Ελβετία και για μία τυπική εργάσιμη μέρα.

Παραγόμενο από το παραπάνω σενάριο της Ελβετίας, είναι **το σενάριο της Ζυρίχης**, Εικόνες 3 και 4, με μπλε χρώμα. Το σενάριο αυτό είναι εμπλουτισμένο με δεδομένα που υπήρχαν μόνο για αυτή τη μικρότερη περιοχή, όπως δεδομένα σηματοδοτών και μετακινήσεις οχημάτων μεταφοράς φορτίων. Η εξαγωγή του μικρότερου σεναρίου της Ζυρίχης από το σενάριο ολόκληρης της χώρας, οδήγησε σε **δύο εκδοχές του σεναρίου**. Η μία αφορούσε την ύπαρξη και τη μετακίνηση όλων των πρακτόρων που περνούσαν κάποια στιγμή μέσα από την περιοχή μελέτης, που είναι και αυτή που χαίρει της προτίμησης όσων χρησιμοποιούν το σενάριο και περιλαμβάνει περίπου 2εκ πράκτορες, και η δεύτερη μόνο όσους έμεναν μέσα στη περιοχή για το σύνολο της μέρας.

Με την προσθήκη των μετακινήσεων που αφορούσαν οχήματα για μεταφορές φορτίων, προστέθηκαν 180χιλ πράκτορες ακόμα. Ο έλεγχος και η προσαρμογή του σεναρίου στην πραγματική κυκλοφορία, έγινε με μετρήσεις 123 συνδέσμων και 12χλμ ακτίνα γύρω από το κεντρικό σημείο, ώστε να αποφευχθούν συνοριακά προβλήματα ζήτησης.



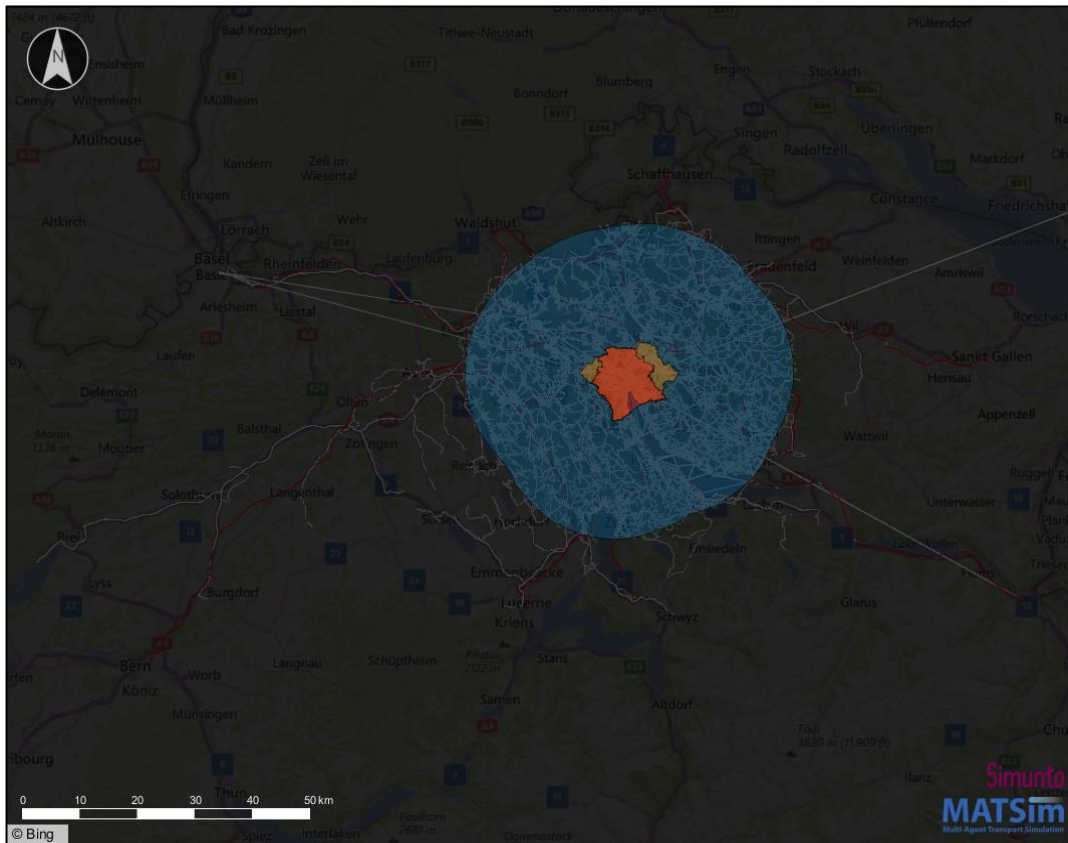
Εικόνα 3: Οδικό Δίκτυο MATSim της Ελβετίας. Με μπλε, 30χλμ γύρω από κεντρικό σημείο της Ζυρίχης

Η περιοχή μελέτης αυτού του σεναρίου, που είναι και η περιοχή μελέτης αυτής της εργασίας, είναι ένας κύκλος με ακτίνα 30 χλμ και εμβαδόν 2324,6 χλμ², γύρω από ένα κεντρικό σημείο της πόλης. Πιο συγκεκριμένα, Εικόνα 4, περιλαμβάνει την ίδια την πόλη της Ζυρίχης, με κόκκινο χρώμα και εμβαδόν 87,9 χλμ², κάποιες πυκνοκατοικημένες περιοχές γύρω της, με πορτοκαλί χρώμα και πρόσθετο εμβαδόν 35,3 χλμ², και μια πρόσθετη μεταβατική περιοχή 20 χλμ γύρω από τις δύο προηγούμενες περιοχές, με μπλε χρώμα.

Το Σύστημα Γεωγραφικών Συντεταγμένων (CRS) κατά την προσομοίωση του σεναρίου δίνεται ως Atlantis, με συντεταγμένες που οδηγούν κάπου στη μέση του Ατλαντικού, καθώς έτσι είχε καθιερωθεί στις αρχές του MATSim για την περιγραφή περιοχών που δεν υπάρχουν, όπως κάποια παραδείγματα που διατίθενται. Το πραγματικό CRS για την Ελβετία, που χρησιμοποιείται στην οπτικοποίηση, είναι το EPSG:2056.

Το εξεταζόμενο σενάριο δημιουργήθηκε από το μεγαλύτερο σενάριο της Ελβετίας, με την εισαγωγή ενός αρχείου που να καθορίζει γεωγραφικά την επιθυμητή περιοχή, τύπου shapfile, σε κώδικα που μπορεί να διαμορφώσει το αρχικό σενάριο για την μειωμένη περιοχή. Σε αυτήν την εργασία η διαδικασία έγινε μέσω του RunScenarioCutter το οποίο είναι μέρος του Eqasim-java, (GitHub, 2020). Για την παραγωγή του μειωμένου σεναρίου, προσομοιώθηκε μια πλήρης μέρα του μεγαλύτερου σεναρίου και έγινε η καταγραφή των μετακινήσεων που σχετίζονται με την πόλη της Ζυρίχης.

Στη συνέχεια, διαμορφώθηκε το οδικό δίκτυο το οποίο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4 επεκτείνεται και εκτός της περιοχής μελέτης, προκύπτει από τις μετακινήσεις που είτε έχουν κάποιο άκρο τους μέσα της, ή απλώς περνούν από αυτήν κάποια στιγμή μέσα στην μέρα. Επίσης, διαμορφώθηκαν όλα τα υπόλοιπα αρχεία που διέθετε το μεγαλύτερο σενάριο, όπως αρχεία πληθυσμού, μέσων μαζικής μεταφοράς, κατοικιών κλπ., ώστε να περιέχουν τους πράκτορες, τις τοποθεσίες δραστηριοτήτων κλπ., που αφορούν μόνο στο μειωμένο σενάριο.



Όσες δραστηριότητες συμβαίνουν εντός της μπλε περιοχής, που είναι η περιοχή μελέτης, θεωρούνται εσωτερικές δραστηριότητες και λαμβάνουν το πραγματικό όνομα της δραστηριότητας, για παράδειγμα σπίτι-home. Αν συμβαίνουν εκτός, τότε θεωρούνται εξωτερικές και λαμβάνουν την κοινή ονομασία, outside, άσχετα από το είδος της δραστηριότητας. Αν δύο διαδοχικές δραστηριότητες βρίσκονται εκτός, τότε η μετακίνηση του πράκτορα μεταξύ των δύο αντίστοιχων τοποθεσιών γίνεται με μέσο μεταφοράς το outside, που πραγματοποιείται με τηλεμεταφορά. Οι μετακινήσεις μεταξύ δύο δραστηριοτήτων εντός της περιοχής μελέτης και εκείνων που η μία βρίσκεται εντός της περιοχής μελέτης και η άλλη εκτός, γίνονται με κάποιο από τα λοιπά μέσα μεταφοράς που είναι διαθέσιμα, για παράδειγμα αυτοκίνητο-car.

Για τις πρώτες δοκιμαστικές προσπάθειες επεξεργασίας και προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε το σενάριο της περιοχής μελέτης για το **0.1% του πληθυσμού** της. Το σενάριο αυτό περιέχει 2021 πράκτορες και 61 πράκτορες που απεικονίζουν την ύπαρξη οχημάτων μεταφοράς φορτίων. Πιο αναλυτικά στοιχεία και στατιστικά για τα χαρακτηριστικά του σεναρίου θα δοθούν παρακάτω για το σενάριο που αφορούσε το 10% του πληθυσμού, το οποίο μπορεί να διαθέτει μεγαλύτερο πληθυσμό αλλά κάποια άλλα χαρακτηριστικά του είναι κοινά με του 0.1%, όπως τα διαθέσιμα μέσα μετακίνησης και το οδικό δίκτυο. Το σενάριο του 0.1% αξιοποιήθηκε όπου χρειάστηκε να γίνουν δοκιμές για την λειτουργία κάποιου κώδικα ή κάποιας αλλαγής στην προσομοίωση. Το σενάριο 10%, που προφανώς παρέχει μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην κυκλοφορία, χρησιμοποιήθηκε για να προκύψουν **τα τελικά μεγέθη**.

Για την προσομοίωση των μέσων μαζικής μεταφοράς, εκτός από το ίδιο το μέσο το οποίο ονομάζεται pt (public transport), το οποίο μπορεί να είναι κάποιο τρένο για παράδειγμα, υπάρχουν και κάποια άλλα χαρακτηριστικά που είναι χρήσιμο να αναφερθούν. Το περπάτημα του πράκτορα προς το σημείο που θα χρησιμοποιήσει τα μέσα μαζικής μεταφοράς, όπως κάποιο σταθμό τρένου, ονομάζεται access_walk. Η αποχώρηση του από κάποιο τέτοιο σταθμό και η μετάβασή του στον τελικό του προορισμό ονομάζεται egress_walk. Η μετακίνηση του με τα πόδια από τον έναν σταθμό σε

κάποιον άλλο, ονομάζεται `transit_walk`. Τέλος, ενώ τα προηγούμενα αφορούσαν τρόπους μετακίνησης, υπάρχει και μία δραστηριότητα που ονομάζεται `pt_interaction`, και αφορά στις διάφορες αλλαγές μέσω μαζικής μεταφοράς που μπορεί να κάνει ο πράκτορας μέχρι να φτάσει στον προορισμό του. Επομένως ένας αν μια μετακίνηση με `access_walk` οδηγήσει σε μια δραστηριότητα `pt_interaction`, αυτό σημαίνει πως ο πράκτορας έφτασε σε κάποιο σταθμό, π.χ. τρένου.

Επειδή το εξεταζόμενο σενάριο είναι υπό κλίμακα 10%, τα μέσα μαζικής μεταφοράς δεν μπορούν να προσομοιωθούν στην κυκλοφορία, και άρα να την επηρεάσουν, οπότε τηλεμεταφέρονται. Παραμένουν όμως ως διαθέσιμα μέσα μεταφοράς, λαμβάνοντας κάποιο ποσοστό των μετακινήσεων και διαθέτοντας ακριβή στοιχεία τους, όπως χρόνος και απόσταση μετακίνησης.

Η υπηρεσία αυτόνομων ταξί που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία, όπως έχει αναφερθεί και στο 3.3.3 έχει πάρει την τελική τους μορφή από τον Sebastian Horl, (Horl, 2017). Στο αποθετήριο του Eqsim, υπάρχουν κομμάτια κώδικα τα οποία αφορούν αποκλειστικά στην λειτουργία και άλλα χαρακτηριστικά αυτής της υπηρεσίας. Αυτός ο κώδικας δεν επεξεργάστηκε, μα χρησιμοποιήθηκε ως έχει.

Το σενάριο αποτελείται από τα **αρχεία**: `facilities.xml`, `households.xml`, `network.xml`, `population.xml`, `transit_schedule.xml`, `transit_vehicles.xml`. Από αυτά τα αρχεία, τα οποία έχουν επεξηγηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, το μόνο το οποίο υπέστη επεξεργασία για τις ανάγκες της εργασίας, ήταν το `population.xml`, δηλαδή αυτό του πληθυσμού. Επισκόπηση και ανάλυση δεδομένων όμως, έγινε και σε όλα τα υπόλοιπα αρχεία, εκτός των αρχείων `transit`, δηλαδή των μέσων μαζικής μεταφοράς, που δεν προσομοιώθηκαν στην κυκλοφορία.

Τέλος, όπως έχει αναφερθεί και στην Εισαγωγή, θα γίνεται απευθείας ανάθεση των επιθυμητών μετακινήσεων στο μέσο μεταφοράς των αυτόνομων ταξί, οπότε δεν θα χρησιμοποιηθεί κάποια μέθοδος **βαθμολόγησης**. Παρακάτω, θα παρουσιαστούν κάποια συγκεντρωτικά στοιχεία που περιγράφουν σημαντικά χαρακτηριστικά του σεναρίου για το 10% του πληθυσμού.

4.1.1 Χαρακτηριστικά Οδικού Δικτύου

Το οδικό δίκτυο του σεναρίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, αποτελείται από κόμβους και συνδέσμους και καλύπτει μία μεγαλύτερη περιοχή από την εξεταζόμενη περιοχή μελέτης της πόλης της Ζυρίχης. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά του, Πίνακας 1.

Επειδή τα **μέσα μαζικής μεταφοράς (Μ.Μ.Μ)** δεν επηρεάζουν την κυκλοφορία στην προσομοίωση, δεν θα αναλυθούν εκτενώς τα χαρακτηριστικά που τα αφορούν. Στο οδικό δίκτυο, υπάρχουν κάποιοι σύνδεσμοι, οι οποίοι αφορούν μόνο γραμμές Μ.Μ.Μ, περιέχοντας και ειδικά μέσα μεταφοράς, όπως για παράδειγμα γόνδολα. Στον πίνακα έχει γίνει ο διαχωρισμός από αυτούς τους αποκλειστικούς συνδέσμους για τα Μ.Μ.Μ και δεν έχουν αναφερθεί τα ειδικά μέσα μεταφοράς. Τα ποσοστά που αναφέρονται στους α/α 2 και 4 του πίνακα, προκύπτουν ως προς τους συνολικούς κόμβους και συνδέσμους αντίστοιχα, ενώ αυτά στους α/α 17 και 18, ως προς τους συνδέσμους εκτός των αποκλειστικών για Μ.Μ.Μ.

Η πυκνότητα του οδικού δικτύου, στον α/α 11, υπολογίστηκε με βάση το εμβαδόν της περιοχής μελέτης, α/α 5. Το οδικό δίκτυο επεκτείνεται και πέρα από αυτή την κυκλική περιοχή, με μπλε χρώμα στην Εικόνα 4, αν και όχι πολύ πυκνά, οπότε η πυκνότητα που υπολογίστηκε είναι μικρότερη στην πραγματικότητα, πιθανώς λίγο λιγότερο από 9χλμ/χλμ².

Στις τρεις τελευταίες σειρές του πίνακα φαίνεται πως οι σύνδεσμοι που μπορούν να δεχτούν αυτοκίνητα, επιβάτη αυτοκινήτου, αυτόνομο ταξί και όχημα μεταφοράς φορτίου (`truck`) είναι οι ίδιοι. Στη τελευταία σειρά, αθροίστηκαν, χωρίς να αναλυθούν, όλοι οι σύνδεσμοι που μπορούν να δεχτούν τα αναφερόμενα Μ.Μ.Μ, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Σημειώνεται πως οι αριθμοί που αναφέρονται υπολογίστηκαν ως ξεχωριστά αθροίσματα για κάθε μέσο, όπως το αυτοκίνητο. Δηλαδή οι σύνδεσμοι δεν είναι ανάγκη να μπορούν να δεχτούν μόνο τα μέσα του α/α 17 ή

18. Μπορεί ένας σύνδεσμος να μπορεί να δεχτεί, αυτοκίνητο, επιβάτη αυτοκινήτου, λεωφορείο και τραμ, για παράδειγμα.

Για να περιέχονται και οι σύνδεσμοι που μπορούν να δεχτούν αυτόνομα ταξί, ο υπολογισμός των παρακάτω χαρακτηριστικών έγινε αξιοποιώντας ένα οδικό δίκτυο που προέκυψε μετά την προσομοίωση των σεναρίων. Τέλος, ο υπολογισμός των μεγεθών έγινε με κώδικα γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού rython, που υπάρχει στα Παραρτήματα, και αξιοποιώντας το πρόγραμμα Spyder, (Spyder, 2020).

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά Οδικού Δικτύου

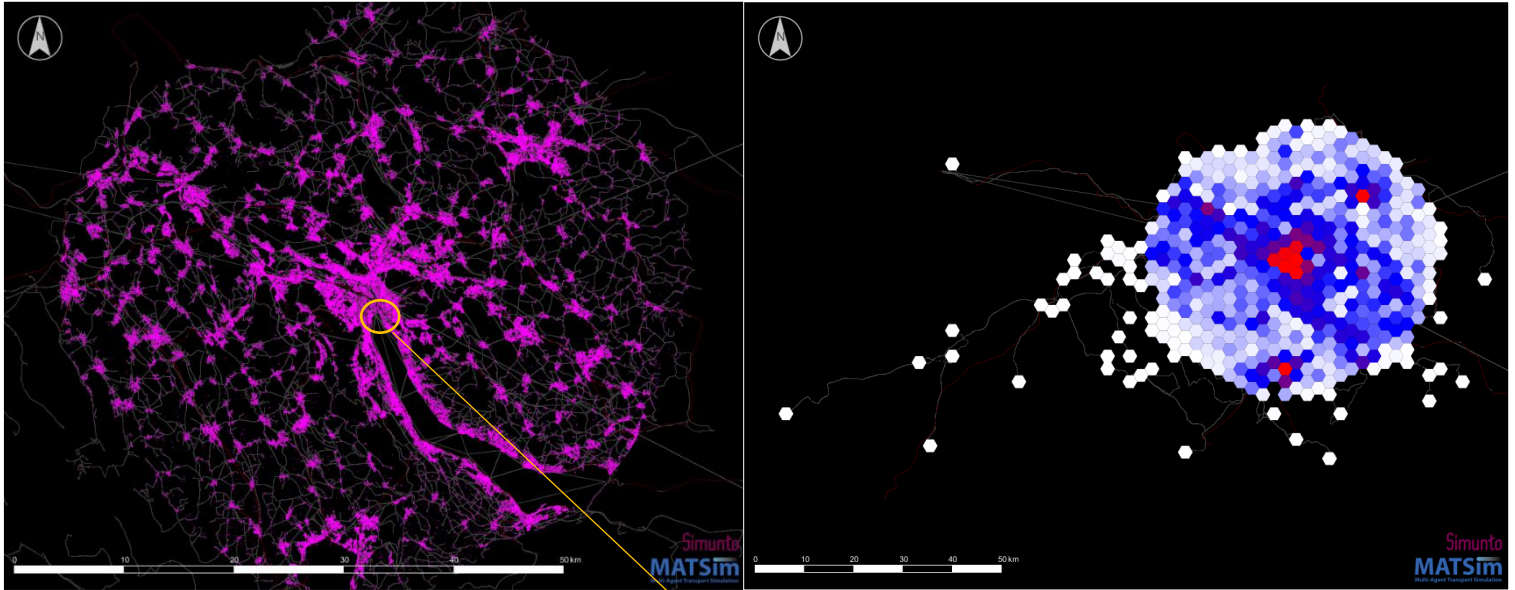
α/α	Χαρακτηριστικό	Αριθμός	Ποσοστό %	Ελάχιστο	Μέσο	Μέγιστο
1	Συνολικοί Κόμβοι	77.476				
2	Κόμβοι εκτός των αποκλειστικών για Μ.Μ.Μ	77.208	99,65%			
3	Συνολικοί Σύνδεσμοι	166.207				
4	Σύνδεσμοι εκτός των αποκλειστικών για Μ.Μ.Μ	165.290	99,45%			
5	Εμβαδόν περιοχής μελέτης σε χλμ ²	2.324,6				
6	Μήκος οχήματος σε μέτρα	7,5				
7	Πλάτος λωρίδας σε μέτρα	3,75				
8	Χρόνος υπολογισμού ρυθμού ροής σε ώρες	1:00				
9	Συνολικό μήκος συνδέσμων σε χλμ	21.736				
10	Πυκνότητα οδικού δικτύου σε χλμ/χλμ ²	9,35				
11	Μήκος συνδέσμων σε μέτρα			2,8	139,5	3569.7
12	Λωρίδες μιας κατεύθυνσης			1	3	6
13	Μέγιστος ρυθμός ροής εξόδου σε οχήματα/ώρα			300	3.892	12.000
14	Ταχύτητα Ελεύθερης Ροής σε μέτρα/δευτερόλεπτο			2,8	24,1	55,5
15	Ταχύτητα Ελεύθερης Ροής σε χλμ/ώρα			10,1	86,8	200,0
16	Σύνδεσμοι, εκτός αποκλειστικών Μ.Μ.Μ, που μπορούν να δεχτούν τα εξής μεταφορικά μέσα:					
17	Car, Car_passenger, AV, Truck	155.836	94,28%			
18	Αθροιστικά για: Train, Pt, Rail, Light_Rail, Bus, Tram	93.782	56,74%			

4.1.2 Τοποθεσίες Δραστηριοτήτων

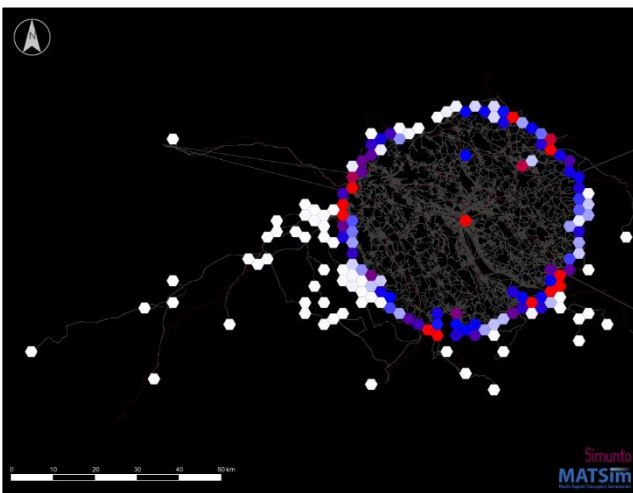
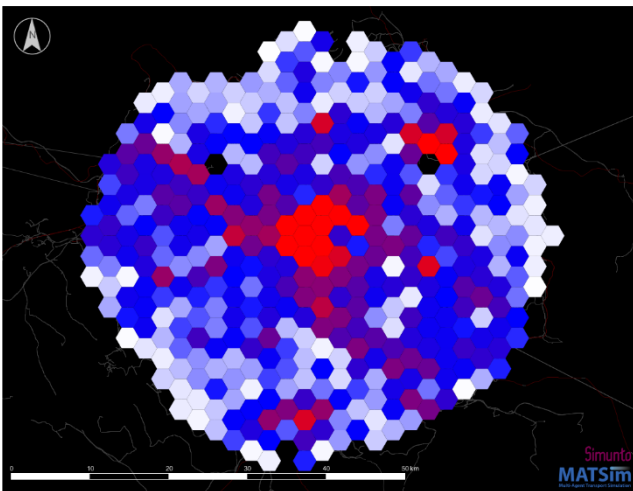
Στο οδικό δίκτυο που παρουσιάστηκε παραπάνω, οι πράκτορες θα μετακινηθούν για να εκτελέσουν τις δραστηριότητές τους, οι οποίες βρίσκονται σε διάφορες τοποθεσίες ή αλλιώς εγκαταστάσεις-facilities. Παρακάτω, **Εικόνα 5**, φαίνονται οι εγκαταστάσεις αυτές με ροζ. Στην ίδια εικόνα φαίνεται επίσης η πυκνότητα αυτών των εγκαταστάσεων, οι οποίες μπορεί αφορούν οποιαδήποτε δραστηριότητα, όπως κατοικία, δουλειά, outside κλπ. Στη χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιεί το Via, τα χρώματα αναμειγνύονται-παρεμβάλλονται στα όρια των διαφορετικών τιμών, για πιο ομοιόμορφο αποτέλεσμα (interpolation). Κατά τα άλλα, η τιμή κάθε χρώματος αποτελεί κάτω όριο, εκτός από την πρώτη, που αφορά τιμές μόνο μικρότερες από αυτή.

Στην **Εικόνα 7**, φαίνεται από πιο κοντινή απόσταση η διάταξη αυτών των εγκαταστάσεων. Γίνεται επίσης κατανοητό πως ένα ζεύγος συντεταγμένων, μπορούν να υπάρχουν πάνω από μία εγκαταστάσεις, όπως στην εικόνα που υπάρχουν 4, και σε κάθε εγκατάσταση μπορούν να πραγματοποιούνται πάνω από μια δραστηριότητες, όπως για παράδειγμα κατοικία (home), δουλειά (work) ή άλλο (other).

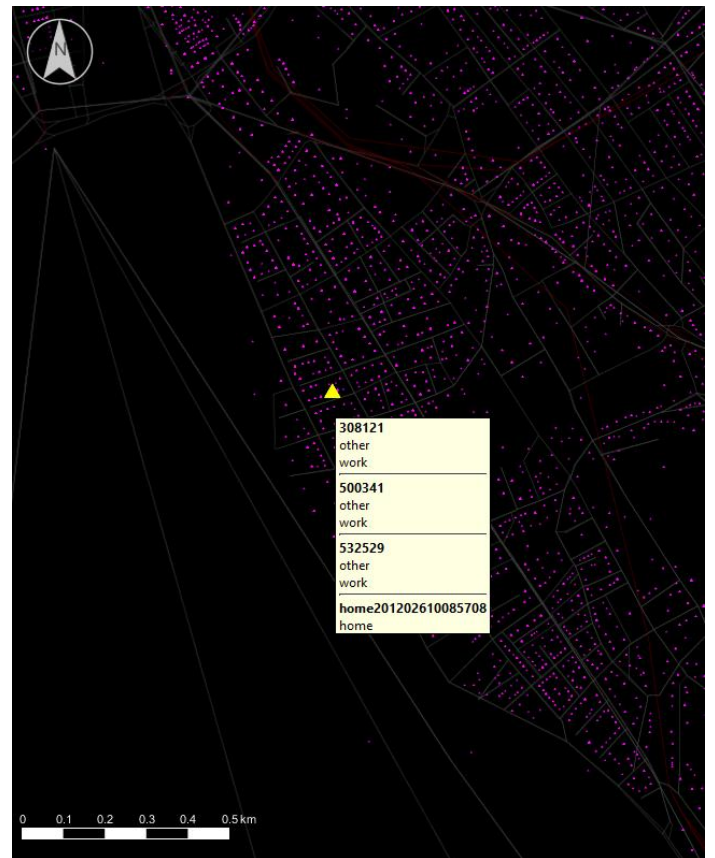
Τέλος, στην **Εικόνα 6**, εμφανίζονται οι πυκνότητες των δραστηριοτήτων του αρχικού σεναρίου, ώστε γίνει σαφής η χωρική τοποθέτηση σημαντικών δραστηριοτήτων όπως της κατοικίας-home και εκείνων εκτός της περιοχής μελέτης-outside. Φαίνεται πως οι δραστηριότητες κατοικίας είναι αρκετά περισσότερες μέσα στην Ζυρίχη, ενώ εκείνες εκτός της περιοχής μελέτης, προφανώς, συσσωρεύονται περιμετρικά της.



Εικόνα 4: Αριστερά, με ροζ οι εγκαταστάσεις των δραστηριοτήτων (facilities). Δεξιά, το άθροισμα των εγκαταστάσεων ακτίνας 1500μ και σε χρωματική κλίμακα: άσπρο: 0+, μπλε: 500-5000, κόκκινο: >5000 εγκαταστάσεις. Μέσω Via.



Εικόνα 5: Πάνω, το άθροισμα των δραστηριοτήτων που αφορούν στην κατοικία-home σε ακτίνα 1500μ. Κάτω, το άθροισμα όων είναι outside, με την ίδια ακτίνα. Ίδια χρωματική κλίμακα με Εικόνα 5. Μέσω Via.



Εικόνα 6: Μία εγκατάσταση μπορεί να εξυπηρετεί πάνω από μία δραστηριότητες. Μέσω Via.

4.1.3 Χαρακτηριστικά Αρχικού Πληθυσμού

Οι πράκτορες του εξεταζόμενου πληθυσμού (10%) έχουν λεπτομερή δημογραφικά στοιχεία. Στον παρακάτω **Πίνακα**, φαίνονται διάφορα στατιστικά στοιχεία που δίνουν μια συνολική εικόνα για αυτά τα στοιχεία. Για τους α/α 2-9 και 11-13, τα ποσοστά προέκυψαν ως προς τους Πράκτορες Συνολικά, για τους 15-20, ως προς το Σύνολο των Δραστηριοτήτων που υπάρχουν στα πλάνα των πρακτόρων στο αρχικό σενάριο και για τα 22-28, ως προς το Σύνολο των Μετακινήσεων. Χρήσιμο επίσης χαρακτηριστικό του πληθυσμού είναι η πυκνότητά του. Στο αρχείο των κατοικιών (households.xml), καταγράφεται αναλυτικά πόσοι πράκτορες διαμένουν σε κάθε κατοικία, μεταξύ άλλων στοιχείων. Μια ικανοποιητική εκτίμηση για αυτήν την πυκνότητα, μπορεί να προκύψει από την Εικόνα 6, που φαίνεται το άθροισμα των δραστηριοτήτων που αφορούν στην κατοικία-home.

Στον α/α 29, παρουσιάζονται τα **αυτοκίνητα** που προβλέπεται να χρησιμοποιήσουν οι πράκτορες στα πλάνα τους. Υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα αυτοκίνητα που χρησιμοποιήθηκαν από κάθε ξεχωριστό πράκτορα στο πλάνο του, μόνο την πρώτη φορά που τα χρησιμοποίησε. Ο κώδικας, σε java, για τον υπολογισμό όλων των παρακάτω μεγεθών εμφανίζεται στα Παραρτήματα.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά και στατιστικά στοιχεία αρχικού πληθυσμού.

α/α	Χαρακτηριστικό	Αριθμός	Ποσοστό %
1	Πράκτορες Συνολικά	209.391	
2	Οχήματα μεταφοράς φορτίου - freights	6.656	
3	Άντρες	102.698	49,0%
4	Γυναίκες	106.693	51,0%
5	Διαθέσιμο αυτοκίνητο (πάντα, κάποιες φορές)	146.085	69,8%
6	Μπορούν να είναι επιβάτες αυτοκινήτων	45.388	21,7%
7	Εργαζόμενοι	128.335	61,3%
8	Έχουν δίπλωμα οδήγησης	151.445	72,3%
9	Εκτός της εξεταζόμενης περιοχής - outside	62.089	29,7%
10	Ηλικιακές Ομάδες:		
11	0-17	33.440	16,0%
12	17-54	118.561	56,6%
13	>55	57.390	27,4%
14	Σύνολο Δραστηριοτήτων:	1.058.052	
15	Σπίτι - home	451.678	42,7%
16	Δουλειά - work	127.343	12,0%
17	Εκπαίδευση - education	35.307	3,3%
18	Εκτός περιοχής - outside	191.165	18,1%
19	Διασκέδαση - ψώνια - άλλο (leisure, shop, other)	244.161	23,1%
20	Φόρτωση - Εκφόρτωση (freights load - unload)	8.398	0,8%
21	Σύνολο Μετακινήσεων:	842.005	
22	Με αυτοκίνητο - car	312.803	37,1%
23	Ως επιβάτης αυτοκινήτου - car_passenger	71.949	8,5%
24	Με Μ.Μ.Μ - pt	138.612	16,5%
25	Με μέσο εκτός περιοχής - outside	49.829	5,9%
26	Με όχημα μεταφοράς φορτίου - truck	6.872	0,8%
27	Με ποδήλατο - bike	50.178	6,0%
28	Με περπάτημα - walk	211.762	25,1%
29	Συνολικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιήθηκαν στο αρχικό σενάριο	95.560	

Τέλος, μέσω κάποιου κώδικα ή πολύ απλούστερα μέσω του Via, είναι δυνατόν να γίνει η επισκόπηση της αλληλουχίας των δραστηριοτήτων των πρακτόρων (**activity chains**) και της συχνότητας εμφάνισης κάθε αλληλουχίας. Για παράδειγμα 6.5% των πρακτόρων έχουν την αλληλουχία κατοικία-->δουλειά-->κατοικία. Αυτό είναι και το μεγαλύτερο ποσοστό ίδιας αλληλουχίας που εμφανίζεται. Όσοι πράκτορες δεν είναι οχήματα μεταφοράς φορτίων (freights), ξεκινούν και τελειώνουν με δραστηριότητα κατοικίας ή outside.

4.2 Μεθοδολογία Δημιουργίας Νέων Σεναρίων

Έχοντας περιγράψει αναλυτικά τα αρχικά δεδομένα του σεναρίου, **επόμενο βήμα είναι η κατάλληλη επεξεργασία** τους, ώστε να προκύψουν τα ζητούμενα μεγέθη της εργασίας. Οι αλλαγές που έγιναν σε αυτά τα δεδομένα, αφορούν στα πλάνα των πρακτόρων του πληθυσμού και τα διαθέσιμα μέσα μεταφοράς. Συγκεκριμένα, η επεξεργασία των πλάνων έγινε μόνο στα μέσα μεταφοράς με τα οποία πηγαίνουν οι πράκτορες στις δραστηριότητές τους. Επίσης, τα διαθέσιμα μέσα μεταφοράς (legs) που μπορούν να χρησιμοποιήσουν οι πράκτορες στο αρχικό σενάριο, είναι αυτά που εμφανίζονται στους α/α 22-28 του παραπάνω πίνακα.

Το νέο μέσο που θα προστεθεί στα παραπάνω, είναι η υπηρεσία αυτόνομων ταξί. Τα πλάνα των πρακτόρων θα **τροποποιηθούν**, ώστε κάθε διαφορετικό νέο σενάριο να υφίσταται κάποιο ποσοστό αντικατάστασης των μετακινήσεων με συμβατικά μέσα, από μετακινήσεις με αυτόνομα ταξί. Τελικά τα σενάρια που θα δημιουργηθούν θα περιέχουν όλες τις παραπάνω πληροφορίες του αρχικού σεναρίου και θα διαφέρουν μεταξύ τους μόνο αναφορικά με το ποσοστό της αντικατάστασης των μετακινήσεων με συμβατικά μέσα από αυτόνομα και το μέγεθος του στόλου της υπηρεσίας αυτόνομων ταξί.

Για τα **τελικά σενάρια** που θα προσομοιωθούν, τα ποσοστά αντικατάστασης των συμβατικών μετακινήσεων από αυτόνομα ταξί θα είναι 5%, 20%, 40%, 60%, 80% και 100%. Οι διαθέσιμοι στόλοι της υπηρεσίας προέκυψαν υπολογίζοντας πόσα οχήματα χρειάζονται για καλύψουν τις υπολογισμένες μετακινήσεις κάθε ποσοστού αντικατάστασης, με την υπόθεση πως κάθε μετακίνηση με αυτόνομο ταξί χρειάζεται 25 λεπτά και ότι οι μετακινήσεις συγκεντρώνονται στις 18 από τις 30 ώρες. Τα 25 λεπτά αποτελούν μια μέση τιμή που προκύπτει από την εξέταση διάφορων ερευνών πάνω στους χρόνους μετακίνησης με αυτόνομα οχήματα ή ταξί, (Moreno A. , Michalski, LLorca, & Moeckel, 2018). Έτσι οι διαθέσιμοι στόλοι θα είναι 800, 3000, 6000, 9000, 12000 και 15000 οχήματα. Τελικά, ο συνδυασμός των παραπάνω οδηγεί στην δημιουργία 36 καινούργιων σεναρίων. Υπενθυμίζεται πως εφόσον τα σενάρια που εξετάζονται είναι σε κλίμακα 10%, οι παραπάνω στόλοι αφορούν πραγματικούς αριθμούς οχημάτων δέκα φορές μεγαλύτερους.

Η τροποποίηση των πλάνων των πρακτόρων, αντικαθιστώντας τα επιθυμητά ποσοστά των μετακινήσεων, έγινε με κάποιους **περιορισμούς**:

- 1) Οι μετακινήσεις των οχημάτων μεταφοράς φορτίων, δεν μπορούν να μετατραπούν σε μετακινήσεις με αυτόνομα οχήματα.
- 2) Οι μετακινήσεις με μέσο μεταφοράς το outside, δεν μπορούν να μετατραπούν σε μετακινήσεις με αυτόνομα οχήματα. Επίσης ούτε οι μετακινήσεις που ξεκινούν ή καταλήγουν σε δραστηριότητα εκτός της περιοχής μελέτης – outside, μπορούν να δεχτούν την μετατροπή.
- 3) Τα μέσα μεταφοράς (legs) Μ.Μ.Μ, περπάτημα και επιβάτης αυτοκινήτου μπορούν να αντικατασταθούν χωρίς περιορισμούς. Για το αυτοκίνητο και το ποδήλατο όμως, που απαιτούν ένα φυσικό μέσο για να γίνει η μετακίνησή τους, πρέπει να εξασφαλιστεί πως η χρήση τους θα είναι ρεαλιστική. Αυτό σημαίνει, πως αν ένας πράκτορας ξεκινήσει από το σπίτι του με αυτοκίνητο, οι υπόλοιπες μετακινήσεις που είναι προγραμματισμένος να κάνει με αυτοκίνητο μέχρι και να επιστρέψει στο σπίτι, δε μπορούν να μετατραπούν σε μετακίνηση με αυτόνομο όχημα. Αντίστοιχα αν ξεκινήσει από το σπίτι του και επιλέξει να μετακινηθεί με την υπηρεσία των αυτόνομων

οχημάτων, δεν μπορεί ξαφνικά να κάνει κάποια μετακίνηση με το αυτοκίνητο που έχει αφήσει σπίτι. Ομοίως και για το ποδήλατο.

- 4) Τέλος, επειδή τα σενάρια θα προσομοιωθούν χωρίς κάποιο σύστημα βαθμολόγησης, ώστε να μπορεί το σύστημα των πρακτόρων να φτάσει σε μια συνολικά βέλτιστη κατάσταση, τα αρχικά αυτά πλάνα περιέχουν κάποιες μη ρεαλιστικές μετακινήσεις. Μία από αυτές που παρατηρήθηκε, ήταν να διανύουν ακόμα και 100χλμ απόσταση περπατώντας. Προσπαθώντας να δημιουργηθούν όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικές συνθήκες γίνεται, η μετακίνηση με περπάτημα για πάνω από 4χλμ θα ανατίθεται αναγκαστικά στην υπηρεσία αυτόνομων ταξί, για δραστηριότητες εντός της περιοχής μελέτης και στο μέσο μεταφοράς outside, για δραστηριότητες εκτός αυτής.

Ο 2^{ος} περιορισμός, βασίζεται στην σκέψη πως αυτή η υπηρεσία είναι διαθέσιμη μόνο για την περιοχή μελέτης. Έτσι μπορεί να εξυπηρετήσει μόνο τις μετακινήσεις που η προέλευση και ο προορισμός τους είναι μέσα σε αυτήν.

Τα πλάνα του πληθυσμού του αρχικού σεναρίου είχαν για κάθε πράκτορα τουλάχιστον ένα πλάνο, που αποτελούσαν από τις δραστηριότητες και τα αντίστοιχα μέσα μεταφοράς. Για να γίνουν οι αντικαταστάσεις των συμβατικών μέσων από αυτόνομα, έπρεπε αρχικά να μπορέσει ο κώδικας να διαβάσει τις αλληλουχίες των δραστηριοτήτων και των μετακινήσεών τους με τα μέσα μεταφοράς. Οι μετακινήσεις περιείχαν αναλυτικές πληροφορίες για την κίνησή τους, όπως την διαδρομή και την απόσταση που διανύθηκε. Παρόλα αυτά, εκτός από το περπάτημα, που σύμφωνα με τον 4^ο περιορισμό χρειάζεται να υπάρχει γνώση για την απόσταση της μετακίνησης, για τα υπόλοιπα μέσα μεταφοράς αρκεί να υπάρχει το όνομα του μέσου, π.χ. car για αυτοκίνητο ή an για αυτόνομο ταξί, και τα υπόλοιπα τα αναλαμβάνει ο προσομοιωτής κυκλοφορίας του MATSim.

Έτσι, για τις ζητούμενες αντικαταστάσεις, γράφτηκαν κάποιοι κώδικες σε γλώσσα προγραμματισμού java και εκτελέστηκαν οι παρακάτω διαδικασίες:

- A. Πρόβλημα στην παραπάνω διαδικασία αποτελούσε το γεγονός πως η χρήση των M.M.M περιγραφόταν από τη χρήση διάφορων μέσων μεταφοράς, access_walk, egress_walk, transit_walk, pt, καθώς και δημιουργούσε κάποιες επιπλέον δραστηριότητες, τις **pt interaction**. Έτσι, ως πρώτο βήμα έπρεπε να αφαιρεθούν οι επιπλέον δραστηριότητες και τα επιπλέον μέσα μεταφοράς από τα πλάνα των πρακτόρων, που αφορούσαν την χρήση των M.M.M, και να αντικατασταθούν απλώς από ένα μέσο μεταφοράς, το pt. Κατά την προσομοίωση, το MATSim δημιουργεί ξανά τις αναγκαίες επιπλέον πληροφορίες.
- B. Παράλληλα, έπρεπε μόνο για το μέσο μεταφοράς του **περπατήματος**, να διατηρηθεί η **διαδρομή της μετακίνησης**, ώστε να μπορεί να καταγραφεί η απόσταση της. Στον παρακάτω αλγόριθμο, σε ψευδογλώσσα, που παρουσιάζεται μέσω της ιστοσελίδας ([planetB, 2020](#)), φαίνεται ο τρόπος που έγιναν αυτές οι δύο διαδικασίες, δημιουργώντας έναν νέο πληθυσμό με τις ζητούμενες ιδιότητες. Ο πλήρης κώδικας δεν θα προστεθεί στα Παραρτήματα, διότι περιέχει παρόμοιες πρακτικές με άλλον που θα αναφερθεί παρακάτω.

1. Διάβασε τον πληθυσμό
2. Δημιούργησε έναν νέο πληθυσμό
3. Αρχή_επανάληψης για κάθε πράκτορα του πληθυσμού
4. Δημιούργησε ένα νέο πράκτορα
5. Αντέγραψε όλα τα δημογραφικά στοιχεία του πράκτορα στον νέο πράκτορα
6. Δημιούργησε ένα νέο πλάνο
7. Αρχή_επανάληψης για κάθε στοιχείο του επιλεγμένου πλάνου του πράκτορα
8. Αν το στοιχείο είναι μετακίνηση τότε
9. προσωρινή_μεταβλητή_διαδρομής ← διαδρομή της μετακίνησης
10. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← όνομα του μέσου μεταφοράς
11. Αν το στοιχείο είναι δραστηριότητα τότε
12. Αν η δραστηριότητα είναι "pt interaction" τότε
13. Στο νέο πλάνο πρόσθεσε το μέσο μεταφοράς "pt" αντί των:
14. Διαδοχικών δραστηριοτήτων "pt interaction"
15. Μέσων μεταφοράς που βρίσκονται πριν, μετά και ενδιάμεσα τους

16. **αλλιώς**
17. Πρόσθεσε την δραστηριότητα στο νέο πλάνο
18. Πρόσθεσε το μέσο της προσωρινή_μεταβλητή_μέσου στο νέο πλάνο
19. **Αν** το μέσο μεταφοράς της προσωρινή_μεταβλητή_μέσου είναι περπάτημα **τότε**
20. Πρόσθεσε την διαδρομή της προσωρινή_μεταβλητή_διαδρομής στο μέσο μεταφοράς
21. Πρόσθεσε το νέο πλάνο στον νέο πράκτορα
22. Πρόσθεσε τον νέο πράκτορα στον νέο πληθυσμό
23. Γράψε τον νέο πληθυσμό σε νέο αρχείο

Αλγόριθμος σε Ψευδογλώσσα 1: Τροποποίηση του αρχικού πληθυσμού. Διαγραφή των δραστηριοτήτων pt interaction και διατήρηση της διαδρομής για τις μετακινήσεις με περπάτημα.

- Γ. Ύστερα, για να μπορέσει να λειτουργήσει ο τελικός κώδικας που κάνει τις αντικαταστάσεις, δημιουργήθηκε ένα απλό αρχείο κειμένου, το οποίο περιέχει την πλήρη αλληλουχία των δραστηριοτήτων και μέσων μεταφοράς όλων των πρακτόρων του πληθυσμού που δημιουργήθηκε με τον παραπάνω αλγόριθμο, σε μία συνεχόμενη στήλη. Έτσι το αρχείο περιέχει μια μακριά στήλη με μια λέξη σε κάθε σειρά, για παράδειγμα home, car, work, car, home κ.ο.κ, χωρίς καμία επισήμανση αν αλλάζει ο αναφερόμενος πράκτορας. Τα στοιχεία αυτού του αρχείου, ακολουθούν ακριβώς την σειρά εμφάνισης τους στον πληθυσμό που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα.

Διαφοροποίηση αποτελεί, σύμφωνα με τον περιορισμό 2, πως τα μέσα μεταφοράς μετακινήσεων που έχουν κάποιο άκρο τους εκτός της περιοχής μελέτης – outside, παίρνουν το πρόθεμα final. Για παράδειγμα, μια μετακίνηση με αυτοκίνητο – car, θα γίνει finalcar.

- Δ. Τελικά, έχοντας το αρχείο με την μακριά συνεχόμενη στήλη από δραστηριότητες και μετακινήσεις στην σωστή σειρά και με τις κατάλληλες επισημάνσεις final και τον νέο πληθυσμό που δημιουργήθηκε παραπάνω, μπορούν να γίνουν οι επιθυμητές αντικαταστάσεις. Ο νέος πληθυσμός διαθέτει όλους τους πράκτορες, τα δημογραφικά τους στοιχεία, τα επιλεγμένα πλάνα τους, δηλαδή αν κάποιος πράκτορας είχε αρχικά πολλά πλάνα, τα υπόλοιπα εκτός του επιλεγμένου αγνοήθηκαν, και κοινή αλληλουχία δραστηριοτήτων και μέσων μετακίνησης με τον αρχικό πληθυσμό. Οι μόνες διαφορές είναι πως τώρα όλα τα μέσα μεταφοράς διαθέτουν μόνο το όνομα του μέσου, εκτός του περπατήματος που περιέχει και την διαδρομή, και πως οι μετακινήσεις με M.M.M, περιγράφονται μόνο με ένα μέσο μεταφοράς, το pt.

Για την **αντικατάσταση διαφορετικών ποσοστών** μετακινήσεων, χρησιμοποιήθηκε μια **εντολή παραγωγής τυχαίων αριθμών** ως εξής: η εντολή είχε την μορφή, τυχαίος_αριθμός(100). Αυτό σημαίνει πως το αποτέλεσμα αυτής της εντολής θα είναι ένας αριθμός μεταξύ του 0 και του 99, με ίσες πιθανότητες εμφάνισης κάθε αριθμού. Επομένως ο κάθε αριθμός, έχει 1/100 ή 1% πιθανότητα να εμφανιστεί.

Το επιθυμητό αποτέλεσμα προκύπτει θέτοντας το τυχαίος_αριθμός(100) <= από το ζητούμενο ποσοστό μείον 1. Για παράδειγμα αν το ζητούμενο ποσοστό είναι 50%, τότε θέτοντας τυχαίος_αριθμός(100) <= 49, σημαίνει πως αφού κάθε αριθμός από το 0 ως το 49 έχει 1% πιθανότητα να εμφανιστεί, τότε η πιθανότητα το αποτέλεσμα του τυχαίος_αριθμός(100) να είναι μικρότερο ή ίσο του 49, είναι αθροιστικά 50%. Με αυτόν τον τρόπο, αν αυτή η έκφραση προκύψει αληθής, τότε γίνεται η αντικατάσταση του μέσου μεταφοράς σε αυτόνομο ταξί, ενώ αντίθετα όχι.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τελικός αλγόριθμος των αντικαταστάσεων σε ψευδογλώσσα. Ο αλγόριθμος αυτός έχει λίγο διαφορετική πορεία από τον πραγματικό κώδικα, που υπάρχει στα Παραρτήματα, αλλά μόνο για λόγους επεξηγηματικότητας και χωρίς να αλλάζει η εφαρμοσμένη διαδικασία.

1. Διάβασε τον πληθυσμό
2. Διάβασε το αρχείο με τα final_legs
3. Διάβασε το επιθυμητό ποσοστό αντικατάστασης
4. Δημιούργησε την πιθανότητα αντικατάστασης βάση αυτό το ποσοστό
5. final_plans ← Λίστα των στοιχείων του αρχείου με τα final_legs

```

6. Δημιούργησε έναν νέο πληθυσμό
7. Αρχή_επανάληψης για κάθε πράκτορα του πληθυσμού
8. Δημιούργησε ένα νέο πράκτορα
9. Αντέγραψε όλα τα δημογραφικά στοιχεία του πράκτορα στον νέο πράκτορα
10. Δημιούργησε ένα νέο πλάνο
11. Αρχή_επανάληψης για κάθε στοιχείο του επιλεγμένου πλάνου του πράκτορα
12. Συγχρόνισε το διάβασμα των τιμών του πληθυσμού και της λίστας final_plans
13. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← κενό
14. προσωρινή_μεταβλητή_αυτοκίνητο-ποδήλατο ← κενό
15. Αν το στοιχείο είναι δραστηριότητα τότε
16. Πρόσθεσε την δραστηριότητα στο νέο πλάνο
17.
18. Αν το στοιχείο είναι μετακίνηση τότε
19. Αν(1) το μέσο μεταφοράς είναι περπάτημα τότε
20. Διάβασε την απόστασή της μετακίνησης
21. Αν(2) είναι μεγαλύτερη του 4000 τότε
22. Αν(3) το μέσο μεταφοράς έχει το πρόθεμα final τότε
23. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← outside
24. αλλιώς(3)
25. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← αυτόνομο όχημα (AV)
26. αλλιώς(2)
27. Αν(3) το μέσο μεταφοράς έχει το πρόθεμα final τότε
28. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← περπάτημα
29. αλλιώς(3)
30. Εξέτασε πιθανότητα αντικατάστασης (Ναι - Όχι)
31. Αν Ναι τότε
32. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← αυτόνομο όχημα (AV)
33. αλλιώς
34. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← περπάτημα
35. αλλιώς_αν(1) το μέσο μεταφοράς είναι αυτοκίνητο-ποδήλατο τότε
36. //Το αυτοκίνητο και το ποδήλατο εξετάστηκαν ξεχωριστά.
37. //Ο αλγόριθμος όμως είναι ο ίδιος και για τα δύο, για αυτό παρουσιάζονται μαζί
38. Αν(2) προσωρινή_μεταβλητή_αυτοκίνητο-ποδήλατο είναι κενό τότε
39. Εξέτασε πιθανότητα αντικατάστασης (Ναι - Όχι)
40. Αν Ναι τότε
41. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← αυτόνομο όχημα (AV)
42. αλλιώς
43. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← αυτοκίνητο-ποδήλατο
44. προσωρινή_μεταβλητή_αυτοκίνητο-ποδήλατο ← προσωρινή_μεταβλητή_μέσου
45. αλλιώς(2)
46. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← προσωρινή_μεταβλητή_αυτοκίνητο-ποδήλατο
47. αλλιώς_αν(1) το μέσο μεταφοράς είναι Μ.Μ.Μ ή επιβάτης αυτοκινήτου τότε
48. Εξέτασε πιθανότητα αντικατάστασης (Ναι - Όχι)
49. Αν Ναι τότε
50. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← αυτόνομο όχημα (AV)
51. αλλιώς
52. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← μέσο μεταφοράς
53. αλλιώς_αν(1) το μέσο μεταφοράς είναι όχημα μεταφοράς φορτίου-freight ή outside ή έχει το πρόθεμα final τότε
54. //Εκτός από το περπάτημα που εξετάστηκε παραπάνω
55. Αθροίσε τις μετακινήσεις που δεν μπορούν να αντικατασταθούν από αυτόνομο ταξί
56. προσωρινή_μεταβλητή_μέσου ← μέσο μεταφοράς
57. Πρόσθεσε το μέσο της προσωρινή_μεταβλητή_μέσου στο νέο πλάνο
58. Πρόσθεσε το νέο πλάνο στον νέο πράκτορα
59. Πρόσθεσε τον νέο πράκτορα στον νέο πληθυσμό
60. Γράψε τον νέο πληθυσμό σε νέο αρχείο

```

Αλγόριθμος σε Ψευδογλώσσα 2: Αντικατάσταση μετακινήσεων με συμβατικά μέσα από μετακινήσεις με αυτόνομο ταξί.

4.2.1 Νέα χαρακτηριστικά πληθυσμών

Από τις παραπάνω διαδικασίες, δημιουργήθηκαν 6 διαφορετικοί πληθυσμοί, με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο αριθμός των συμβατικών μετακινήσεων που μπορούσαν να μετατραπούν σε μετακινήσεις με αυτόνομα οχήματα, σύμφωνα με τους παραπάνω περιορισμούς, είναι

626.898 ή 74,5% του συνόλου των μετακινήσεων. Επομένως, στη συνέχεια όπου αναφέρεται, για παράδειγμα, 100% αντικατάσταση μετακινήσεων, θα εννοείται 100% πιθανότητα αντικατάστασης και 74,5% πραγματική αντικατάσταση. Ο αριθμός των μετακινήσεων που μετατρέπονται από κάποιο συμβατικό μέσο σε αυτόνομο ταξί, θα αναφέρεται ως AvReplace.

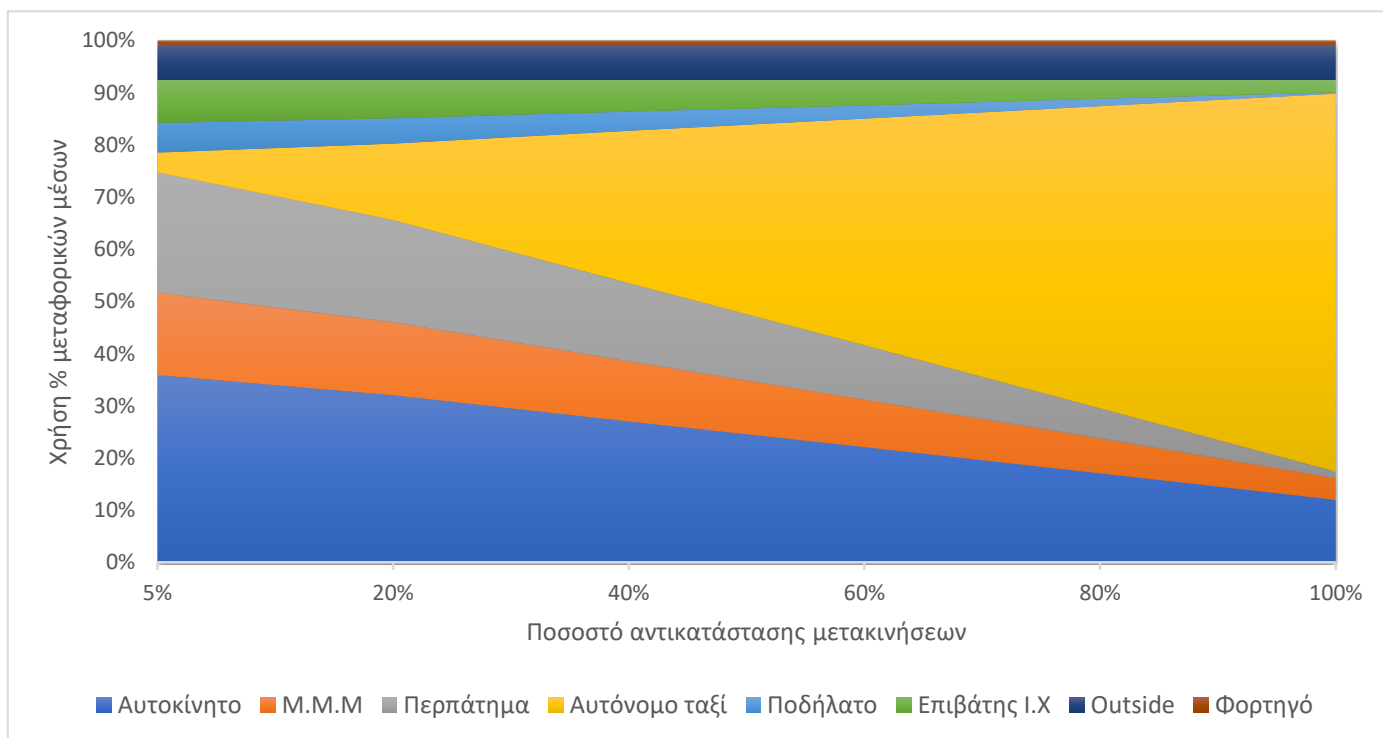
Στο **Διάγραμμα 10**, παρουσιάζεται η ποσοστιαία χρήση των μέσων μεταφοράς για κάθε μέσο, όπως αυτή διαμορφώθηκε για κάθε σενάριο.

Στον **Πίνακα 3**, παρουσιάζονται τα AvReplace των συμβατικών μέσων μεταφοράς, για όλους τους νέους πληθυσμούς, ως προς κάποιες χαρακτηριστικές τιμές.

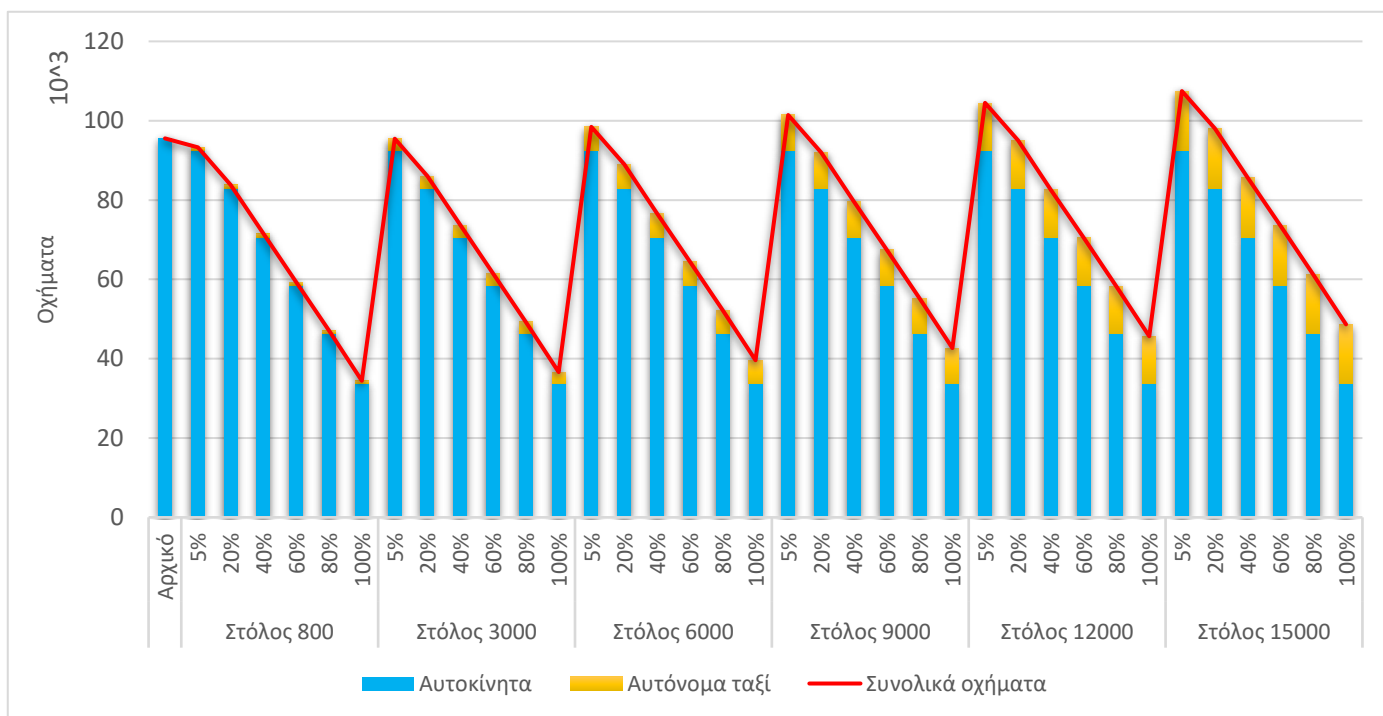
Στο **Διάγραμμα 11**, παρουσιάζονται τα οχήματα που μπαίνουν και επηρεάζουν την κυκλοφορία, δηλαδή δεν τηλεμεταφέρονται, τα οποία είναι μόνο τα αυτόνομα ταξί και τα αυτοκίνητα, για κάθε σενάριο που εξετάστηκε. Τα αυτοκίνητα υπολογίστηκαν με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκαν και για το αρχικό σενάριο στο 4.1.3. Για τα αυτόνομα ταξί, ο αριθμός τους εμφανίζεται ως Στόλος 300, για 300 αυτόνομα ταξί. Γίνεται σαφές πως τα συνολικά οχήματα μειώνονται, μέχρι και πάνω από 60% για 100% αντικατάσταση, όσο μεγαλώνει το ποσοστό αντικατάστασης των μετακινήσεων, αφού μειώνονται αρκετά οι μετακινήσεις με αυτοκίνητο, οι οποίες αντικαθίστανται με τον αυξανόμενο στόλο των αυτόνομων ταξί.

Πίνακας 3: AvReplace κάθε μέσου ως προς κάποιες χαρακτηριστικές τιμές, για κάθε νέο πληθυσμό.

AvReplace ως προς το Συνολικό AvReplace						
Αντικατάσταση	Αυτοκίνητο	Περπάτημα	M.M.M	Επιβάτης Αυτοκινήτου	Ποδήλατο	Συνολικό AvReplace
5%	33,64%	34,68%	15,97%	8,06%	7,65%	31795
20%	34,80%	32,37%	16,86%	8,36%	7,61%	123593
40%	34,74%	32,09%	16,84%	8,45%	7,88%	246047
60%	34,66%	32,03%	17,01%	8,46%	7,84%	365761
80%	34,64%	31,99%	16,97%	8,49%	7,91%	487641
100%	34,74%	31,90%	16,97%	8,50%	7,89%	609928
AvReplace ως προς τις μετακινήσεις που μπορούν να αντικατασταθούν - 626.898						
Αντικατάσταση	Αυτοκίνητο	Περπάτημα	M.M.M	Επιβάτης Αυτοκινήτου	Ποδήλατο	Σύνολο AvReplace
5%	1,71%	1,76%	0,81%	0,41%	0,39%	5,07%
20%	6,86%	6,38%	3,32%	1,65%	1,50%	19,72%
40%	13,63%	12,60%	6,61%	3,32%	3,09%	39,25%
60%	20,22%	18,69%	9,93%	4,94%	4,57%	58,34%
80%	26,94%	24,89%	13,20%	6,60%	6,16%	77,79%
100%	33,80%	31,04%	16,51%	8,27%	7,68%	97,29%
AvReplace ως προς τις μετακινήσεις με το αντίστοιχο μέσο στο Αρχικό Σενάριο						
Αντικατάσταση	Αυτοκίνητο	Περπάτημα	M.M.M	Επιβάτης Αυτοκινήτου	Ποδήλατο	
Αρχικό Σενάριο	312803	211762	138612	71949	50178	
5%	3,42%	5,21%	3,66%	3,56%	4,84%	
20%	13,75%	18,89%	15,03%	14,36%	18,74%	
40%	27,33%	37,29%	29,89%	28,90%	38,63%	
60%	40,52%	55,32%	44,90%	43,02%	57,15%	
80%	54,00%	73,67%	59,70%	57,53%	76,90%	
100%	67,75%	91,88%	74,65%	72,06%	95,92%	



Διάγραμμα 10: Ποσοστιαία χρήση μεταφορικών μέσων για κάθε ποσοστό αντικατάστασης μετακινήσεων.



Διάγραμμα 11: Οχήματα που επηρεάζουν την κυκλοφορία, για κάθε εξεταζόμενο σενάριο.

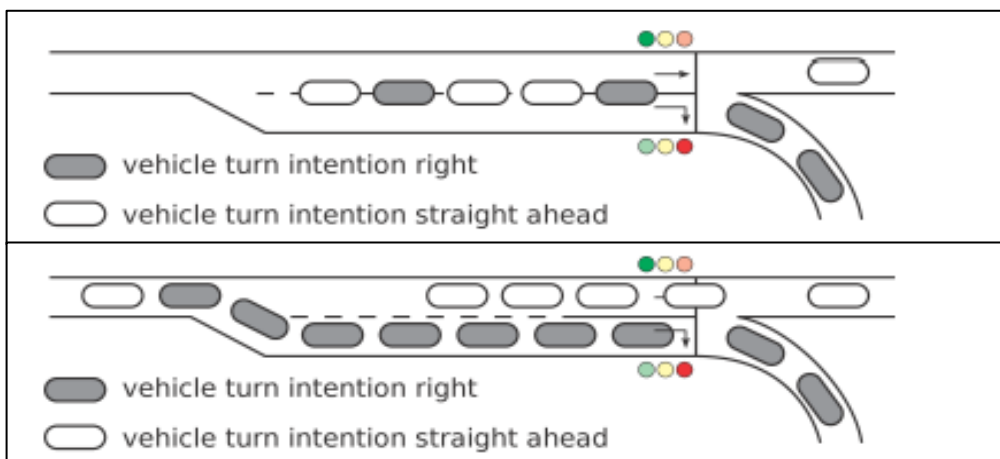
4.3 Προσομοιώσεις

Έχοντας δημιουργήσει τα απαραίτητα δεδομένα εισαγωγής, που είναι τα 36 νέα σενάρια που δημιουργήθηκαν παραπάνω, επόμενο βήμα είναι να γίνει προσομοιωθούν μέσω του MATSim. Ο κώδικας που αξιοποιήθηκε για την προσομοίωση κάθε σεναρίου, βρίσκεται στο αρχείο **RunSimulation** του Eqasim (GitHub, 2020). Για την εκτέλεση και την οργάνωση των αποτελεσμάτων όλων των προσομοιώσεων των σεναρίων, δημιουργήθηκε επιπλέον κώδικας ο οποίος καλούσε το RunSimulation, δίνοντάς τους τις απαραίτητες παραμέτρους εισόδου. Όλοι οι κώδικες εκτελέστηκαν μέσω του Eclipse.

Ο κώδικας RunSimulation απαιτούσε ως παραμέτρους εισόδου το αρχείο διαμόρφωσης του σεναρίου (config.xml) και το μέγεθος του στόλου αυτόνομων ταξί. Σαν παράμετροι εισόδου μπορούν επίσης να δοθούν και τυχόν αλλαγές που χρειάζονται να γίνουν στις παραμέτρους του αρχείου διαμόρφωσης του σεναρίου, όπως για παράδειγμα να αλλάξει η τοποθεσία αποθήκευσης των αποτελεσμάτων ή να οριστεί άλλος αριθμός επαναλήψεων της προσομοιωμένης μέρας.

Οι **παράμετροι του αρχείου διαμόρφωσης που έπρεπε να διαφοροποιηθούν** για τις ανάγκες αυτής της εργασίας ήταν:

- Το σημείο και το όνομα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων, `--config:controler.outputDirectory`, ώστε να αποθηκεύονται με το κατάλληλο όνομα τα αποτελέσματα των διάφορων σεναρίων.
- Ο αριθμός των επαναλήψεων κάθε σεναρίου, `--config:controler.lastIteration`, που τέθηκε 0 ώστε να γίνει μόνο μία επανάληψη.
- Η τοποθεσία του αρχείου του πληθυσμού του κάθε νέου σεναρίου, `--config:plans.inputPlansFile`.
- Την ξεχωριστή προσομοίωση των λωρίδων, `--config:qsim.useLanes`, που τίθεται ίση με `true`. Αυτή η παράμετρος επηρεάζει την κυκλοφορία, και συγκεκριμένα την κίνηση των ουρών στις λωρίδες, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 7: Πάνω, κυκλοφορία με την παράμετρο `lanes = false`. Κάτω, κυκλοφορία με την παράμετρο `lanes = true`. (Πηγή: (Horni, Nagel, & Axhausen, *The Multi-Agent Transport Simulations MATSim*, 2016)

Κάποιες άλλες σημαντικές **παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν ως έχουν** από το αρχείο διαμόρφωσης του αρχικού σεναρίου και επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας, αφορούν στον προσομοιωτή της κυκλοφορίας Qsim που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία:

- `--config:qsim.stuckTime:10`, που σημαίνει πως το όχημα που βρίσκεται στην κορυφή της ουράς τους συνδέσμου και που δεν έχει προχωρήσει για 10 δευτερόλεπτα, θεωρείται κολλημένο-stuck.
- `--config:qsim.removeStuckVehicles:false`, που σημαίνει πως όταν ένα όχημα θεωρείται κολλημένο, προωθείται αναγκαστικά στον επόμενο σύνδεσμο.

- --config:qsim.trafficDynamics:queue, που σημαίνει ότι η κυκλοφορία προσομοιώνεται με μοντέλο ουρών.
- --config:qsim.vehicleBehavior:teleport, που σημαίνει πως αν ένας πράκτορας θέλει να αναχωρήσει και, για παράδειγμα, το αυτοκίνητό του δεν βρίσκεται στη θέση του, τηλεμεταφέρεται στον προορισμό του.
- --config:qsim.flowCapacityFactor:0,3 και --config:qsim.storageCapacityFactor:0,1, που μειώνουν τον μέγιστο ρυθμό ροής εξόδου και την αποθηκευτική χωρητικότητα οχημάτων των συνδέσμων στο 30% και στο 10%, αντίστοιχα. Τα σενάρια που προσομοιώνονται βρίσκονται σε κλίμακα 10%, το οποίο σημαίνει πως ο πληθυσμός τους είναι το 10% του πραγματικού.
Για μια ρεαλιστική προσομοίωση θα έπρεπε οι δύο παραπάνω παράμετροι να μειωθούν στο 10% των τιμών τους. Επειδή όμως στην κυκλοφορία που προσομοιώνεται, δεν δίνεται η δυνατότητα να φτάσει σε ένα ικανοποιητικό ή τουλάχιστον ρεαλιστικό επίπεδο, λόγω της έλλειψης συστήματος βαθμολόγησης και επανασχεδιασμού, η μείωση στο 10% των παραπάνω παραμέτρων, η οποία ήταν η πρώτη που δοκιμάστηκε, οδηγούσε σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει πως η διαδρομή των μετακινήσεων επιλεγόταν με μοναδικό κριτήριο να διανύεται η μικρότερη απόσταση. Έτσι, μετά την πρωινή αιχμή του κυκλοφοριακού φόρτου, η συμφόρηση δεν μειωνόταν ποτέ, μα αυξανόταν μέχρι το τέλος της μέρας. Αυτό σημαίνει πως πολλοί πράκτορες παγιδεύονταν σε μικρούς, σε μήκος, συνδέσμους με μικρούς ρυθμούς ροής και δεν κατάφερναν να τελειώσουν ποτέ το ημερήσιο πλάνο τους. Προφανώς η κυκλοφορία αυτή ήταν κάθε άλλο παρά ρεαλιστική, οπότε μετά από δοκιμές, το καλύτερο αποτέλεσμα προέκυψε με τον παραπάνω συνδυασμό αυτών των παραμέτρων. Η αύξηση του μέγιστου ρυθμού ροής από 10% σε 30% κάνει πιο άνετη την κυκλοφορία, γεγονός που αντισταθμίζει ως ένα βαθμό την απουσία συστήματος βαθμολόγησης και επανασχεδιασμού.
- --config:qsim.linkDynamics: FIFO, που σημαίνει πως όποιο όχημα μπει πρώτο σε έναν σύνδεσμο, αποχωρεί και πρώτο.

Τέλος, οι προσομοιώσεις έγιναν σε επιτραπέζιο υπολογιστή με επεξεργαστή AMD Ryzen 7 2700, 8-πυρήνων και 16 νημάτων, 3,2 GHz και με 16 Gb μνήμη RAM. Σε κάθε προσομοίωση δινόταν σαν παράμετρος εισαγωγής να αξιοποιηθούν κατά μέγιστο 10 Gb μνήμης RAM.

Συνολικά έγινε η προσομοίωση μίας μέρας-επανάληψης για 37 σενάρια, το αρχικό σενάριο χωρίς αυτόνομα οχήματα και τα 36 νέα σενάρια που δημιουργήθηκαν. Ο χρόνος που διαρκούσαν αυτές οι προσομοιώσεις ήταν μεταξύ 10 και 30 λεπτών η καθεμία. Συγκριτικά, τα ίδια σενάρια για το 0,1% του πληθυσμού, χρειάζονται περίπου ένα λεπτό για να προσομοιωθούν 2 σενάρια. Επίσης συγκριτικά, ο αποθηκευτικός χώρος που χρειάζεται ένα σενάριο για το 10% του πληθυσμού είναι περίπου 1,4 Gb, ενώ για το 0,1%, περίπου 20 Mb.

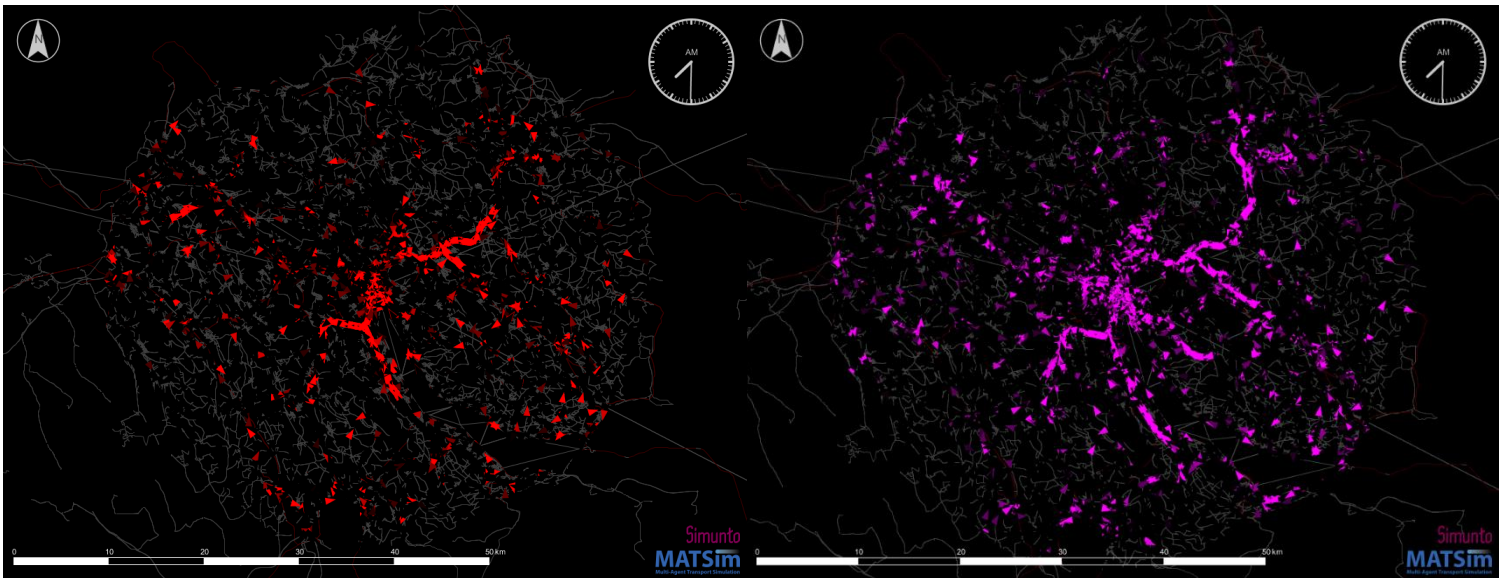
4.3.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Με την προσομοίωση των 36 εξεταζόμενων σεναρίων, καθώς και του αρχικού σεναρίου χωρίς αυτόνομα οχήματα, έχουν δημιουργηθεί και οι αντίστοιχοι **φάκελοι με τα αποτελέσματά τους**. Σε αυτούς περιέχονται όλα τα απαραίτητα αρχεία, που έχουν συζητηθεί στο Θεωρητικό Υπόβαθρό, ώστε να γίνει η ζητούμενη κυκλοφοριακή ανάλυση, με σημαντικότερο το αρχείο των συμβάντων, `output_events.xml`. Το αρχείο αυτό είναι και το μεγαλύτερο από τα αποτελέσματα, τόσο σε αποθηκευτικό χώρο, συμπιεσμένο έχει μέγεθος της τάξης των 500 Mb και ασυμπιεστο 5 Gb, όσο και σε γραμμές δεδομένων εσωτερικά του αρχείου, που φτάνουν μέχρι και 95εκ γραμμές με συμβάντα.

Για την κυκλοφοριακή ανάλυση που θα ακολουθήσει, τα αρχεία που αξιοποιήθηκαν ήταν το αρχείο των συμβάντων, `output_events.xml`, και του οδικού δικτύου, `output_network.xml`, στην συμπιεσμένη μορφή τους. Κατά την εξέταση όμως, γενικώς των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, εξετάστηκαν και τα λοιπά εξαγόμενα αρχεία, όπως αυτό του πληθυσμού-πλάνων, `output_plans.xml`.

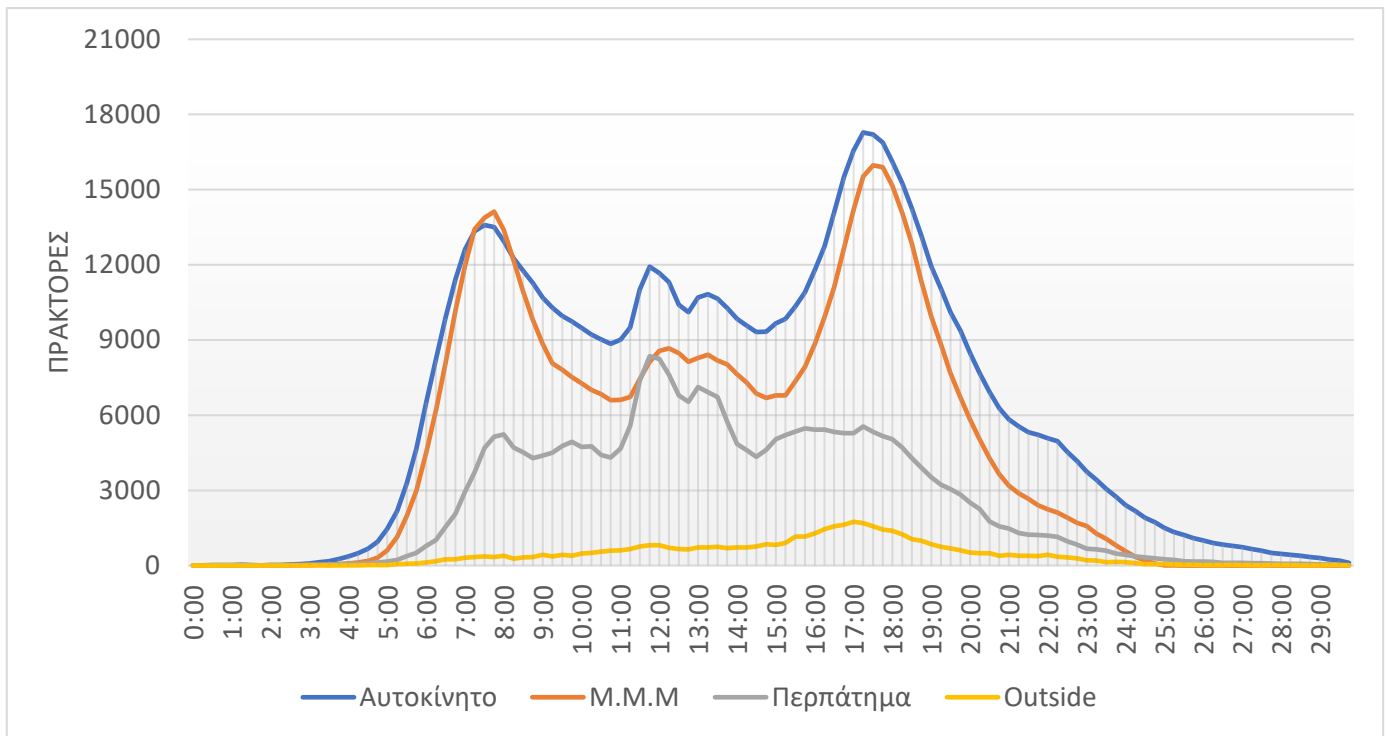
Πρώτο βήμα κατά την εξέταση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, ήταν η **οπτικοποίηση**, μέσω του *Via*, κάποιων σεναρίων, όπως του αρχικού, ώστε να υπάρχει μια πρώτη επισκόπηση της εξέλιξης της κυκλοφορίας, τόσο μέσα στην μέρα, όσο και μεταξύ των σεναρίων. Για την οπτικοποίηση αυτή, το *Via* χρειάζεται τα αρχεία: *output_network.xml* και *output_events.xml*. Αρχικά γίνεται σαφές πως οι προσομοιώσεις εκτελούνται για 30 ώρες, ξεκινώντας στις 12 τα μεσάνυχτα και ολοκληρώνοντας την επόμενη μέρα στις 6 το πρωί.

Παρατηρήθηκαν επίσης **κρίσιμα σημεία συμφόρησης**, τα οποία εμφανίζονται, σε κάποιο βαθμό, σε όλα τα σενάρια. Παρακάτω, Εικόνα 9, φαίνεται η κυκλοφορία των οχημάτων στις 7:30 το πρωί για το αρχικό σενάριο και το σενάριο που περιέχει 15.000 αυτόνομα ταξί και 60% αντικατάσταση των μετακινήσεων. Οι δύο αποχρώσεις, κόκκινο και ροζ, αποσκοπούν μόνο στο να ξεχωρίσουν τα σενάρια μεταξύ τους και αντικατοπτρίζουν τις σχετικές ταχύτητες των οχημάτων. Συγκεκριμένα, φαίνονται μόνο τα οχήματα που οι ταχύτητές τους είναι μεταξύ του 0% και του 20% της ταχύτητας ελεύθερης ροής των αντίστοιχων συνδέσμων. Τέλος, παρατηρώντας την οπτικοποίηση και μέσω των διαγραμμάτων που εξάγονται με δεδομένα του *Via*, εντοπίστηκαν οι **ώρες αιχμής** του κυκλοφοριακού φόρτου, του αρχικού σεναρίου, που είναι στις 7:30 το πρωί και στις 17:30 το απόγευμα, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 12. Στα υπόλοιπα σενάρια οι ώρες αιχμής παρατηρούνται περίπου τις ίδιες ώρες και σε μερικά υπάρχει και μια ενδιάμεση ώρα αιχμής περίπου στις 13:00 το μεσημέρι.



Εικόνα 8: Αριστερά, συμφόρηση αρχικού σεναρίου στις 7:30 το πρωί. Δεξιά, συμφόρηση σεναρίου 15χιλ αυτόνομων ταξί και 60% αντικατάστασης για την ίδια ώρα. Μέσω *Via*.

Ύστερα, έγινε μια **σύγκριση των αρχείων πληθυσμών**, δηλαδή αυτών που δόθηκαν σαν εισαγωγή στον MATSim, *population.xml*, και αυτών που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, ελαφρώς τροποποιημένων και εφοδιασμένων με αποτελέσματα των προσομοιώσεων, *output_plans.xml*. Παρατηρήθηκε πως κάποιες μετακινήσεις που είχαν μετατραπεί σε αυτόνομα ταξί κατά την δημιουργία των σεναρίων, όταν προσομοιώθηκαν από το MATSim μετατράπηκαν σε μετακινήσεις περπατήματος. Συγκεκριμένα, σε ένα δοκιμαστικό σενάριο 0.1%, από τις 2458 μετακινήσεις που είχαν ανατεθεί να γίνουν με αυτόνομα οχήματα, οι 172 είχαν μετατραπεί σε μετακίνηση με περπάτημα και αφορούσαν μικρές αποστάσεις, μέσου όρου 30μέτρων. Αυτό έγινε διότι εσωτερικά το MATSim μετατρέπει όσες μετακινήσεις έχουν ίδιο σύνδεσμο προέλευσης - προορισμού, σε περπάτημα. Η διαφοροποίηση στις αποστάσεις υπήρχε διότι μπορεί οι δραστηριότητες που εξυπηρετούσε η μετακίνηση να ήταν στον ίδιο σύνδεσμο, αλλά είχαν διαφορετικές συντεταγμένες.



Διάγραμμα 12: Πράκτορες που βρίσκονται εν κινήσει με κάποια βασικά μεταφορικά μέσα, ανά 15 λεπτά της ώρας, για το αρχικό σενάριο χωρίς αυτόνομα οχήματα. Δεδομένα μέσω Via.

Επόμενο και κύριο βήμα, ήταν η **ανάλυση των συμβάντων**, `output_events.xml`, χρησιμοποιώντας τα απαραίτητα δεδομένα του οδικού δικτύου, `output_network.xml`. Πάνω σε αυτή την ανάλυση βασίζονται όλα τα υπόλοιπα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν, συμπεριλαμβανομένης και της κυκλοφοριακής ανάλυσης του επόμενου κεφαλαίου. Όπως έχει εξηγηθεί, το συγκεκριμένο αρχείο περιέχει όλες τις πληροφορίες της προσομοίωσης που έγινε, εκφρασμένες σε απλά συμβάντα όπως, ο πράκτορας βγήκε από το αυτοκίνητό του. Σε αυτό το αρχείο, έγινε ένα εύρος αναλύσεων ώστε να προκύψουν όλες οι ζητούμενες πληροφορίες.

Το αρχείο των συμβάντων αποτελείται από γραμμές συμβάντων, όπου κάθε γραμμή περιέχει ένα συμβάν με όλες τις απαραίτητες επεξηγηματικές παραμέτρους του. Κάθε συμβάν περιέχει σίγουρα τον χρόνο-time που έγινε καθώς και τον τύπο-type του. Ο χρόνος στα σενάρια 10%, μετριέται σε δευτερόλεπτα, ξεκινά από το 0 και ολοκληρώνεται στο δευτερόλεπτο 108.000 (=30 ώρες). Επίσης οι **τύποι συμβάντων** που θα απασχολήσουν αυτή την εργασία είναι:

- `actstart` (έναρξη δραστηριότητας)
- `actend` (λήξη δραστηριότητας)
- `departure` (πράκτορας αναχωρεί)
- `PersonEntersVehicle` (πράκτορας μπαίνει σε όχημά)
- `vehicle enters traffic` (όχημα μπαίνει στην κυκλοφορία)
- `entered link` (όχημα μπαίνει σε σύνδεσμο)
- `left link` (όχημα βγαίνει από σύνδεσμο)
- `vehicle leaves traffic` (όχημα βγαίνει από την κυκλοφορία)
- `PersonLeavesVehicle` (πράκτορας βγαίνει από όχημα)
- `travelled` (ολοκλήρωση μετακίνησης για μέσα μεταφοράς που τηλεμεταφέρονται, όπως το περπάτημα)
- `arrival` (πράκτορας έφτασε)
- `vehicle aborts` (όχημα ματαιώνεται και βγαίνει από την προσομοίωση)
- `stuckAndAbort` (πράκτορας ματαιώνεται και βγαίνει από την προσομοίωση)

Αυτοί οι τύποι συμβάντων περιέχουν επίσης διάφορες **προσδιοριστικές παραμέτρους**, όπως την ταυτότητα του ατόμου-person ή του οχήματος-vehicle που αναφέρονται, τον σύνδεσμο που γίνεται το συμβάν-link και το μέσο μεταφοράς που χρησιμοποιείται-legMode. Κάθε τύπος συμβάντος

χρειάζεται διαφορετικές παραμέτρους: για παράδειγμα ο τύπος συμβάντος left link, χρειάζεται την ταυτότητα του οχήματος και τον σύνδεσμο που γίνεται το συμβάν. Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα συμβάντων, τα οποία επιλέχθηκαν τυχαία, που περιλαμβάνει όλους τους παραπάνω τύπους συμβάντων και των προσδιοριστικών παραμέτρων τους.

```

1. <event time="10980.0" type="actstart" person="201240015508452" link="577923" facility="37033" actType="work" />
2. <event time="10743.0" type="departure" person="201240008690056" link="730010" legMode="car" />
3. <event time="10743.0" type="PersonEntersVehicle" person="201240008690056" vehicle="201240008690056" />
4. <event time="10744.0" type="vehicle enters traffic" person="201240008690056" link="730010" vehicle="201240008690056" networkMode="car" relativePosition="1.0" />
5. <event time="10745.0" type="entered link" vehicle="201240008690056" link="730008" />
6. <event time="10749.0" type="left link" vehicle="201240015508452" link="108312" />
7. <event time="10980.0" type="vehicle leaves traffic" person="201240015508452" link="577923" vehicle="201240015508452" networkMode="car" relativePosition="1.0" />
8. <event time="10980.0" type="PersonLeavesVehicle" person="201240015508452" vehicle="201240015508452" />
9. <event time="13062.0" type="travelled" person="201240010885121" distance="35.988750932066054" />
10. <event time="12969.0" type="arrival" person="201240010197973" link="833946" legMode="car" />
11. <event time="11281.0" type="actend" person="201240010197973" link="62477" facility="home201202240001055" actType="home" />
12. <event time="108000.0" type="vehic le aborts" link="829364" vehicle="201240008553720" />
13. <event time="108000.0" type="stuckAndAbort" link="829364" legMode="car" person="201240008553720" />

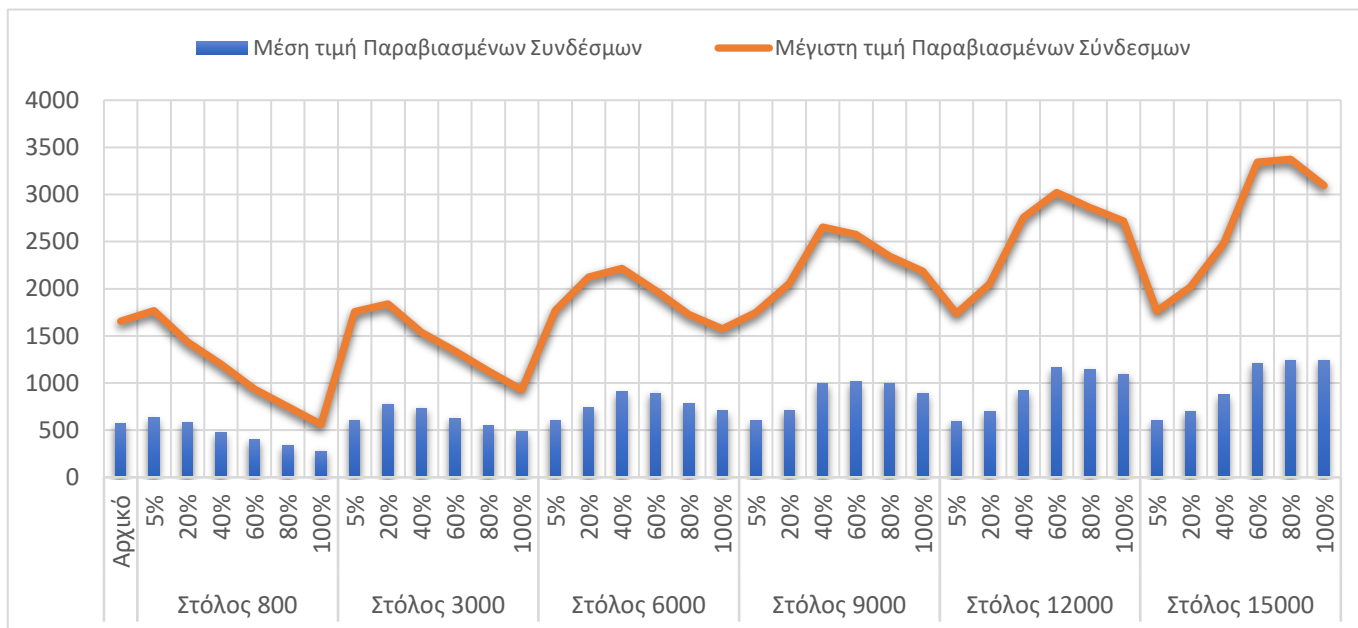
```

Αρχείο Συμβάντων: Τύποι συμβάντων που αξιοποιήθηκαν και οι προσδιοριστικές παράμετροί τους.

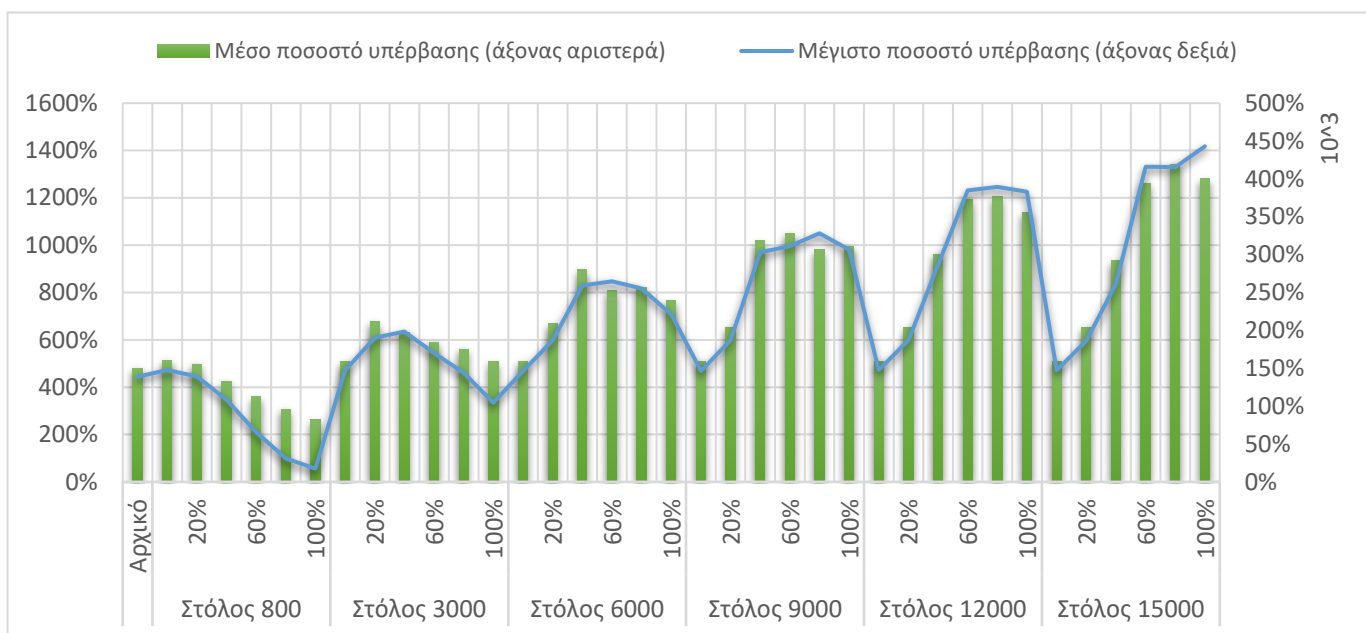
Βασική ιδιαιτερότητα της παρούσας μελέτης, είναι πως το κάθε σενάριο προσομοιώθηκε μόνο για μία επανάληψη, έχοντας αναθέσει κατά τη δημιουργία του όλα τα επιθυμητά μέσα μεταφοράς στους πράκτορες. Παρόλο που ο συντελεστής του μέγιστου ρυθμού ροής εξόδου των συνδέσμων (flowCapacityFactor) τέθηκε 3 φορές μεγαλύτερος από την κλίμακα που σεναρίου που εξετάζεται, 0.3 για κλίμακα 0.1, δεν μπόρεσε να αντισταθμίσει πλήρως την απουσία συστήματος βαθμολόγησης και επανασχεδιασμού. Έτσι, στα σενάρια που προσομοιώθηκαν μπορεί η κυκλοφορία να μην παρουσίαζε τόσο εκτεταμένη **συμφόρηση** όσο σε δοκιμές με χαμηλότερο συντελεστή για το μέγιστο ρυθμό ροής εξόδου, μα και πάλι οι αποθηκευτικές χωρητικότητες αρκετών κόμβων του δικτύου ήταν παραβιασμένες και αρκετοί πράκτορες, 1% ως 7%, δεν κατάφεραν να ολοκληρώσουν τα ημερήσια πλάνα τους.

Πιο συγκεκριμένα, η αποθηκευτική χωρητικότητα ενός συνδέσμου του δικτύου προκύπτει ως ο πολλαπλασιασμός του μήκους του σε μέτρα, επί τις λωρίδες που διαθέτει και δια το μήκος ενός οχήματος, δηλαδή $7,5 \text{ μέτρα} \cdot \text{λωρίδες} / 7,5$. Αυτό το νούμερο πρέπει να πολλαπλασιαστεί επί 0,1, αφού τα σενάρια προσομοιώνονται σε κλίμακα 10% και η αποθηκευτική χωρητικότητα των συνδέσμων έχει πολλαπλασιαστεί με $\text{storageCapacityFactor} = 0,1$.

Γνωρίζοντας το μήκος και τις λωρίδες κάθε συνδέσμου από το αρχείο του οδικού δικτύου, μπορούν να υπολογιστούν οι **αποθηκευτικές χωρητικότητες** (storage capacities) τους. Ύστερα, αναλύοντας το αρχείο των συμβάντων, προσθέτοντας τα οχήματα όταν μπαίνουν σε κάποιο σύνδεσμο, vehicle enters traffic και entered link, και αφαιρώντας τα όταν αυτά βγαίνουν, left link, vehicle leaves traffic και vehicle aborts, υπολογίζεται πόσα οχήματα βρίσκονται στους συνδέσμους κάθε δεδομένη στιγμή. Ελέγχοντας κάθε πέντε λεπτά σε πόσους συνδέσμους έχει παραβιαστεί η αποθηκευτική χωρητικότητα και ποιες είναι η μέγιστη και η μέση υπέρβαση, προκύπτει:



Διάγραμμα 13: Αριθμός συνδέσμων με παραβιασμένη αποθηκευτική χωρητικότητα.



Διάγραμμα 14: Ποσοστό υπέρβασης της αποθηκευτικής χωρητικότητας των παραβιασμένων συνδέσμων.

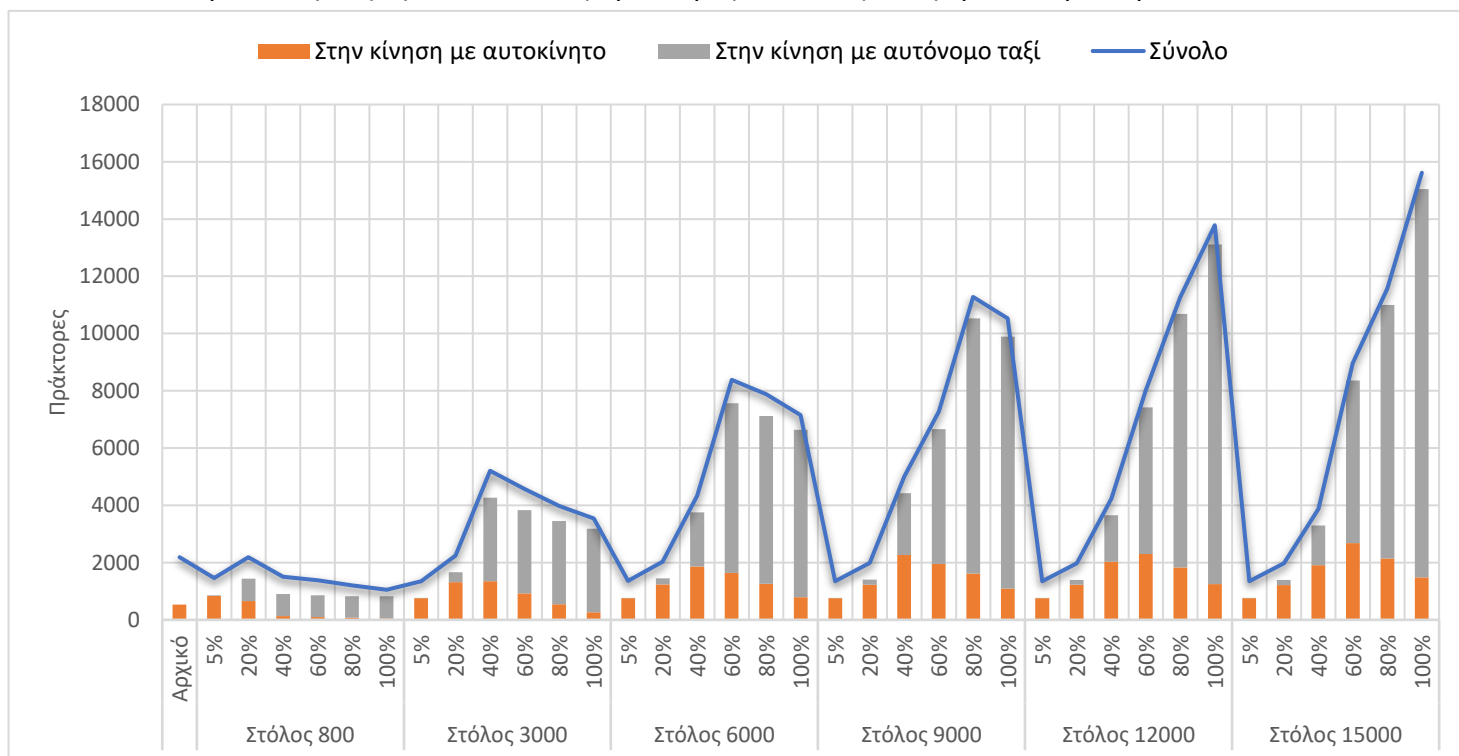
Από τα Διαγράμματα 13,14, φαίνεται πως για έναν αριθμό συνδέσμων, κατά μέσο όρο 750, 0.4% του συνόλου, που πλησιάζουν τους 3500 κατά μέγιστο, 2% του συνόλου, (από τους περίπου 165.000 διαθέσιμους συνδέσμους τους δικτύου), γίνεται **υπέρβαση της αποθηκευτικής τους χωρητικότητας**. Ο αριθμός αυτός φαίνεται να μειώνεται και κατά μέσο όρο και κατά μέγιστο όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης των συμβατικών μετακινήσεων από αυτόνομες, στα σενάρια με στόλους μέχρι 3000 αυτόνομα ταξί, ενώ αυτό δε συμβαίνει, ή συμβαίνει το αντίθετο, σε σενάρια με μεγαλύτερους στόλους. Επίσης ο αριθμός των παραβιασμένων συνδέσμων αυξάνεται, κατά μέσο όρο και κατά μέγιστο, όσο αυξάνεται το μέγεθος του στόλου.

Παρόμοια συμπεριφορά έχει και το ποσοστό τοις εκατό αυτής της υπέρβασης της αποθηκευτικής χωρητικότητας. Ενώ οι μέγιστες τιμές του φτάνουν σε εξαιρετικά μεγάλα ποσοστά, της τάξης του 450.000%, οι μέσες τιμές είναι περί του 750%. Αυτές οι τιμές υπέρβασης φαίνονται υπερβολικές,

αλλά παρουσιάζονται μόνο για να γίνει σαφές πως σε μερικά σημεία του οδικού δικτύου υπάρχει **έντονη συμφόρηση**. Το MATSim αυξάνει αυτόματα τις χωρητικότητες κάποιων συνδέσμων, ειδικά συνδέσμων με μικρό μήκος και μεγάλο ρυθμό ροής εξόδου, ώστε αυτός ο ρυθμός ροής να μπορεί να επιτευχθεί.

Αυτή η έντονη συμφόρηση οδηγεί κάποιους πράκτορες να μην καταφέρουν να ολοκληρώσουν το σύνολο των προγραμματισμένων δραστηριοτήτων τους. Με τον έλεγχο του τύπου συμβάντος stuckAndAbort (που συνήθως συμβαίνει στο τέλος της προσομοίωσης), προκύπτει πόσοι **πράκτορες ματαιώσαν το πλάνο τους. Κατά την διάρκεια** της προσομοίωσης του αρχικού σεναρίου, ματαιώθηκε το πλάνο περίπου 4000 πρακτόρων που χρησιμοποιούσαν M.M.M, βγάζοντάς τους από την προσομοίωση. Το ίδιο συνέβη και σε όλα τα άλλα εξεταζόμενα σεναρία, με παρόμοιους αριθμούς πρακτόρων, αλλά το ζήτημα δεν διερευνήθηκε περαιτέρω, διότι στην παρούσα εργασία τα M.M.M δεν επηρεάζουν την κυκλοφορία. Κανένας πράκτορας με άλλο μέσο μεταφοράς δεν βγήκε από την προσομοίωση κατά την διάρκειά της.

Στο τέλος της προσομοίωσης, οι πράκτορες που δεν έχουν ολοκληρώσει τα πλάνα τους μπορεί να έχουν ξεκινήσει μια δραστηριότητα που δεν ολοκλήρωσαν ποτέ, να βρίσκονται κολλημένοι στην κίνηση οδεύοντας προς την τοποθεσία κάποιας δραστηριότητας ή να περιμένουν ένα αυτόνομο όχημα. Έτσι, στο Διάγραμμα 15 φαίνεται το σύνολο των πρακτόρων των οποίων το πλάνο ματαιώθηκε στο τέλος της προσομοίωσης, πόσοι από αυτούς βρίσκονταν στην κίνηση με αυτοκίνητο και πόσο με αυτόνομο ταξί. Το μέγεθος των πρακτόρων που βρίσκονταν εν μέσω κάποιας δραστηριότητας όταν τελείωσε η προσομοίωση, φαίνεται από την διαφορά της τιμής του συνόλου των πρακτόρων που ματαιώθηκε το πλάνο τους και της κορυφής της στοιβαγμένης στήλης όσων βρίσκονταν στην κίνηση. Επίσης, όσοι περίμεναν αυτόνομο ταξί, το οποίο πήγαινε να τους παραλάβει, και το πλάνο τους ματαιώθηκε, εμφανίζονται σαν να βρίσκονται στην κίνηση με αυτόνομο ταξί, εξαιτίας του τρόπου που γίνεται η κλήση του από τους πράκτορες, ο οποίος αναφέρεται λίγο παρακάτω.



Διάγραμμα 15: Πράκτορες που στο τέλος της προσομοίωσης το πλάνο τους ματαιώθηκε και οδηγήθηκαν σε συμβάν stuckAndAbort. Εμφανίζεται το σύνολο αυτών των πρακτόρων, αυτοί που βρίσκονταν στην κίνηση με αυτόκίνητο και εκείνοι που βρίσκονταν στην κίνηση με αυτόνομο ταξί.

Όπως φαίνεται, ένα υψηλό ποσοστό των πρακτόρων των οποίων τα πλάνα τους ματαιώνονται, περί του 60% για τα πρώτα σεναρία και έως 97% για το σενάριο με τα 15.000 αυτόνομα οχήματα και για 100% αντικατάσταση, βρίσκεται κολλημένο στην κίνηση στο τέλος της προσομοίωσης. Επιπλέον

φαίνεται πως το μεγαλύτερο μέρος αυτού του ποσοστού πρακτόρων αφορά κίνηση ή αναμονή για παραλαβή αυτόνομου ταξί, το οποίο αυξάνεται όσο αυξάνονται οι διαθέσιμοι στόλοι και τα ποσοστά αντικατάστασης.

Στο Διάγραμμα 15 φαίνεται επίσης πως οι πράκτορες που οδηγούνται σε **stuckAndAbort**, αυξάνονται κατά πολύ όσο αυξάνεται ο διαθέσιμος στόλος. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αφενός επειδή στο αρχικό σενάριο, οι αντίστοιχοι πράκτορες χρησιμοποιούσαν περισσότερο μέσα μεταφοράς όπως το ποδήλατο, τα οποία τηλεμεταφέρονταν, χωρίς να επηρεάζονται από την συμφορημένη κυκλοφορία. Αφετέρου, συγκρίνοντας τα σενάρια με στόλους 800 και 15000 αυτόνομα ταξί για 100% αντικατάσταση, ο αριθμός των οχημάτων που μπορεί να έχει κληθεί από κάποιο πράκτορα ή που να περιέχουν ήδη κάποιο πράκτορα, περιορίζεται από τον αριθμό του διαθέσιμου στόλου. Αυτό σημαίνει πως η τόσο μεγάλη διαφορά μεταξύ τους, οφείλεται στο γεγονός πως για κάποιους πράκτορες η κλήση για αυτόνομο όχημα δεν έφτασε ποτέ σε κάποιο από αυτά. Αυτοί οι πράκτορες δεν εμφανίζονται σε συμβάν **stuckAndAbort**, και άρα στο Διάγραμμα 15.

Για να γίνει κατανοητό το πως η υπηρεσία αυτόνομων ταξί επηρεάζει τις κινήσεις και την τελική ματαίωση των πλάνων των πρακτόρων, πρέπει να γίνει η εξήγηση της κλήσης και της παράδοσης των πρακτόρων στον προορισμό τους. Εξετάζοντας τους τύπους των συμβάντων **departure** και **arrival** με παράμετρο **legMode = 'av'**, προκύπτει ποιοι πράκτορες κάλεσαν ένα αυτόνομο ταξί και ποιοι τελικά έφτασαν στον προορισμό τους με αυτό, αντίστοιχα. Στο Διάγραμμα 16, οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τις μετακινήσεις σχεδιασμού για κάθε ποσοστό αντικατάστασης συμβατικών μετακινήσεων από αυτόνομες.

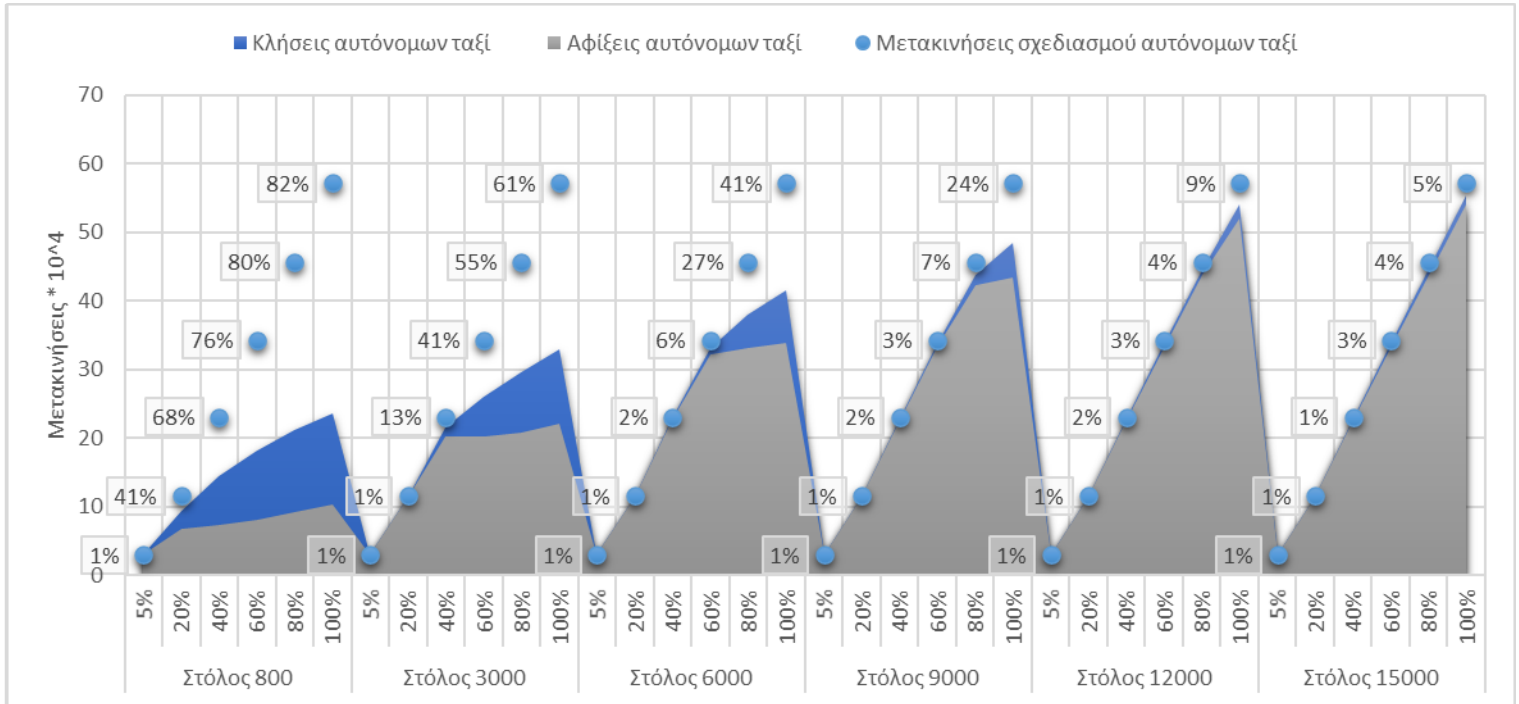
Για τους πράκτορες λοιπόν, που κάλεσαν κάποιο αυτόνομο ταξί, δηλαδή συμβάν με τύπο **departure** και παράμετρο **legMode = 'av'**, χωρίς όμως να καταφέρει να φτάσει σε κανένα όχημα αυτή η κλήση, δεν έγινε η ματαίωση του πλάνου τους στο τέλος της προσομοίωσης. Απλώς περίμεναν χωρίς ανταπόκριση. Το μέγεθος αυτών των πρακτόρων γίνεται σαφές στο Διάγραμμα 16. Στο διάγραμμα αυτό, από τις μετακινήσεις σχεδιασμού έχουν αφαιρεθεί οι μετακινήσεις που μετατράπηκαν αυτόματα από αυτόνομο ταξί σε περπάτημα, όπως έχει εξηγηθεί στην αρχή του 4.3.1. Οι μετακινήσεις αυτές ήταν λίγο παραπάνω από το 6% των σχεδιασμένων μετακινήσεων με αυτόνομο ταξί, για κάθε νέο σενάριο.

Οι στόλοι της υπηρεσίας έχουν υπολογιστεί έτσι ώστε κάθε αύξηση του μεγέθους του στόλου, να μπορεί να ικανοποιήσει τις μετακινήσεις κάθε αύξησης του ποσοστού αντικατάστασης. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 16, αυτό επιτυγχάνεται γενικώς ικανοποιητικά, εκτός ίσως του σεναρίου με στόλο 15000 οχήματα, όπου ακόμα και σε αυτό η απόκλιση είναι της τάξης των 3000 μετακινήσεων που δεν έφτασαν στον προορισμό τους, για το 100% της αντικατάστασης. Γίνεται σαφές, πως για στόλους που δεν μπορούν καλύψουν την αναγκαία ζήτηση, η υπηρεσία προκύπτει ανεπαρκής και μεγάλο μέρος των μετακινήσεων δεν εξυπηρετούνται.

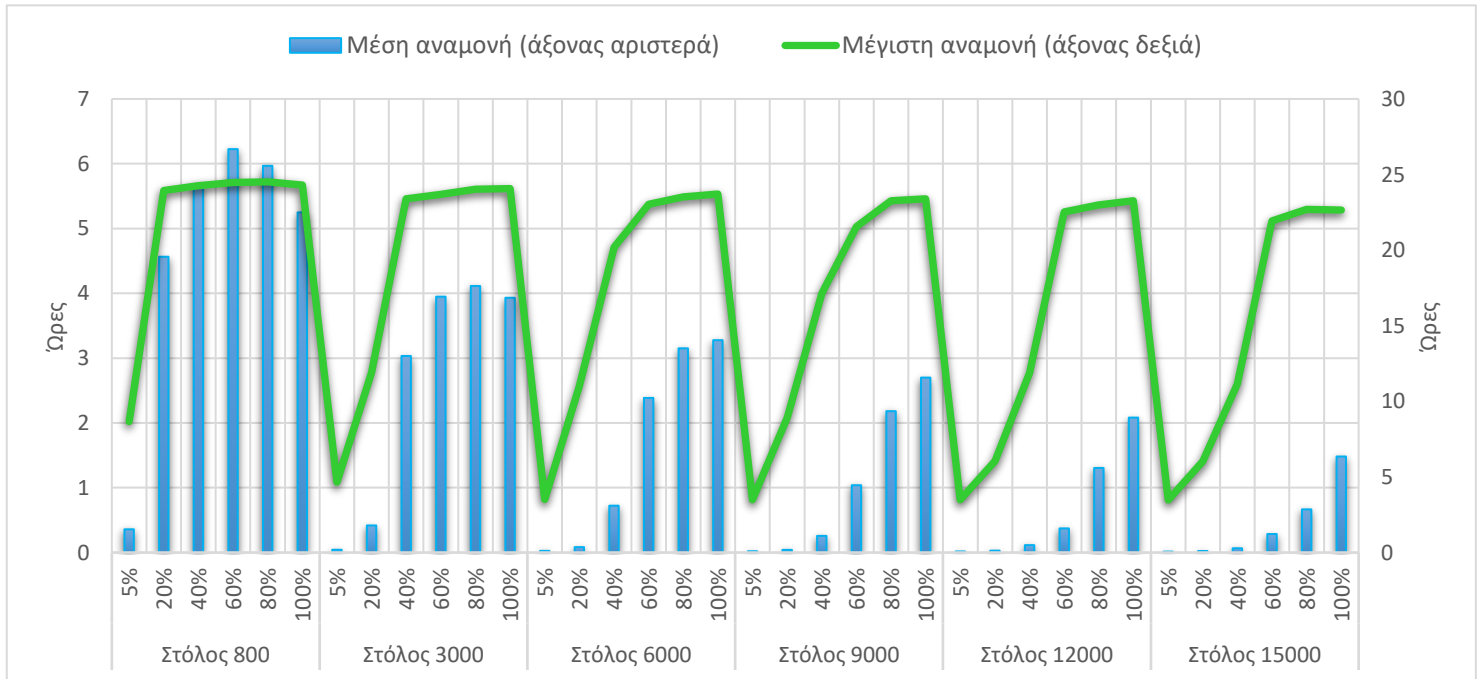
Οι πράκτορες που τελικά κατάφεραν να χρησιμοποιήσουν την υπηρεσία αυτόνομων οχημάτων περίμεναν κατά μέσο όρο περίπου 2 ώρες για να έρθει το όχημα τους, με τον χρόνο αυτό να είναι μόλις μερικά λεπτά, περίπου 11 λεπτά, για στόλους που εξυπηρετούν ικανοποιητικά την ζήτηση. Σε κάποιες ακραίες περιπτώσεις η **αναμονή** έφτασε σχεδόν τις 25 ώρες, που είναι σχεδόν όλη η μέρα της προσομοίωσης.

Ο υπολογισμός των χρόνων αναμονής, υπολογίστηκε ως ο χρόνος μεταξύ των συμβάντων με τύπο **departure** και παράμετρο **legMode = "av"**, όπου ο πράκτορας καλεί το αυτόνομο ταξί, και εκείνων που αφορούν στον ίδιο πράκτορα που κάλεσε το όχημα και έχουν τύπο **PersonEntersVehicle**. Ύστερα, με την εύρεση του χρόνου μεταξύ του **PersonEntersVehicle** και του **PersonLeavesVehicle**, υπολογίζεται ο **χρόνος της μετακίνησης**, που δεν εμφανίζεται σε κάποιο ξεχωριστό διάγραμμα. Κατά μέσο όρο, τα αυτόνομα οχήματα χρειάστηκαν περίπου 21 λεπτά να ολοκληρώσουν μία μεταφορά,

ενώ ο μέγιστος χρόνος άγγιξε τις 22 ώρες στα σενάρια με 12 και 15 χιλιάδες οχήματα και για αντικαταστάσεις μετακινήσεων μεγαλύτερες του 80%.



Διάγραμμα 16: Σύγκριση μεταξύ των σχεδιασμένων μετακινήσεων με αυτόνομα ταξί, των κλήσεων για αυτόνομα ταξί που έγιναν και των μετακινήσεων που τελικά και έφτασαν στον προορισμό τους. Εμφανίζεται επίσης το ποσοστό των μετακινήσεων που δεν έφτασαν στον προορισμό τους ως προς τις συνολικές μετακινήσεις σχεδιασμού.



Διάγραμμα 17: Αναμονή των πρακτόρων για τον ερχομό ενός αυτόνομου ταξί, σε ώρες.

Τέλος, ένα σημαντικό μέγεθος που διερευνήθηκε είναι τα **οχηματο-χιλιόμετρα** που διανύθηκαν. Αυτό το μέγεθος προκύπτει πολλαπλασιάζοντας όλα τα οχήματα που εξετάστηκαν, επί τη συνολική απόσταση που διάνυσαν. Εκτός από τα συνολικά οχηματο-χιλιόμετρα, για κάθε σενάριο υπολογίστηκαν και τα οχηματο-χιλιόμετρα που διανύθηκαν από αυτόνομα οχήματα δίχως επιβάτη, δηλαδή κατά τη διάρκεια που πήγαιναν να παραλάβουν κάποιο πράκτορα.

Για να υπολογιστούν αυτά τα μεγέθη, ελέγχθηκαν οι τύποι συμβάντων left link, vehicle leaves traffic, actend και actstart. Για τα συνολικά οχηματο-χιλιόμετρα, αθροίστηκε το μήκος όσων συνδέσμων είχαν συμβάντα με τους δύο πρώτους τύπους. Για τις διαδρομές χωρίς επιβάτη, πάλι αξιοποιήθηκαν οι δύο πρώτοι τύποι συμβάντων, για να αθροιστούν τα μήκη των συνδέσμων, αλλά μόνο για τα οχήματα που βρίσκονταν σε μια λίστα η οποία συγκρατούσε ποια οχήματα ταξίδευαν χωρίς επιβάτη.

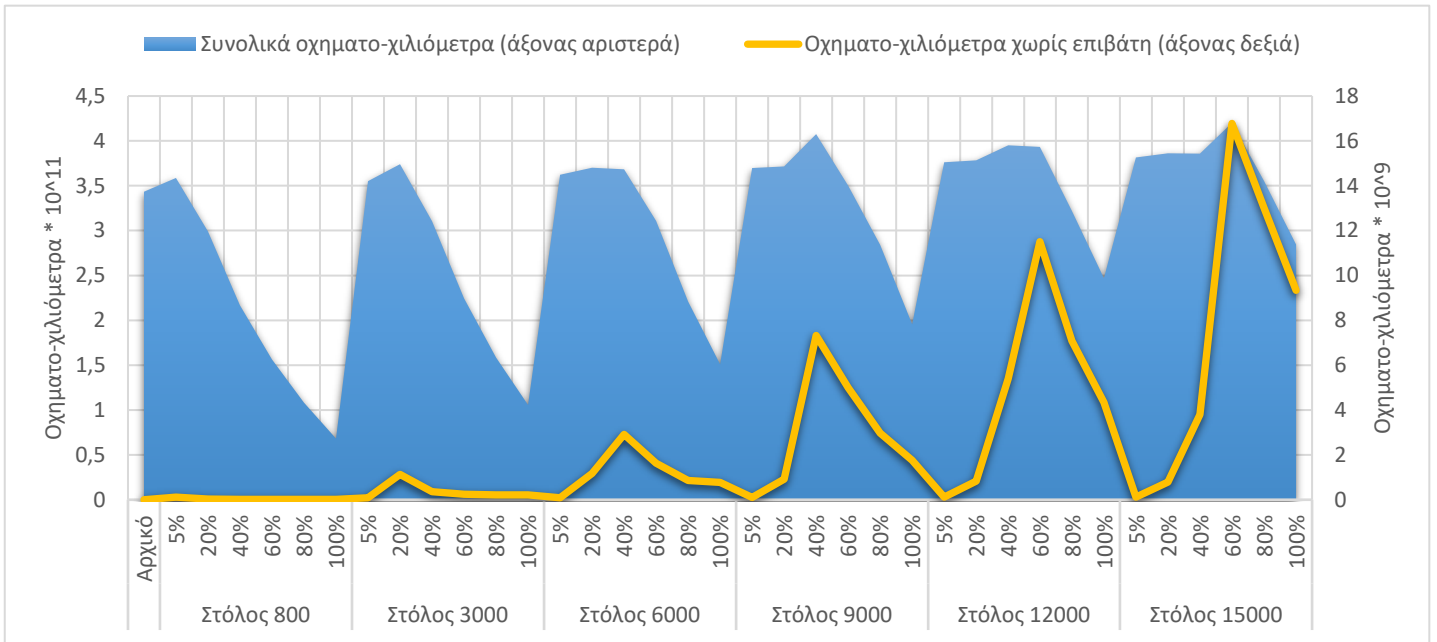
Στα συμβάντα που είχαν τύπο actend με παράμετρο actType = "AVStay", που σημαίνει πως ένα αυτόνομο όχημα έχει κληθεί από κάποιον πράκτορα, το αντίστοιχο αυτόνομο όχημα έμπαινε στη λίστα με τα οχήματα χωρίς επιβάτη. Για τύπο συμβάντος actstart με παράμετρο actType = "AVPickup", που σημαίνει πως ο πράκτορας ετοιμάζεται να μπει στο αυτόνομο ταξί, το αντίστοιχο αυτόνομο ταξί έβγαινε από τη λίστα.

Στο αρχικό σενάριο φαίνεται να έχουν διανυθεί $3,4 \cdot 10^{11}$ οχηματο-χιλιόμετρα. Τα μέγιστα συνολικά οχηματο-χιλιόμετρα που παρατηρούνται είναι $4,2 \cdot 10^{11}$, δηλαδή 23,5% παραπάνω από αυτά του αρχικού σεναρίου, εκ των οποίων το 5% ή $16,8 \cdot 10^9$ οχηματο-χιλιόμετρα διανύονται δίχως επιβάτη.

Το γεγονός ότι τα συνολικά οχηματο-χιλιόμετρα μειώνονται όσο μεγαλώνει το ποσοστό αντικατάστασης, αντικατοπτρίζει όσα αναφέρθηκαν παραπάνω: δηλαδή ότι ένα μέρος των μετακινήσεων που ανατέθηκαν στην υπηρεσία αυτόνομων ταξί, ειδικά για τους μικρότερους στόλους, τελικά δεν γίνονται. Έτσι αυξανόμενες μετακινήσεις με αυτοκίνητο, που είναι το μόνο άλλο μέσο που μπορεί συμβάλει στα οχηματο-χιλιόμετρα, αντικαθίστανται με αυτόνομα οχήματα, οι οποίες δεν εκτελούνται ποτέ. Παρόλα αυτά, αυξάνονται όσο αυξάνει το μέγεθος του στόλου, όχι τόσο ως μέγιστη τιμή, αλλά σχετικά με τα ποσοστά αντικατάστασης που εξυπηρετούνται ικανοποιητικά.

Τα **οχηματο-χιλιόμετρα των κενών διαδρομών**, δηλαδή αυτών που το αυτόνομο όχημα πάει να παραλάβει κάποιον πράκτορα, αυξάνονται με την αύξηση του στόλου. Σχετικά με το ποσοστό αντικατάστασης, τα οχηματο-χιλιόμετρα αρχικά αυξάνονται, αλλά για τα υψηλότερα ποσοστά αντικατάστασης, στα οποία όπως φάνηκε παραπάνω, υπάρχουν αρκετές μετακινήσεις που δεν εξυπηρετούνται, τα οχηματο-χιλιόμετρα μειώνονται. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του τρόπου λειτουργίας της υπηρεσίας των αυτόνομων ταξί.

Η υπηρεσία, όταν η ζήτηση ξεπερνά τη διαθέσιμη προσφορά των αυτόνομων οχημάτων, κατάσταση που όπως φάνηκε είναι σχεδόν μόνιμη στα εξεταζόμενα σενάρια, αποστέλλει το πρώτο αυτόνομο ταξί που θα γίνει διαθέσιμο στον κοντινότερο πράκτορα που περιμένει. Έτσι, όσο μεγαλώνει το ποσοστό της αντικατάστασης των μετακινήσεων, οι πράκτορες που καλούν ένα αυτόνομο όχημα κάθε δεδομένη στιγμή, είναι ταυτόχρονα περισσότεροι, αλλά και περισσότερο διασκορπισμένοι στο δίκτυο. Άρα, τα αυτόνομα ταξί διανύουν μικρότερες αποστάσεις ως τον κοντινότερο πράκτορα, στα σενάρια με υψηλές αντικαταστάσεις μετακινήσεων.



Διάγραμμα 18: Συνολικά Οχηματο-χιλιόμετρα και οχηματο-χιλιόμετρα που διανύθηκαν χωρίς επιβάτη, για όλα τα σενάρια.

Οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για την παραπάνω ανάλυση δεν θα παρουσιαστούν στα παραρτήματα. Η μορφή και ο τρόπος λειτουργίας τους όμως, είναι παρόμοιοι με τον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε στο επόμενο κεφάλαιο για να παραχθούν τα κυκλοφοριακά μεγέθη.

Κεφάλαιο 5: Κυκλοφοριακή Ανάλυση και Ανθεκτικότητα

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε η επισκόπηση και η ανάλυση κάποιων σημαντικών χαρακτηριστικών των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν. Προέκυψε πως αυτές οι προσομοιώσεις είχαν κάποιους περιορισμούς και δεν αποτελούν την πλέον ιδανική αναπαράσταση της πραγματικότητας. Παρόλα αυτά, παρακάτω θα γίνει η κυκλοφοριακή ανάλυση των αποτελεσμάτων τους, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση που έχουν στην κυκλοφορία τα σενάρια που προσομοιώθηκαν και να προκύψουν τα ζητούμενα συμπεράσματα για την ανθεκτικότητα του κυκλοφοριακού συστήματος. Για την ανάλυση αυτή αξιοποιήθηκαν οι γενικευμένες εξισώσεις του Edie, (Edie, 1965), όπως αναφέρθηκαν στον κεφάλαιο της Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης, και η μεθοδολογία της εξηγείται παρακάτω.

5.1 Μεθοδολογία Κυκλοφοριακής Ανάλυσης

Στόχος αυτής της ανάλυσης είναι να υπολογιστούν τα βασικά μακροσκοπικά κυκλοφοριακά μεγέθη της πυκνότητας K , του φόρτου Q και της ταχύτητας V , για το σύνολο του εξεταζόμενου οδικού δικτύου. Οι γενικευμένες εξισώσεις του Edie μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να υπολογιστούν οι μέσες τιμές των μεγεθών αυτών στο ζητούμενο μακροσκοπικό επίπεδο.

Ακολουθώντας μια διαδικασία δύο βημάτων, (Leclercq, Chiabaut, & Trinquier, 2014, σσ. 3-4), αρχικά θα υπολογιστούν οι μέσες τιμές των μεγεθών της πυκνότητας K_i και του φόρτου Q_i , για κάθε σύνδεσμο του δικτύου και για χρονικές περιόδους ελέγχου 5 λεπτών. Αυτό σημαίνει πως για κάθε σενάριο θα προκύψουν 360 χρονικές περιόδους ελέγχου, που θα καλύπτουν και τις 30 ώρες της προσομοίωσης. Οι εξισώσεις για να προκύψουν οι μέσες τιμές των μεγεθών σε επίπεδο συνδέσμου και για κάθε χρονική περίοδο είναι οι εξής:

$$Q_i = \frac{\sum_k d_k}{l_i \Delta t} \quad (5.1)$$

$$K_i = \frac{\sum_k t_k}{l_i \Delta t} \quad (5.2)$$

Όπου i είναι οι σύνδεσμοι του οδικού δικτύου, k είναι τα οχήματα που μετακινούνται σε αυτόν τον σύνδεσμο, συμβατικά ή αυτόνομα, d_k είναι η απόσταση σε μέτρα που διάνυσαν κατά τις μετακινήσεις τους στην εξεταζόμενη χρονική περίοδο και t_k είναι ο αντίστοιχος χρόνος σε δευτερόλεπτα αυτών των μετακινήσεων. Το Δt είναι ίσο με 300, που είναι η χρονική περίοδος των 5 λεπτών σε δευτερόλεπτα, και το l_i είναι το μήκος του κάθε συνδέσμου i .

Με L να είναι το συνολικό μήκος του οδικού δικτύου, τα τελικά μεγέθη K και Q για κάθε χρονική περίοδο προκύπτουν ως εξής:

$$Q = \sum_i \frac{l_i Q_i}{L} \quad (5.3)$$

$$K = \sum_i \frac{l_i K_i}{L} \quad (5.4)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις (5.1-4), δεν διαφέρουν τελικώς από τις εξισώσεις (2.5-6) του κεφαλαίου της Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης, απλώς η διαδικασία γίνεται σε δύο βήματα και σε επίπεδο συνδέσμου. Έτσι είναι τα αποτελέσματά της μπορούν εποπτευθούν πιο εύκολα και αξιόπιστα για τυχόν σφάλματα.

Το εξεταζόμενο οδικό δίκτυο της περιοχής της Ζυρίχης είναι πολύ εκτεταμένο και το άθροισμα των μηκών των συνδέσμων του ισούται με λίγο λιγότερα από 22χιλ χιλιόμετρα. Το μέγιστο όμως μήκος συνδέσμων που αξιοποιήθηκε σε κάποιο σενάριο ήταν περίπου 6χιλ χιλιόμετρα. Αυτό σημαίνει πως στη χρονική περίοδο ελέγχου 5 λεπτών που αξιοποιήθηκε αυτό το μέγιστο μήκος του δικτύου, σε όλο το υπόλοιπο μήκος του, δεν κινήθηκε κάποιο όχημα.

Έτσι, δεν είναι ορθό οι τελικές τιμές πυκνότητας και φόρτου να διαιρούνται με το συνολικό μήκος του οδικού δικτύου. Επειδή μέσα στην μέρα υπάρχει μεγάλη μεταβλητότητα, αναφορικά με τη

χρήση του οδικού δικτύου, πιο σωστή προσέγγιση είναι οι τιμές αυτές να διαιρεθούν με το μήκος του συνόλου των συνδέσμων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε εξεταζόμενη χρονική περίοδο. Έτσι οι παραπάνω εξισώσεις πρέπει να τροποποιηθούν:

$$Q = \sum_i \frac{l_i Q_i}{\sum_i l_i} \quad (5.5) \quad K = \sum_i \frac{l_i K_i}{\sum_i l_i} \quad (5.6)$$

Με υπολογισμένα τα μεγέθη της Πυκνότητας και του Φόρτου, η μέση τιμή της Ταχύτητας, V , του οδικού δικτύου για κάθε χρονική περίοδο ελέγχου, προκύπτει ως εξής:

$$V = \frac{Q}{K} \quad (5.7)$$

Στην πράξη, αυτά τα μεγέθη υπολογίστηκαν μέσω κώδικα και με μια διαδικασία της οποίας βασικά μέρη περιγράφονται παρακάτω. Ο πλήρης κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού python υπάρχει στα Παραρτήματα. Για τους ζητούμενους υπολογισμούς έγινε, και για τα 37 σενάρια, το αρχικό και τα 36 που δημιουργήθηκαν, η ανάλυση των συμβάντων του `output_events.xml`, χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου από το `output_network.xml`. **Παραγόμενα** από αυτήν την ανάλυση, για κάθε σενάριο, είναι **3 αρχεία μορφής κειμένου**. Ένα για την πυκνότητα, `K.txt`, ένα για τον φόρτο, `Q.txt`, και ένα που περιέχει πληροφορίες για τα οχήματα που κόλλησαν και ματαιώθηκαν στο τέλος της προσομοίωσης, `stuck_vehicles.txt`.

Τα αρχεία της πυκνότητας και του φόρτου, περιέχουν τις τελικές 360 τιμές, μία για κάθε χρονική περίοδο ελέγχου 5 λεπτών, των μέσων τιμών των αντίστοιχων μεγεθών του συνολικού δικτύου. Για να γίνουν κατανοητά τα περιεχόμενα του τρίτου αρχείου, πρέπει να αναφερθούν κάποια βασικά σημεία της διαδικασίας με την οποία έγινε η ανάλυση.

Για κάθε σενάριο, αρχικά δημιουργήθηκε ένα μητρώο που κράτησε το μήκος του κάθε συνδέσμου. Ύστερα, για κάθε συμβάν του αρχείου με τα συμβάντα, διαβάστηκε ο χρόνος και ο τύπος του. Ο χρόνος αξιοποιήθηκε αρχικά για να οροθετηθούν οι 360 χρονικές περίοδοι, μία ανά 300 δευτερόλεπτα. Οι τύποι των συμβάντων που χρησιμοποιήθηκαν για την κυκλοφοριακή ανάλυση είναι οι: `entered link`, `left link`, `vehicle leaves traffic` και `vehicle aborts`.

Δεν χρησιμοποιήθηκε ο τύπος, `vehicle enters traffic` διότι, όπως έχει εξηγηθεί στο Θεωρητικό Υπόβαθρο, τα οχήματα που μπαίνουν στην κυκλοφορία, τοποθετούνται κατευθείαν στην κορυφή της ουράς του συνδέσμου. Αυτό σημαίνει πως αν αυτός ο τύπος συμβάντος χρησιμοποιούνταν, τότε κάθε φορά που ένα όχημα έμπαινε στην κυκλοφορία, θα καταγραφόταν το συνολικό μήκος του συνδέσμου στο άθροισμα της απόστασης, αλλά, άσχετα με το πόσο συμφορημένος είναι ο σύνδεσμος, ο χρόνος μετακίνησης θα ήταν 1 δευτερόλεπτο.

Για αυτούς τους τύπους συμβάντων λοιπόν και για κάθε όχημα που έμπαινε σε έναν σύνδεσμο, `entered link`, καταγραφόταν σε ένα μητρώο ο σύνδεσμος, ο χρόνος και ο αριθμός, από το 0 ως το 359, της χρονικής περιόδου ελέγχου που μπήκε. Όταν ένα όχημα έβγαινε από έναν σύνδεσμο, με έναν από τους λοιπούς τύπους συμβάντων, καταγραφόταν και πάλι ο σύνδεσμος, ο χρόνος και ο αριθμός της χρονικής περιόδου που βγήκε. Αν ο τύπος που έβγαλε το όχημα από τον σύνδεσμο ήταν η ματαίωση του οχήματος, `vehicle aborts`, καταγραφόταν επιπλέον πως το όχημα ματαιώθηκε.

Με αυτά τα στοιχεία, υπολογίζεται για κάθε χρονική περίοδο και για κάθε σύνδεσμο, το **άθροισμα της απόστασης d_k** και του **χρόνου μετακίνησης t_k** όλων των οχημάτων που πέρασαν από τους συνδέσμους. Κατά τη διάρκεια αυτού του υπολογισμού, όσα οχήματα είχαν βγει, και άρα είχαν ολοκληρώσει τη διαδρομή τους, από κάποιο σύνδεσμο, διαγράφονταν από το μητρώο. Οπότε πιο απλά, το μητρώο αυτό για κάθε δεδομένη στιγμή, κρατούσε το ζεύγος χαρακτηριστικών εισόδου-εξόδου κάθε οχήματος, για κάθε σύνδεσμο. Κατά τον υπολογισμό των μεγεθών της απόστασης και του χρόνου, που γινόταν μία φορά κάθε 5 λεπτά, αν το ζεύγος αυτό είχε ολοκληρωθεί, υπολογίζονταν τα

ζητούμενα μεγέθη και ύστερα διαγραφόταν από το μητρώο. Αν όμως ήταν μισό, δηλαδή ένα όχημα είχε μόνο μπει στον σύνδεσμο, δεν γινόταν κάποια ενέργεια.

Όπως έγινε σαφές από το προηγούμενο κεφάλαιο, σε όλα τα σενάρια υπήρχε συμφόρηση. Επομένως προς το τέλος της προσομοίωσης, αρκετά οχήματα είχαν μπει σε κάποιο σύνδεσμο πριν από κάποια ώρα και δεν είχαν βγει ποτέ, οπότε αυτό τα ανάγκαζε να ματαιωθούν. Αρκετά περισσότερα ήταν τα οχήματα όμως, τα οποία είχαν μπει στα τελευταία 10 λεπτά, δηλαδή στις τελευταίες δύο χρονικές περιόδους ελέγχου, και δεν πρόλαβαν να βγουν, άρα ματαιώθηκαν. Αυτή η συσσώρευση οχημάτων στις δύο τελευταίες χρονικές περιόδους οδηγούσε σε ακραίες τιμές (outliers), λόγω του τρόπου που υπολογίζονταν η απόσταση και ο χρόνος των μετακινήσεων των οχημάτων. Αυτός ο τρόπος εξηγείται στις αμέσως επόμενες παραγράφους.

Για κάθε ολοκληρωμένο ζεύγος, υπήρχαν οι πληροφορίες του δευτερολέπτου και της χρονικής περιόδου που αυτό μπήκε και που βγήκε από έναν σύνδεσμο. Κατά τον υπολογισμό του χρόνου μετακίνησης, υπολογίζονταν ακριβώς τα δευτερόλεπτα που μετακινήθηκε με βάση τις παραπάνω πληροφορίες. Για τον υπολογισμό της απόστασης όμως, λόγω έλλειψης καλύτερης μεθόδου και επειδή το MATSim δεν προσομοιώνει μικροσκοπικά τις κινήσεις κάθε οχήματος εσωτερικά των συνδέσμων, η απόσταση της μετακίνησης μοιράστηκε σε όλες τις χρονικές περιόδους που επηρέασε το όχημα, με βάρος τον αντίστοιχο χρόνο μετακίνησης.

Για παράδειγμα, αν ένα όχημα μπήκε στην αρχή της χρονικής περιόδου 12 και βγήκε στο τέλος της χρονικής περιόδου 15, θα προστεθούν 300 δευτερόλεπτα στο άθροισμα του χρόνου μετακίνησης του συνδέσμου, σε κάθε μία από τις 4 αυτές χρονικές περιόδους. Το μήκος που διανύθηκε, που είναι το μήκος του συνδέσμου, θα διαιρεθεί με τα 1200 δευτερόλεπτα του συνολικού χρόνου της μετακίνησης και στο άθροισμα της απόστασης του συνδέσμου θα προστεθεί $300 \cdot$ το διαιρεμένο μήκος του συνδέσμου, για κάθε μία από τις 4 χρονικές περιόδους. Φυσικά στον κώδικα καλύπτονται και όλες οι ενδιάμεσες περιπτώσεις εισόδου-εξόδου.

Επιπλέον, για κάθε όχημα που εξετάζεται, ο χρόνος και η απόσταση που προστίθενται στα αντίστοιχα αθροίσματα, πολλαπλασιάζεται επί 10. Αυτό γιατί τα σενάρια που προσομοιώθηκαν αφορούν στο 10% του πραγματικού πληθυσμού της Ζυρίχης και άρα η κυκλοφορία αποτελείται από περίπου δέκα φορές λιγότερους πράκτορες που μετακινούνται στην πόλη. Στις προσομοιώσεις αυτή η διαφορά έχει αντισταθμιστεί μειώνοντας για κάθε σύνδεσμο την αποθηκευτική χωρητικότητα κατά 90% και τον μέγιστο ρυθμό ροής εξόδου κατά 70%. Έτσι, στην προσομοιωμένη κυκλοφορία ο μειωμένος πληθυσμός αντισταθμίζεται από μειωμένες δυνατότητες του οδικού δικτύου. Οπότε, στην ανάλυση που έγινε, για να προκύψουν ορθά μεγέθη, κάθε όχημα που εξετάστηκε, αντιμετωπίστηκε σαν δέκα πραγματικά οχήματα.

Εξαιτίας λοιπόν του τρόπου υπολογισμού του χρόνου και της απόστασης που παρουσιάστηκε παραπάνω, η ματαίωση αρκετών οχημάτων, ειδικά στις τελευταίες χρονικές περιόδους ελέγχου, προκάλούσαν τη δημιουργία ανεπιθύμητων ακραίων τιμών σε αυτά τα αθροίσματα. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά, πριν γίνει ο υπολογισμός της τελευταίας χρονικής περιόδου, υπολογίστηκαν τα ζεύγη που στο παραπάνω μητρώο είναι μισά, τα οχήματα δηλαδή που έχουν μπει σε κάποιο σύνδεσμο και δεν έχουν βγει. Αυτό είναι και ένα από τα δύο περιεχόμενα του τρίτου παραγόμενου αρχείου, του **stuck vehicles.txt**. Για παράδειγμα στην περίπτωση του σεναρίου με στόλο 15000 αυτόνομων οχημάτων και 100% αντικατάσταση μετακινήσεων, από αυτόν τον υπολογισμό προέκυψε πως: 7 οχήματα είχαν μπει στην χρονική περίοδο 267, δηλαδή 7.5 ώρες πριν(!), στη συνέχεια ο αριθμός των οχημάτων αυξανόταν ομαλά μέχρι την χρονική περίοδο 357, που είχαν μπει 624 οχήματα, 2284 οχήματα που είχαν μπει την περίοδο 358 και 27781 που είχαν μπει την περίοδο 359. Στο σύνολό, υπήρχαν 42960 μισά ζεύγη στο μητρώο.

Κατά τον υπολογισμό της τελευταίας χρονικής περιόδου, αθροίστηκαν κανονικά με την παραπάνω διαδικασία οι αποστάσεις και οι χρόνοι μετακίνησης όλων των οχημάτων εκτός των δύο τελευταίων χρονικών περιόδων. Για τις δύο τελευταίες χρονικές περιόδους ελέγχου όμως, αθροίστηκαν οι τιμές μόνο των οχημάτων που δεν ματαιώθηκαν, αλλά βγήκαν από τους συνδέσμους που είχαν μπει, είτε με left link ή με vehicle leaves traffic. Τελικά δεν υπολογίστηκαν καθόλου οι τιμές χρόνου και απόστασης 2766 οχημάτων, 607 για την περίοδο 358 και 2159 για την περίοδο 359, συνεχίζοντας το παραπάνω παράδειγμα. Αυτά τα τελικά οχήματα που δεν υπολογίστηκαν, είναι τα δεύτερα περιεχόμενα του αρχείου stuck vehicles.txt. Το αρχείο αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε περαιτέρω και αποτέλεσε μόνο βοηθητικό αρχείο επισκόπησης ώστε να γίνει σαφής η ανάγκη για επιπλέον ενέργειες στις τελευταίες χρονικές περιόδους.

Ύστερα, έχοντας υπολογίσει για κάθε σύνδεσμο του οδικού δικτύου, 360 αθροίσματα απόστασης d_k και χρόνου μετακίνησης t_k , και εφαρμόζοντας τις εξισώσεις (5.1-2), υπολογίζονται ο φόρτος Q_i και πυκνότητα K_i του κάθε συνδέσμου. Παράλληλα, υπολογίζεται το άθροισμα των μηκών των συνδέσμων που είχαν κάποια κυκλοφορία οχημάτων για κάθε χρονική περίοδο, $\sum_i l_i$. Αυτό γίνεται εξετάζοντας αν είναι μηδενικά ή όχι τα αθροίσματα του χρόνου μετακίνησης κάθε συνδέσμου για κάθε χρονική περίοδο. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό των **τελικών μέσων τιμών φόρτου Q και πυκνότητας K** του οδικού δικτύου, για κάθε χρονική περίοδο, εφαρμόζονται οι εξισώσεις (5.5-6).

Σε τελευταίο βήμα, χρησιμοποιείται η εξίσωση (5.7), ώστε να υπολογιστούν και οι αντίστοιχες μέσες τιμές της ταχύτητας του οδικού δικτύου. Οι ταχύτητες αυτές δεν αποθηκεύτηκαν σε κάποιο αρχείο και όποτε χρειάστηκαν οι τιμές τους, απλώς διαιρέθηκαν τα μεγέθη της πυκνότητας και του φόρτου ώστε να προκύψουν. Τελικά, με την παραπάνω διαδικασία, υπολογίστηκαν όλα τα ζητούμενα κυκλοφοριακά μεγέθη, για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια.

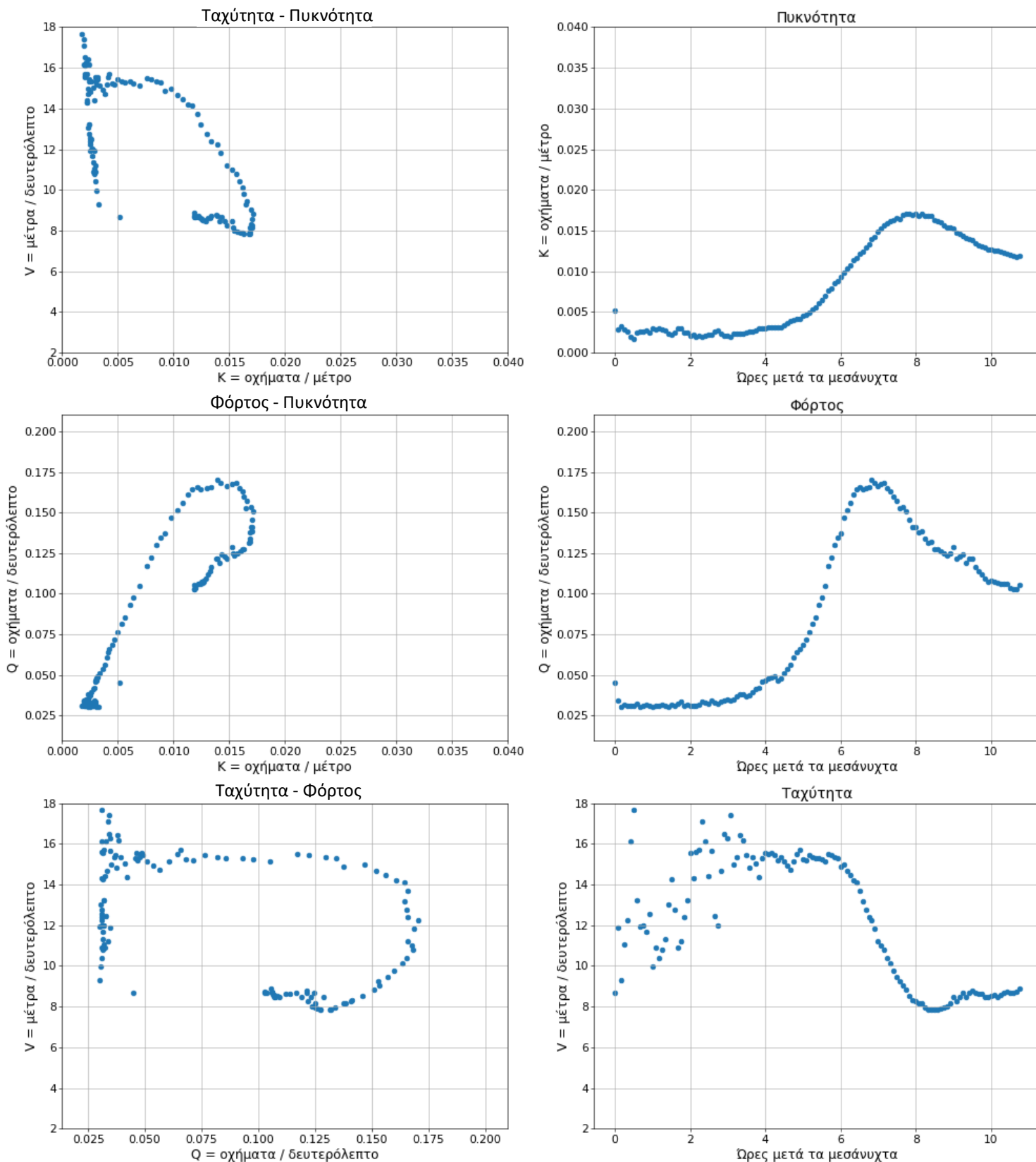
5.1.1 Αποτελέσματα Κυκλοφοριακής Ανάλυσης

Για να γίνουν κατανοητά τα κυκλοφοριακά μεγέθη που υπολογίστηκαν παραπάνω, είναι ανάγκη να τοποθετηθούν σε **κατάλληλα διαγράμματα**, ώστε να γίνουν σαφή τα χαρακτηριστικά τους. Για κάθε σενάριο λοιπόν, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα που παρουσιάζουν την εξέλιξη των βασικών κυκλοφοριακών μεγεθών, δηλαδή της πυκνότητας, του φόρτου και της ταχύτητας, κατά τη διάρκεια της προσομοιωμένης μέρας. Δημιουργήθηκαν επίσης τα τρία μακροσκοπικά θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής: Ταχύτητας - Πυκνότητας, Φόρτου - Πυκνότητας και Ταχύτητας - Φόρτου.

Στο Διάγραμμα 19 φαίνονται αυτά τα **έξι διαγράμματα για το αρχικό σενάριο της Ζυρίχης**, που δεν περιέχει αυτόνομα οχήματα. Όλα τα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν, όπως φαίνεται και στα 3 διαγράμματα της δεξιάς στήλης για το αρχικό σενάριο, **αφορούν περίπου στην μισή μέρα** που προσομοιώθηκε. Συγκεκριμένα αφορούν 130 περιόδους ελέγχου 5 λεπτών, δηλαδή από τα μεσάνυχτα μέχρι τις 10:48 το πρωί.

Αυτό γίνεται διότι λόγω των χαρακτηριστικών του MATSim και των ιδιοτήτων της κυκλοφορίας των σεναρίων που προσομοιώθηκαν, τα διαγράμματα αποκτούσαν λανθασμένη μορφή. Έτσι αποφασίστηκε να παρουσιαστούν τα διαγράμματα που περιλαμβάνουν μόνο την μία από τις δύο αιχμές της κυκλοφοριακής συμφόρησης, την πρωινή. Αυτή η επιλογή θα εξηγηθεί αναλυτικότερα παρακάτω. Για όλα τα διαγράμματα ίδιου τύπου που θα παρουσιαστούν, π.χ. Ταχύτητας - Πυκνότητας, έχουν χρησιμοποιηθεί τα ίδια όρια τιμών στους άξονες, για την ευκολότερη σύγκρισή τους.

Η πρώτη παρατήρηση που γίνεται στα διαγράμματα του αρχικού σεναρίου είναι το εύρος των τιμών τους. Η ταχύτητα παρουσιάζει μέγιστο στα 18 μέτρα/δευτερόλεπτο και ελάχιστο στα 8 μ/δ, που ισοούνται με 64,8 χλμ/ώρα και 28,8 χλμ/ώρα αντίστοιχα. Η μέγιστη πυκνότητα είναι 0,017 οχήματα/μέτρο, που ισούται με 17 οχήματα/χλμ και ο μέγιστος φόρτος ή η κυκλοφοριακή ικανότητα είναι 0,17 οχήματα/δευτερόλεπτο, που ισούται με 612 οχήματα/ώρα.



Διάγραμμα 19: Διαγράμματα βασικών μεγεθών και θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής για το αρχικό σενάριο της Ζυρίχης.

Ο μέσος όρος των μέγιστων ρυθμών ροής εξόδου, όλων των συνδέσμων που αξιοποιήθηκαν από κάποιο όχημα, κατά τη διάρκεια των 130 περιόδων ελέγχου στο αρχικό σενάριο, είναι 804 οχήματα/ώρα ή 0,22 οχήματα/μέτρο. Αυτή η τιμή είναι και η μέγιστη κυκλοφοριακή ικανότητα που μπορεί να αποκτήσει μακροσκοπικά το εξεταζόμενο οδικό δίκτυο, για αυτό το σενάριο. Έπειτα από περαιτέρω ανάλυση, προέκυψε πως ο μέσος όρος των μέγιστων ρυθμών ροής εξόδου, των συνδέσμων που αξιοποιήθηκαν από κάποιο όχημα, για όλα τα 37 σενάρια που εξετάστηκαν, είναι επίσης 804 οχήματα/ώρα. Η μέγιστη

τιμή που παρατηρήθηκε είναι 850 οχ/ώρα και η ελάχιστη 791 οχ/ώρα. Έτσι, οι κυκλοφοριακές ικανότητες όλων των σεναρίων μπορούν να συγκριθούν αξιόπιστα μεταξύ τους.

Η κυκλοφοριακή ικανότητα του αρχικού σεναρίου, 612 οχ/ώρα, σημαίνει πως εξυπηρετήθηκε το 76% των οχημάτων που θα μπορούσαν να εξυπηρετηθούν, που είναι ικανοποιητικό ποσοστό, μα φαίνεται πως η συμφόρηση επηρεάζει την απόδοση του συστήματος. Η μέση ταχύτητα είναι σε υψηλά επίπεδα όταν δεν υπάρχει συμφόρηση, δεδομένου πως για τους συνδέσμους που χρησιμοποιήθηκαν ο μέσος όρος της ταχύτητας ελεύθερης ροής είναι στα 10 μ/δ ή 36 χλμ/ώρα για όλα τα σενάρια, και δεν πέφτει χαμηλότερα από 8 μ/δ ή 28,8 χλμ/ώρα κατά την συμφόρηση.

Οι **σχετικά υψηλές ταχύτητες μαζί με τις πολύ χαμηλές πυκνότητες** που εμφανίζονται, είναι αποτέλεσμα της αύξησης του συντελεστή του μέγιστου ρυθμού ροής εξόδου των συνδέσμων (flowCapacityFactor) από 0,1, που θα έπρεπε να είναι, σε 0,3. Η μέγιστη τιμή που μπορεί πρακτικά να πάρει η πυκνότητα είναι: 1 μέτρο οδού / 7.5μέτρα οχήματος = 0,133 οχ/μ ή 1000μ / 7.5 = 133 οχ/χλμ. Επομένως η μέγιστη πυκνότητα στο αρχικό σενάριο, η οποία φτάνει μόλις στα 17 οχ/χλμ στην αιχμή της κυκλοφορίας, μπορεί να θεωρηθεί πολύ χαμηλή τιμή. Υπενθυμίζεται όμως, πως στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν κάποιοι σύνδεσμοι που είχαν κατά πολύ παραβιασμένες αποθηκευτικές χωρητικότητες οχημάτων, που σημαίνει ότι σε εκείνα τα σημεία υπήρχε έντονη συμφόρηση και η πυκνότητα ήταν, στο περιβάλλον του MATSim, μεγαλύτερη της μέγιστης.

Αυτά που αναφέρθηκαν, είναι αυτά που δικαιολογούν την ανάγκη για την **αύξηση του flowCapacityFactor στο 0.3**. Σε δοκιμές με χαμηλότερο συντελεστή, η πυκνότητα έφτανε σε τιμές κοντά της απόλυτα μέγιστης και οι παραβιασμένοι σύνδεσμοι ήταν περισσότεροι και με μεγαλύτερα ποσοστά παραβίασης. Με την αύξηση αυτού του συντελεστή, κάποια οχήματα που βρίσκονταν παγιδευμένα σε υπερ-παραβιασμένους συνδέσμους, κατάφεραν να προχωρήσουν και οι πράκτορες που επέβαιναν σε αυτά να συνεχίσουν τα πλάνα τους. Μειονέκτημα αυτής της αύξησης είναι πως σε συνδέσμους που δεν υπήρχε τόσο εκτεταμένη συμφόρηση, η κυκλοφορία έγινε πολύ άνετη, με αποτέλεσμα η μέση ταχύτητα του δικτύου να είναι σχετικά υψηλή και η μέση πυκνότητα πολύ χαμηλή. Οι μέγιστοι κυκλοφοριακοί φόρτοι όμως, που είναι το πλέον σημαντικό χαρακτηριστικό στην περιγραφή της απόδοσης της κυκλοφορίας, βρίσκονται σε ικανοποιητικά και συγκρίσιμα επίπεδα.

Η δυνατότητα των συνδέσμων να μπορούν να δεχτούν περισσότερα οχήματα από όσα είναι φυσικά δυνατό, είναι ένας από τους λόγους που **παρουσιάζεται μόνο η μισή μέρα της προσομοίωσης**. Αυτή όμως η δυνατότητα, σε συνδυασμό με την απουσία της ταχύτητας επιστροφής των κενών θέσεων στις ουρές των συνδέσμων, χαρακτηριστικό του προσομοιωτή κυκλοφορίας QSim και δεύτερος λόγος παρουσίασης της μισής μέρας, οδηγεί σε αποδεκτά μεγέθη και διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής.

Στην πραγματική κυκλοφορία, η συμφόρηση συμβαίνει διότι μειώνεται η **ταχύτητα με την οποία μια θέση της ουράς αναμονής ενός οδικού τμήματος γίνεται διαθέσιμη, αφού ελευθερωθεί**. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως σε μια ουρά αυτοκινήτων σε ένα σηματοδότη, όσο μεγαλύτερη είναι η ουρά, τόσο αργότερα θα κινηθεί το τελευταίο όχημα, λόγω της μικρής καθυστέρησης κάθε οχήματος να ξεκινήσει να κινείται. Αυτή η μικρή καθυστέρηση κάθε ξεχωριστού οχήματος, μαζί με το μέγεθος της ουράς αναμονής, καθορίζουν την ταχύτητα επιστροφής μίας κενής θέσης στην ουρά αναμονής, όταν αυτή ελευθερωθεί, δηλαδή όταν το όχημα αποχωρήσει από το οδικό τμήμα.

Αυτή η ταχύτητα είναι που δίνει την παραβολική ή τριγωνική μορφή στο διάγραμμα Φόρτου – Πυκνότητας. Δηλαδή αφού επιτευχθεί ο μέγιστος φόρτος και αρχίσει η περιοχή συμφορημένης ροής, η πυκνότητα συνεχίζει να αυξάνεται, δηλαδή καταφθάνουν περισσότερα οχήματα, αλλά επειδή μεγαλώνει η ουρά αναμονής και άρα μειώνεται η ταχύτητα επιστροφής μιας κενής θέσης στην ουρά, μειώνονται και τα οχήματα που εξυπηρετούνται, δηλαδή ο φόρτος.

Στον προσομοιωτή QSim του MATSim, αυτή η ταχύτητα δεν υφίσταται και μια θέση γίνεται άμεσα διαθέσιμη, την στιγμή που ελευθερώνεται. Δηλαδή, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, το

διάγραμμα Φόρτου – Πυκνότητας ενός συνδέσμου αφορά μόνο την έξοδο των οχημάτων από αυτόν και άρα αποτελείται μόνο από την αριστερή πλευρά του τριγωνικού διαγράμματος, η οποία καταλήγει σε μια οριζόντια ευθεία όταν επιτευχθεί ο μέγιστος φόρτος, με την πυκνότητα να συνεχίζει να αυξάνεται αλλά τον φόρτο να μην μειώνεται. Παρόλα αυτά, η δυνατότητα υπερ-αποθήκευσης οχημάτων από τους συνδέσμους αντισταθμίζει κάπως την απουσία αυτής της ταχύτητας επιστροφής της κενής θέσης και γίνεται δυνατό να παραχθούν διαγράμματα Φόρτου – Πυκνότητας με αποδεκτή παραβολική – τριγωνική μορφή .

Αυτό συμβαίνει διότι το MATSim κρατώντας ένα όχημα κολλημένο στην κορυφή της ουράς για 10 δευτερόλεπτα, αν ο επόμενος σύνδεσμος δεν χωράει άλλα οχήματα, και ύστερα αναγκάζοντάς το να προχωρήσει, παραβιάζοντας την χωρητικότητά του, οδηγεί την συμφόρηση να επεκταθεί. Με αυτό το τρόπο, η πυκνότητα του οδικού δικτύου συνεχίζει να αυξάνεται και η συμφόρηση επεκτείνεται σε περισσότερους συνδέσμους, αντί να παραμένει στους συνδέσμους που είναι ήδη γεμάτοι. Έτσι, ο μακροσκοπικός κυκλοφοριακός φόρτος μειώνεται, αφού περισσότερα οχήματα, σε περισσότερους συνδέσμους αναγκάζονται να περιμένουν αυτά τα 10 δευτερόλεπτα στην κορυφή της ουράς.

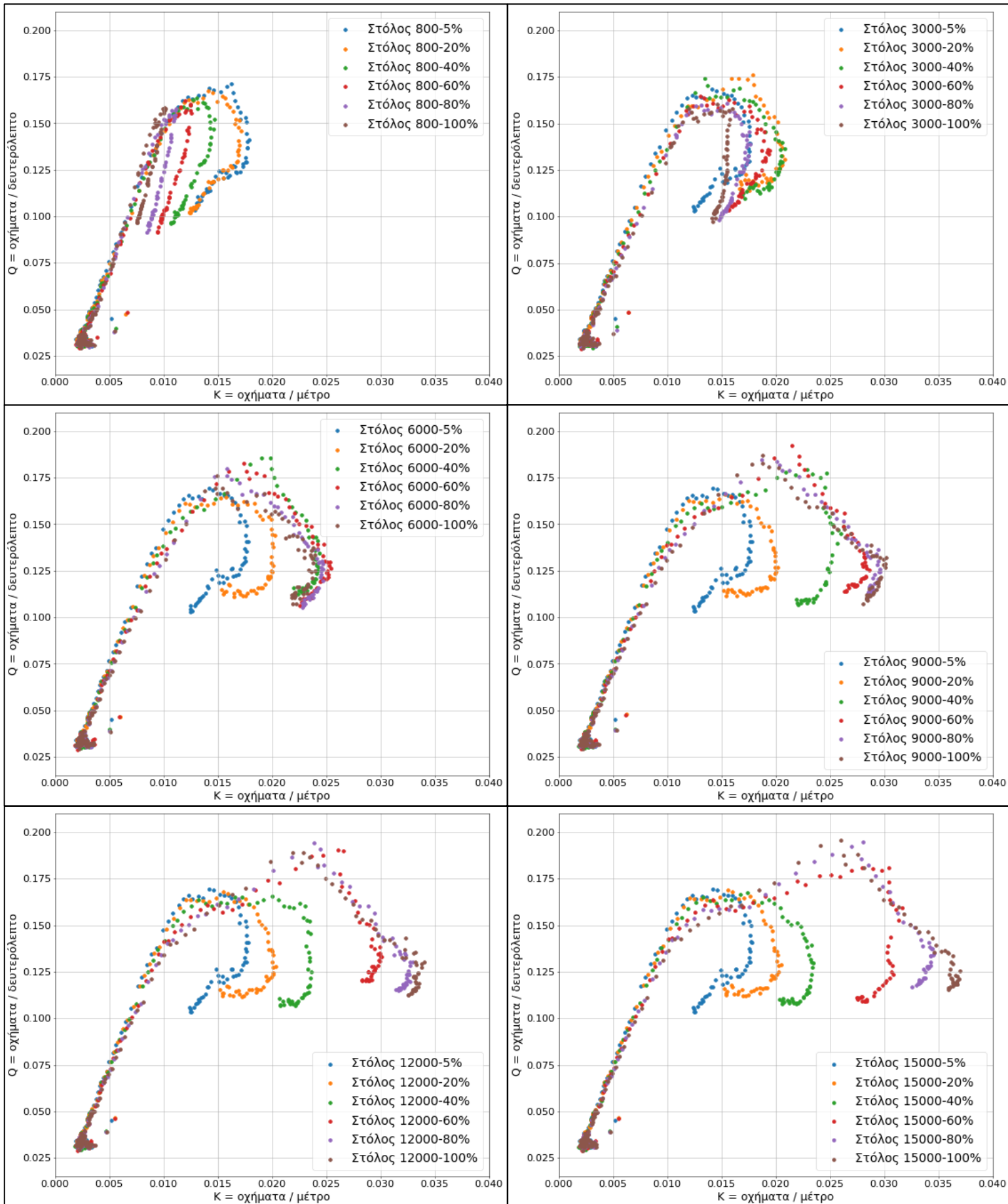
Ο λόγος που παρουσιάζεται μόνο η μία από τις δύο αιχμές του κυκλοφοριακού φόρτου, δηλαδή περίπου η μισή προσομοιωμένη μέρα, είναι διότι εξαιτίας της υπερ-συσσώρευσης οχημάτων σε μερικούς συνδέσμους, η πυκνότητα σε μερικά σενάρια δεν μειώνεται ποτέ μετά την πρώτη αιχμή. Δηλαδή από την στιγμή που ξεκινά η συμφόρηση της πρώτης αιχμής της κυκλοφορίας, δεν καταφέρνει να εξομαλυνθεί ποτέ. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία μια δεύτερης παραβολής – τριγώνου στο διάγραμμα Φόρτου – Πυκνότητας, αφού η δεύτερη αιχμή του κυκλοφοριακού φόρτου συμβαίνει σε αρκετά μεγαλύτερη πυκνότητα. Επίσης, η μακροσκοπική πυκνότητα του οδικού δικτύου συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι το τέλος της μέρας, φτάνοντας σε παράταιρα μεγάλες τιμές, ενώ ο φόρτος πλησιάζει το μηδέν, σε μια ώρα που οι πράκτορες που κυκλοφορούν θα έπρεπε να είναι ελάχιστοι.

Τελικά, τα διαγράμματα που παρουσιάζονται έχουν ικανοποιητική μορφή, συγκρίσιμες τιμές και μπορούν να ερμηνευτούν με βάση τη λογική και τη θεωρία της κυκλοφοριακής ροής. Φυσικά για την ερμηνεία τους είναι ανάγκη να λαμβάνονται υπόψιν οι ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά του προσομοιωτή κυκλοφορίας QSim και του MATSim, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω.

Έτσι, στο Διάγραμμα 20 παρουσιάζονται τα **διαγράμματα Φόρτου – Πυκνότητας για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια**, εκτός του αρχικού που έχει ήδη παρουσιαστεί. Με αυτά τα διαγράμματα μπορεί να γίνει η σύγκριση της κυκλοφοριακής ικανότητας, που είναι ο μέγιστος φόρτος (Q), της κρίσιμης πυκνότητας (K), που είναι η πυκνότητα που αντιστοιχεί στον μέγιστο φόρτο, και της μέγιστης πυκνότητας (K), κάθε σεναρίου.

Μία πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει σε αυτά τα διαγράμματα, είναι πως η κυκλοφοριακή ικανότητα, η κρίσιμη και η μέγιστη πυκνότητα αυξάνονται όσο αυξάνεται ο στόλος των διαθέσιμων αυτόνομων ταξί. Επίσης και τα τρία αυτά μεγέθη φαίνεται να μειώνονται όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης των μετακινήσεων για στόλο 800 οχημάτων, ενώ το αντίθετο συμβαίνει όσο αυξάνεται το μέγεθος του διαθέσιμου στόλου. Η μέγιστη τιμή της κυκλοφοριακής ικανότητας, που παρατηρείται σε σενάριο με 15000 αυτόνομα ταξί και υψηλό ποσοστό αντικατάστασης, πλησιάζει τα 0,2 οχήματα/δευτερόλεπτο, τιμή που είναι κοντά στον μέγιστο φόρτο που μπορεί να εξυπηρετήσει το οδικό δίκτυο κατά μέσο όρο, 0,22 οχ/δ.

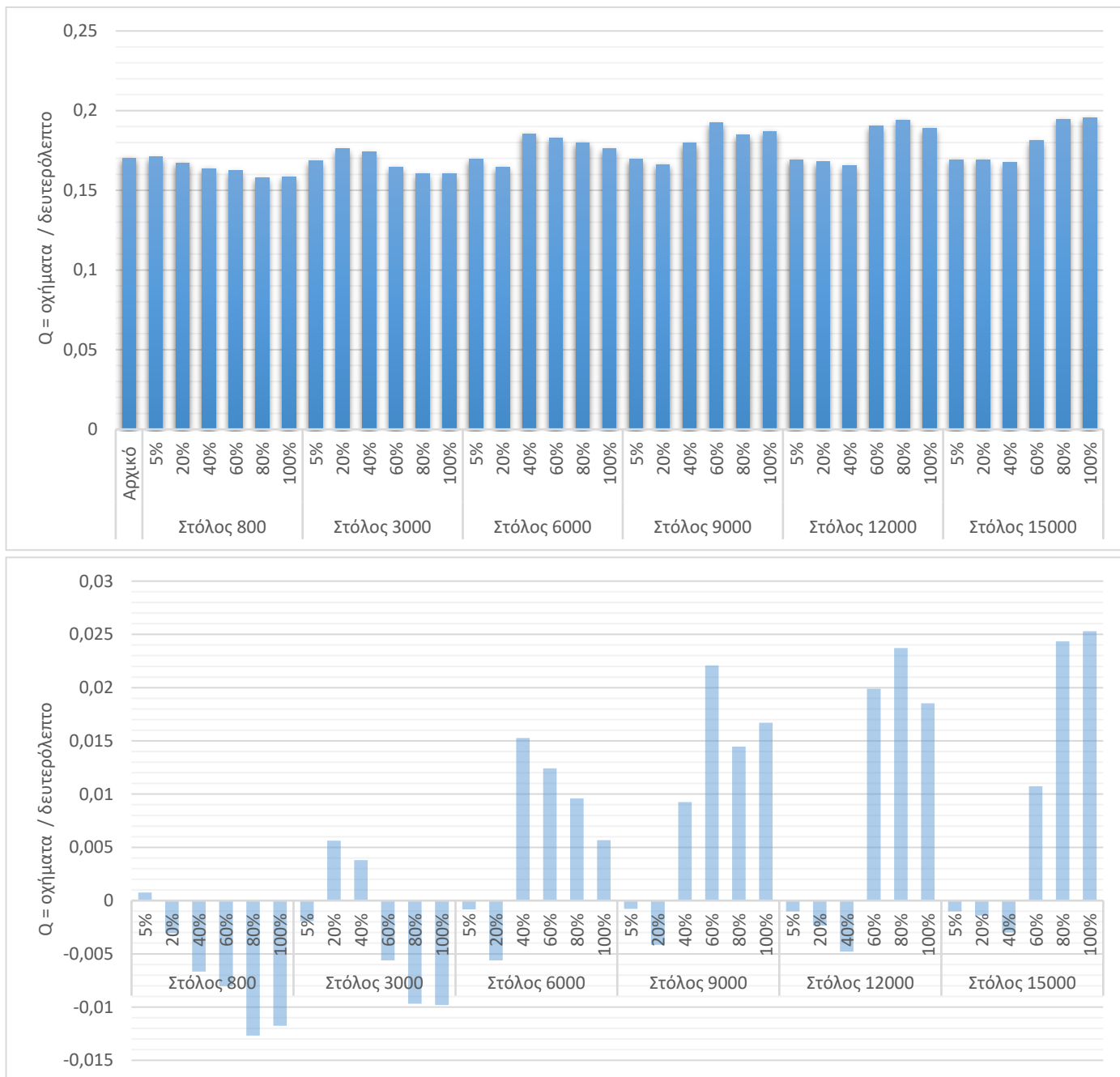
Στα Παραρτήματα υπάρχουν όλα τα υπόλοιπα διαγράμματα των κυκλοφοριακών μεγεθών που υπολογίστηκαν και δεν εμφανίζονται σε αυτό το Κεφάλαιο.



Διάγραμμα 20: Μακροσκοπικά Θεμελιώδη Διαγράμματα Φόρτου – Πυκνότητας για όλα τα νέα εξεταζόμενα σενάρια. Σε κάθε διάγραμμα διατηρείται σταθερός ο στόλος των αυτόνομων ταξί και μεταβάλλεται το ποσοστό αντικατάστασης των μετακινήσεων.

5.1.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη Διαγραμμάτων Πυκνότητας - Φόρτου

Τα διαγράμματα Φόρτου – Πυκνότητας του Διαγράμματος 20, μαζί με αυτό του αρχικού σεναρίου, προσφέρουν μια ικανοποιητική πρώτη εκτίμηση και σύγκριση των ζητούμενων χαρακτηριστικών μεγεθών, δηλαδή της κυκλοφοριακής ικανότητας, της κρίσιμης και της μέγιστης πυκνότητας. Για να μπορέσουν όμως να εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα, πρέπει να γίνει πιο συγκεκριμένη ανάλυση. Παίρνοντας τις μέγιστες τιμές του φόρτου, δηλαδή την κυκλοφοριακή ικανότητα, την αντίστοιχη πυκνότητα για αυτούς τους φόρτους, κρίσιμη πυκνότητα, και τη μέγιστη πυκνότητα που εμφανίζονται σε κάθε σενάριο, προκύπτουν τα Διαγράμματα 21,22 και 23, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 21: Πάνω, η κυκλοφοριακή ικανότητα για κάθε σενάριο. Κάτω, η διαφορά της αφαίρεσης της κυκλοφοριακής ικανότητας του αρχικού σεναρίου από την κυκλοφοριακή ικανότητα των νέων σεναρίων.

Αρχικά, στο Διάγραμμα 21, παρατηρείται πως οι διαφορές μεταξύ των **κυκλοφοριακών ικανοτήτων** φτάνουν το πολύ ως 0,025 μέτρα/δευτερόλεπτο ή 90 οχ/ώρα, δηλαδή είναι αρκετά μικρές. Παρατηρείται επίσης ότι για τα σενάρια με 800 και 3000 αυτόνομα ταξί, η κυκλοφοριακή ικανότητα είναι

περίπου ίση ή μεγαλύτερη του αρχικού σεναρίου για χαμηλά ποσοστά αντικατάστασης των μετακινήσεων και μικρότερη για υψηλά, ενώ στους μεγαλύτερους στόλους ισχύει το αντίθετο.

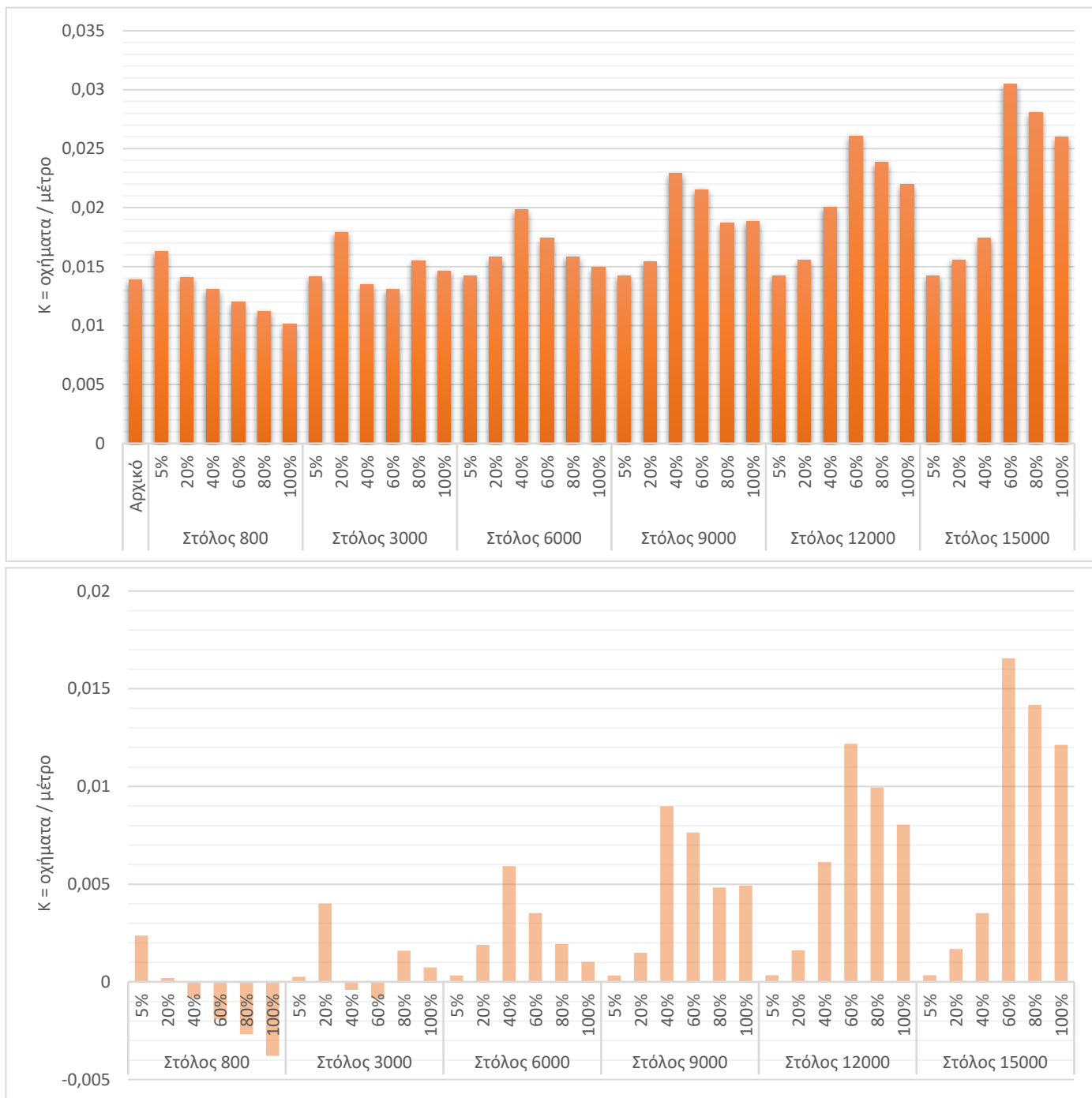
Αυτή η συμπεριφορά εξηγείται πιθανώς από το γεγονός πως για στόλους μεγαλύτερους των 3000 οχημάτων και χαμηλά ποσοστά αντικαταστάσεων, τα αυτοκίνητα είναι ακόμη πολλά και η συνύπαρξή τους με επίσης πολλά αυτόνομα ταξί, που κάνουν και διαδρομές δίχως επιβάτη, επιβαρύνουν την κυκλοφορία. Αντίθετα, όσο μειώνονται τα αυτοκίνητα και περισσότερες διαδρομές γίνονται με κάποιον αρκετά μεγάλο στόλο αυτόνομων ταξί, η κυκλοφορία βελτιώνεται και η κυκλοφοριακή ικανότητα αυξάνεται. Στα σενάρια με στόλους μικρότερους των 15000 αυτόνομων ταξί και για υψηλές αντικαταστάσεις μετακινήσεων, το πιθανότερο είναι πως η κυκλοφοριακή ικανότητα μειώνεται εξαιτίας του αριθμού μετακινήσεων που δεν εκτελούνται.

Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι πως για κάθε διαφορετικό στόλο αυτόνομων ταξί, η μέγιστη αύξηση της κυκλοφοριακής ικανότητας που επιφέρει, βρίσκεται στην ποσοστιαία αντικατάσταση με βάση την οποία είχε σχεδιαστεί. Για παράδειγμα η μέγιστη αύξηση για τον στόλο με 1500 οχήματα, που είναι και μέγιστη γενικώς, γίνεται για 100% αντικατάσταση μετακινήσεων, που είναι το ποσοστό για το οποίο σχεδιάστηκε το μέγεθος αυτού του στόλου.

Η **κρίσιμη πυκνότητα**, που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 22, φαίνεται πως αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους του στόλου των αυτόνομων ταξί. Οι τιμές αυτής της αύξησης φτάνουν μέχρι περίπου το 0,017 οχ/μέτρο ή 17 οχ/χλμ, που είναι το διπλάσιο της μέγιστης πυκνότητας του αρχικού σεναρίου. Επίσης, για κάθε μέγεθος στόλου, η κρίσιμη πυκνότητα αρχικά αυξάνεται, φτάνει σε μια μέγιστη τιμή και ύστερα μειώνεται στις υψηλότερες αντικαταστάσεις μετακινήσεων.

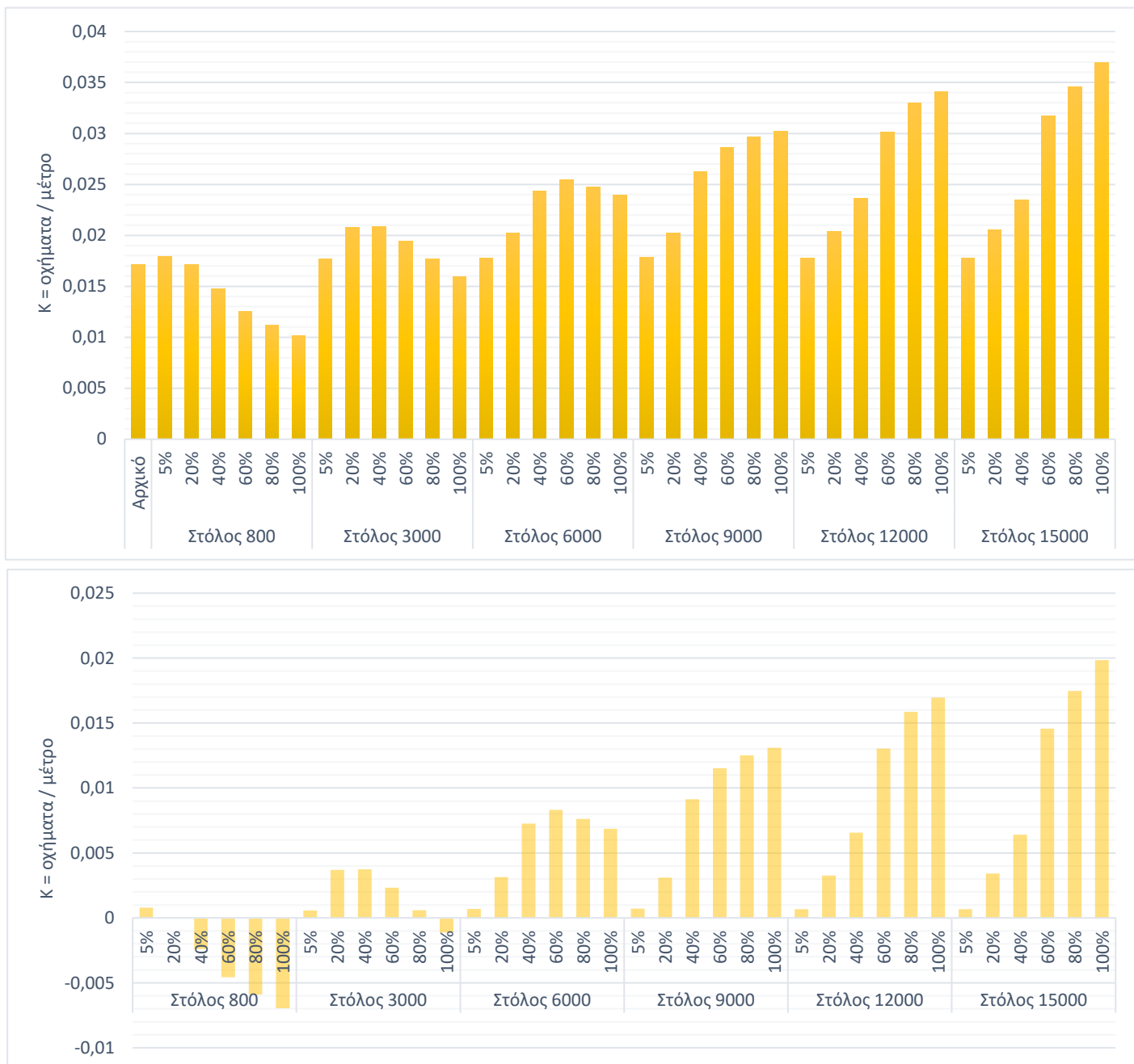
Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα πως η κυκλοφορία σε συμφορημένη ροή καθυστερεί να ξεκινήσει, δηλαδή χρειάζεται μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων στο δίκτυο για να συμβεί, όσο αυξάνεται ο στόλος των αυτόνομων ταξί, που είναι κάτι θετικό. Η μείωση της κρίσιμης πυκνότητας μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής, για κάθε στόλο αυτόνομων ταξί, πιθανώς οφείλεται και πάλι στον αριθμό των μετακινήσεων που δεν λαμβάνουν χώρα.

Γενικώς, μεγαλύτερη κρίσιμη πυκνότητα, σημαίνει πως τα οχήματα κινούνται πιο πολύ σε κυκλοφορία μη συμφορημένης ροής, δηλαδή χρειάζεται να συσσωρευτούν, και άρα να εξυπηρετηθούν, πιο πολλά οχήματα για να επιτευχθεί η κυκλοφοριακή ικανότητα. Άρα υπάρχει καλύτερη αξιοποίηση του οδικού δικτύου.



Διάγραμμα 22: Πάνω, η κρίσιμη πυκνότητα κάθε σεναρίου. Κάτω, η διαφορά της αφαιρέσης της κρίσιμης πυκνότητας του αρχικού σεναρίου από την κρίσιμη πυκνότητα των νέων σεναρίων.

Τέλος, στο Διάγραμμα 23 παρουσιάζεται η **μέγιστη πυκνότητα** των εξεταζόμενων σεναρίων. Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται, για το σενάριο με 15000 αυτόνομα ταξί και 100% αντικατάσταση, είναι μεγαλύτερη της διπλάσιας από την μέγιστη πυκνότητα του αρχικού σεναρίου. Η μέγιστη πυκνότητα φαίνεται να αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος των στόλων με αυτόνομα ταξί και όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης των μετακινήσεων. Εξαιρέση αποτελεί κυρίως το σενάριο με τα 800 αυτόνομα οχήματα, που η μέγιστη πυκνότητα μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης. Το πιθανότερο είναι πως αυτό συμβαίνει για ακόμα μια φορά, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού μετακινήσεων που δεν κατάφεραν να γίνουν σε αυτή την περίπτωση.



Διάγραμμα 23: Πάνω, η μέγιστη πυκνότητα κάθε σεναρίου. Κάτω, η διαφορά της αφαίρεσης της μέγιστης πυκνότητας του αρχικού σεναρίου από την μέγιστη πυκνότητα των νέων σεναρίων.

5.2 Αξιολόγηση της Κυκλοφοριακής Ανθεκτικότητας

Από τον ορισμό της ανθεκτικότητας, αλλά και από τον τρόπο που έχει εξεταστεί η ανθεκτικότητα πραγματικών κυκλοφοριακών συστημάτων σε άλλες έρευνες, όπως έχει αναφερθεί στην Βιβλιογραφική Ανασκόπηση, σημείο αναφοράς αυτής της αξιολόγησης είναι η αρχική κατάσταση του συστήματος. Η προσομοίωση του αρχικού σεναρίου, όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, οδήγησε σε κυκλοφορία που είχε κάποια συμφόρηση, εντονότερη σε μερικούς συνδέσμους οι οποίοι δέχτηκαν περισσότερα οχήματα από όσα μπορούσαν να διαχειριστούν, και με αποδεκτή κυκλοφοριακή ικανότητα.

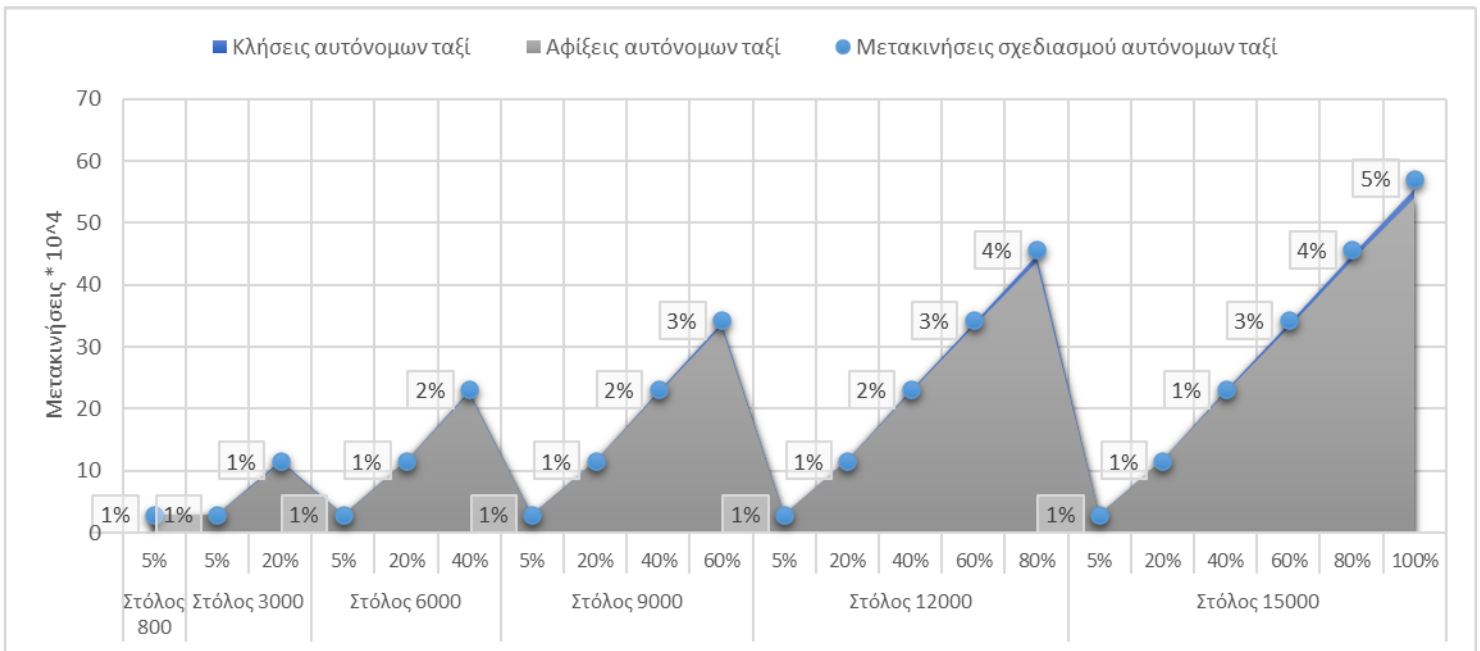
Το ίδιο κυκλοφοριακό σύστημα δοκιμάστηκε με την ανάθεση κάποιων ποσοστών των μετακινήσεων που γίνονταν από συμβατικά μέσα, σε μια υπηρεσία αυτόνομων ταξί. Η ανθεκτικότητά του κυκλοφοριακού συστήματος σε αυτές τις δοκιμές, αξιολογείται συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά και τα

μεγέθη της κυκλοφορίας κάθε δοκιμής-σεναρίου, με τα αντίστοιχα του αρχικού σεναρίου. Έτσι θα προκύψει σε ποιες περιπτώσεις το κυκλοφοριακό σύστημα, που αποτελείται από το οδικό δίκτυο και τα διαθέσιμα μέσα μεταφοράς, κρίνεται επαρκές και άρα ανθεκτικό στην επιβαλλόμενη αλλαγή.

Σημαντικό πρόβλημα των νέων σεναρίων που εξετάστηκαν, ήταν ο **αριθμός των μετακινήσεων που είχαν ανατεθεί να πραγματοποιηθούν με αυτόνομα ταξί και δεν κατάφεραν να γίνουν ποτέ**, ειδικά σε σενάρια με μικρούς στόλους αυτόνομων οχημάτων. Στο αρχικό σενάριο, οι διαδρομές που έχουν ανατεθεί να γίνουν με αυτοκίνητο ήταν 312.803 και από αυτές έγιναν οι 310.858. Δηλαδή μόλις ένα 0,6% των μετακινήσεων με αυτοκίνητο δεν κατάφεραν να ολοκληρωθούν.

Με βάση αυτό το ποσοστό των μετακινήσεων που δεν ολοκληρώθηκαν για το αρχικό σενάριο, θα κριθεί η απόδοση των λοιπών εξεταζόμενων σεναρίων. Για τα νέα σενάρια λοιπόν, στα οποία δεν πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από το 5% των σχεδιασμένων μετακινήσεων με αυτόνομο ταξί, θα θεωρείται πως το κυκλοφοριακό τους σύστημα δεν περνά τον έλεγχο ανθεκτικότητας. Δίνεται κάπως αυξημένο όριο ελέγχου διότι στο αρχικό σενάριο εκτός από τα αυτοκίνητα, τα υπόλοιπα μέσα μεταφοράς τηλεμεταφέρονται στον προορισμό τους και άρα δεν επηρεάζονται από την συμφορημένη κυκλοφορία. Για αυτό το λόγο δίνεται λίγο μεγαλύτερο περιθώριο ανοχής από το περίπου 1% των μετακινήσεων με αυτοκίνητο που δεν κατάφεραν να ολοκληρωθούν στο αρχικό σενάριο.

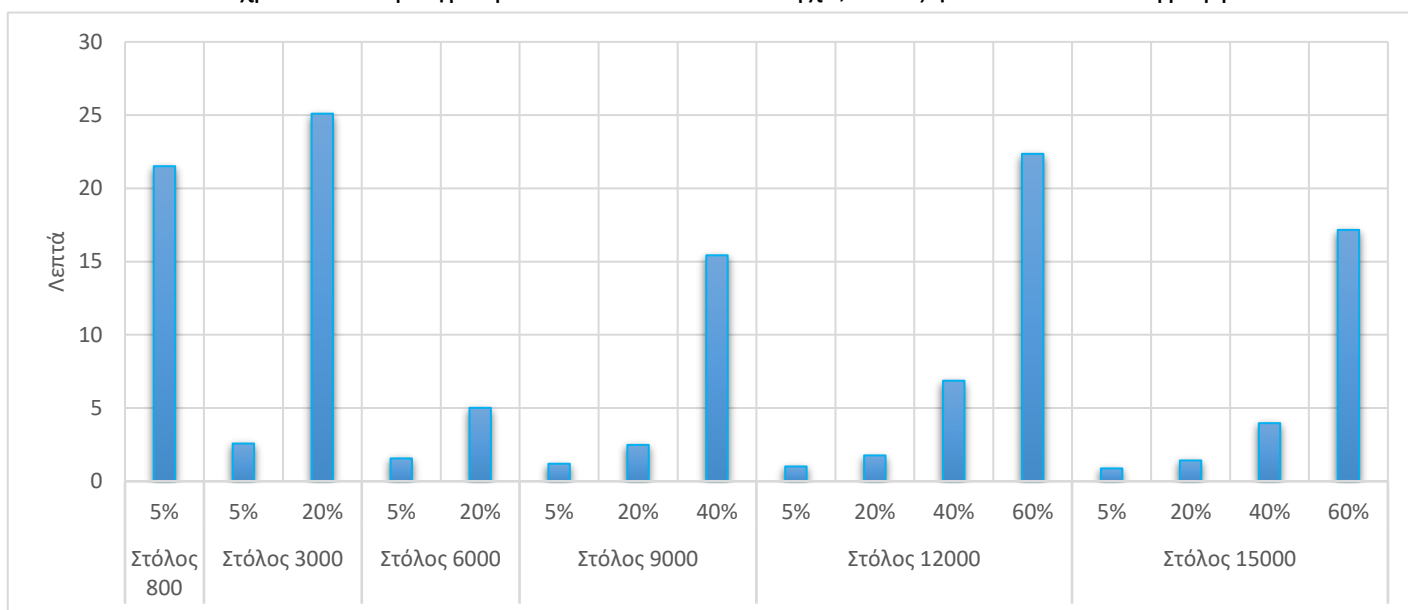
Έτσι, μετά τον αναλυτικό υπολογισμό των αναγκαίων τιμών, 21 από τα 36 εξεταζόμενα σενάρια τηρούν την παραπάνω προϋπόθεση, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 24. Κατά μέσο όρο, στα σενάρια που πέρασαν αυτόν τον έλεγχο δεν πραγματοποιείται το 1.9% των μετακινήσεων που είχαν σχεδιαστεί. Παρατηρείται πως κάθε στόλος ήταν σε θέση να καλύψει τις μετακινήσεις για τις οποίες σχεδιάστηκε, μέσα στο όριο ελέγχου που τέθηκε.



Διάγραμμα 24: Σενάρια που η υπηρεσία αυτόνομων ταξί εκπλήρωσε τουλάχιστον το 95% των μετακινήσεων που της είχαν ανατεθεί.

Η παραβίαση της αποθηκευτικής χωρητικότητας οχημάτων των συνδέσμων είναι μια κατάσταση που υφίσταται σε όλα τα σενάρια, συμπεριλαμβανομένου του αρχικού, και εφόσον είναι μη ρεαλιστική, δεν υπάρχει νόημα σύγκρισης και ελέγχου. Ο αριθμός των πρακτόρων που το πλάνο τους ματαιώθηκε στο τέλος της προσομοίωσης, επηρεάζεται από το αν τα μέσα που χρησιμοποιούνται επηρεάζονται από την συμφόρηση, δηλαδή από το αν τηλεμεταφέρονται ή όχι, και από το μέγεθος του στόλου των αυτόνομων ταξί. Σχετίζεται επίσης με τον έλεγχο που έγινε παραπάνω, τις μετακινήσεις που δεν πραγματοποιήθηκαν, οπότε και πάλι δεν θα γίνει κάποιος έλεγχος.

Κατά την εξέταση του **μέσου χρόνου αναμονής των πρακτόρων για κάποιο αυτόνομο ταξί**, προκύπτει πως πέντε από τα σενάρια που πέρασαν τον παραπάνω έλεγχο ξεπερνούν τα 25 λεπτά μέσου χρόνου αναμονής, που θεωρείται οριακά αποδεκτός χρόνος αναμονής σε αυτήν την εργασία, παρόλο που είναι μεγαλύτερος από τον γενικώς αποδεκτό χρόνο αναμονής των περίπου 10 λεπτών που ορίζεται σε έρευνες παρόμοιου χαρακτήρα, (Abe, 2019). Τίθεται αυξημένος αποδεκτός χρόνος αναμονής για να αντισταθμιστεί η έντονη συμφόρηση που εμφανίζεται σε κεντρικούς συνδέσμους του οδικού δικτύου και κατ' επέκταση τον γενικώς μεγάλο χρόνο αναμονής που παρουσιάζεται στη πλειονότητα των σεναρίων, ειδικά με δεδομένο πως στο αρχικό σενάριο υπήρχε μηδαμινή αναμονή στις μετακινήσεις, εκτός των χρηστών των Μ.Μ.Μ. Έτσι, 16 από τα 36 εξεταζόμενα σενάρια ικανοποιούν ταυτόχρονα τον προηγούμενο και αυτόν τον έλεγχο, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 25.



Διάγραμμα 25: Σενάρια που ο μέσος χρόνος αναμονής για αυτόνομο ταξί δεν ξεπερνά τα 25 λεπτά.

Τα οχηματο-χιλιόμετρα που διανύθηκαν καθώς και η κρίσιμη και η μέγιστη πυκνότητα που παρατηρήθηκαν, δεν θεωρείται πως μπορούν να αποτελέσουν κριτήρια ελέγχου της ανθεκτικότητας του κυκλοφοριακού συστήματος. Έτσι, τελικό κριτήριο ελέγχου αποτελεί η **κυκλοφοριακή ικανότητα** κάθε σεναρίου, όπως προέκυψε από την κυκλοφοριακή ανάλυση. Στο Διάγραμμα 26, φαίνονται τα σενάρια που πέρασαν τους παραπάνω ελέγχους και για τα οποία η κυκλοφοριακή ικανότητα προκύπτει μεγαλύτερη από αυτή του αρχικού σεναρίου.

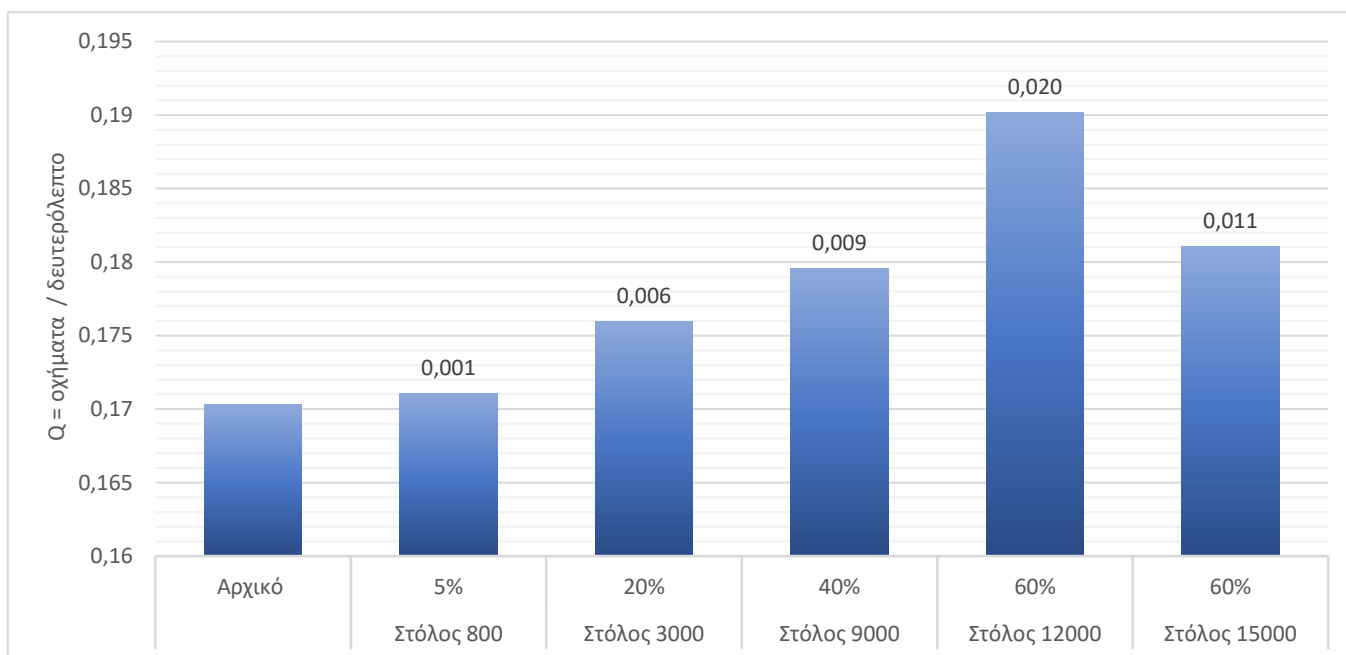
Τελικά από τα 36 σενάρια που εξετάστηκαν, μόνο τα κυκλοφοριακά συστήματα για 5 από αυτά πέρασαν όλους τους παραπάνω ελέγχους και κρίνονται ανθεκτικά. Όπως ήταν αναμενόμενο οι μικροί στόλοι αυτόνομων ταξί οδηγούν σε ανεπαρκή κυκλοφοριακά συστήματα, για υψηλά ποσοστά αντικατάστασης. Ενδιαφέρον είναι όμως, πως επίσης ανεπαρκή προκύπτουν τα κυκλοφοριακά συστήματα με μεγάλα μεγέθη στόλων και μικρά ποσοστά αντικατάστασης μετακινήσεων.

Αυτό φαίνεται καλύτερα στο **Διάγραμμα 27**, που παρουσιάζονται τα τελικά σενάρια, για τα οποία προέκυψε ανθεκτικό κυκλοφοριακό σύστημα. Φαίνεται δηλαδή πως ενώ όσο αυξάνεται ο διαθέσιμος στόλος αυτόνομων ταξί, αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης μετακινήσεων που μπορεί να εξυπηρετηθεί περνώντας τους παραπάνω ελέγχους, δε συμβαίνει το ίδιο και για τα μικρότερα ποσοστά αντικατάστασης.

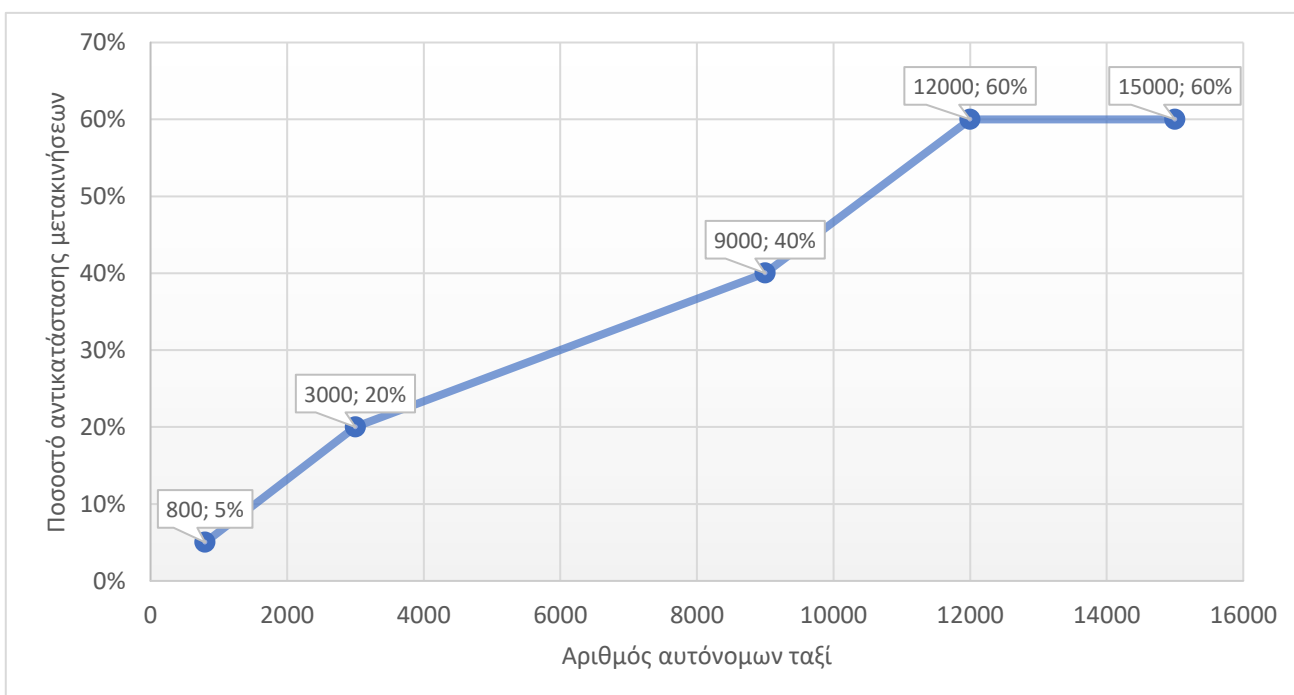
Συγκεκριμένα, για κάθε μέγεθος στόλου προκύπτει ανθεκτικό το σενάριο με το ποσοστό αντικατάστασης για το οποίο είχε σχεδιαστεί, εκτός των στόλων από 6000 αυτόνομα ταξί και πάνω, που ανθεκτικά προκύπτουν τα σενάρια για μικρότερα ποσοστά αντικατάστασης. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις, είτε για μεγαλύτερο είτε για μικρότερο ποσοστό αντικατάστασης, δεν προκύπτει

ανθεκτικό κυκλοφοριακό σύστημα. Εξαιρέση αποτελεί ο στόλος με 6000 οχήματα που δεν οδηγεί κανένα σενάριο σε ανθεκτικό κυκλοφοριακό σύστημα.

Τέλος, σημαντικό είναι να αναφερθεί πως ενώ η κυκλοφοριακή ικανότητα κάθε σεναρίου, που προέκυψε από την εξέταση των μακροσκοπικών θεμελιωδών διαγραμμάτων φόρτου – πυκνότητας, αποτελεί βασικό κριτήριο αξιολόγησης της ανθεκτικότητας του κυκλοφοριακού συστήματος στην παρούσα εργασία, δεν θα μπορούσε να είναι το μόνο. Αυτό διότι τα άλλα δύο κριτήρια που εξετάστηκαν, οι σχεδιασμένες μετακινήσεις αυτόνομων ταξί που τελικά δεν πραγματοποιήθηκαν και οι μέσοι χρόνοι αναμονής για αυτόνομο ταξί, είναι επίσης βασικά χαρακτηριστικά της απόδοσης της κυκλοφορίας και δεν μπορούν να παραβλεφθούν.



Διάγραμμα 26: Κυκλοφοριακή ικανότητα των σεναρίων που πέρασαν όλους τους ελέγχους. Οι αριθμοί πάνω από τις στήλες είναι η διαφορά της αφαίρεσης της κυκλοφοριακής ικανότητας του αρχικού σεναρίου από τη κυκλοφοριακή ικανότητα των νέων σεναρίων.

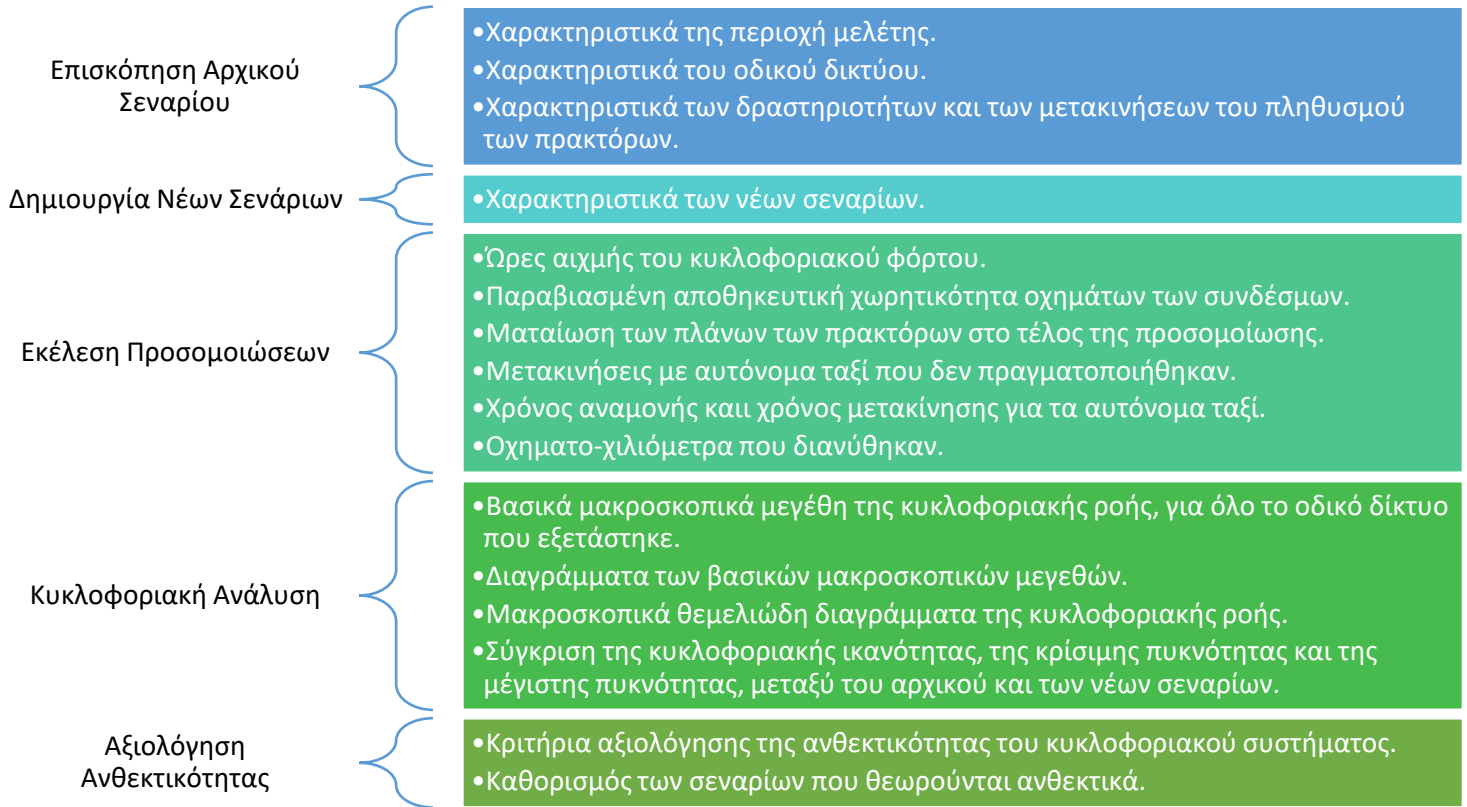


Διάγραμμα 27: Σενάρια των οποίων το κυκλοφοριακό σύστημα κρίθηκε ανθεκτικό στην επιβαλλόμενη αλλαγή.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Στον συγκεντρωτικό Διάγραμμα 28, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε κάθε βήμα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια:



Διάγραμμα 28: Συγκεντρωτικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στα παραπάνω κεφάλαια.

Πιο συγκεκριμένα, η **περιοχή μελέτης** είναι έναν κύκλος 30 χιλιομέτρων γύρω από ένα κεντρικό σημείο της πόλης της Ζυρίχης, έχει εμβαδόν 2324,6 χλμ², και είναι αρκετά μεγαλύτερη της ίδιας της πόλης, που έχει εμβαδόν 87,9 χλμ². Το **οδικό δίκτυο** που εξετάστηκε επεκτείνεται πέρα από την περιοχή μελέτης, για να καλύψει μετακινήσεις που κάποια στιγμή περνούν μέσα από την εξεταζόμενη περιοχή, διαθέτει συνολικά 77.476 κόμβους και 166.207 συνδέσμους και το συνολικό του μήκος είναι 21.736 χλμ.

Ο **πληθυσμός** των πρακτόρων του αρχικού σεναρίου, ο οποίος αφορά στο 10% του πραγματικού πληθυσμού της περιοχής μελέτης, περιέχει 209.391 πράκτορες και 6.656 οχήματα μεταφοράς φορτίων. Βασικές δραστηριότητες που είχαν οι πράκτορες στα πλάνα τους, ήταν η κατοικία, 42,7%, η εργασία, 12% και οι δραστηριότητες εκτός περιοχής μελέτης – outside, 18,1%. Τα κύρια μέσα μεταφοράς που χρησιμοποιούσαν για τις μετακινήσεις τους, ήταν το αυτοκίνητο, 37,1%, το περπάτημα, 25,1% και τα Μ.Μ.Μ, 16,5%. Από αυτά τα μέσα μεταφοράς, μόνο το αυτοκίνητο μπαίνει στην προσομοίωση της κυκλοφορίας, ενώ τα υπόλοιπα τηλεμεταφέρονται.

Με την προσθήκη μιας υπηρεσίας αυτόνομων ταξί ως διαθέσιμο μέσο μεταφοράς, δημιουργήθηκαν **36 νέα σενάρια προσομοίωσης**. Σε αυτά, υπάρχουν όλα τα χαρακτηριστικά του αρχικού σεναρίου, με μόνη διαφορά πως κάποιο ποσοστό των μετακινήσεων, που γινόταν με ένα από τα συμβατικά μέσα του αρχικού σεναρίου, ανατέθηκε στα αυτόνομα ταξί. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν σενάρια που διαθέτουν 800, 3000, 6000, 9000, 12000 και 15000 αυτόνομα ταξί και 5%, 20%, 40%, 60%, 80% και 100% πιθανότητα αντικατάστασης των μετακινήσεων, σε όλους τους συνδυασμούς.

Η αντικατάσταση των μετακινήσεων έγινε σύμφωνα με κάποιους περιορισμούς και έτσι στο 100% της πιθανότητας αντικατάστασης, οι μετακινήσεις που ανατίθενται σε αυτόνομα ταξί αφορούν στο 74,5% των συμβατικών μετακινήσεων του αρχικού σεναρίου. Για 100% πιθανότητα αντικατάστασης, 68% των μετακινήσεων που ήταν να γίνουν με αυτοκίνητο, πάνω από 90% εκείνων που ήταν να γίνουν με περπάτημα και με ποδήλατο και πάνω από 70% αυτών που αφορούσαν Μ.Μ.Μ και επιβάτη αυτοκινήτου, μετατράπηκαν σε μετακίνηση με αυτόνομο ταξί. Τα συνολικά οχήματα, τα οποία προσομοιώνονταν στην κυκλοφορία, δηλαδή αυτόνομα ταξί και αυτοκίνητα, μειώθηκαν πάνω από 60%, για 100% αντικατάσταση.

Κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων, οι οποίες έγιναν για το 30% του μέγιστου ρυθμού ροής εξόδου και το 10% της αποθηκευτικής χωρητικότητας οχημάτων των συνδέσμων, προσδιορίστηκαν αρχικά οι **ώρες αιχμής** του κυκλοφοριακού φόρτου, οι οποίες συνέβαιναν περίπου τις ίδιες ώρες για όλα τα σενάρια, στις 7:30 και στις 17:30. Παρατηρήθηκε πως, εξαιτίας των ιδιοτήτων του προσομοιωτή της κυκλοφορίας QSim του MATSim, για 0.4% των συνολικών συνδέσμων του οδικού δικτύου, που έφτανε ως 2% κατά μέγιστο, παραβιαζόταν η **αποθηκευτική χωρητικότητα** οχημάτων τους. Η παραβίαση αυτή γινόταν για ποσοστά 750%, κατά μέσο όρο, της δυνατής χωρητικότητάς αυτών των συνδέσμων.

Επίσης, για ένα ποσοστό των πρακτόρων, που κυμαίνονταν από 1% ως 7% μεταξύ των σεναρίων, **ματαιώθηκε το πλάνο τους** στο τέλος της προσομοίωσης, δηλαδή δεν κατάφεραν να ολοκληρώσουν όλες τις προγραμματισμένες δραστηριότητες και μετακινήσεις τους. Ένα μεγάλο ποσοστό αυτών, που έφτανε ως το 97%, βρίσκονταν στην κίνηση όταν ματαιώθηκε το πλάνο τους. Σαν πράκτορας που ματαιώνεται το πλάνο του ενώ βρίσκεται στην κίνηση, εμφανίζεται και ένα αυτόνομο ταξί που πηγαίνει να παραλάβει κάποιον πράκτορα που το είχε καλέσει.

Υπήρχαν όμως και περιπτώσεις που **η κλήση για αυτόνομο ταξί δεν ανατέθηκε ποτέ σε κάποιο όχημα**. Όταν δηλαδή οι στόλοι των αυτόνομων ταξί δεν επαρκούσαν για να εξυπηρετήσουν τη ζήτηση, πολλές κλήσεις δεν κατάφεραν καν να ανατεθούν σε κάποιο αυτόνομο ταξί, το οποίο στη συνέχεια θα ξεκινούσε να πάει να παραλάβει κάποιον πράκτορα. Το 82% των μετακινήσεων που είχαν ανατεθεί, κατά τον σχεδιασμό, σε αυτόνομο ταξί, δεν έφτασαν ποτέ στον προορισμό τους, για το σενάριο με 800 αυτόνομο ταξί και 100% αντικατάσταση. Αυτό το ποσοστό είναι 61%, 41%, 24%, 9% και 5% για τα υπόλοιπα 5 μεγέθη στόλων και για την ίδια αντικατάσταση, αντίστοιχα. Προφανώς για μικρότερες τιμές αντικατάστασης το ποσοστό αυτό είναι αρκετά χαμηλότερο, μέχρι και κάτω του 1%, και δείχνει την ανεπάρκεια μικρών στόλων αυτόνομων ταξί για μεγάλα ποσοστά αντικατάστασης.

Ο χρόνος αναμονής για κάποιο αυτόνομο ταξί ήταν κατά μέσο όρο περίπου 2 ώρες, ενώ σε σενάρια που ο στόλος ήταν επαρκής για να ικανοποιηθεί η ζήτηση, η αναμονή ήταν περίπου 11 λεπτά κατά μέσο όρο. **Ο μέσος χρόνος μετακίνησης** με αυτόνομο ταξί υπολογίστηκε περίπου στα 21 λεπτά.

Τα μέγιστα συνολικά **οχηματο-χιλιόμετρα** που διανύθηκαν ήταν $4,2 \cdot 10^{11}$, 23,5% περισσότερα του αρχικού σεναρίου. Τα μέγιστα οχηματο-χιλιόμετρα που διανύθηκαν χωρίς επιβάτη, ήταν $0,168 \cdot 10^{11}$, που αποτελούν το 5% των μέγιστων συνολικών οχηματο-χιλιομέτρων.

Έχοντας μια πλήρη εικόνα από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, στη συνέχεια έγινε η **κυκλοφοριακή ανάλυσή τους**. Υπολογίστηκαν τα βασικά μακροσκοπικά μεγέθη της πυκνότητας, του κυκλοφοριακού φόρτου και της ταχύτητας και ύστερα τοποθετήθηκαν σε διαγράμματα που περιγράφουν την εξέλιξή τους, από τα μεσάνυχτα μέχρι τις 10:48. Για το ίδιο χρονικό διάστημα δημιουργήθηκαν και τα διαγράμματα για τις θεμελιώδεις σχέσεις ταχύτητας – πυκνότητας, φόρτου – πυκνότητας, ταχύτητας – φόρτου.

Δεν αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της κυκλοφοριακής ανάλυσης ολόκληρης της μέρας, διότι οι ιδιότητες του MATSim οδηγούσαν σε εσφαλμένες τιμές και μορφές διαγραμμάτων μετά το πέρας της πρώτης συμφόρησης, δηλαδή μετά την πρωινή αιχμή στις 7:30. Οι ιδιότητες αυτές είναι η

έλλειψη της ταχύτητας επιστροφής μιας κενής θέσης στην ουρά αναμονής ενός συνδέσμου, αφού ελευθερωθεί, και η δυνατότητα να μπορούν οι σύνδεσμοι να δεχτούν περισσότερα οχήματα από αυτά που υπαγορεύει η χωρητικότητά τους.

Το μακροσκοπικό μέγεθος της **ταχύτητας** παρουσίαζε σχετικά υψηλές τιμές, για παράδειγμα στο αρχικό σενάριο δεν έπεσε χαμηλότερα από, περίπου, 30 χλμ/ώρα, ακόμα και κατά την πρωινή συμφόρηση, ενώ ο συνολικός μέσος όρος της ταχύτητας ελεύθερης ροής για όλα τα σενάρια υπολογίστηκε στα 36 χλμ/ώρα. Η **πυκνότητα**, αντίθετα, κινήθηκε σε αρκετά χαμηλά επίπεδα, που δικαιολογείται από τον αυξημένο συντελεστή μέγιστου ρυθμού ροής εξόδου, χωρίς να ξεπερνά τα 17 οχήματα/χιλιόμετρο στο αρχικό σενάριο. Τέλος, ο κυκλοφοριακός **φόρτος** έφτασε ως τα 612 οχήματα/ώρα στην αιχμή της κυκλοφορίας του ίδιου σεναρίου. Αυτή η τιμή, ενώ φαίνεται χαμηλή, στην πραγματικότητα είναι το 76% του μέσου όρου των μέγιστων ρυθμών ροής εξόδου όλων των συνδέσμων που αξιοποιήθηκαν σε αυτό το σενάριο, δηλαδή του μέγιστου αριθμού οχημάτων που μπορεί να εξυπηρετήσει το κυκλοφοριακό σύστημα.

Για να μπορέσουν να γίνουν πιο κατανοητά τα αποτελέσματα της κυκλοφοριακής ανάλυσης, συγκεντρώθηκαν οι τιμές των μέγιστων φόρτων, δηλαδή των **κυκλοφοριακών ικανοτήτων, των κρίσιμων και των μέγιστων πυκνοτήτων**, και έγινε η σύγκρισή τους, μεταξύ του αρχικού και των 36 νέων σεναρίων. Κάθε στόλος παρουσιάζει μέγιστη κυκλοφοριακή ικανότητα για την αντικατάσταση μετακινήσεων με βάση την οποία έχει σχεδιαστεί, ενώ ύστερα η τιμή της μειώνεται. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως για μεγάλα μεγέθη στόλων και μικρά ποσοστά αντικατάστασης, για παράδειγμα 15000 αυτόνομα ταξί και 5% αντικατάσταση, η κυκλοφοριακή ικανότητα φαίνεται να είναι μικρότερη του αρχικού σεναρίου.

Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και της κυκλοφοριακής ανάλυσης, προκύπτουν τα **κριτήρια για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας** του κυκλοφοριακού συστήματος. Για να κριθεί το κυκλοφοριακό σύστημα ενός σεναρίου ανθεκτικό στην αλλαγή που του επιβλήθηκε, πρέπει οι μετακινήσεις με αυτόνομο όχημα που δεν κατάφεραν να φτάσουν στον προορισμό τους, να μην ξεπερνούν το 5% των μετακινήσεων σχεδιασμού. Επίσης, για τους πράκτορες που τελικά χρησιμοποίησαν την υπηρεσία, πρέπει ο μέσος χρόνος αναμονής για αυτόνομο όχημα να μην ξεπερνά τα 25 λεπτά. Τέλος, ανθεκτικό κρίνεται ένα κυκλοφοριακό σύστημα το οποίο έχει περάσει τους προηγούμενους δυο ελέγχους και η κυκλοφοριακή του ικανότητα είναι μεγαλύτερη από αυτή του αρχικού σεναρίου.

Τελικά, με βάση τα παραπάνω κριτήρια, ανθεκτικά κρίνονται τα σενάρια με:

800 αυτόνομα ταξί και 5% αντικατάσταση μετακινήσεων

3000 αυτόνομα ταξί και 20% αντικατάσταση μετακινήσεων

9000 αυτόνομα ταξί και 40% αντικατάσταση μετακινήσεων

12000 αυτόνομα ταξί και 60% αντικατάσταση μετακινήσεων

15000 αυτόνομα ταξί και 60% αντικατάσταση μετακινήσεων

Διάγραμμα 29: Σενάρια με ανθεκτικό κυκλοφοριακό σύστημα.

6.2 Τελικά Συμπεράσματα

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω περιορισμών, στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής εργασίας, έγιναν κάποιες ενέργειες, αυξάνοντας από 0,1 σε 0,3 τον συντελεστή του μέγιστου ρυθμού ροής εξόδου των συνδέσμων και εξετάζοντας μόνο την μισή προσομοιωμένη μέρα, δηλαδή μόνο τη μία από τις δύο αιχμές του κυκλοφοριακού φόρτου, ώστε να προκύψουν όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Με αυτό το τρόπο, οι προσομοιώσεις οδήγησαν σε ικανοποιητική, μα όχι ιδανική, αναπαράσταση της πραγματικότητας, από την οποία μετά την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας κυκλοφοριακής ανάλυσης και αξιολόγησης της ανθεκτικότητας, μπορούν να αντληθούν κάποια **χρήσιμα συμπεράσματα**.

Αρχικά, εύκολα διαπιστώνει κανείς πόσο κατάλληλη είναι διερεύνηση της λειτουργίας και των επιπτώσεων των αυτόνομων οχημάτων, με βάση τις επιλογές και τα πλάνα ενός **πολύ-πρακτορικού συστήματος**. Υπολογίζοντας τα ζητούμενα μακροσκοπικά μεγέθη της κυκλοφορίας της Ζυρίχης, προσομοιώνοντας κάθε άτομο και τις επιλογές του ξεχωριστά, προσδίδει σε αυτά μια ιδανική διάσταση κατανόησης, αφού οποιαδήποτε απορία σχετικά με κάποιο αποτέλεσμα που προέκυψε, μπορεί να ανιχνευθεί και να αναλυθεί στο ελάχιστο επίπεδο των πλάνων ενός ατόμου. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα, ειδικά μέσω του MATSim, να δημιουργηθούν επακριβώς οι επιθυμητές συνθήκες που θέλει να εξετάσει κάποιος, έχοντας τη δυνατότητα να θέσει τον τύπο και την ώρα εκτέλεσης των δραστηριοτήτων που εκτελούνται, καθώς και τον τρόπο μετακίνησης από και προς αυτές.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης γίνεται κατανοητό πως όσο περισσότερα οχήματα μπαίνουν και αλληλοεπιδρούν μέσα στην κυκλοφορία, τόσο περισσότερο αυξάνεται η παραβίαση της αποθηκευτικής χωρητικότητας οχημάτων των συνδέσμων, τόσο σε αριθμό συνδέσμων όσο και σε ποσοστό παραβίασης, και ο αριθμός των πλάνων που ματαιώνονται στο τέλος της προσομοίωσης. Αυτό δείχνει πως, όπως είναι λογικό, **η αλληλεπίδραση των οχημάτων στο περιβάλλον της κυκλοφορίας είναι σε θέση να διαφοροποιήσει τα αποτελέσματα**, ακόμα και αν τα μέσα που τηλεμεταφέρονται κινούνται με ορθά χαρακτηριστικά, όπως την κατάλληλη ταχύτητα. Καταδεικνύει λοιπόν, η σημασία του να προσομοιώνονται στην κυκλοφορία όλα τα διαθέσιμα μεταφορικά μέσα, ώστε να μπορούν να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, αφού όπως και σε πραγματικές συνθήκες, αξιόπιστα συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν μόνο όταν εξετάζονται όλες οι παράμετροι ενός τόσο σύνθετου φαινομένου.

Αναφορικά με τα **οχηματο-χιλιόμετρα** που διανύθηκαν, τόσο τα συνολικά, όσο και εκείνα που έγιναν δίχως επιβάτη, προκύπτει πως σε όλα τα σενάρια που κρίθηκαν ανθεκτικά, αυτά αυξάνονται, με τη μέγιστη αύξηση από το αρχικό σενάριο να φτάνει το 23,5%, για τα συνολικά οχηματο-χιλιόμετρα. Το γεγονός πως τα αυτόνομα ταξί σταθμεύουν αμέσως μόλις αφήσουν κάποιον πράκτορα στον προορισμό του, οδηγεί στο συμπέρασμα πως στην πραγματικότητα τα οχηματο-χιλιόμετρα που θα διανύονταν θα ήταν ακόμα πιο αυξημένα, καθώς τα αυτόνομα ταξί θα έπρεπε να ψάξουν για θέση στάθμευσης επί της οδού, ή να πάνε στο κοντινότερο χώρο στάθμευσης.

Πολύ χρήσιμη φαίνεται να είναι η δημιουργία των μακροσκοπικών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής, και ειδικά του διαγράμματος φόρτου – πυκνότητας, αφού είναι σε θέση να προσφέρουν μια άμεση επισκόπηση των βασικών χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας και με ελάχιστη περαιτέρω ανάλυση, να οδηγήσουν στα ζητούμενα συμπεράσματα για την απόδοσή της. Αναλύοντας τις **τιμές της κρίσιμης και της μέγιστης πυκνότητας**, προκύπτει πως με την αυξανόμενη χρήση των αυτόνομων ταξί, αυξάνεται η συνολική χρήση του οδικού δικτύου αλλά και μεγαλώνει το διάστημα που η κυκλοφορία λειτουργεί σε συνθήκες μη συμφορημένης ροής.

Γίνεται επίσης σαφές πως **η αξιολόγηση της ανθεκτικότητας ενός κυκλοφοριακού συστήματος**, δεν μπορεί να βασίζεται στην μεταβολή, συγκριτικά με αυτή της αρχικής του κατάστασης, μόνο ενός παράγοντα, για παράδειγμα της κυκλοφοριακής του ικανότητας. Είναι ανάγκη να εξετάζονται όλα

τα αντιπροσωπευτικά κριτήρια ελέγχου που χαρακτηρίζουν την απόδοσή του, όπως έγινε παραπάνω, ώστε μπορούν να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα για το εξεταζόμενο σύστημα.

Έτσι, το κυκλοφοριακό σύστημα της Ζυρίχης, σύμφωνα με τα σενάρια για τα οποία εξετάστηκε, τα κριτήρια αξιολόγησης και τους, κοινούς για όλα τα σενάρια, περιορισμούς, δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ανθεκτικό. Αυτό διότι τα σενάρια που προέκυψαν να έχουν ανθεκτικό κυκλοφοριακό σύστημα, αφορούν ποσοστά αντικατάστασης με τα οποία είχαν σχεδιαστεί οι στόλοι που αξιοποιήθηκαν, ή μικρότερα. Επομένως σε καταστάσεις πέραν του σχεδιασμού, το κυκλοφοριακό σύστημα δεν είχε ικανοποιητική απόδοση, συγκριτικά με το αρχικό σενάριο, και επομένως κρίνεται ως μη ανθεκτικό.

Τελικά, σημαντικό συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει από αυτή την εργασία, είναι η **καθοριστική σημασία της σωστής πρόβλεψης της ζήτησης και του σχεδιασμού με βάση την ανθεκτικότητα**. Ο συνδυασμός των μετακινήσεων με αυτόνομα οχήματα που δεν πραγματοποιήθηκαν, του χρόνου αναμονής για αυτόνομο ταξί από τους πράκτορες που τελικά εξυπηρετήθηκαν και των κυκλοφοριακών ικανοτήτων των εξεταζόμενων σεναρίων, δηλαδή τα κριτήρια αξιολόγησης την ανθεκτικότητας, κάνουν ξεκάθαρη αυτή την σημασία.

Στα σενάρια που εξετάστηκαν, έγινε ο **σχεδιασμός του στόλου μιας υπηρεσίας αυτόνομων ταξί** για έναν αριθμό μετακινήσεων και τελικά ανατέθηκε σε αυτόν όλο το εύρος της ζήτησης που εξετάστηκε, από πολύ χαμηλή ως πολύ υψηλή. Αυτή η ενέργεια προσπάθησε να αντικατοπτρίσει έναν σχεδιασμό με ελλιπή πρόβλεψη και με την υπόθεση πως όλα θα λειτουργήσουν βάσει αυτού. Έτσι, η ανάθεση όλου του εύρους ζήτησης που εξετάστηκε σε κάθε διαφορετικό μέγεθος στόλου, προσομοιώνει τις μη προβλεπόμενες καταστάσεις που μπορεί να συμβούν, όπως για παράδειγμα η υπηρεσία να είναι τόσο ελκυστική ώστε πολύ μεγαλύτερος αριθμός πρακτόρων να την προτιμήσουν ή να προκύψει λιγότερο ελκυστική από τον σχεδιασμό, και άρα να προσελκύσει λιγότερη ζήτηση.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, προκύπτει πως για μεγαλύτερη ζήτηση από αυτή του σχεδιασμού, οι μετακινήσεις που τελικώς δεν πραγματοποιούνται μπορούν να φτάσουν σε υψηλές τιμές, οι μέσοι χρόνοι αναμονής αυξάνονται επίσης κατά πολύ και η κυκλοφοριακή ικανότητα του οδικού δικτύου μειώνεται. Αντίθετα, όταν η ζήτηση είναι ίση ή μικρότερη αυτής του σχεδιασμού, και ενώ οι μετακινήσεις με αυτόνομο ταξί που δεν πραγματοποιούνται γίνονται ελάχιστες και οι χρόνοι αναμονής μειώνονται μόλις σε μερικά λεπτά, σε μερικές περιπτώσεις οι κυκλοφοριακές ικανότητες και πάλι μειώνονται. Τελικά, στις περισσότερες των περιπτώσεων, κάθε μέγεθος στόλου οδήγησε σε ανθεκτικό κυκλοφοριακό σύστημα, μόνο για το ποσοστό αντικατάστασης για το οποίο σχεδιάστηκε ή για κάποιο μικρότερο.

Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα πως πέρα από την σωστή πρόβλεψη της ζήτησης, είναι ανάγκη να λαμβάνεται υπόψιν και η ανθεκτικότητα του κυκλοφοριακού συστήματος, ώστε να είναι σε θέση να ανταπεξέλθει σε καταστάσεις που δεν έχουν υπολογιστεί κατά τον σχεδιασμό, ειδάλλως ενδέχεται να μην προκύψουν θετικά αποτελέσματα. Από τα παραπάνω φαίνεται πως όταν ο σχεδιασμός δεν οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα, δεν επιβαρύνεται μόνο η εταιρεία που παρέχει την υπηρεσία, μα και το κυκλοφοριακό σύστημα σαν σύνολο. Επομένως, συμπεραίνεται πως για να προκύψουν τα βέλτιστα αποτελέσματα και για τις δύο πλευρές, οι διαχειριστές των κυκλοφοριακών συστημάτων σε συνεργασία με τις εταιρείες που θα παρέχουν υπηρεσίες αυτόνομων ταξί, θα πρέπει να θέσουν από κοινού κάποιους **κανόνες και πολιτικές για την κυκλοφορία των αυτόνομων ταξί**. Με αυτό το τρόπο θα εξασφαλιστεί, ως ένα βαθμό, πως η λειτουργία τέτοιων υπηρεσιών δεν θα επιβαρύνει τους υπόλοιπους χρήστες του οδικού δικτύου, επηρεάζοντας αρνητικά την απόδοση του κυκλοφοριακού συστήματος, ούτε θα οδηγούνται οι ίδιες σε κακές αποδόσεις, χωρίς να μπορούν να εξυπηρετήσουν τους πελάτες τους.

6.3 Περιορισμοί

Όπως γίνεται σαφές και από την παραπάνω σύνοψη, η παρούσα εργασία διέπεται από κάποιους **περιορισμούς**. Αυτοί οι περιορισμοί προέκυψαν κυρίως λόγω της **μεγάλης καμπύλης μάθησης του προγράμματος MATSim**, που είναι αποτέλεσμα του εκτεταμένου εύρους δυνατοτήτων που προσφέρει, και άρα του αντίστοιχου κώδικα, οδηγιών και βιβλιογραφίας, και την ελλιπή καταγραφή και επεξήγηση σημαντικών διαδικασιών και βασικών εντολών, που χρειάζονται για την ολοκληρωμένη διερεύνηση ενός συγκοινωνιακού θέματος, όπως της παρούσας εργασίας. Σε μια προσπάθεια κάλυψης αυτής της έλλειψης, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παραδειγμάτων, που, ενώ αποδεικνύονται πολύ χρήσιμα, δίχως την καθοδήγηση κάποιου με εμπειρία πάνω στο MATSim, αναπόφευκτα δημιουργούνται προβλήματα που η επίλυσή τους χάνεται μέσα στις χιλιάδες γραμμές κώδικα, βιβλιογραφίας, ερωτήσεων και απαντήσεων στο GitHub και αρχείων xml.

Παρόλο που υπήρχαν διαθέσιμα τα **πλήρη δεδομένα του σεναρίου της Ζυρίχης**, ο απαραίτητος κώδικα για την εκτέλεση προσομοιώσεων με την δυνατότητα χρήσης αυτόνομων ταξί και η καθοδήγηση για την χρήση αυτών των στοιχείων, δεν κατέστη δυνατόν να αξιοποιηθεί ένα **σύστημα βαθμολόγησης και επανασχεδιασμού**, δεδομένης της πολυπλοκότητας του προβλήματος. Ένα τέτοιο σύστημα όμως θα μπορούσε να οδηγήσει κάποιους πράκτορες, οι οποίοι δεν έλαβαν καλή βαθμολογία στην προσομοιωμένη μέρα τους, να διαλέξουν μια διαφορετική διαδρομή για να πάνε στον προορισμό τους. Με αυτό το τρόπο, το πολύ-πρακτορικό σύστημα θα κατάφερνε ενδεχομένως να οδηγηθεί σε μια πιο ρεαλιστική κυκλοφορία, χωρίς να παγιδεύονται οι πράκτορες για ώρες σε κάποιους συνδέσμους.

Η ύπαρξη ενός τέτοιου συστήματος, μπορεί να οδηγούσε σε πιο ρεαλιστική κυκλοφορία, αλλά το πιθανότερο είναι πως και πάλι θα υπήρχαν προβλήματα με τη μορφή των ζητούμενων θεμελιωδών διαγραμμάτων της κυκλοφοριακής ροής. Αυτό διότι στον προσομοιωτή κυκλοφορίας QSim που αξιοποιήθηκε, δεν γίνεται να τεθεί ταχύτητα επιστροφής της κενής θέσης στην ουρά αναμονής των συνδέσμων, όταν αυτή ελευθερωθεί, ενώ στον **JDEQSim** γίνεται. Η προσαρμογή όμως ενός διαφορετικού προσομοιωτή κυκλοφορίας σε ένα σενάριο που έχει δημιουργηθεί με βάση τον προσομοιωτή QSim, αφενός δεν επεξηγείται πλήρως από την βιβλιογραφία του προγράμματος και αφετέρου πιθανώς θα δημιουργούσε προβλήματα συμβατότητας. Με τη σειρά τους, η επίλυση αυτών των προβλημάτων θα απαιτούσε επιπλέον κατανόηση, δοκιμές και διορθώσεις, όπως άλλωστε θα απαιτούσε και η αξιοποίηση του προαναφερόμενου συστήματος, πολλαπλασιάζοντας έτσι τη δυσκολία διεκπεραίωσης αυτής της εργασίας.

Τέλος, σημαντικός περιορισμός των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν, είναι πως **δεν προσομοιώνονταν στην κυκλοφορία** τα Μ.Μ.Μ όπως τα λεωφορεία, επειδή τα σενάρια αφορούσαν το 10% του πληθυσμού, τα οχήματα μεταφοράς φορτίων, οι μετακινήσεις με μέσο μεταφοράς το outside και οι επιβάτες αυτοκινήτων. Αυτό σημαίνει πως ενώ εξυπηρετούσαν ένα μέρος της ζήτησης, δεν αλληλοεπιδρούσαν με τα μέσα που αποτελούσαν την κυκλοφορία, δηλαδή τα αυτοκίνητα και τα αυτόνομα ταξί, και άρα δεν την επηρέαζαν.

6.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Αδιαμφισβήτητα, η ερευνητική προσπάθεια πάνω στη λειτουργία και τις επιπτώσεις των αυτόνομων οχημάτων βρίσκεται ακόμα σε αρχικό στάδιο. Το σίγουρο είναι πως αυτή η προσπάθεια πρόκειται μόνο να εντατικοποιηθεί τα επόμενα χρόνια, με τα οχήματα αυτά να έχουν ήδη αρχίσει να βγαίνουν από τα εργαστήρια και τις ελεγχόμενες διαδρομές και να διανύουν ολοένα και περισσότερα οχηματο-χιλιόμετρα σε μεικτή κυκλοφορία μαζί με άλλα συμβατικά οχήματα, όπως για παράδειγμα τα οχήματα της εταιρείας Waymo.

Διαβάζοντας αυτή τη Διπλωματική εργασία, αυτονόητο βήμα για την **βελτίωση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή πιο αξιόπιστων συμπερασμάτων**, αναφορικά με την ανθεκτικότητα των κυκλοφοριακών συστημάτων στην εποχή των αυτόνομων οχημάτων και χρησιμοποιώντας το MATSim, είναι η αξιοποίηση ενός συστήματος βαθμολόγησης και επανασχεδιασμού των πλάνων των πρακτόρων και η αντικατάσταση του προσομοιωτή κυκλοφορίας QSim από τον JDEQSim. Επίσης για να προκύψει η πλέον ιδανική αναπαράσταση της πραγματικότητας, θα πρέπει τα σενάρια που θα εξεταστούν να εκτελεστούν σε κλίμακα 100% του πληθυσμού, που θα χρειαστεί ένα πολύ πιο δυνατό υπολογιστικό σύστημα, έτσι ώστε να προσομοιωθούν στην κυκλοφορία και οι κινήσεις των M.M.M και των οχημάτων μεταφοράς φορτίων.

Εμπλουτίζοντας τα σενάρια που εξέτασε η παρούσα εργασία, θα μπορούσαν να υπάρχουν **παραπάνω από μία υπηρεσίες αυτόνομων οχημάτων** με διαφορετικά χαρακτηριστικά η καθεμία. Παραδείγματα που έχουν ήδη εξεταστεί σε άλλες έρευνες, όπως έχει αναφερθεί στην Βιβλιογραφική Ανασκόπηση, είναι μία υπηρεσία ταξί που συγκεντρώνει τις κλήσεις που δέχεται με βάση την απόσταση και η χρήση οχημάτων ταξί-μίνι-βαν ή ταξί-λεωφορείων, που διαθέτουν περισσότερες των 4 θέσεων που διαθέτουν τα υπόλοιπα αυτόνομα ταξί.

Με αυτό το τρόπο θα μπορούν να εξεταστούν περισσότερα σενάρια ανθεκτικότητας του κυκλοφοριακού συστήματος, εξετάζοντας για παράδειγμα μία δυσλειτουργία σε κάποια από τις υπηρεσίες αυτόνομων ταξί και τη μεταβίβαση της ζήτησης που εξυπηρετούσε στις υπόλοιπες. Επίσης η ύπαρξη πάνω από μίας υπηρεσίας αυτόνομων ταξί που ανταγωνίζονται μεταξύ τους, περιγράφει καλύτερα τα πρώτα στάδια της εισαγωγής των αυτόνομων οχημάτων στην καθημερινότητα των μετακινήσεων, όπου οι εταιρείες που θα παρέχουν αυτές τις υπηρεσίες θα δοκιμάζουν ακόμα να βρουν ποιος είναι ο βέλτιστος τρόπος αξιοποίησής τους.

Ένα στοιχείο που μπορεί εμπλουτίσει ακόμα περισσότερο τη διερεύνηση της λειτουργίας και των επιπτώσεων των αυτόνομων οχημάτων, είναι η ύπαρξη **ειδικών χώρων στάθμευσης και φόρτισης τους**. Στην παρούσα Διπλωματική εργασία, τα αυτόνομα ταξί αρχικοποιούνταν διεσπαρμένα στο οδικό δίκτυο, με βάση την πυκνότητα του πληθυσμού, και στάθμευαν στο σημείο που άφηναν κάποιο πράκτορα, αφού τον είχαν πάει στον προορισμό του.

Εφόσον γίνεται η επιλογή τα αυτόνομα ταξί να μην περιφέρονται διαρκώς ψάχνοντας για κάποιο πελάτη, όπως τα συμβατικά ταξί, και είτε να σταθμεύουν κοντά στο σημείο που ολοκλήρωσαν κάποια μεταφορά είτε να επανατοποθετούνται στρατηγικά στο οδικό δίκτυο, θα πρέπει να υπάρχει κάποια πρόβλεψη για το που θα σταθμεύουν. Αν πρόκειται να σταθμεύουν επί της οδού, θα πρέπει να συνυπολογιστούν οι μετακινήσεις που θα κάνουν ψάχνοντας για θέση στάθμευσης, με βάση τον αριθμό των συμβατικών αυτοκινήτων που υπάρχουν ακόμα σε χρήση, αλλά και οι μετακινήσεις που θα κάνουν όταν χρειάζεται να φορτιστούν. Η ύπαρξη λοιπόν κάποιων χώρων που τα αυτόνομα οχήματα θα σταθμεύουν, είτε μόνο όταν χρειάζεται να φορτιστούν ή να συντηρηθούν, είτε ως χώροι που θα συγκεντρώνονται όταν δεν εξυπηρετούν κάποια κλήση, είναι σημαντικό στοιχείο στην εξέταση των επιπτώσεων των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία.

Η εκτίμηση, παρόλα αυτά, της πλήρους αξιοποίησης των δυνατοτήτων των αυτόνομων οχημάτων, θα χρειαστεί και την διερεύνηση κάποιων **χαρακτηριστικών τους σε μικροσκοπική κλίμακα**. Είναι ανάγκη δηλαδή, να προσδιοριστεί η βελτιωμένη κίνηση των αυτόνομων οχημάτων, είτε όταν αλληλοεπιδρούν με κάποιο συμβατικό όχημα ή με κάποιο άλλο αυτόνομο όχημα είτε κατά την αλληλεπίδρασή τους με την υποδομή του οδικού δικτύου, για παράδειγμα τους φωτεινούς σηματοδότες, τόσο εξαιτίας της τεχνολογίας των ίδιων των οχημάτων όσο και από την ύπαρξη ειδικών Συστημάτων Ευφυών Μεταφορών στην υποδομή των οδικών δικτύων. Ύστερα, αυτή η βελτιωμένη δυνατότητα κίνησης θα μπορούσε να **μεταφραστεί σε κάποια βελτιωμένα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά**, για παράδειγμα κατάληψη λιγότερων Ισοδύναμων Μονάδων Επιβατικού Αυτοκινήτου (ΜΕΑ), ώστε να δημιουργηθούν και να αξιοποιηθούν τυποποιημένα αυτόνομα οχήματα με αυτά τα χαρακτηριστικά, όπως δημιουργούνται στο MATSim τυποποιημένα αυτοκίνητα.

Όπως είναι προφανές, οι παραπάνω προτάσεις έχουν στην πλειονότητά τους ήδη εξεταστεί, ξεχωριστά και ως ένα βαθμό, από κάποιες έρευνες, αρκετές εκ των οποίων έχουν αναφερθεί στην Βιβλιογραφική Ανασκόπηση. Παρόλα αυτά η **ενσωμάτωσή τους σε ένα ενιαίο σενάριο**, είτε συνολικά είτε τμηματικά, και η εξέτασή τους υπό το πρίσμα της ανθεκτικότητας, θα μπορούσε να οδηγήσει σε πολύ χρήσιμα αποτελέσματα. Αυτό διότι στο περιβάλλον ενός πραγματικού κυκλοφοριακού συστήματος, όλα τα παραπάνω στοιχεία αλληλοεπιδρούν και σχετίζονται μεταξύ τους. Τελικά, η εξέταση ενός τέτοιου, πλήρους κυκλοφοριακού συστήματος κάτω από μη προβλεπόμενες συνθήκες και η αξιολόγηση της ανθεκτικότητάς του, μπορεί να οδηγήσει στον εντοπισμό σφαλμάτων που δεν θα εμφανίζονταν κάτω από φυσιολογικές συνθήκες και να διευρύνει τα περιθώρια βελτίωσης των χαρακτηριστικών του.

Βιβλιογραφία

- Abe, R. (2019). Introducing autonomous buses and taxis: Quantifying the potential benefits in Japanese transportation systems. *Transportation Research Part A*.
- Balac, M., Horl, S., & Axhausen, K. W. (2019). Fleet sizing for pooled automated vehicle fleets. *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*.
- Bierstedt, J., Gooze, A., Gray, C., Peterman, J., Raykin, L., & Walters, J. (2014). *Effects of next-generation vehicles on travel demand and highway capacity*. Fehr & Peers.
- Biscoff, J., & Maciejewski, M. (2016). Simulation of city-wide replacement of private cars with autonomous taxis in Berlin. *The 7th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2016)*. Procedia Computer Science.
- Boesch, P. M., & Ciari, F. (2015). Agent-Based Simulation of Autonomous Cars. *2015 American Control Conference*. Chicago, IL, USA.
- Cembalest, M. (2018). *Eye on the market*. J.P Morgan, annual energy paper.
- Chen, T. D., Kockelman, K. M., & Hanna, J. P. (2016). Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. *Transportation Research Part A*.
- Chen, T., & Kockelman, K. M. (2016). Management of a Shared Autonomous Electric Vehicle Fleet: Implications of Pricing Schemes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
- Du, J., Rakha, H., & Gayah, V. V. (2015). Deriving macroscopic fundamental diagrams from probe. *Transportation Research Part C*.
- Duarte, F., & Ratti, C. (2018). The Impact of Autonomous Vehicles on. *Urban Technology*.
- Eclipse*. (2020). Ανάκτηση από Eclipse Foundation: <https://www.eclipse.org/>
- Edie, L. C. (1965). Discussion of traffic stream measurements and definitions. *The 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*.
- Fagnant, D. J., Kockelman, K. M., & Bansal, P. (2015). Operations of a Shared Autonomous Vehicle Fleet for the Austin, Texas Market. *Transportation Research Record*.
- Ganin, A. A., Kitsak, M., Marchese, D., Keisler, J. M., Seager, T., & Linkov, I. (2017). Resilience and efficiency in transportation networks. *Science Advances*.
- Geroliminis, N., & Daganzo, C. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B*.
- GitHub*. (2020). Ανάκτηση από matsim-code-examples: <https://github.com/matsim-org/matsim-code-examples>
- GitHub*. (2020). Ανάκτηση από eqasim-java: <https://github.com/eqasim-org/eqasim-java>
- GitHub*. (2020). Ανάκτηση από discrete-mode-choice: <https://github.com/matsim-eth/discrete-mode-choice>
- Horl, S. (2017). Agent-based simulation of autonomous taxi services with dynamic demand responses. *The 6th International Workshop on Agent-based Mobility, Traffic and Transportation Models, Methodologies and Applications (ABMTrans 2017)*. Procedia Computer Science.

- Horl, S., Balac, M., & Axhausen, K. W. (2019). Dynamic demand estimation for an AMoD system in Paris. *Intelligent Vehicles Symposium*. Paris.
- Horni, A., & Balmer, M. (2016). Switzerland. Στο A. Horni, K. Nagel, & K. W. Axhausen, *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim* (σσ. 373-374). Ubiquity Press.
- Horni, A., Nagel, K., & Axhausen, K. W. (2016). *The Multi-Agent Transport Simulations MATSim*. London: Ubiquity Press.
- Hult, R., Campos, G. R., Steinmetz, E., Hammarstrand, L., Falcone, P., & Wymeersch, H. (2016). Coordination of Cooperative Autonomous Vehicles. *IEEE Signal Processing Magazine*.
- Iacobucci, R., McLellan, B., & Tezuka, T. (2018). Modeling shared autonomous electric vehicles: Potential for transport. *Energy*.
- Kockelman, K., Boyles, S., Stone, P., Fagnant, D., Patel, R., Levin, M. W., . . . Li, J. (2017). *An assessment of autonomous vehicles: traffic impacts and infrastructure needs—final report*. The University of Texas at Austin Center for Transportation Research.
- Larson, W., & Weihua, Z. (2019). Self-driving cars and the city: Effects on sprawl, energy consumption, and housing affordability. *Regional Science and Urban Economics*.
- Leclercq, L., Chiabaut, N., & Trinquier, B. (2014). Macroscopic Fundamental Diagrams: A cross-comparison of estimation methods. *Transportation Research Part B*.
- Lu, Q., Tettamanti, T., Horcher, D., & Varga, I. (2019). The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation. *Transportation Letters*.
- Maciejewski, M., & Bischoff, J. (2016). Congestion Effects of Autonomous Vehicles. *TRANSPORT*.
- Martinez, L. M., & Viegas, J. M. (2017). Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban. *Transportation Science & Technology mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal*.
- MATSim. (2020). Ανάκτηση από <https://www.matsim.org/>
- MATSim. (2020). Ανάκτηση από MATSim 0.9.0 API: <https://www.matsim.org/apidocs/core/0.9.0/>
- Mauer, M., Gerdes, J., Lenz, B., & Winner, H. (2015). *Autonomous Driving*. Springer Open.
- Monreal, C. O. (2016). Autonomous Vehicles and Smart mobility Related Technologies. *Infocommunications Journal*.
- Moreno, A., Michalski, A., Llorca, C., & Moeckel, R. (2018). Autonomous Taxis Effect on Vehicle km Traveled and Average Trip Duration in the Greater Munich Metropolitan Area. *Transportation Research Board 97th Annual Meeting*. Washington DC.
- Moreno, A., Michalski, A., Llorca, C., & Moeckel, R. (2018). Shared Autonomous Vehicles Effect on Vehicle-Km Traveled and Average Trip Duration. *Journal of Advanced Transportation*.
- Pinjari, A. R., Menon, N., & Bertho, A. (2014). Highway Capacity Impacts of Autonomous Vehicles : An Assessment.
- planetB. (2020). Ανάκτηση από Syntax Highlight Code In Word Documents: <http://www.planetb.ca/syntax-highlight-word>
- PtvGroup. (2020). Ανάκτηση από PtvGroup-Vlssim: <https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim/>

- Rieser-Schussler, N., Bosch, P. M., Horni, A., & Balmer, M. (2016). Zurich. Στο A. Horni, K. Nagel, & K. W. Axhausen, *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim* (σσ. 375-378). London: Ubiquity Press.
- SAE International Technical Standard Provides Terminology for Motor Vehicle Automated Driving Systems*. (2020). Ανάκτηση από SAE International: <https://www.sae.org/news/press-room/2014/10/sae-international-technical-standard-provides-terminology-for-motor-vehicle-automated-driving-systems>
- Self-Driving car*. (2020). Ανάκτηση από Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Self-driving_car
- Simunto*. (2020). Ανάκτηση από Via: <https://www.simunto.com/via/>
- Spyder*. (2020). Ανάκτηση από Spyder: <https://www.spyder-ide.org/>
- Stamos, I., Grau, J., Mitsakis, E., & Mamarikas, S. (2015). Macroscopic Fundamental Diagrams: Simulation findings for Thessaloniki's road network. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*.
- SUMO*. (2020). Ανάκτηση από SUMO-Simulation of Urban Mobility: <http://sumo.sourceforge.net/>
- Tesla*. (2020). Ανάκτηση από Tesla Autopilot: <https://www.tesla.com/support/autopilot>
- Uber*. (2020). Ανάκτηση από Uber Technology: <https://www.uber.com/us/en/atg/technology>
- Waymo*. (2020). Ανάκτηση από Waymo Technology: <https://waymo.com/tech>
- What is an Autonomous Car?* (2020). Ανάκτηση από synopsis: <https://www.synopsys.com/automotive/what-is-autonomous-car.html>
- Ye, L., & Yamamoto, T. (2017). Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow. *Physica A*.
- Σταθόπουλος, Α., & Καρλαύτης, Μ. (2016). *Σχεδιασμός Μεταφορικών Συστημάτων*. Αθήνα: Παπασωτηρίου Εκδόσεις.
- Φρατζεσκάκης, Ι. Μ., Γκόλιας, Ι. Κ., & Πιτσιάβα-Λατινοπούλου, Μ. Χ. (2009). *Κυκλοφοριακή Τεχνική*. Παπασωτηρίου Εκδόσεις.

Παραρτήματα

Οι κώδικες που θα παρουσιαστούν σε αυτό το κεφάλαιο, είναι γραμμένοι είτε σε γλώσσα προγραμματισμού `python` είτε σε `java`. Η επιλογή των δύο αυτών γλωσσών έγινε ως εξής: Η `python`, είναι σχετικά απλή γλώσσα, η σύνταξή της αρκετά εύκολη και παρέχει πολλές βιβλιοθήκες για προσπέλαση αρχείων και εξαγωγή δεδομένων, όπως τύπου `xml` που χρειάστηκε σε αυτήν την εργασία, και δημιουργία διαγραμμάτων.

Η `java`, που είναι κάπως δυσκολότερη, είναι η γλώσσα στην οποία είναι γραμμένες οι βάσεις δεδομένων στις οποίες υπάρχουν οι αναγκαίοι κώδικες για να τρέξει το `MATSim`. Αυτές οι βάσεις δεδομένων διαθέτουν πολλές εντολές που κάνουν κάποιες διαδικασίες αρκετά πιο εύκολες και γρήγορες, στο περιβάλλον του `MATSim`. Παρόλα αυτά, οι χρήσιμες αυτές εντολές είναι σε μεγάλο βαθμό μη καταγεγραμμένες και άρα η κατανόηση και η χρήση τους είναι δυνατή είτε μέσω κάποιων παραδειγμάτων που διατίθενται, είτε μέσω της υπόδειξης κάποιου γνώστη του προγράμματος.

Έτσι, σε αρχικές φάσεις της παρούσας εργασίας, αξιοποιήθηκαν οι δυνατότητες της γλώσσας `java`, μέσω των βάσεων δεδομένων του `MATSim`, με βάση παραδείγματα που υπήρχαν και σύμφωνα με κάποιες συμβουλές ειδικών του προγράμματος. Σε μετέπειτα φάσεις, όπου μπορούσε να αποφευχθεί η χρήση της γλώσσας `java`, ο κώδικας γραφόταν σε γλώσσα `python`.

Οι περισσότεροι παρακάτω κώδικες, θα μπορούσαν να έχουν γραφτεί καλύτερα, από άποψη σύνταξης, αξιοποιημένων μεθόδων κ.λπ. Παρόλα αυτά, παρέχουν μια εικόνα για το πως προέκυψαν τα στοιχεία των προηγούμενων κεφαλαίων, δίνεται η δυνατότητα να αντιγραφούν, στην ψηφιακή μορφή αυτού του εγγράφου, και τελικά μπορεί μερικές εντολές ή διαδικασίες να είναι χρήσιμες σε κάποιον που ξεκινάει με το `MATSim`.

Τέλος, όλοι οι κώδικες που θα παρουσιαστούν, διαθέτουν την κατάλληλη επισήμανση (`highlight`) της αντίστοιχης γλώσσας, που βοηθάει πολύ στην κατανόηση τους, από την ιστοσελίδα ([planetB, 2020](#)).

Παράρτημα 1: Χαρακτηριστικά Οδικού Δικτύου – `python`

```

1. from xml.dom import minidom
2. import os
3. import statistics
4. os.chdir("G:/ZurichOutput/Fleet 800 5% AVs")
5.
6. net=minidom.parse('output_network-nopt.xml')
7. node=minidom.parse('nodesnopt.xml')
8. network=net.getElementsByTagName('link')
9. nodes=node.getElementsByTagName('node')
10.
11. # =====
12. #   Print Nodes
13. # =====
14. def nodecount(nodes):
15.     counter=0
16.     for node in nodes:
17.         counter+=1
18.     print("Nodes: {}".format(counter))
19.
20. def networklinks(network):
21. # =====
22. #   Print modes and mode stats
23. # =====
24.     modes=set()
25.     train = 0
26.     pt = 0
27.     car_passenger = 0

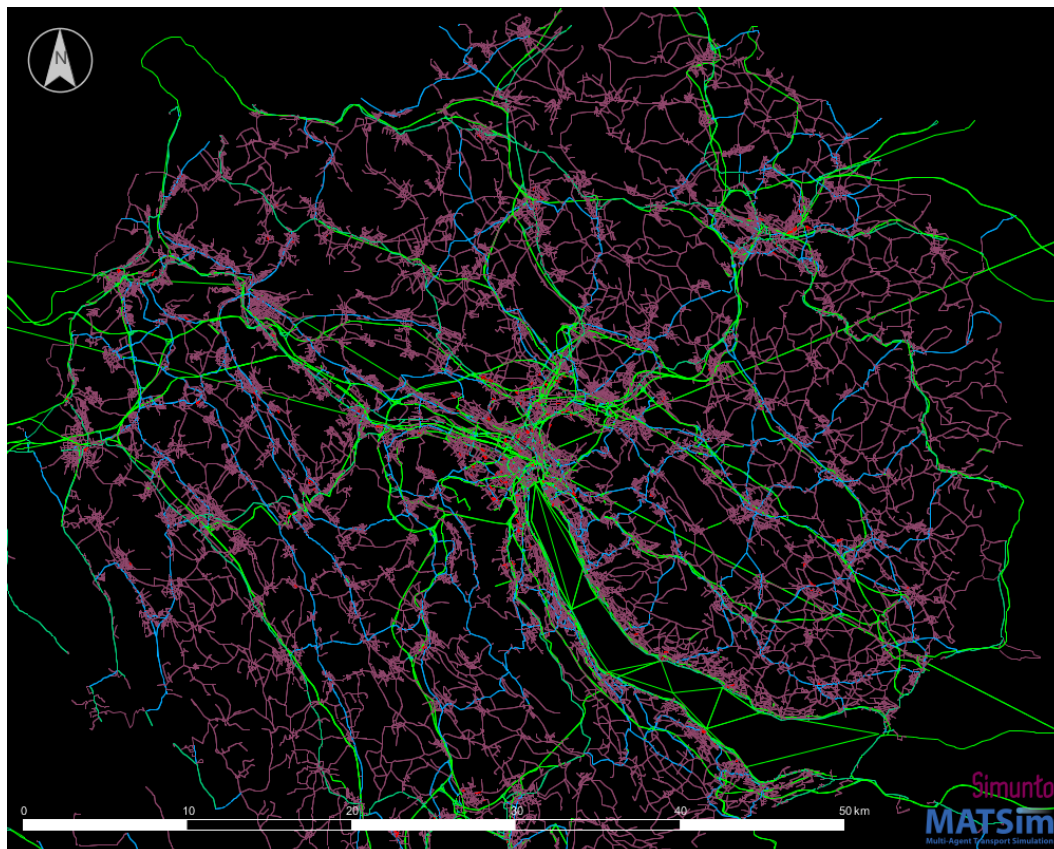
```

```

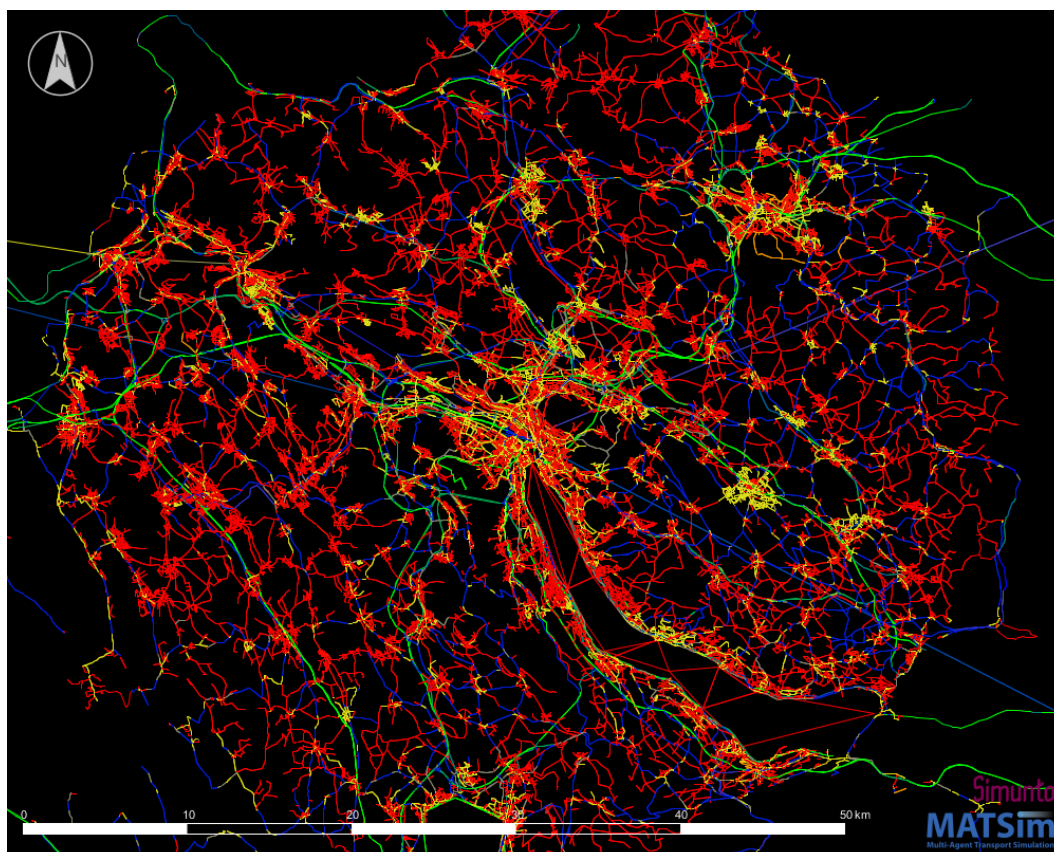
28. light_rail = 0
29. truck = 0
30. rail = 0
31. car = 0
32. bus = 0
33. tram = 0
34. av = 0
35. for link in network:
36.     mode = link.attributes['modes'].value
37.     for word in mode.split(','):
38.         modes.add(word)
39.         if word=="train": train+=1
40.         if word=="pt": pt+=1
41.         if word=="truck": truck+=1
42.         if word=="rail": rail+=1
43.         if word=="car_passenger": car_passenger+=1
44.         if word=="light_rail": light_rail+=1
45.         if word=="av": av+=1
46.         if word=="car": car+=1
47.         if word=="bus": bus+=1
48.         if word=="tram": tram+=1
49.
50.     print("Available modes: {}".format(modes))
51.     print("Train: {}".format(train))
52.     print("Pt: {}".format(pt))
53.     print("Truck: {}".format(truck))
54.     print("Rail: {}".format(rail))
55.     print("Car_passenger: {}".format(car_passenger))
56.     print("Light_Rail: {}".format(light_rail))
57.     print("AV: {}".format(av))
58.     print("Car: {}".format(car))
59.     print("Bus: {}".format(bus))
60.     print("Tram: {}".format(tram))
61. # =====
62. #     Speed, Length, Capacity, Lanes
63. # =====
64.     length=set()
65.     freespeed=set()
66.     capacity=set()
67.     permalanes=set()
68.     totallength=0
69.     for link in network:
70.         length.add(float(link.attributes['length'].value))
71.         totallength+=float(link.attributes['length'].value)
72.         freespeed.add(float(link.attributes['freespeed'].value))
73.         capacity.add(float(link.attributes['capacity'].value))
74.         permalanes.add(float(link.attributes['permlanes'].value))
75.     print("Mean length: {}".format(statistics.mean(length)))
76.     print("Max length: {}".format(max(length)))
77.     print("Min length: {}".format(min(length)))
78.
79.     print("Mean capacity: {}".format(statistics.mean(capacity)))
80.     print("Max capacity: {}".format(max(capacity)))
81.     print("Min capacity: {}".format(min(capacity)))
82.
83.     print("Mean freespeed: {}".format(statistics.mean(freespeed)))
84.     print("Max freespeed: {}".format(max(freespeed)))
85.     print("Min freespeed: {}".format(min(freespeed)))
86.
87.     print(totallength)
88.     print("Meadian lanes: {}".format(statistics.median(permalanes)))
89. # =====
90. networklinks(network)
91. nodecount(nodes)

```

Παράρτημα 2: Οπτικοποίηση Χαρακτηριστικών Οδικού Δικτύου



Εικόνα 10: Μέγιστοι ρυθμοί ροής εξόδου συνδέσμων σε οχήματα/ώρα. Χρωματική κλίμακα: κόκκινο: 0-300, μπλε: 1000 -2000, πράσινο: >2000. Μέσω Vía.



Εικόνα 9: Ταχύτητα Ελεύθερης Ροής συνδέσμων σε χλμ/ώρα. Χρωματική κλίμακα: κόκκινο: 0-30, κίτρινο: 47-76, μπλε: 76-112, πράσινο: >112. Μέσω Vía.

Παράρτημα 3: Στατιστικά Στοιχεία Πληθυσμών – java

Στο `args[0]`, που είναι **παράμετρος εισόδου**, δόθηκε ο εξεταζόμενος πληθυσμός, στο `args[1]`, το αρχείο που περιείχε όλες τις δραστηριότητες και τα μέσα μετακίνησης, διαφορετικά κωδικοποιημένα ώστε να γίνεται σαφές ποιες μετακινήσεις γίνονται εκτός της περιοχής μελέτης-outside, στα `args[2],[3],[4]`, δόθηκαν το εξεταζόμενο σενάριο δοκιμής (χαρακτηριστικό που τελικά δεν αξιοποιήθηκε από την Διπλωματική εργασία), ο διαθέσιμος στόλος αυτόνομων ταξί και το ποσοστό αντικατάστασης. Τον κώδικα αυτόν τον καλούσε κάποιος άλλος κώδικας και έτσι η συνεργασία τους ήταν σε θέση να παράξει συνολικά πληροφορίες για πολλά εξεταζόμενα σενάρια, ταυτόχρονα. Ύστερα, ένας τρίτος κώδικας συγκέντρωνε τα δεδομένα των προέκυψαν, δίνοντας την δυνατότητα να παραχθούν συνολικοί πίνακες και διαγράμματα.

Αυτός ο κώδικας δεν μπορεί να λειτουργήσει ολόκληρος. Φτιάχτηκε ώστε να προκύψουν στατιστικά στοιχεία από διάφορα στάδια της έρευνας. Έτσι, στο τέλος του αρχείου, που υπάρχουν οι εντολές που γράφουν σε αρχεία τα ζητούμενα στατιστικά, πρέπει οι γραμμές που δεν είναι αναγκαίες για στοιχεία που πρόκειται να εξαχθούν, να μπουν σε σχόλιο, μαζί με όποιες άλλες γραμμές που βρίσκονται παραπάνω και δεν αφήνουν τον κώδικα να τρέξει.

```

1. package org.matsim.codeexamples.population.analyzePlans;
2.
3. import java.io.File;
4. import java.io.FileWriter;
5. import java.io.IOException;
6. import java.io.PrintWriter;
7. import java.util.ArrayList;
8. import java.util.HashMap;
9. import java.util.HashSet;
10. import java.util.List;
11. import java.util.Map;
12. import java.util.Scanner;
13. import java.util.Set;
14.
15. import org.matsim.api.core.v01.Scenario;
16. import org.matsim.api.core.v01.population.Activity;
17. import org.matsim.api.core.v01.population.Leg;
18. import org.matsim.api.core.v01.population.Person;
19. import org.matsim.api.core.v01.population.Plan;
20. import org.matsim.api.core.v01.population.PlanElement;
21. import org.matsim.api.core.v01.population.Population;
22. import org.matsim.api.core.v01.population.PopulationFactory;
23. import org.matsim.api.core.v01.population.Route;
24. import org.matsim.core.config.Config;
25. import org.matsim.core.config.ConfigUtils;
26. import org.matsim.core.population.io.PopulationReader;
27. import org.matsim.core.scenario.ScenarioUtils;
28.
29. public class PlanStatsclean {
30.     private static double round (double value, int precision) {
31.         int scale = (int) Math.pow(10, precision);
32.         return (double) Math.round(value * scale) / scale;
33.     }
34.     public static void main(String[] args) throws ClassCastException, NumberFormatException, IOException {
35.         Config config = ConfigUtils.createConfig() ;
36.         Scenario scenario = ScenarioUtils.createMutableScenario(config) ;
37.         PopulationReader popReader = new PopulationReader(scenario);
38.         popReader.readFile(args[0]);
39.         final Population pop = scenario.getPopulation();
40.         Scenario newScenario = ScenarioUtils.createMutableScenario(config);
41.         Population newPopulation = newScenario.getPopulation();
42.         PopulationFactory populationFactory = newPopulation.getFactory();
43.
44.         Integer sc = Integer.parseInt(args[2]);

```



```

45.     Integer fl = Integer.parseInt(args[3]);
46.     Integer perc = Integer.parseInt(args[4]);
47.     //     FileWriter printWriter = new FileWriter("G:\\Scenario "+sc+" Popula-
         tion "+perc+" Fleet "+fl+" Statistics.txt", true);
48.     FileWriter printWriter = new FileWriter("G:\\Scenario Statistics.txt", true);
49.     PrintWriter writer = new PrintWriter(printWriter);
50.     //Reading from the txt and add to list
51.     List<String> plans = new ArrayList<String>();
52.     File file = new File(args[1]);
53.     Scanner reader = new Scanner(file);
54.     while (reader.hasNextLine()) {
55.         plans.add(reader.nextLine());
56.     }
57.     int tempPlanElements = 0;
58.     reader.close();
59.
60.     //START OF PERSON
61.     double nonchangabletrips=215107;
62.     double male=0;
63.     double female=0;
64.     int freight=0;
65.     double people=0;
66.     double employed=0;
67.     double license=0;
68.     double carpassenger=0;
69.     double outside=0;
70.     double age017=0;
71.     double age1824=0;
72.     double age2534=0;
73.     double age3544=0;
74.     double age4554=0;
75.     double age5564=0;
76.     double ageover=0;
77.     double carall=0;
78.     double carsometimes=0;
79.     Set<String> activities = new HashSet<String>();
80.     Set<String> legs = new HashSet<String>();
81.     double acts=0;
82.     double trips=0;
83.     String act=null;
84.     String leg=null;
85.     double totaldistance=0;
86.     double bike=0;
87.     double car=0;
88.     double bikei=0;
89.     double cari=0;
90.     Double score=0.0;
91.     Double scoreav=0.0;
92.     //     int test=0;
93.     HashMap<String, Double> Actcount = new HashMap<String, Double>();
94.     Actcount.put("other", 0.0);Actcount.put("shop", 0.0);Actcount.put("educa-
         tion", 0.0);Actcount.put("work", 0.0);
95.     Actcount.put("outside", 0.0);Actcount.put("freight_load-
         ing", 0.0);Actcount.put("leisure", 0.0);Actcount.put("home", 0.0);
96.     Actcount.put("freight_unloading", 0.0);Actcount.put("pt interaction", 0.0);
97.     HashMap<String, Double> Modecount = new HashMap<String, Double>();
98.     Modecount.put("pt", 0.0);Modecount.put("car", 0.0);Modecount.put("av", 0.0);Mode-
         count.put("outside", 0.0);
99.     Modecount.put("truck", 0.0);Modecount.put("transit_walk", 0.0);Mode-
         count.put("car_passenger", 0.0);Modecount.put("walk", 0.0);
100.    Modecount.put("bike", 0.0);Modecount.put("egress_walk", 0.0);Modecount.put("ac-
         cess_walk", 0.0);
101.    HashMap<String, Double> Avreplace = new HashMap<String, Double>();
102.    Avreplace.put("pt", 0.0);Avreplace.put("car", 0.0);Avreplace.put("av", 0.0);Avrepl-
         ace.put("outside", 0.0);
103.    Avreplace.put("truck", 0.0);Avreplace.put("transit_walk", 0.0);Avreplace.put("car_
         passenger", 0.0);Avreplace.put("walk", 0.0);
104.    Avreplace.put("bike", 0.0);Avreplace.put("egress_walk", 0.0);Avreplace.put("ac-
         cess_walk", 0.0);

```



```

105.     HashMap<String, Double> Distance = new HashMap<String, Double>();
106.     Distance.put("pt", 0.0);Distance.put("car", 0.0);Distance.put("av", 0.0);Dis-
tance.put("outside", 0.0);
107.     Distance.put("truck", 0.0);Distance.put("transit_walk", 0.0);Dis-
tance.put("car_passenger", 0.0);Distance.put("walk", 0.0);
108.     Distance.put("bike", 0.0);Distance.put("egress_walk", 0.0);Distance.put("ac-
cess_walk", 0.0);
109.
110.     for ( Person person : pop.getPersons().values() ) {
111.         String carperson =null;
112.         String bikeperson = null;
113.         String carpersoni =null;
114.         String bikepersoni = null;
115.         String inperson=null;
116.         Person newPerson = populationFactory.createPerson(person.getId());
117.         Map<String, Object> attr = person.getAttributes().getAsMap();
118.         for (Map.Entry<String,Object> entry : attr.entrySet())
119.             newPerson.getAttributes().putAttribute(entry.getKey(), entry.get-
Value());
120.         for (Map.Entry<String,Object> entry : attr.entrySet()) {
121.             String attrib = entry.getKey();
122.             Object value = entry.getValue();
123.             String val = value.toString();
124.             try {
125.                 if (attrib.equals("age")) {
126.                     int age = Integer.valueOf((String) val);
127.                     if (age>64) {ageover++;}
128.                     else if (age>54 && age<65) {age5564++;}
129.                     else if (age>44 && age<55) {age4554++;}
130.                     else if (age>34 && age<45) {age3544++;}
131.                     else if (age>24 && age<35) {age2534++;}
132.                     else if (age>17 && age<25) {age1824++;}
133.                     else if (age<18) {age017++;}
134.                 }
135.                 } catch (Exception ignore) { }
136.                 if (attrib.equals("sex")) { if (value.equals("f")) {fe-
male++;} else {male++;}}
137.                 if ( (attrib.equals("isFreight")) && (value.equals(true)) ){freight++;}
138.                 if (attrib.equals("employed") && value.equals(true)) {employed++;}
139.                 if (attrib.equals("isOutside") && value.equals(true)) {outside++;}
140.                 if (attrib.equals("hasLicense") && value.equals("yes")) {license++;}
141.                 if (attrib.equals("isCarPassenger") && value.equals(true)) {carpassen-
ger++;}
142.                 if (attrib.equals("carAvail") && value.equals("sometimes")) {carsome-
times++;}
143.                 if (attrib.equals("carAvail") && value.equals("always")) {carall++;}
144.             }
145.             Plan plan = person.getSelectedPlan();
146.             score += plan.getScore();
147.             //START OF ELEMENT
148.             for (PlanElement pe : plan.getPlanElements()) {
149.                 //IF ACTIVITY
150.                 if (pe instanceof Activity) {
151.                     act= ((Activity) pe).getType();
152.                     activities.add(act);
153.                     if (Actcount.containsKey(act)) {
154.                         Double count=Actcount.get(act);
155.                         count++;
156.                         Actcount.put(act,count);
157.                     }
158.                     acts++;
159.                 }
160.                 //IF LEG
161.                 if (pe instanceof Leg) {
162.                     leg= ((Leg) pe).getMode();
163.                     legs.add(leg);
164.                     if (Modecount.containsKey(leg)) {
165.                         Double count=Modecount.get(leg);
166.                         count++;

```

```

167.             Modecount.put(leg,count);
168.         }
169.         trips++;
170.         //Distance
171.         Route route = ((Leg) pe).getRoute();
172.         double distance = route.getDistance();
173.         if (!Double.isNaN(distance)) {
174.             totaldistance=totaldistance+distance;
175.             if (Distance.containsKey(leg)) {
176.                 Double count=Distance.get(leg);
177.                 count=count+distance;
178.                 Distance.put(leg,count);
179.             }
180.         }
181.         //Score with avs
182.         if (leg.equals("av") && inperson==null ){inper-
son="in"; scoreav+=plan.getScore();}
183.         //Modes replaced by av
184.         if (leg.equals("av")){
185.             String legthatgotreplaced = plans.get(tempPlanElements);
186.             if (Avreplace.containsKey(legthatgotreplaced)) {
187.                 Double count=Avreplace.get(legthatgotreplaced);
188.                 count++;
189.                 Avreplace.put(legthatgotreplaced,count);
190.             }
191.         }
192.         //
193.         if (leg.equals("av")) {
194.             writer.println(person.getId());
195.         }
196.         //Count cars and bikes
197.         String planleg=plans.get(tempPlanElements);
198.         if (bikeper-
son==null && ( planleg.equals("bike") || planleg.equals("finalbike") ) ){bikeperson="acti-
vate"; bike++; }
199.         if (carperson==null && ( planleg.equals("car") || planleg.equals("fi-
nalcar") ) ) {carperson="activate"; car++; }
200.
201.         if (bikepersoni==null && leg.equals("bike")){bikepersoni="acti-
vate"; bikei++; }
202.         if (carpersoni==null && leg.equals("car")) {carpersoni="acti-
vate"; cari++; }
203.     }
204.     tempPlanElements++;
205. }
206. }
207. people=male+female;
208. String newLine = System.lineSeparator();
209. // Integer sc = Integer.parseInt(args[2]);
210. // Integer fl = Integer.parseInt(args[3]);
211. // Integer perc = Integer.parseInt(args[4]);
212. writer.println(newLine+"-----Scenario "+sc+" Popula-
tion "+perc+" Fleet "+fl+"-----");
213. writer.println(newLine+"-----Scenario "+sc+" Population "+perc+"-----
-----");
214. writer.println(newLine+"-----Attributes");
215. writer.println("People: "+people);
216. writer.println("Females: "+female+" ---- Percent: " + round((female/peo-
ple*100),1)+"%");
217. writer.println("Males: "+male+" ---- Percent: " + round((male/peo-
ple*100),1)+"%");
218. writer.println("Freights: "+freight);
219. writer.println("carAvail always: "+carall+" ---- Percent: " + round((carall/peo-
ple*100),1)+"%");
220. writer.println("carAvail sometimes: "+carsometimes+" ---- Percent: " + round((car-
sometimes/people*100),1)+"%");
221. writer.println("carAvail all: "+(carall+carsometimes)+" ---- Per-
cent: " + round(((carall+carsometimes)/people*100),1)+"%");

```

```

222.     writer.println("car passenger: "+carpassenger+" ---- Percent: " + round((carpas-
senger/people*100),1)+"%");
223.     writer.println("Employed: "+employed+" ---- Percent: " + round((employed/peo-
ple*100),1)+"%");
224.     writer.println("Licence: "+license+" ---- Percent: " + round((license/peo-
ple*100),1)+"%");
225.     writer.println("Outside: "+outside+" ---- Percent: " + round((outside/peo-
ple*100),1)+"%");
226.     writer.println(newLine+"-----Age Groups: "+people+" People"+newLine+
227.         "0-17: "+age017+" ---- Percent: " + round((age017/peo-
ple*100),1)+"% " + newLine+
228.         "18-24: "+age1824+" ---- Percent: " + round((age1824/peo-
ple*100),1)+"% " + newLine+
229.         "25-34: "+age2534+" ---- Percent: " + round((age2534/peo-
ple*100),1)+"% " +newLine+
230.         "35-44: "+age3544+" ---- Percent: " + round((age3544/peo-
ple*100),1)+"% "+newLine+
231.         "45-54: "+age4554+" ---- Percent: " + round((age4554/peo-
ple*100),1)+"% "+newLine+
232.         "55-64: "+age5564+" ---- Percent: " + round((age5564/peo-
ple*100),1)+"% "+newLine+
233.         ">65: "+ageover+" ---- Percent: " + round((ageover/people*100),1)+"%");
234.     System.out.println(acts+" Activities" + ": " + activities); //Print when pt interac-
tion
235.     System.out.println(trips+" Trips" + ": " + legs);
236.     writer.println(newLine+"-----All Activities are total: "+acts+" and specifi-
cally:");
237.     for (String key: Actcount.keySet()) {
238.         Double temp=Actcount.get(key);
239.         temp=temp/acts*100;
240.         writer.println(key+" : "+round(Actcount.get(key),1)+" ---- Per-
cent: "+round(temp,1)+"%");
241.     }
242.     writer.println(newLine+"-----All ModeTrips are total: "+trips+" and specifi-
cally:");
243.     for (String key: Modecount.keySet()) {
244.         Double temp=Modecount.get(key);
245.         temp=temp/trips*100;
246.         writer.println(key+" : "+round(Modecount.get(key),1)+" ---- Per-
cent: "+round(temp,1)+"%");
247.     }
248.     writer.println(newLine+"-----Total Distance travelled: "+totaldis-
tance+" and specifically:");
249.     for (String key: Distance.keySet()) {
250.         Double temp=Distance.get(key);
251.         temp=temp/totaldistance*100;
252.         writer.println(key+" : "+round(Distance.get(key),1)+" ---- Per-
cent: "+round(temp,1)+"%");
253.     }
254.     double totalavtrips = Modecount.get("av");
255.     double tripscanbechanged=trips-nonchangabletrips;
256.     writer.println(newLine+"-----Trips replaced by AV:");
257.     writer.println("--Trips that could be replaced by AV: "+tripscanbe-
changed+" or "+round(tripscanbechanged/trips*100,1)+"% of all trips");
258.     writer.println("--Trips replaced by AV: "+totalavtrips+" or: "+round(totala-
vtrips/trips*100,1)+"% of all trips "
259.         +round(totalavtrips/tripscanbe-
changed*100,1)+"% of trips that can be changed"+newLine+"--Specifically: ");
260.     for (String key: Avreplace.keySet()) {
261.         Double temp1=Avreplace.get(key);
262.         if (temp1>0.0) {
263.             Double temp=temp1/totalavtrips*100;
264.             writer.println(key+" : "+round(Avreplace.get(key),1)+" ---- Per-
cent of avtrips: "+round(temp,1)+"% "
265.                 + " ---- Percent of "+key+" trips changed: "+round(temp1/Mode-
count.get(key)*100,1)+"%");
266.         }
267.     }
268.     double avs = Double.parseDouble(args[3]);

```

```
269.         writer.println(newLine+"-----Cars and bikes used baseline:");//com-
pared to baseline and avs
270.         writer.println("--In Baseline, Cars used: "+car+", Bikes used: "+bike);
271.         writer.println("--In This Sce-
nario, Cars used: "+cari+" or "+round(cari/car*100,1)+"% of base-
line, Bikes used: "+bikei+" or "+round(bikei/bike*100,1)+"% of baseline");
272.         writer.println("--In This Sce-
nario, AVs used: "+avs+" or "+round(avs/cari*100,1)+"% of used cars or "
273.             +round(avs/car*100,1)+"% of baseline cars and "
274.             +round(avs/bikei*100,1)+"% of used bikes or "
275.             +round(avs/bike*100,1)+"% of baseline bikes");
276.
277.         writer.println(newLine+"--Total score is: "+score);
278.         writer.println("--Score of peo-
ple who took av is: "+scoreav+" or "+round(scoreav/score*100,1)+"% of total score");
279.         writer.close();
280.     }
281. }
```

Παράρτημα 4: Δημιουργία Νέων Πληθυσμών – java

Στο args[0], δόθηκε ο πληθυσμός χωρίς pt interaction, στο args[1] το επιθυμητό ποσοστό αντικατάστασης και στο args[2], το αρχείο txt που περιείχε την στήλη με τις αλληλουχίες δραστηριοτήτων και μεταφορικών μέσων, μαζί με τις κατάλληλες επισημάνσεις final. Ο λόγος για τον οποίο όπου εμφανίζεται το περπάτημα, walk, εμφανίζεται και το transit_walk, ενώ κανονικά δεν θα έπρεπε να υπάρχει καν σαν μέσο, αφού έχει γίνει η διαγραφή των δραστηριοτήτων pt interaction, είναι επειδή υπήρχαν περιπτώσεις που στα πλάνα των πρακτόρων χρησιμοποιούνταν σαν απλό περπάτημα, εκτός M.M.M, οπότε διαχειρίστηκε σαν ήταν επίσης μέσο περπατήματος.

```

1. package org.matsim.codeexamples.population.analyzePlans;
2.
3. import java.io.File;
4. import java.io.IOException;
5. import java.util.ArrayList;
6. import java.util.List;
7. import java.util.Map;
8. import java.util.Random;
9. import java.util.Scanner;
10.
11. import org.matsim.api.core.v01.Scenario;
12. import org.matsim.api.core.v01.population.Activity;
13. import org.matsim.api.core.v01.population.Leg;
14. import org.matsim.api.core.v01.population.Person;
15. import org.matsim.api.core.v01.population.Plan;
16. import org.matsim.api.core.v01.population.PlanElement;
17. import org.matsim.api.core.v01.population.Population;
18. import org.matsim.api.core.v01.population.PopulationFactory;
19. import org.matsim.api.core.v01.population.PopulationWriter;
20. import org.matsim.api.core.v01.population.Route;
21. import org.matsim.core.config.Config;
22. import org.matsim.core.config.ConfigUtils;
23. import org.matsim.core.population.io.PopulationReader;
24. import org.matsim.core.scenario.ScenarioUtils;
25.
26. public class PopulationParseClean {
27.
28.     public static void main(String[] args) throws IOException {
29.         //Percentage of mode replace
30.         int probability = Integer.parseInt(args[1]);
31.         Random rand = new Random();
32.
33.         Config config = ConfigUtils.createConfig() ;
34.         //thats for reading from the given pop file
35.         Scenario scenario = ScenarioUtils.createMutableScenario(config) ;
36.         PopulationReader popReader = new PopulationReader(scenario);
37.         popReader.readFile(args[0]);
38.         final Population pop = scenario.getPopulation();
39.
40.         //thats for creating the new pop file
41.         Scenario newScenario = ScenarioUtils.createMutableScenario(config);
42.         // Network network = newScenario.getNetwork();
43.         Population newPopulation = newScenario.getPopulation();
44.         PopulationFactory populationFactory = newPopulation.getFactory();
45.
46.         //Making the List
47.         List<String> final_plans = new ArrayList<String>();
48.         //Reading from the final_legs txt file and add to list
49.         File file = new File(args[2]);
50.         Scanner reader = new Scanner(file);
51.         while (reader.hasNextLine()) {
52.             final_plans.add(reader.nextLine());
53.         }
54.         reader.close();
55.         //temp to keep up the parsing through the population with the list

```

```

56.         int tempPlanElements = 0;
57.
58.         //Attributes of agents
59.         Map<String, Object> atr = pop.getAttributes().getAsMap();
60.         for (Map.Entry<String, Object> entry : atr.entrySet()) {
61.             newPopulation.getAttributes().putAttribute(entry.getKey(), entry.get-
Value());
62.         }
63.         //count legs that can't be changed
64.         int countnonav=0;
65.         //Start parsing person of population
66.         for ( Person person : pop.getPersons().values() ) {
67.             //adds new person to the new file
68.             Person newPerson = populationFactory.createPerson(person.getId());
69.             //attributes to new person
70.             Map<String, Object> attr = person.getAttributes().getAsMap();
71.             for (Map.Entry<String, Object> entry : attr.entrySet())
72.                 newPerson.getAttributes().putAttribute(entry.getKey(), entry.get-
Value());
73.             //plan to new person
74.             Plan newPlan = newPopulation.getFactory().createPlan();
75.             //read the plan of the agent
76.             Plan plan = person.getSelectedPlan();
77.             //Temps
78.             String tempLeg = null;
79.             String tempCar = null;
80.             String tempBike = null;
81.             //Elements of plans
82.             for (PlanElement pe : plan.getPlanElements()) {
83.                 //Start of Activity
84.                 if (pe instanceof Activity) {
85.                     newPlan.addActivity((Activity) pe);
86.                 }
87.                 //Start of Leg
88.                 if (pe instanceof Leg) {
89.                     //Getting the mode of this leg
90.                     String final_plan = final_plans.get(tempPlanElements);
91.                     if ( final_plan.equals("truck") ||
92.                         final_plan.contains("final") ||
93.                         final_plan.contains("outside") ) {
94.                         countnonav++; //count unchangeable legs
95.                         if ( final_plan.contains("transit_walk") ||
96.                             (final_plan.contains("walk")) ) {
97.                             Route route = ((Leg) pe).getRoute();
98.                             double distance = route.getDistance();
99.                             if (distance>=4000.0) { //distance of walking
100.                                 tempLeg="outside";
101.                             } else {
102.                                 tempLeg = ((Leg) pe).getMode();
103.                             }
104.                         }else {
105.                             tempLeg = ((Leg) pe).getMode();
106.                             if (tempLeg.equals("car")) {
107.                                 tempCar = tempLeg;
108.                             }
109.                             if (tempLeg.equals("bike")) {
110.                                 tempBike = tempLeg;
111.                             }
112.                         }
113.                         Leg leg = newPopulation.getFactory().createLeg(tempLeg);
114.                         newPlan.addLeg(leg);
115.                     } else if ( final_plan.equals("transit_walk") ||
116.                         final_plan.equals("walk") ) {
117.                         Route route = ((Leg) pe).getRoute();
118.                         double distance = route.getDistance();
119.                         if (distance>=4000.0) {
120.                             tempLeg="av";
121.                         } else {
122.                             boolean val = rand.nextInt(100)<= (probability-1);

```



```

123.         if (val) {tempLeg="av";
124.             } else {tempLeg = ((Leg) pe).getMode();}
125.     }
126.     Leg leg = newPopulation.getFactory().createLeg(tempLeg);
127.     newPlan.addLeg(leg);
128. } else if ( final_plan.equals("car") && (tempCar==null)) {
129.     boolean val = rand.nextInt(100)<= (probability-1);
130.     if (val) {tempLeg="av";
131.         } else {tempLeg = ((Leg) pe).getMode();}
132.
133.     Leg leg = newPopulation.getFactory().createLeg(tempLeg);
134.     newPlan.addLeg(leg);
135.     tempCar = tempLeg;
136. } else if ( final_plan.equals("bike") && (tempBike==null)) {
137.     boolean val = rand.nextInt(100)<= (probability-1);
138.     if (val) {tempLeg="av";
139.         } else {tempLeg = ((Leg) pe).getMode();}
140.
141.     Leg leg = newPopulation.getFactory().createLeg(tempLeg);
142.     newPlan.addLeg(leg);
143.     tempBike = tempLeg;
144. } else if ( final_plan.equals("car") && (tempCar!=null)) {
145.     Leg leg = newPopulation.getFactory().createLeg(tempCar);
146.     newPlan.addLeg(leg);
147.     tempLeg=tempCar;
148. } else if ( final_plan.equals("bike") && (tempBike!=null)) {
149.     Leg leg = newPopulation.getFactory().createLeg(tempBike);
150.     newPlan.addLeg(leg);
151.     tempLeg=tempBike;
152. } else if ( final_plan.equals("pt") || final_plan.equals("car_passen-
153. ger") ){
154.     boolean val = rand.nextInt(100)<= (probability-1);
155.     if (val) {tempLeg="av";
156.         } else {tempLeg = ((Leg) pe).getMode();}
157.
158.     Leg leg = newPopulation.getFactory().createLeg(tempLeg);
159.     newPlan.addLeg(leg);
160. }
161. //Keep up with the txt file of final_legs
162. tempPlanElements++;
163. }
164. newPerson.addPlan(newPlan);
165. newPopulation.addPerson(newPerson);
166. }
167. System.out.println(countnonav);
168. new PopulationWriter(newScenario.getPopulation()).write
169. ("C:\\Users\\User\\Desktop\\10%\\Population"+args[1]+"\\zurich_population.xml");
170. }
171. }

```

Παράρτημα 5: Κυκλοφοριακή Ανάλυση – python

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας με τον οποίο υπολογίστηκαν τα μακροσκοπικά μεγέθη της πυκνότητας K και του φόρτου Q , για τις 30 ώρες, ή 360 περιόδους ελέγχου 5 λεπτών, της μέρας που προσομοιώθηκε μέσω MATSim, για όλα τα νέα σεναρία που δημιουργήθηκαν. Ίδια διαδικασία ακριβώς γίνεται για υπολογισμό των αντίστοιχων μεγεθών του αρχικού σεναρίου.

```

1. # =====
2. #   Libraries
3. # =====
4. import sys
5. import time as logtime
6. import os
7. import xml.sax
8. import gzip
9. import shutil
10. import logging
11. import logging.handlers
12. from collections import Counter
13. # =====
14. #%%   Network data
15. # =====
16. class EventHandlerNetwork(xml.sax.ContentHandler):
17.     def __init__(self):
18.         xml.sax.ContentHandler.__init__(self)
19.     def startElement(self, tag, attributes):
20.         self.CurrentData = tag
21.         if tag == "link":
22.             linkid = attributes["id"]
23.             length = float(attributes['length'])
24.             linksdata[linkid] = length
25.             Qi[linkid] = [0] * lastchunk
26.             Ki[linkid] = [0] * lastchunk
27.             emptylinks[linkid] = [0] * lastchunk
28. # =====
29. #%%   Start of event parser class
30. # =====
31. class EventHandler(xml.sax.ContentHandler):
32.     def __init__(self,i,j):
33.         xml.sax.ContentHandler.__init__(self)
34.         self.startingtime=-1
35.         self.timechunk=0
36.         self.i= str(i)
37.         self.j= str(j)
38.         self.trafficdata = {}
39.         self.counters = 0
40.         self.chunktime = 0
41.         self.stuck_vehicles = []
42. # =====
43. #%%   Link data
44. # =====
45.     def linkdata(self, ttype, link, veh, time):
46.         if ttype == "entered link":
47.             try:
48.                 self.traf-
49. ficdata[link][veh] = [time, None, self.timechunk,self.startingtime, None,False]
50.             except:
51.                 self.traf-
52. ficdata[link] = {veh : [time, None, self.timechunk, self.startingtime, None,False]}
53.         else:
54.             try:
55.                 self.trafficdata[link][veh][1] = time
56.                 self.trafficdata[link][veh][-2] = self.timechunk
57.                 if ttype == "vehicle aborts":
58.                     self.trafficdata[link][veh][-1] = True
59.             except: pass

```

```

58. # =====
59. ###    Calculating Qi, Ki
60. # =====
61.     def calculatingaverages(self, time):
62.         for link, traffic in self.trafficdata.items():
63.             length = linksdata[link]
64.             list_of_veh_to_delete = []
65.             for vehicles in traffic:
66.                 intime = traffic[vehicles][0]
67.                 outtime = traffic[vehicles][1]
68.                 inchunk = traffic[vehicles][2]
69.                 instartingtime = traffic[vehicles][3]
70.                 outchunk = traffic[vehicles][4]
71.                 isabort = traffic[vehicles][5]
72.                 if outtime != None and (inchunk < lastchunk-2 or isabort == False):
73.                     list_of_veh_to_delete.append(vehicles)
74.                     stuckchunks = outchunk - inchunk
75.                     if stuckchunks == 0:
76.                         ki = outtime - intime
77.                         if ki==0:ki=1
78.                         qi = length
79.                     elif stuckchunks==1:
80.                         ki = outtime - self.startingtime
81.                         if ki==0:ki=1
82.                         intimemove = instartingtime + 300 - intime
83.                         if intimemove==0:intimemove=1
84.                         divideby = intimemove + ki
85.                         qi = length * ki / divideby
86.                         Ki[link][outchunk-1] += intimemove * scale
87.                         Qi[link][outchunk-1] += length * intime-
move / divideby * scale
88.                     else:
89.                         ki = outtime - self.startingtime
90.                         if ki==0:ki=1
91.                         intimemove = instartingtime + 300 - intime
92.                         if intimemove==0:intimemove=1
93.                         divideby = intimemove + (stuckchunks-1)*checkpoint + ki
94.                         qi = length * ki / divideby
95.                         Ki[link][outchunk-stuckchunks] += intimemove * scale
96.                         Qi[link][outchunk-stuckchunks] += length * intime-
move / divideby * scale
97.                     for chunk in range(1,stuckchunks):
98.                         Ki[link][outchunk-chunk] += checkpoint*scale
99.                         Qi[link][outchunk-chunk] += length * check-
point/ divideby * scale
100.                         Ki[link][outchunk] += ki*scale
101.                         Qi[link][outchunk] += qi*scale
102.                 for vehicle in list_of_veh_to_delete:
103.                     del self.trafficdata[link][vehicle]
104. # =====
105. ###    Calculating Q, K
106. # =====
107.     def calculatingfinals(self):
108.         calctime = logtime.time()
109.         for link,kis in Ki.items():
110.             length = linksdata[link]
111.             iterator=0
112.             for ki in kis:
113.                 emptylink = True
114.                 if ki != 0: emptylink=False
115.                 emptylinks[link][iterator] = emptylink
116.
117.                 Ki[link][iterator] = ki / length / checkpoint
118.                 iterator += 1
119.         for link,qis in Qi.items():
120.             length = linksdata[link]
121.             iterator=0
122.             for qi in qis:
123.                 Qi[link][iterator] = qi / length / checkpoint

```

```

124.         iterator +=1
125.     for link, values in emptylinks.items():
126.         length = linksdata[link]
127.         iterator = 0
128.         for value in values:
129.             if not value:
130.                 totallength[iterator] += length
131.                 iterator += 1
132.     for link, kis in Ki.items():
133.         length = linksdata[link]
134.         iterator = 0
135.         for ki in kis:
136.             try:
137.                 K[iterator] += ki * length / totallength[iterator]
138.             except Exception as e:
139.                 print(e)
140.                 iterator +=1
141.     for link, qis in Qi.items():
142.         length = linksdata[link]
143.         iterator = 0
144.         for qi in qis:
145.             try:
146.                 Q[iterator] += qi * length / totallength[iterator]
147.             except Exception as e:
148.                 print(e)
149.                 iterator +=1
150.     logging.info("Calculated final data in {} sec".format(round(logtime.time()-
calctime),2))
151. # =====
152. #%% Stuck Vehicles
153. # =====
154.     def stuckvehicles(self):
155.         counter=0
156.         enteredchunk = []
157.         for link,values in self.trafficdata.items():
158.             for vehicles in values:
159.                 counter +=1
160.                 enteredchunk.append(values[vehicles][2])
161.         countchunks = Counter(enteredchunk)
162.         setenterchunk = set(enteredchunk)
163.         for chunk in setenterchunk:
164.             self.stuck_vehicles.append("{} vehicles entered in timechunk {}".for-
mat(countchunks[chunk],chunk))
165.         self.stuck_vehicles.append("Total vehicles stuck {}".format(coun-
ter))
166. # =====
167. #%% Execute in the beginning of every event line
168. # =====
169.     def startElement(self, tag, attributes):
170.         self.CurrentData = tag
171.         if tag == "event":
172.             ttype = attributes["type"]
173.             time = int(float(attributes["time"]))
174.             self.time = time
175.             trafficcheck = ttype == "vehicle leaves traf-
fic" or ttype == "left link" or ttype == "entered link" or ttype == "vehicle aborts"
176.             if trafficcheck:
177.                 veh = attributes["vehicle"]
178.                 link = attributes["link"]
179.                 if time >= 0.0 and self.startingtime == -1:
180.                     self.chunktime = logtime.time()
181.                     self.counters += 1
182.                     self.startingtime = time
183.                     if trafficcheck:
184.                         self.linkdata(ttype, link, veh, time)
185.                 elif (time - self.startingtime) < checkpoint:
186.                     self.counters += 1
187.                     if trafficcheck:
188.                         self.linkdata(ttype, link, veh, time)

```

```

189.         elif (time - self.startingtime) >= checkpoint:
190.             self.calculatingaverages(time)
191.             logging.info("End of {} timechunk in {} sec -- checked {} events".for-
mat(self.timechunk, round(logtime.time() - self.chunktime,2), self.counters))
192.             self.timechunk += 1
193.             self.chunktime = logtime.time()
194.             self.counters = 1
195.             self.startingtime = time
196.             if trafficcheck:
197.                 self.linkdata(ttype, link, veh, time)
198. # =====
199. #%% Executes when the events file ends
200. # =====
201.     def endDocument(self):
202.         self.stuck_vehicles.append("-----Before last calc")
203.         self.stuckvehicles()
204.         if self.timechunk != lastchunk-1:
205.             self.timechunk = lastchunk-1
206.             self.calculatingaverages(self.time)
207.             self.stuck_vehicles.append("-----Final stuck vehicles")
208.             self.stuckvehicles()
209.             self.calculatingfinals()
210.             with open("G:/ZurichOutput_0.3/results/flow/Fleet {} {}% AVs/Q.txt".for-
mat(self.i, self.j), 'w') as file:
211.                 for q in Q:
212.                     file.write("{}\n".format(str(q)))
213.                 file.close()
214.             with open("G:/ZurichOutput_0.3/results/density/Fleet {} {}% AVs/K.txt".for-
mat(self.i, self.j), 'w') as file:
215.                 for k in K:
216.                     file.write("{}\n".format(str(k)))
217.                 file.close()
218.             with open("G:/ZurichOutput_0.3/results/stuck vehicles/Fleet {} {}% AVs.txt".for-
mat(self.i, self.j), 'w') as file:
219.                 for line in self.stuck_vehicles:
220.                     file.write("{}\n".format(line))
221.                 file.close()
222. # =====
223. #%% Parsing the gzip network file
224. # =====
225.     def ziphandlerNetwork(filename):
226.         parser = xml.sax.make_parser()
227.         parser.setFeature(xml.sax.handler.feature_namespaces,0)
228.         Handler= EventsHandlerNetwork()
229.         parser.setContentHandler(Handler)
230.         f=gzip.open(filename,'rt', encoding="utf8")
231.         parser.parse(f)
232.         f.close()
233. # =====
234. #%% Parsing the gzip events file
235. # =====
236.     def ziphandler(filename,i,j):
237.         parser = xml.sax.make_parser()
238.         parser.setFeature(xml.sax.handler.feature_namespaces,0)
239.         Handler= EventsHandler(i,j)
240.         parser.setContentHandler(Handler)
241.         f=gzip.open(filename,'rt', encoding="utf8")
242.         parser.parse(f)
243.         f.close()
244. # =====
245. #%% MAIN
246. # =====
247. if __name__ == "__main__":
248.     # =====
249.     # logging
250.     # =====
251.     logging.basicConfig(level=logging.INFO, format="%asctimes --> %message)s")
252.     # =====
253.     # Scenario run

```

```

254. # =====
255. maxtotallength = {}
256. fleet = [800,3000,6000,9000,12000,15000]
257. perc = [5, 20, 40, 60, 80, 100]
258. for i in fleet:
259.     for j in perc:
260.         logging.info("----- In Fleet {} {}% AVs -----".for-
mat(str(i), str(j)))
261.         # =====
262.         #%%      Network Data
263.         # =====
264. #         checkpoint = float(input("Enter checkpoints in sec-
onds e.g 300 for 5 minutew: "))
265. #         scale = float(input("Enter Scale (10 or 1000): "))
266.         checkpoint = 300
267.         scale = 10
268.         if scale == 1000:
269.             lastchunk = int(round(98400/checkpoint,0))
270.         elif scale == 10: lastchunk = int(round(108000/checkpoint,0))
271.         else: raise Exception("Wrong scale")
272.         nettime = logtime.time()
273.         linksdata = {}
274.         emptylinks = {}
275.         totallength = [0] * lastchunk
276.         Qi = {}
277.         Ki = {}
278.         Q = [0] * lastchunk
279.         K = [0] * lastchunk
280.         V = [0] * lastchunk
281.         filename = "G:/ZurichOutput_0.3/Fleet {} {}% AVs/output_network.xml.gz".for-
mat(str(i),str(j))
282.         ziphandlerNetwork(filename)
283.         logging.info("Finished Network data in {}".format(logtime.time() - nettime))
284.         # =====
285.         #%%      Prepare for Analysis
286.         # =====
287.         densitydir="G:/ZurichOutput_0.3/results/density/Fleet {} {}% AVs".for-
mat(str(i),str(j))
288.         flowdir="G:/ZurichOutput_0.3/results/flow/Fleet {} {}% AVs".for-
mat(str(i),str(j))
289.         if os.path.exists(densitydir):shutil.rmtree(densitydir)
290.         os.makedirs(densitydir)
291.         if os.path.exists(flowdir):shutil.rmtree(flowdir)
292.         os.makedirs(flowdir)
293.         # =====
294.         #%%      Run Analysis
295.         # =====
296.         filename = "G:/ZurichOutput_0.3/Fleet {} {}% AVs/output_events.xml.gz".for-
mat(str(i),str(j))
297.         parsetime = logtime.time()
298.         ziphandler(filename, i, j)
299.         logging.info("End of analysis {}".format(logtime.time() - parsetime))
300.         logging.info("##### Finished Fleet {} {}% AVs #####\n".for-
mat(str(i),str(j)))
301.         maxtotallength["Fleet {} {}% AVs".format(str(i),str(j))] = max(totallength)
302. #         sys.exit()
303.         logging.shutdown()
304.         with open("G:/ZurichOutput_0.3/results/totallength.txt","w") as file:
305.             for keys, items in maxtotallength.items():
306.                 file.write("{}: {}\n".format(keys,str(items)))
307.

```


Παράρτημα 6: Διαγράμματα Κυκλοφοριακής Ανάλυσης - python

Παρακάτω φαίνεται ο κώδικας με τον οποίο προέκυψαν όλα τα διαγράμματα του αρχικού σεναρίου, όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Για τη δημιουργία των διαγραμμάτων των υπόλοιπων σεναρίων, έγιναν παρόμοιες διαδικασίες.

```

1. # =====
2. #   Libraries
3. # =====
4. import os
5. import logging
6. import logging.handlers
7. import matplotlib.pyplot as plt
8. from statistics import mean
9. # =====
10. #   Plots
11. # =====
12. def plotting(i):
13.     plt.close()
14.     os.chdir("G:/Baseline_{}/results/diagrams".format(i))
15.     my_dpi = 55
16.     fig, axes = plt.subplots(nrows=3, ncols=2, figsize=(18, 20), dpi=my_dpi, constrained_layout=True)
17.     high = fig.subplotpars.top + 0.15
18.     fig.suptitle('Διαγράμματα Αρχικού Σεναρίου', fontsize=20,y=high)
19.     axes[0,0].set_title("Ταχύτητα - Πυκνότητα", fontsize=18)
20.     axes[0,0].set_xlabel("K = οχήματα / μέτρο", fontsize=16)
21.     axes[0,0].set_ylabel("V = μέτρα / δευτερόλεπτο", fontsize=16)
22.     axes[1,0].set_title("Φόρτος - Πυκνότητα", fontsize=18)
23.     axes[1,0].set_xlabel("K = οχήματα / μέτρο", fontsize=16)
24.     axes[1,0].set_ylabel("Q = οχήματα / δευτερόλεπτο", fontsize=16)
25.     axes[2,0].set_title("Ταχύτητα - Φόρτος", fontsize=18)
26.     axes[2,0].set_xlabel("Q = οχήματα / δευτερόλεπτο", fontsize=16)
27.     axes[2,0].set_ylabel("V = μέτρα / δευτερόλεπτο", fontsize=16)
28.     axes[0,0].scatter(K,V)
29.     axes[1,0].scatter(K,Q)
30.     axes[2,0].scatter(Q,V)
31.     axes[0,1].set_title("Πυκνότητα", fontsize=18)
32.     axes[0,1].set_xlabel("Ώρες μετά τα μεσάνυχτα", fontsize=16)
33.     axes[0,1].set_ylabel("K = οχήματα / μέτρο", fontsize=16)
34.     axes[1,1].set_title("Φόρτος", fontsize=18)
35.     axes[1,1].set_xlabel("Ώρες μετά τα μεσάνυχτα", fontsize=16)
36.     axes[1,1].set_ylabel("Q = οχήματα / δευτερόλεπτο", fontsize=16)
37.     axes[2,1].set_title("Ταχύτητα", fontsize=18)
38.     axes[2,1].set_xlabel("Ώρες μετά τα μεσάνυχτα", fontsize=16)
39.     axes[2,1].set_ylabel("V = μέτρα / δευτερόλεπτο", fontsize=16)
40.     chunk = [x/60*5 for x in range(130)]
41.     axes[0,1].scatter(chunk,K)
42.     axes[1,1].scatter(chunk,Q)
43.     axes[2,1].scatter(chunk,V)
44.     axes[0,0].tick_params(axis='both', which='major', labelsize=14)
45.     axes[0,1].tick_params(axis='both', which='major', labelsize=14)
46.     axes[1,0].tick_params(axis='both', which='major', labelsize=14)
47.     axes[1,1].tick_params(axis='both', which='major', labelsize=14)
48.     axes[2,0].tick_params(axis='both', which='major', labelsize=14)
49.     axes[2,1].tick_params(axis='both', which='major', labelsize=14)
50.     axes[0,0].set_xlim(xmin=0,xmax=0.04)
51.     axes[1,0].set_xlim(xmin=0,xmax=0.04)
52.     axes[2,0].set_xlim(xmax=0.21)
53.     axes[0,0].set_ylim(ymin=2,ymax=18)
54.     axes[0,1].set_ylim(ymin=0,ymax=0.04)
55.     axes[1,0].set_ylim(ymax=0.21)
56.     axes[1,1].set_ylim(ymax=0.21)
57.     axes[2,0].set_ylim(ymin=2,ymax=18)
58.     axes[2,1].set_ylim(ymin=2,ymax=18)
59.     axes[0,0].grid(True)
60.     axes[1,0].grid(True)

```

```

61.     axes[2,0].grid(True)
62.     axes[0,1].grid(True)
63.     axes[1,1].grid(True)
64.     axes[2,1].grid(True)
65.     plt.savefig("AllFundamentals.png")
66.     plt.close()
67. # =====
68. #     MAIN
69. # =====
70. if __name__ == "__main__":
71.     perc = ["0.3"]
72.     for i in perc:
73.         try:
74.             logging.basicConfig(level=logging.INFO, format="%(asctime)s --> %(mes-
             sage)s")
75.             K = []
76.             Q = []
77.             filename = "G:/Baseline_{}/results/density/K.txt".format(i)
78.             with open(filename, 'r') as dens:
79.                 for line in dens:
80.                     K.append(float(line))
81.             filename = "G:/Baseline_{}/results/flow/Q.txt".format(i)
82.             with open(filename, 'r') as flow:
83.                 for line in flow:
84.                     Q.append(float(line))
85.             for k in range(360-130):
86.                 del K[-1]
87.                 del Q[-1]
88.             V = [0] * len(Q)
89.             for index in range(len(Q)):
90.                 try:
91.                     V[index] = Q[index] / K[index]
92.                 except Exception as e:
93.                     print(e)
94.                     V[index] = 0
95.             plotting(i)
96.         except:
97.             pass

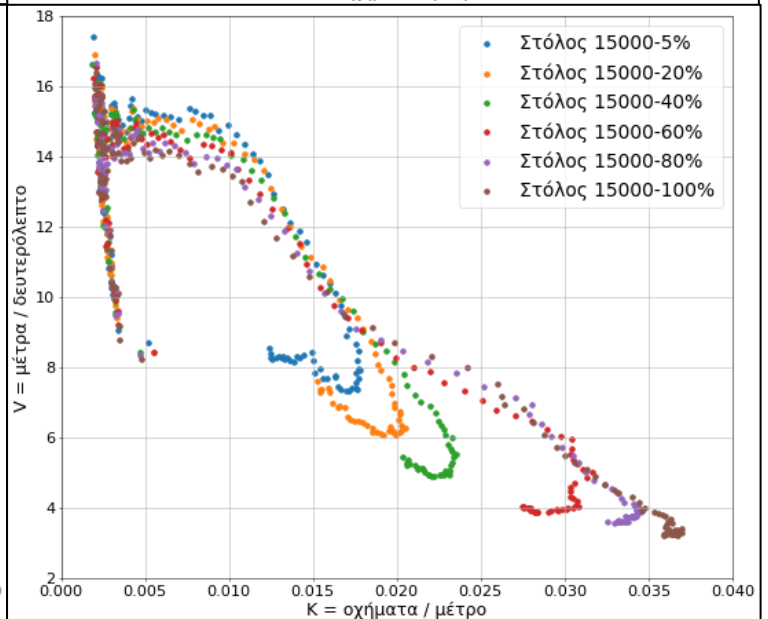
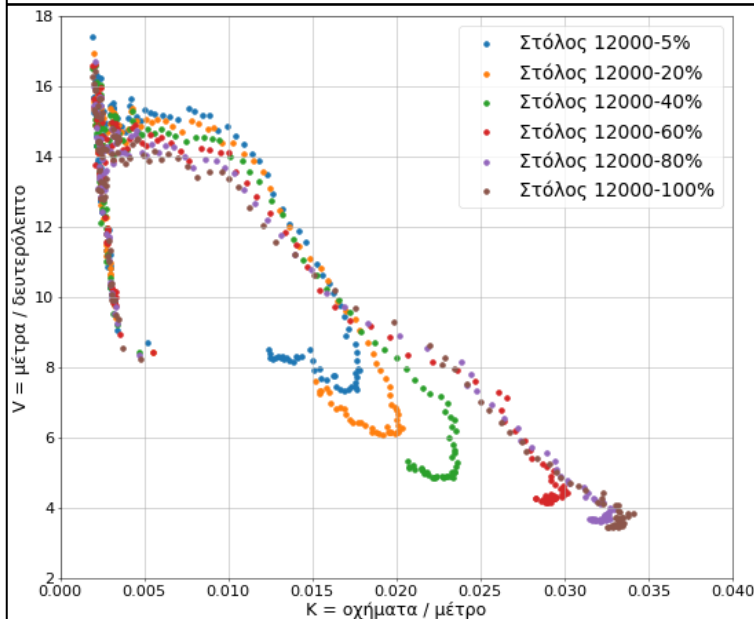
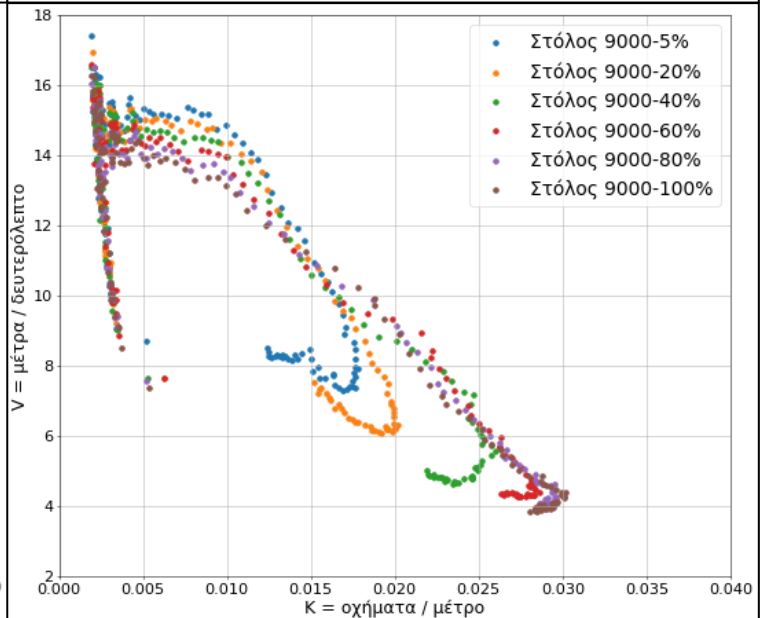
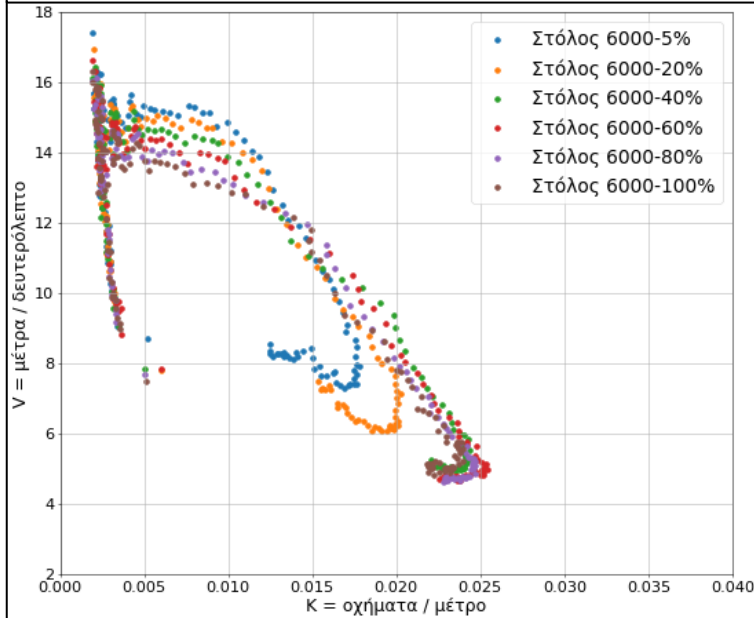
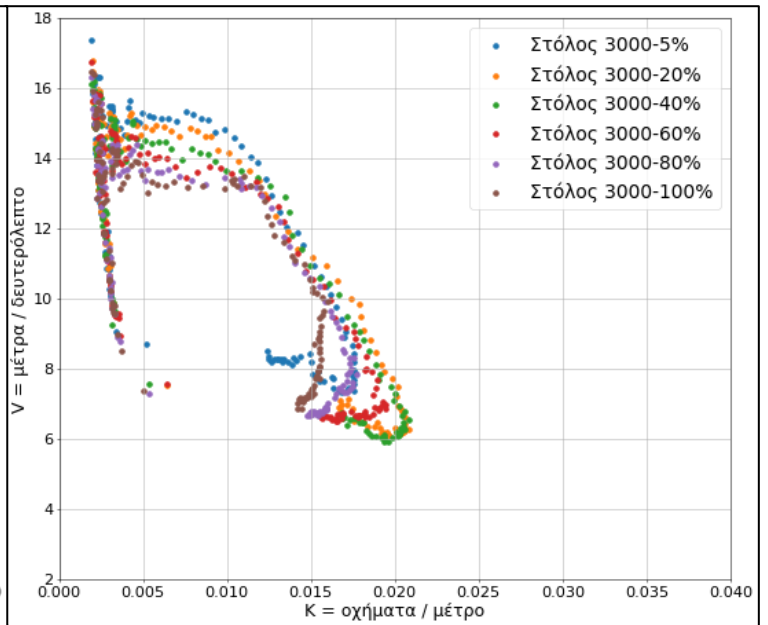
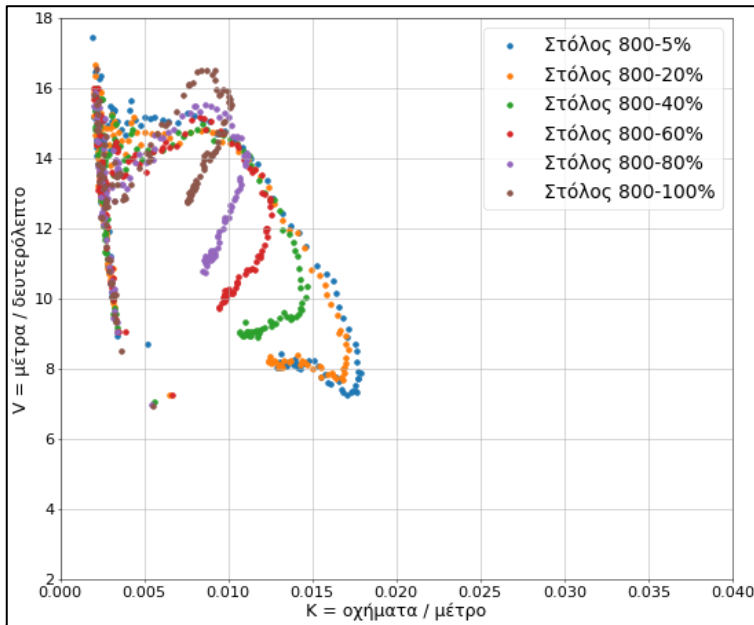
```

Παράρτημα 7: Διαγράμματα Κυκλοφοριακής Ανάλυσης

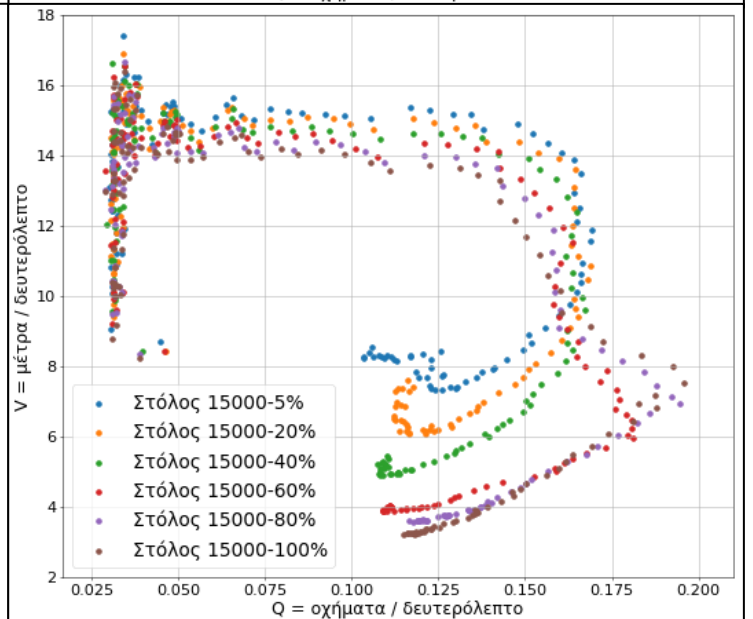
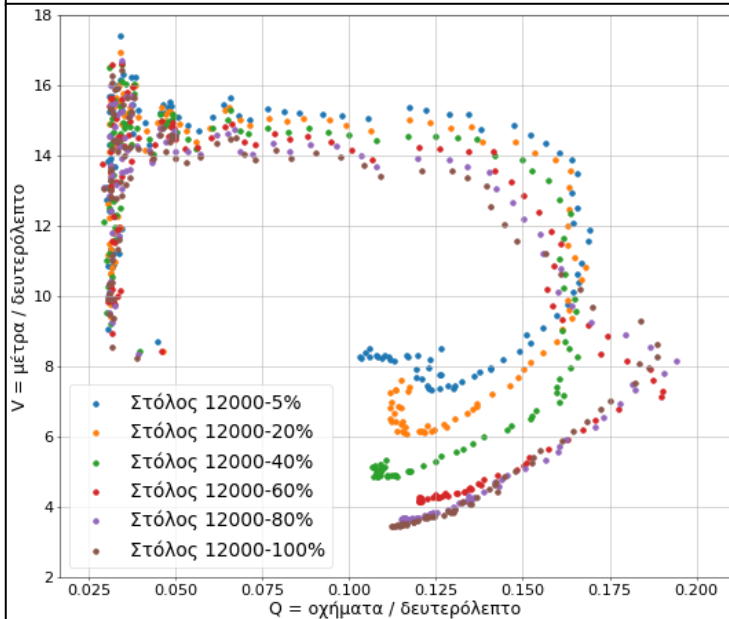
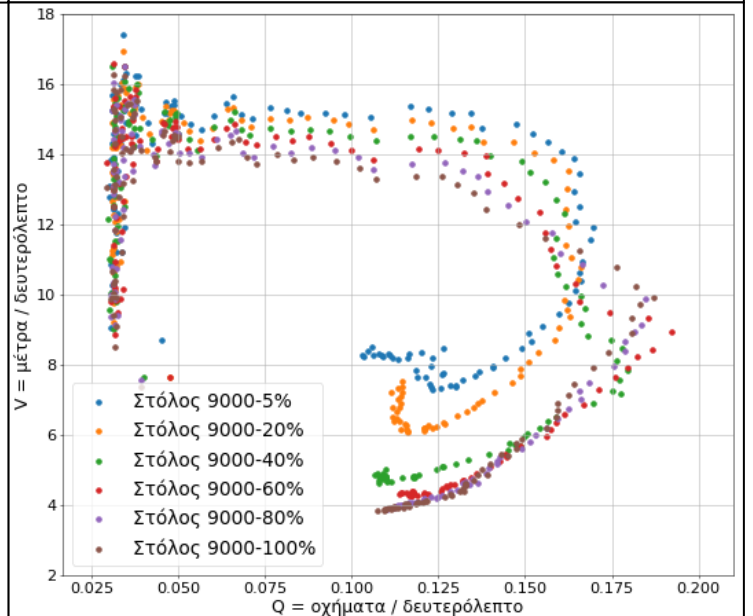
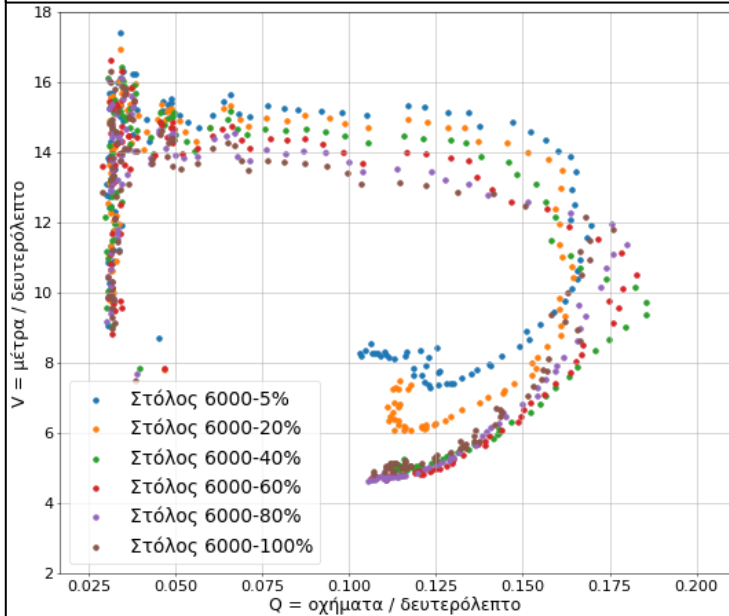
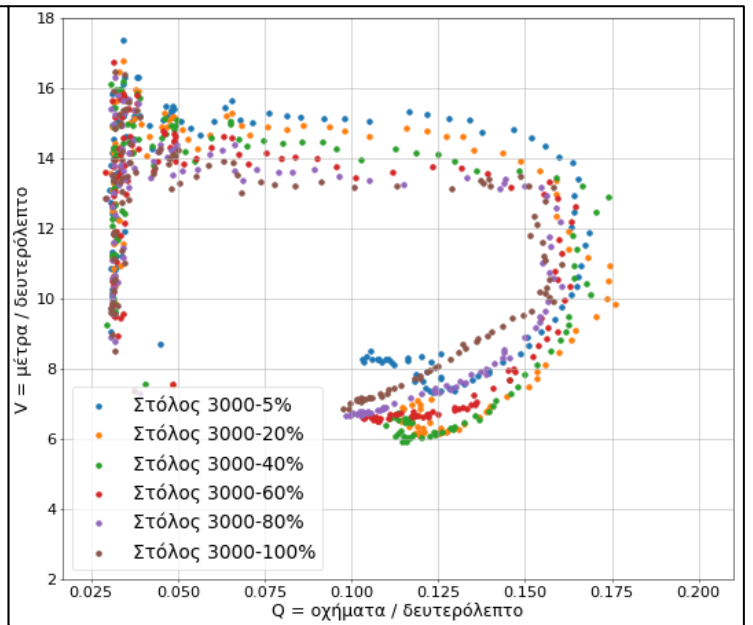
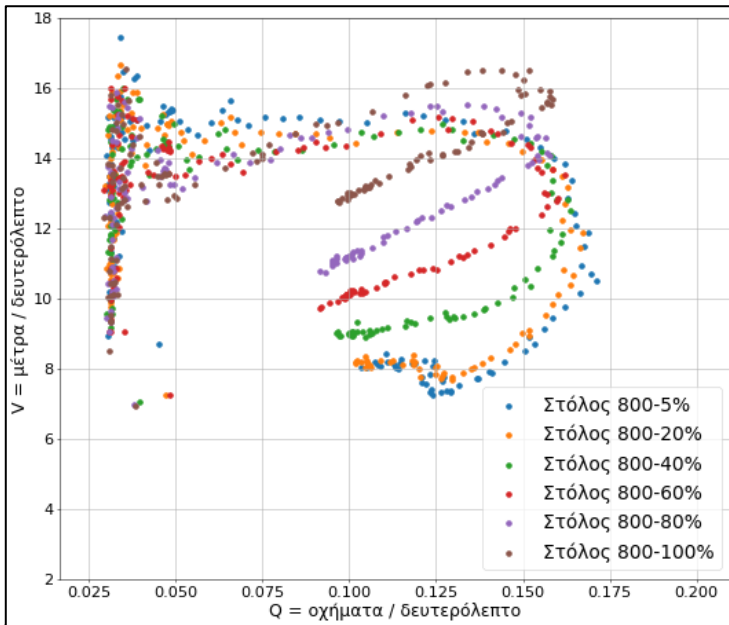
Στις επόμενες σελίδες θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα που προέκυψαν από την κυκλοφοριακή ανάλυση και δεν εμφανίστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν τα Διαγράμματα όλων των σεναρίων, εκτός του αρχικού, για:

- Τη σχέση Ταχύτητας – Πυκνότητας.
- Τη σχέση Ταχύτητας – Φόρτου.
- Το μέγεθος της Πυκνότητας.
- Το μέγεθος του Φόρτου.
- Το μέγεθος της Ταχύτητας.

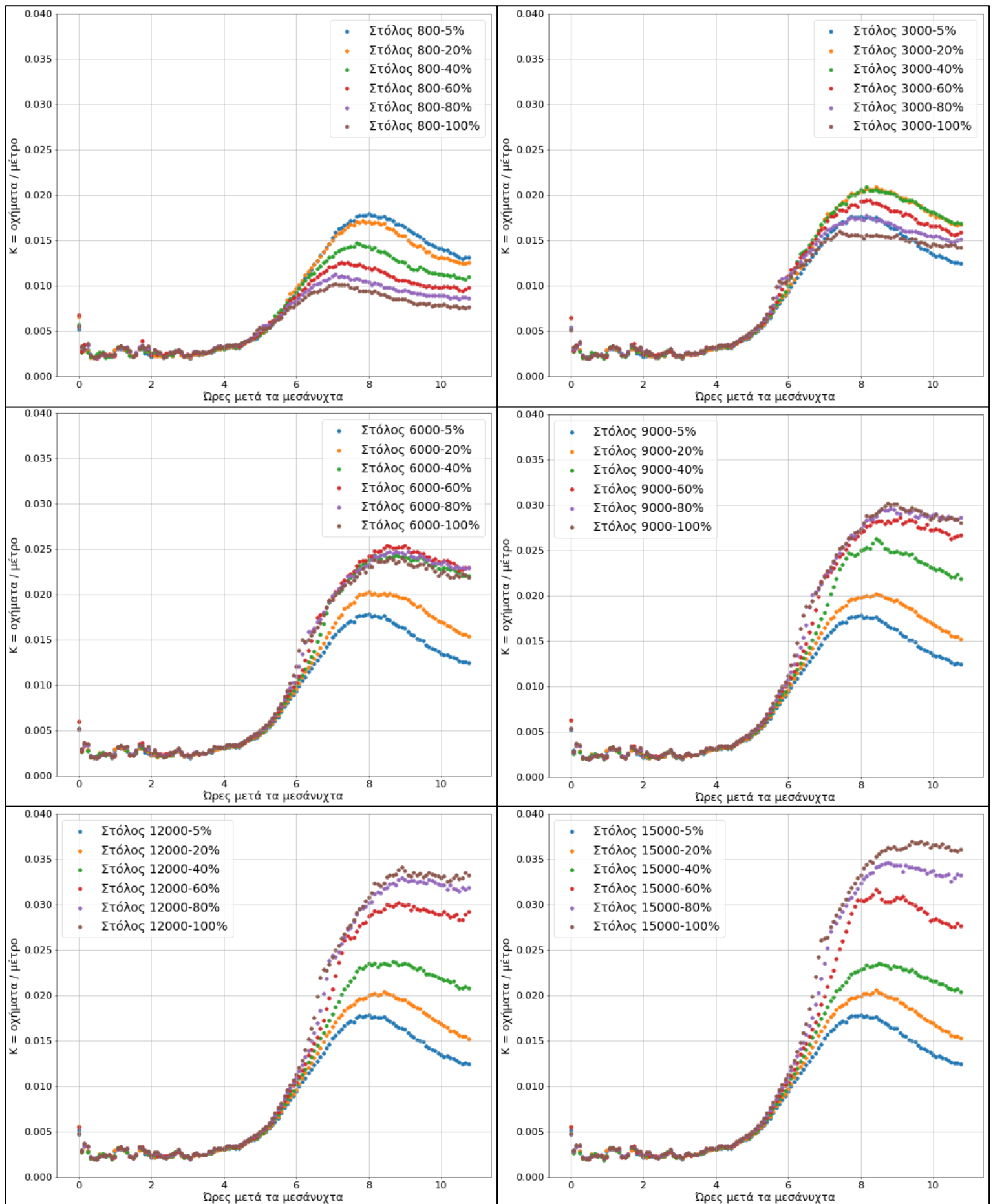
7.2 Ταχύτητα - Πυκνότητα



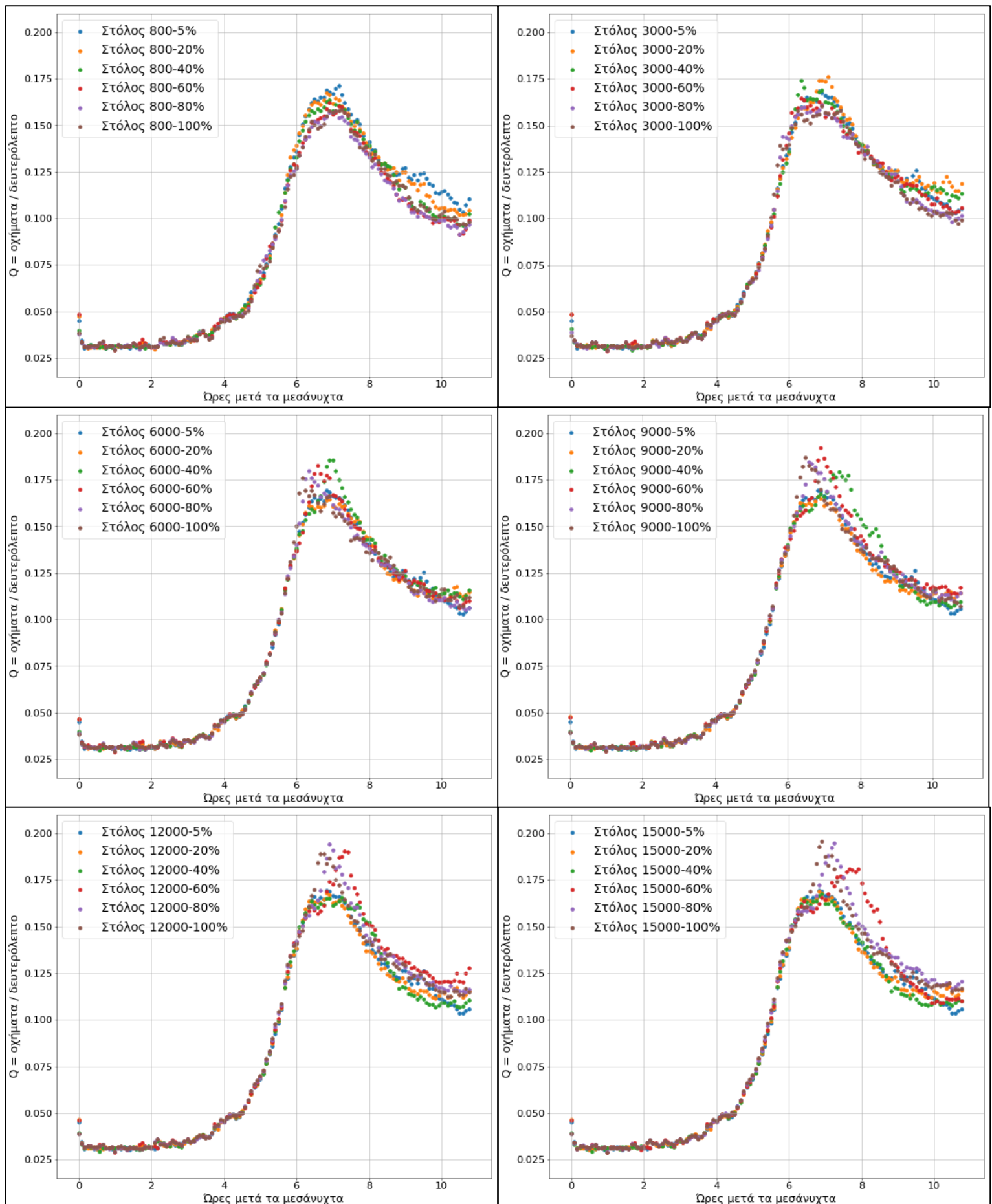
7.3 Ταχύτητα - Φόρτος



7.4 Πυκνότητα



7.5 Φόρτος



7.6 Ταχύτητα

