



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ –
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ
ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ, ΩΣ ΜΕΤΡΟ ΗΠΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ,
ΜΕΣΩ ΧΡΗΣΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ
ΠΡΑΚΤΩΡΩΝ

Ευτυχία Ζαργιαννάκη

Επιβλέπων:
Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2022



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL & SURVEYING ENGINEERING –
GEOINFORMATICS ENGINEERING
DEP. OF INFRASTRUCTURE AND RURAL DEVELOPMENT

Diploma Thesis

**ASSESSING THE IMPACTS OF REDUCING SPEEDS,
AS A TRAFFIC CALMING MEASURE, AT NETWORK
LEVEL. A MULTIMODAL AGENT-BASED
SIMULATION**

Eftychia Zargiannaki

Supervisor:
Konstantinos Kepaptsoglou, Associate Professor

**LABORATORY OF
TRANSPORTATION ENGINEERING**



Athens, July 2022

ΔΗΛΩΣΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

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

ZARGIANNAKH EYTYXIA

Ευχαριστίες

Με το πέρας της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κλείνει ο κύκλος των σπουδών μου στο Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής, έχοντας λάβει πολύτιμα εφόδια για την μετέπειτα επαγγελματική μου πορεία.

Η συμβολή και η υποστήριξη από συγκεκριμένα πρόσωπα ήταν καθοριστική για την επίτευξη αυτού του στόχου. Θα ήθελα, λοιπόν, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου, Αναπληρωτή Καθηγητή, για την ανάθεση και επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω επίσης στον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Τζούρα, που στάθηκε στο πλευρό μου και με καθοδήγησε κατάλληλα με τις πολύτιμες συμβουλές και γνώσεις του καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Θέλω ακόμα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Στέφανο Τσιγδινό, για τις συμβουλές και ενδιαφέρουσες συζητήσεις μας σε ζητήματα της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια και τους φίλους μου, που υποστήριξαν όλη την προσπάθειά μου και με ενθάρρυναν να συνεχίζω.

Ζαργιαννάκη Ευτυχία

Ιούλιος 2022

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση των επιπτώσεων της μείωσης των ταχυτήτων στην μητρόπολη του Βερολίνου. Η μείωση των ταχυτήτων ερευνάται στα πλαίσια της ήπιας κυκλοφορίας, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί μέσα από διάφορες στρατηγικές και μέτρα, και έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ζωής των πολιτών στην περιοχή. Στην παρούσα μελέτη προτείνεται μια νέα μεθοδολογική προσέγγιση για την διερεύνηση των επιπτώσεων της ήπιας κυκλοφορίας, η οποία συσχετίζει τη μείωση των ταχυτήτων με τη συμμόρφωση των οδηγών σε αυτές. Δημιουργούνται ένα σενάριο βάσης και 6 ακόμα σενάρια εξέτασης, από τον συνδυασμό σεναρίων που αφορούν τη μείωση των ταχυτήτων ανά επίπεδο ιεράρχησης των οδών και σεναρίων που αφορούν τη συμμόρφωση των οδηγών με τα νέα όρια. Τα σενάρια δοκιμών που διατυπώνονται παρουσιάζουν ακραίες πραγματικότητες, όπου το όριο ταχύτητας στους περισσότερους αστικούς δρόμους του Βερολίνου πέφτει στα 30 km/h ή και στα 15 km/h. Για την προσομοίωση των σεναρίων χρησιμοποιείται το πρόγραμμα MATSim (Multi-Agent Transport Simulation) στο οποίο εισάγονται πληροφορίες για το Βερολίνο που έχουν συγκεντρωθεί στο έτοιμο σενάριο "Open-Berlin" αφού πρώτα έχουν ενημερωθεί τα χαρακτηριστικά των οδικών συνδέσμων κατά τα προτεινόμενα σενάρια. Για την ενημέρωση αυτή, αναπτύχθηκε νέο εξωτερικό εργαλείο, το οποίο διαμορφώνει την ταχύτητα ελεύθερης ροής και τη χωρητικότητα των οδών. Τα ευρήματα αυτής της μελέτης δείχνουν ότι όταν ηπιοποιείται η κυκλοφορία στους αστικούς οδικούς συνδέσμους αυξάνονται σημαντικά οι μετακινήσεις, οι επιβατικές ώρες και τα επιβατοχιλιόμετρα με χρήση μέσων μαζικής μεταφοράς, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στις μετακινήσεις με αυτοκίνητα. Αν και τα όρια ταχύτητας είναι μειωμένα στους εσωτερικούς αστικούς δρόμους στα περισσότερα από τα σενάρια, η μείωση της μέσης ταχύτητας ταξιδιού των αυτοκινήτων δεν είναι τόσο υψηλή όσο αναμενόταν. Ένα σημαντικό συμπέρασμα της ανάλυσης είναι ότι τα αυτοκίνητα χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερες αποστάσεις σε όλα τα σενάρια δοκιμών. Στις προσομοιώσεις, η συμμόρφωση του οδηγού με τα νέα όρια ταχύτητας φαίνεται να είναι ένας καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζεται έντονα από τις σχεδιαστικές παρεμβάσεις που εφαρμόζονται σε μια περιοχή ηρεμίας της κυκλοφορίας.

Λέξεις κλειδιά: προσομοίωση πρακτόρων, ήπια κυκλοφορία, εκτίμηση επιπτώσεων, αστικό οδικό δίκτυο

ABSTRACT

The aim of this thesis is to investigate the effects of reducing speeds in the metropolis of Berlin. The reduction of speeds is researched in the context of traffic calming, which can be implemented through various strategies and measures, and has the effect of improving the lives of citizens in the area. In the present study, a new methodological approach is proposed to investigate the effects of traffic calming, which correlates the reduction of speeds with drivers' compliance with them. A base scenario and 6 more test scenarios are created, from the combination of scenarios concerning the reduction of speeds per road hierarchy level and scenarios concerning drivers' compliance with the new speed limits. The test scenarios that are formulated present extreme realities, where the speed limit in most urban roads of Berlin drops to 30 km/h or even 15 km/h. To simulate the scenarios, a program called MATSim (Multi-Agent Transport Simulation) and the "Open-Berlin" scenario are utilized, after the characteristics of the road links have been updated according to the proposed scenarios. For this update, a new external tool was developed, which updates the free flow speed and capacity of each network link. The findings of this study show a considerably high increase in trips, passenger hours and passenger kilometers using public transport modes, when traffic calming links are created; the reverse change is observed in private cars trips. Although the speed limits are decreased in inner urban roads in most of the scenarios, the decrease of average travel speed of private cars is not so high as it was expected. Surprisingly, private cars are used for longer distances in all test scenarios. In simulations, driver compliance to the new speed limits seems to be a determinant factor that is strongly influenced by the design interventions applied in a traffic calming area.

Keywords: agent-based simulation, traffic calming, impact assessment, urban road network

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ABSTRACT	iv
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	vii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	ix
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ	ix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	4
2.1. Ιεράρχηση Οδών	5
2.1.1. Η κλασική προσέγγιση – Λειτουργική Ιεράρχηση	6
2.1.2. Ιεράρχησης Οδών στη Γερμανία	7
2.1.3. Ιεράρχησης Οδών στην Ελλάδα	8
2.1.4. Ιεράρχηση Οδών κατά Open Street Map (OSM)	11
2.1.5. Συμπεράσματα	14
2.2. Μέτρα ήπιας κυκλοφορίας σε τοπικό επίπεδο	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	24
3.1. Μοντέλο Διαδρομών ή Μοντέλο των τεσσάρων βημάτων (Trip – based model / Four – Steps Model)	26
3.2. Μοντέλο Δραστηριοτήτων (Activity – based Model)	27
3.3. Μοντέλο Πρακτόρων (Agent-based Model)	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΛΕΙΑ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	33
4.1. Προσομοίωση πολλαπλών πρακτόρων (MATSIM)	34
4.1.1. Λίγα λόγια για τη MATSim	34
4.1.2. Μοντέλο Προσομοίωσης της Κυκλοφορίας	37
4.1.3. Αρχεία εισόδου στη MATSim	38
4.1.4. Αρχεία εξόδου	40
4.2. Το σενάριο του Βερολίνου	41
4.3. Διαμόρφωση Σεναρίων	44
4.3. Ενημέρωση του οδικού δικτύου	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	52
5.1. Ανάλυση στατιστικών αποτελεσμάτων των μετακινήσεων	52
5.2. Ανάλυση αποτελεσμάτων οπτικοποίησης των υπό μελέτη σεναρίων	55
5.3. Ανάλυση αποτελεσμάτων για τα μέσα: αυτοκίνητο και δημόσιες μεταφορές	60
5.4. Κατανομές αποστάσεων και ταχυτήτων ανά σενάριο για το αυτοκίνητο	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	64

6.1. Σύνοψη ευρημάτων, συζήτηση και περιορισμοί.....	64
6.2. Συμπεράσματα	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	68
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	72
A. Κώδικας «Network Updater».....	73
B. Αρχεία εξόδου MATSim σε μορφή εικόνων	77

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Κατηγορίες οδών όπως εμφανίζονται στο RIN (πηγή: Friedrich M. (2016). Functional Structuring of Road Networks).....	7
Σχήμα 2: Κατηγορίες οδών σε συνδυασμό με το επίπεδο εξυπηρέτησης της συνδεσιμότητας όπως εμφανίζονται στο RIN (πηγή: Friedrich M. (2016). Functional Structuring of Road Networks).....	8
Σχήμα 3: Συσχέτιση ταχύτητας, φόρτου και των τριών λειτουργικών κατηγοριών οδού, πηγή: Οδηγία Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) 1 - Άρθρο 2: Κατηγορίες οδών.....	9
Σχήμα 4: Κατηγορίες Οδών και επιδιωκόμενη ταχύτητα διαδρομής ανά κατηγορία οδού, πηγή: Οδηγία Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) 1 - Άρθρο 2: Κατηγορίες οδών.....	10
Σχήμα 5: Ενδεικτική απεικόνιση και παράδειγμα οφιοειδούς διάταξης δρόμου.....	15
Σχήμα 6: Ενδεικτικό παράδειγμα οφιοειδούς διάταξης δρόμου.....	15
Σχήμα 7: Ενδεικτική απεικόνιση αλλαγής ευθυγραμμία διασταύρωσης τύπου «Τ».....	15
Σχήμα 8: Ενδεικτικό παράδειγμα κυκλικού κόμβου.....	16
Σχήμα 9: Ενδεικτικό παράδειγμα μικρού κυκλικού κόμβου.....	16
Σχήμα 10: Ενδεικτικό παράδειγμα μικρού κυκλικού κόμβου.....	16
Σχήμα 11: Ενδεικτική απεικόνιση και παράδειγμα οδικής ύβωσης.....	17
Σχήμα 12: Ενδεικτική απεικόνιση και παράδειγμα “μαξιλαιών”.....	17
Σχήμα 13: Ενδεικτική απεικόνιση και παράδειγμα πλατώ ταχύτητας.....	17
Σχήμα 14: Ενδεικτικό παράδειγμα υπερυψωμένης διάβασης.....	18
Σχήμα 15: Ενδεικτική απεικόνιση και παράδειγμα νησίδας πεζών.....	18
Σχήμα 16: Ενδεικτικό παράδειγμα επέκτασης γωνίας πεζοδρομίου.....	18
Σχήμα 17: Ενδεικτική απεικόνιση επέκτασης πεζοδρομίου.....	19
Σχήμα 18: Ενδεικτικό παράδειγμα μείωσης λωρίδων οδού.....	19
Σχήμα 19: Ενδεικτική απεικόνιση και παράδειγμα εκτροπών κυκλοφορίας.....	19
Σχήμα 20: Ενδεικτικό παράδειγμα κλεισίματος οδού.....	20
Σχήμα 21: Ενδεικτικό παράδειγμα μερικού κλεισίματος οδού.....	20
Σχήμα 22: Ενδεικτική απεικόνιση διάμεσου φράγματος.....	20
Σχήμα 23: Ενδεικτική απεικόνιση νησίδας στροφής.....	20
Σχήμα 24: Ενδεικτικό παράδειγμα οδού με κτίρια και δέντρα.....	21
Σχήμα 25: Ενδεικτικό παράδειγμα αδρών και χρωματιστών υλικών πεζοδρομίου.....	21
Σχήμα 26: Ενδεικτικό παράδειγμα σήμανσης εισόδου σε περιοχή με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.....	21
Σχήμα 27: Ενδεικτικό παράδειγμα κάθετης σήμανσης (αριστερά) και οριζόντιας σήμανσης (δεξιά).....	22
Σχήμα 28: Ενδεικτικό παράδειγμα φαναριού πεζών.....	22
Σχήμα 29: Ενδεικτική απεικόνιση δρόμου συνύπαρξης.....	22
Σχήμα 30: Εννοιολογικό πλαίσιο μοντέλου δραστηριοτήτων, πηγή: (Subbarao & Krishnarao, 2020).....	28
Σχήμα 31: Σύγκριση μοντέλου διαδρομών και μοντέλου δραστηριοτήτων.....	30
Σχήμα 32: Δομή μοντέλου πρακτόρων σε εφαρμογές μεταφορών, πηγή: (Jiangyan et al., 2022).....	32
Σχήμα 33: Μεθοδολογικό διάγραμμα ροής.....	33
Σχήμα 34: Το διάγραμμα ροής – ο κύκλος της MATSim.....	35
Σχήμα 35: Τυπική εξέλιξη της αξιολόγησης (scoring), πηγή: (Horni, Nagel, & Axhausen, 2016).....	36

Σχήμα 36: Μοντέλο προσομοίωσης της κυκλοφορίας στη MATSim, πηγή: (Horni, Nagel, & Axhausen, 2016).....	37
Σχήμα 37: Παρουσίαση σεναρίων με τις υπολογισμένες νέες ταχύτητες ελεύθερης ροής για κάθε οδικό σύνδεσμο.	47
Σχήμα 38: Λειτουργική ιεράρχηση κατά το OSM του οδικού δικτύου του Βερολίνου.	48
Σχήμα 39: Θεμελιώδες Διάγραμμα Φόρτου-Πυκνότητας, πηγή: (Flotterod).	50
Σχήμα 40: Κατανομή μετακινήσεων (%) στα μέσα μεταφοράς ανά σενάριο.	53
Σχήμα 41: Επιβατικές ώρες (αριστερά) και επιβατοχιλιόμετρα (δεξιά) ανά μέσο μετακίνησης ανά σενάριο.	54
Σχήμα 42: Ιστόγραμμα σκέλους για όλα τα μέσα μετακίνησης, 500η επανάληψη σεναρίου 1b.	55
Σχήμα 43: Οπτικοποίηση σεναρίου 1b.....	56
Σχήμα 44: Οπτικοποίηση σεναρίου 2a.....	57
Σχήμα 45: Οπτικοποίηση σεναρίου 2b.....	57
Σχήμα 46: Οπτικοποίηση σεναρίου 2c.....	58
Σχήμα 47: Οπτικοποίηση σεναρίου 3a.....	58
Σχήμα 48: Οπτικοποίηση σεναρίου 3b.....	59
Σχήμα 49: Οπτικοποίηση σεναρίου 3c.....	59
Σχήμα 50: Μέσος χρόνος ταξιδιού (αριστερά), Μέση απόσταση (στο κέντρο) και μέση ταχύτητα (δεξιά) ανά σενάριο και μέσο μεταφοράς (αυτοκίνητο και δημόσια συγκοινωνία). ..	60
Σχήμα 51: Κατανομή αποστάσεων μετακίνησης ανά σενάριο. Παρουσίαση ιστογράμματος και συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.	61
Σχήμα 52: Κατανομή ταχυτήτων αυτοκινήτου ανά σενάριο. Παρουσίαση ιστογράμματος και συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας σε ώρες αιχμής (πάνω διάγραμμα) και τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας (κάτω διάγραμμα).	63

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Κατηγορίες Οδών όπως παρουσιάζονται στο OpenStreetMao	11
Πίνακας 2: Μέτρα Ήπιας Κυκλοφορίας.	15
Πίνακας 3: Σενάρια με προτεινόμενα όρια ταχυτήτων.	45
Πίνακας 4: Κανόνες δεικτών συμμόρφωσης.	45
Πίνακας 5: Σύνθεση σεναρίων ταχυτήτων ελεύθερης ροής βάσει των προτεινόμενων νέων ταχυτήτων και των δεικτών συμμόρφωσης.	46
Πίνακας 6: Δείκτες συμμόρφωσης που προκύπτουν για κάθε σενάριο βάσει των κανόνων του τέθηκαν.	46

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Εξίσωση 1: Ταχύτητα ελεύθερης ροής	49
Εξίσωση 2: Μέγιστος Κυκλοφοριακός Φόρτος, (Flötteröd, 2016)	50
Εξίσωση 3: Χωρητικότητα	50
Εξίσωση 4: Σχετική ταχύτητα οχημάτων στο σύνδεσμο.	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τότε που μπήκε στις ζωές των ανθρώπων το αυτοκίνητο, η δομή των πόλεων και ο συγκοινωνιακός τους σχεδιασμός επικεντρώθηκαν στην εξυπηρέτηση αυτού. Κάποια χρόνια αργότερα, όμως, τα ποικίλα προβλήματα που επιφέρει η αυτοκινητοκεντρική σχεδίαση των αστικών περιοχών έχουν γίνει ορατά. Το αυτοκίνητο ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για την κοινωνική αποδιοργάνωση των πόλεων, την δημιουργία φραγμάτων στον αστικό ιστό, την αισθητή αύξηση των οδικών ατυχημάτων, την αλλοίωση της μορφής και της χρήσης του δημόσιου χώρου, την κοινωνική ανισότητα ως προς τις μετακινήσεις, την αστική εξάπλωση και κατασπατάληση του αξιαστικού χώρου, τη ρύπανση του περιβάλλοντος, την εξατομίκευση κ.α. (Βλαστός & Μηλάκης, 2006; Nieuwenhuijsen & Khreis, 2016). Λόγω των παραπάνω, οι μελετητές πλέον στρέφονται στον περιορισμό του αυτοκινήτου και την προώθηση άλλων μέσων μετακίνησης με σκοπό της εξασφάλιση βιώσιμης κινητικότητας στις πόλεις.

Η μείωση των ορίων ταχύτητας στους αστικούς δρόμους έχει προταθεί από πολλούς πολεοδόμους και συγκοινωνιολόγους τα τελευταία 20 χρόνια με στόχο τη διασφάλιση ασφαλέστερων συνθηκών κυκλοφορίας μεταξύ των χρηστών του δρόμου, δηλαδή πεζών, ποδηλατών, οδηγών αυτοκινήτων κ.λπ. (Domenichini et al., 2018). Πιο συγκεκριμένα, η καθίερωση 30 km/h ή και 15 km/h σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές αποτελεί βασικό και αποτελεσματικό μέτρο βιώσιμης κινητικότητας. Αρχικά με τη μείωση των ταχυτήτων μειώνεται σημαντικά και η πιθανότητα πρόκλησης κάποιου σοβαρού τροχαίου συμβάντος (δηλαδή θανατηφόρου ή με σοβαρό τραυματισμό). Ταυτόχρονα, είναι ένα μέτρο που συνδέεται στενά με την ήπια κυκλοφορία. Πρόκειται για μια ρύθμιση που παραχωρεί προτεραιότητα στους πεζούς έναντι της μηχανοκίνητης κυκλοφορίας. Όπως και οι Creutzig et al. (2020) σημείωσαν η ήπια κυκλοφορία μπορεί να θεωρηθεί ως μια εναλλακτική προσέγγιση για την προώθηση των πιο αργών μέσων μετακίνησης (δηλαδή, πεζή και ποδήλατο) που θα οδηγήσουν σε μια δικαιότερη και πιο αποτελεσματική κατανομή του αστικού χώρου. Είναι μια έξυπνη λύση στο πρόβλημα του αστικού χώρου σε πυκνοκατοικημένες περιοχές με στόχο την ανάπτυξη ενός πιο ανθρωποκεντρικού οδικού περιβάλλοντος που διασφαλίζει υψηλότερα επίπεδα προσβασιμότητας σε ευάλωτες κοινωνικές ομάδες (π.χ. ηλικιωμένους, άτομα με αναπηρίες, παιδιά, κ.λπ.) χωρίς διαχωρισμό των ροών κυκλοφορίας (Tsigdinos et al., 2022). Ο περιορισμός του αυτοκινήτου θα επιφέρει και μια πιο ομαλή ροή στην κυκλοφορία, μειώνοντας τα επίπεδα κυκλοφοριακής συμφόρησης που συχνά προκαλείται από την προτίμηση πολλών χρηστών των οδών στα αυτοκίνητα.

Ο σαφής προσδιορισμός της λειτουργίας των οδών, δηλαδή η λειτουργική ιεράρχηση αυτών, αποτελεί προϋπόθεση για την κατανομή της κυκλοφορίας και την απόδοση των αντίστοιχων ταχυτήτων στους άξονες του οδικού δικτύου. Παράλληλα, για την υψηλότερη συμμόρφωση με τα όρια των ταχυτήτων οι περισσότερες μελέτες προτείνουν σχεδιαστικές παρεμβάσεις, όπως οδικές υβώσεις, κυκλικούς κόμβους, επεκτάσεις κρασπέδων, υπερυψωμένες διασταυρώσεις, νησίδες, δρόμους συνύπαρξης κ.α. Αυτές οι παρεμβάσεις δημιουργούν ένα οδικό περιβάλλον επιεικές και ανθεκτικό στα ανθρώπινα λάθη (O'Hern et al., 2019).

Παρά τις θετικές επιπτώσεις της ηρεμίας της κυκλοφορίας στην ασφάλεια, την προσβασιμότητα και τη βιωσιμότητα, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής δυσκολεύονται να εφαρμόσουν αυτά τα μέτρα σε μεγάλο βαθμό στις μέρες μας. Η μεγαλύτερη ανησυχία σχετίζεται με την αύξηση του χρόνου ταξιδιού του αυτοκινήτου, που θεωρείται «ψευδώς» ως ο ταχύτερος τρόπος μετακίνησης στο αστικό περιβάλλον. Οι πολέμιοι των χαμηλότερων ορίων ταχύτητας υποστηρίζουν ότι αυτό θα οδηγήσει σε σοβαρή υποβάθμιση της αποτελεσματικότητας του

συστήματος μεταφορών που με της σειρά του θα οδηγήσει σε οικονομική ύφεση. Στον αντίποδα, διατυπώνεται η υπόθεση ότι με τη μείωση των ορίων ταχύτητας, μειώνονται επίσης οι μέσες ταχύτητες κυκλοφορίας και η χωρητικότητα του δρόμου και επομένως μια τέτοια αλλαγή μειώνει την προσβασιμότητα του αυτοκινήτου καθιστώντας το λιγότερο ελκυστικό μέσο αστικής μεταφοράς (Tzouras et al., 2021). Η επιρροή αυτή στη συμπεριφορά των πολιτών, οι οποίοι θα χρησιμοποιούν λιγότερο το αυτοκίνητο θα οδηγήσει και σε μικρότερες πιθανότητες κυκλοφοριακής συμφόρησης στην πόλη. Ως εκ τούτου, ο προβληματισμός που αφορά τη θυσία της αποτελεσματικότητας στο βωμό της ασφάλειας μπορεί να μην υπάρχει στην πράξη. Αυτή είναι η κύρια υπόθεση της μελέτης.

Η ανάπτυξη μεσοσκοπικών και μικροσκοπικών εργαλείων προσομοίωσης καθιστά δυνατή την εκ των προτέρων εξέταση της προαναφερθείσας υπόθεσης. Πιο συγκεκριμένα, τα Agent-Based Models (ABM) χρησιμοποιούνται ευρέως για την πρόβλεψη των επιπτώσεων νέων ιδεών κινητικότητας, σχεδίων και καινοτόμων υπηρεσιών που ακόμα είναι υπό εξέταση. Τα ABM προσομοιώνουν δράσεις και αλληλεπιδράσεις αυτόνομων ατόμων (που ονομάζονται πράκτορες) ενός συνθετικού πληθυσμού με σκοπό να αξιολογήσουν τις επιπτώσεις της συμπεριφοράς τους στο σύστημα ως σύνολο (Niazi et al., 2011). Η MATSim, το POLARIS και το SimMobility είναι μεταξύ αυτών των μοντέλων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της ταξιδιωτικής συμπεριφοράς και των κυκλοφοριακών ροών μεγάλων μητροπολιτικών δικτύων, δηλαδή του Βερολίνου, του Σικάγου και της Σγκαπούρης. Τα αποτελέσματά τους αναφέρονται σε μοτίβα ταξιδιού, κατανομή των μετακινήσεων στα διάφορα μέσα, επιβατικά χιλιόμετρα και ώρες, μέσες ταχύτητες ταξιδιού και σημεία συμφόρησης (Tzouras et al., 2022). Φυσικά, υπάρχουν περιορισμοί που σχετίζονται κυρίως με το επίπεδο λεπτομέρειας στο οποίο μοντελοποιούνται οι αλληλεπιδράσεις των χρηστών του δρόμου. Υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας σημαίνει υψηλό χρόνο υπολογισμού και περισσότερους πόρους που πρέπει να διατεθούν. Αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη μελέτη νέων στρατηγικών και πολιτικών.

Αυτή η εργασία επιχειρεί να προτείνει μια εναλλακτική προσέγγιση μοντελοποίησης για την προσομοίωση δικτύων ήπιας κυκλοφορίας στο πλαίσιο της MATSim λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική και τους περιορισμούς της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, η προτεινόμενη προσέγγιση φιλοδοξεί να συνδέσει την ήπια κυκλοφορία με το λογισμικό της MATSim χωρίς να αυξάνει την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Ταυτόχρονα συζητά εάν η εφαρμογή χαμηλότερων ορίων ταχύτητας μπορεί να βελτιώσει ή να υποβαθμίσει τη συνολική απόδοση του συστήματος μεταφορών της υπό εξέταση περιοχής. Ως εκ τούτου, στοχεύει να διερευνήσει τις επιπτώσεις της ήπιας κυκλοφορίας σε επίπεδο μητροπολιτικού οδικού δικτύου. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ένα ήδη υπάρχον βασικό σενάριο, που αναπτύχθηκε για ολόκληρη τη μητροπολιτική περιοχή του Βερολίνου (δηλαδή, το σενάριο Open - Berlin) χρησιμοποιείται ως πειραματικό πεδίο.

Η αποτελεσματικότητα των μέτρων ήπιας κυκλοφορίας είναι δυνατόν να μετρηθεί λαμβάνοντας υπόψη έναν μόνο δείκτη, το ποσοστό συμμόρφωσης που αντιστοιχεί στον λόγο της ελεύθερης ροής (ή μέσης) ταχύτητας προς το νέο όριο ταχύτητας. Για να ελεγχθεί η εγκυρότητα της υπόθεσης που περιγράφηκε προηγουμένως, αναπτύσσεται ένα σύνολο σεναρίων που αναφέρονται σε διαφορετικά όρια ταχύτητας και επίπεδα ποσοστού συμμόρφωσης χρησιμοποιώντας ένα νέο εξωτερικό εργαλείο ενημέρωσης του δικτύου. Τα σενάρια που εξετάζονται, τα οποία παρουσιάζουν ακραίες πραγματικότητες και νέες ιεραρχίες οδικών δικτύων, εισάγονται αργότερα στην προσομοίωση για την πρόβλεψη των επιπτώσεων εφαρμογής των υποθετικών ορίων ταχύτητας.

Αναλυτικότερα όσον αφορά τη δομή της εργασίας στο εισαγωγικό κεφάλαιο **«Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή»** γίνεται μια περιγραφή του προβλήματος που ώθησε στην εξέταση του συγκεκριμένου θέματος, ενώ παράλληλα παρουσιάζεται ο στόχος της διπλωματικής εργασίας. Στο επόμενο κεφάλαιο **«Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο»** αναλύονται οι μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να εξασφαλιστεί η ήπια κυκλοφορία, που περιλαμβάνει τόσο την κατάλληλη λειτουργική ιεράρχηση των οδών, όσο και την εφαρμογή τοπικών μέτρων. Ακολουθεί στο **«Κεφάλαιο 3: Μοντέλα Συγκοινωνιακών Συστημάτων»** η ανάπτυξη των διαφόρων μοντέλων: μοντέλο τεσσάρων βημάτων, μοντέλο δραστηριοτήτων και μοντέλο πρακτόρων, τα οποία διατίθενται για την μελέτη των κυκλοφοριακών συστημάτων. Στο **«Κεφάλαιο 4: Εργαλεία – Μεθοδολογία»** επεξηγούνται τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση των πειραμάτων αλλά και το σκεπτικό της σχεδίασης των σεναρίων που εξετάζονται. Στο **«Κεφάλαιο 5: Ανάλυση Αποτελεσμάτων»** αναλύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μέσω γραφημάτων και των αποτελεσμάτων της οπτικοποίησης των σεναρίων. Τέλος, στο **«Κεφάλαιο 6: Σύνοψη – Συμπεράσματα»** γίνεται μια συζήτηση γύρω από το θέμα και τα αποτελέσματα, τους περιορισμούς και τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Κατά τον ορισμό του Ian M.Lockwood (1997) «Η ήπια κυκλοφορία είναι βασικά ο συνδυασμός (φυσικών) μέτρων, τα οποία μειώνουν τις αρνητικές επιπτώσεις της χρήσης της μηχανοκίνητης κυκλοφορίας, αλλάζουν τη συμπεριφορά των οδηγών και βελτιώνουν τις συνθήκες των υπόλοιπων χρηστών του δρόμου».

Σύμφωνα με το FHWA και το ITE, βασικός σκοπός της ήπιας κυκλοφορίας είναι να υποστηρίξει την βιωσιμότητα των κατοικημένων και εμπορικών περιοχών, μέσα από μια σειρά μέτρων βελτίωσης της ασφάλειας, της κινητικότητας και της άνεσης των μετακινούμενων χωρίς αυτοκίνητο. Αυτοί οι στόχοι τυπικά μπορούν να επιτευχθούν με τη μείωση των ταχυτήτων ή των κυκλοφοριακών φόρτων σε ένα δρόμο ή σε ένα οδικό δίκτυο σε αποδεκτά επίπεδα («αποδεκτά» για το επίπεδο λειτουργικότητας ενός δρόμου και τη φύση των γειτνιαζουσών δραστηριοτήτων). Στα μέτρα ήπιας κυκλοφορίας περιλαμβάνονται οριζόντιες ή κάθετες παρεμβάσεις, στενώσεις λωρίδων, διαμόρφωση πεζοδρομίων και οδοστρωμάτων και άλλα μέσα τα οποία καθοδηγούν τους οδηγούς φυσικά και ψυχολογικά ώστε να παράγουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Δεν αποτελούν δηλαδή ρυθμιστικά μέτρα που απαιτούν επιβολή, όπως οι πινακίδες “STOP”, οι πινακίδες με όρια ταχύτητας και οι συσκευές ελέγχου της ταχύτητας, αλλά μέτρα που προκαλούν την αυτό-επιβολή.

Με τη μείωση της ταχύτητας γίνονται αισθητές μεταξύ άλλων και οι ακόλουθες συνέπειες:

1. Αυξημένη ασφάλεια

Η μείωση των ταχυτήτων συνεπάγεται λιγότερα σε αριθμό, συχνότητα και σοβαρότητα τροχαία συμβάντα. Σε σημεία του δικτύου που μπορεί να βρεθούν πεζοί και αυτοκίνητα, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα τόσο περισσότερες και οι πιθανότητες να προκληθεί θανάσιμο συμβάν. Σε περίπτωση, δηλαδή που ο πεζός χτυπηθεί από όχημα που κινείται με λιγότερο από περίπου 30 km/h, οι πιθανότητες να τραυματιστεί σοβαρά είναι ελάχιστες. Αν όμως το όχημα κινείται με περίπου 60 km/h ή περισσότερο, μπορεί να προκληθεί θάνατος του πεζού.

2. Πρώθηση της χρήσης ποδηλάτων, πεζής μετακίνησης, μέσων μαζικής μεταφοράς και μικροκινητικότητας

Με την μείωση των ταχυτήτων αυξάνεται η ασφάλεια και η αντίληψη ασφάλειας για ποδηλάτες και πεζούς, οι οποίοι μπορούν να κινούνται με άνεση. Ακόμα, μέσα από τα έργα που σχετίζονται με την ήπια κυκλοφορία, δίνεται καθαρό το μήνυμα ότι ο δρόμος ανήκει σε όλους τους χρήστες.

3. Διακοπή της διαμπερούς ροής οχημάτων

Διακόπτεται η συνέχεια μεγάλων δρόμων που ευνοούν την ανάπτυξη ταχυτήτων. Μέσα από την άρση των οδικών φραγμάτων γίνεται σαφές ότι η περιοχή ανήκει σε όλους τους χρήστες και όχι αποκλειστικά σε οχήματα.

4. Επιτυγχάνεται η ισότιμη προσβασιμότητα – κίνηση ευπαθέστερων ομάδων

Η κίνηση των ΑμεΑ, ατόμων με καρτσάκι ή τυφλά άτομα, αλλά και των μαμάδων που κινούν τα καρτσάκια των μωρών καθίσταται, με τα μέτρα ήπιας κυκλοφορίας, πιο εφικτή. Η ασφάλεια και οι υποδομές που προσφέρονται δημιουργούν ένα φιλικό προς όλους περιβάλλον ανεξαιρέτως μέσου μετακίνησης.

5. Αισθητική αναβάθμιση στο περιβάλλον και περισσότερο πράσινο

Κάποια μέτρα ήπιας κυκλοφορίας, όπως η αρχιτεκτονική τοπίου και οι υποδομές για πεζούς, συνεισφέρουν στη διαμόρφωση καλαίσθητων δημόσιων χώρων. Οι γειτονιές γίνονται πιο ελκυστικές καθώς εξασφαλίζονται κοινόχρηστοι χώροι για δραστηριότητες και κοινωνικοποίηση, αναβαθμίζεται το περιβάλλον με την συστηματική φύτευση και αναδεικνύονται οι περιοχές που περιλαμβάνουν πολιτιστικούς χώρους και φυσικό κάλος.

6. Τόνωση κοινωνικής αλληλεπίδρασης

Η δυνατότητα όλων των ατόμων να κυκλοφορούν πεζοί σε ένα ασφαλές, ευχάριστο και άνετο χώρο ενισχύει την επικοινωνία και την κοινωνικοποίηση των ατόμων και ενδυναμώνει το αίσθημα «γειτονιάς».

7. Υποστήριξη τοπικής οικονομίας

Στην περίπτωση εφαρμογής μέτρων σε εμπορικούς δρόμους ο εξωραϊσμός και η βαδισιμότητα που εξασφαλίζονται έχουν θετικές επιπτώσεις και στις τοπικές οικονομικές δραστηριότητες.

8. Μειωμένη κατανάλωση καυσίμου

Όπως αναφέρει το FHWA στο «COURSE ON BICYCLE AND PEDESTRIAN TRANSPORTATION» έχει καταγραφεί 10-12% μείωση στην κατανάλωση καυσίμων λόγω μειωμένων ταχυτήτων και διαφορετικής επιλογής μέσου μετακίνησης των χρηστών.

9. Μείωση του θορύβου και των ρυπογόνων εκπομπών

Τα οχήματα κινούνται πιο αργά άρα η ηχορύπανση που παράγουν είναι μειωμένη, ενώ παράλληλα καθίστανται και φιλικότερα στο περιβάλλον.

10. Μείωση ανάγκης για αστυνόμευση των οδών

Πρέπει να είναι αυτόματα κατανοητό σε όλους τους οδηγούς και τους πεζούς, συμπεριλαμβανομένων των παιδιών, των ηλικιωμένων και των ΑΜΕΑ:

- ⇒ σε ποιο τύπο οδού βρίσκονται,
- ⇒ ποια κυκλοφοριακή συμπεριφορά αναμένεται από εκείνους,
- ⇒ ποια κυκλοφοριακή συμπεριφορά πρέπει να αναμένουν από τους άλλους οδηγούς και πεζούς.

Τα παραπάνω εξασφαλίζονται με τις σαφείς στρατηγικές και τα διακριτά στοιχεία σχεδιασμού των οδών.

Η ήπια κυκλοφορία οφείλει να μελετηθεί υπό το πρίσμα διαφορετικών χωρικών επιπέδων, σε μεγαλύτερη και σε μικρότερη κλίμακα (Τσιγδινός, 2018). Τα εργαλεία της σε υπερτοπικό επίπεδο διαφέρουν σε σχέση με εκείνα στο τοπικό επίπεδο. Σε υπερτοπικό επίπεδο η ιεράρχηση των οδών και επομένως ο καθορισμός συγκεκριμένου ρόλου στη κάθε μια, είναι ένα απαραίτητο πρώτο εργαλείο για την οργάνωση του δικτύου, ώστε στη συνέχεια να καταστούν δυνατά ο σχεδιασμός και η εφαρμογή πιο στοχευμένων τοπικών μέτρων.

2.1. Ιεράρχηση Οδών

Η ιεράρχηση των οδών ενός αστικού οδικού δικτύου αποτελεί προϋπόθεση για τον σχεδιασμό, τη μελέτη και την ανάλυση ενός πολεοδομικού και κυκλοφοριακού συστήματος. Χωρίς την κατάλληλη ιεράρχηση δεν γίνεται και σωστός καταμερισμός της κυκλοφορίας με σκοπό να αποδοθούν οι αντίστοιχες προτεραιότητες στα μέσα μετακίνησης και να εφαρμοστούν ορθά και λειτουργικά μέτρα.

Η στρατηγική ήπιας κυκλοφορίας μέσα από την ιεράρχηση του οδικού δικτύου μπορεί να συμβάλει στην οργάνωση του αστικού χώρου και στην διαμόρφωση μιας αναγνώσιμης εικόνας της πόλης (Βλαστός, 2007).

Η κατάταξη ενός οδικού δικτύου με βάση τη λειτουργικότητά του, επιτρέπει τη διαμόρφωσή του σύμφωνα με τη σημασία του εκάστοτε οδικού τμήματός του και οδηγεί στον προσδιορισμό των δυνατοτήτων, τόσο της επέκτασης, όσο και της συρρίκνωσής του.

Όπως αναφέρεται και στις ελληνικές οδηγίες για τις κατηγορίες της οδού, ένας βασικός στόχος του σχεδιασμού ενός οδικού δικτύου είναι να εξασφαλίζεται για όλους τους χρήστες της στα διάφορα οδικά τμήματα μια ασφαλής κυκλοφοριακή ροή και συγκεκριμένα επίπεδα κυκλοφοριακής εξυπηρέτησης. Παράλληλα πρέπει να υπάρχει στον σχεδιασμό ο σημαντικός γνώμονας της προστασίας του περιβάλλοντος. Επομένως ο ορισμός κατάλληλων ταχυτήτων κυκλοφορίας σε σχέση με τον εκάστοτε λειτουργικό χαρακτήρα σύνδεσης κρίνεται απαραίτητος.

2.1.1. Η κλασσική προσέγγιση – Λειτουργική Ιεράρχηση

Οι οδοί κατατάσσονται κατά ενιαίο τρόπο σε ομάδες ανάλογα με κάποια χαρακτηριστικά. Η λειτουργική ιεράρχηση ενός οδικού δικτύου έχει σκοπό να δώσει σε κάθε τμήμα (οδικό σύνδεσμο) δικτύου ένα χαρακτήρα, ο οποίος προσδιορίζεται από το είδος της εξυπηρέτησης που καλείται να προσφέρει.

Η κλασσική και πιο διαδεδομένη ιεράρχηση οδών είναι η λειτουργική ιεράρχηση, στην οποία οι οδοί κατατάσσονται σε κατηγορίες σύμφωνα με τη λειτουργία τους και όχι τόσο με τον σχεδιασμό, τη χρήση ή με διοικητικά κριτήρια. Η «λειτουργικότητα» των οδών, σύμφωνα με τον (Marshall, 2005), αφορά σε μεγάλο βαθμό τις μελλοντικές ανάγκες και χρήσεις τους και λιγότερο την σημερινή τους χρήση, επομένως οι παρούσες συνθήκες δεν αποτυπώνονται επαρκώς. Ενώ η λειτουργική ιεράρχηση θεωρητικά βασίζεται σε αρχές της κυκλοφοριακής ροής και τη σχέση ανάμεσα στην κίνηση και την πρόσβαση, στην πραγματικότητα στηρίζεται αρκετά στην τοπολογική συνδεσιμότητα των οδών.

Όπως διατυπώνει ο Buchanan ως βασική αρχή, οι οδοί που σχεδιάζονται έχουν ως σκοπό είτε να διανέμουν την κίνηση είτε να εξυπηρετούν την πρόσβαση στα κτίρια. Δηλαδή κάποιες οδοί δίνουν προτεραιότητα στην κίνηση των μηχανοκίνητων και άλλες στην πρόσβαση στις διάφορες χρήσεις και άρα μεταξύ τους είναι ανταγωνιστικές.

Σε αυτό το πλαίσιο, διαμορφώνονται 3 βασικές κατηγορίες οδών, οι αρτηρίες, οι συλλεκτήριες και οι τοπικές. Βέβαια κάθε χώρα είτε διαχωρίζει περαιτέρω τις κατηγορίες (π.χ. κύριο και δευτερεύον δίκτυο) είτε τις εμπλουτίζει προσθέτοντας ακόμα κάποιες (π.χ. αυτοκινητόδρομοι, λεωφόρους ταχείας κυκλοφορίας) ώστε να καλύψει τα χαρακτηριστικά και την ποικιλομορφία του εκάστοτε οδικού δικτύου.

2.1.2. Ιεράρχησης Οδών στη Γερμανία

Στη Γερμανία το “Road and Transportation Research Association” (FGSV) είναι ο οργανισμός που έχει αναλάβει να συντάξει τις τεχνικές οδηγίες που σχετίζονται με το οδικό δίκτυο και τις μεταφορές. Πιο συγκεκριμένα για το σχεδιασμό και την οργάνωση του δικτύου έχουν δημοσιεύσει τις οδηγίες RIN, Guideline: Integrated Network Planning.

Κατά τις γερμανικές οδηγίες RASt 06, για την κατηγοριοποίηση των αστικών οδών χρησιμοποιούνται:

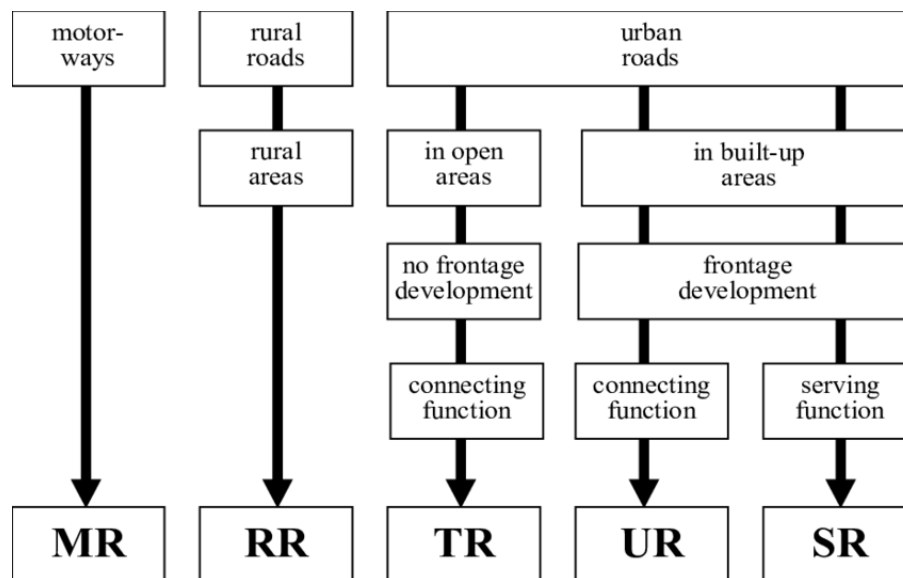
- χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας
- χαρακτηριστικά σχεδιασμού οδών

κατατάσσοντας τις οδούς σε ομάδες και υποομάδες.

Όπως περιγράφει ο (Friedrich , 2016), που έχει μεταφράσει στα αγγλικά τις οδηγίες RIN, οι κατηγορίες των οδών εξαρτώνται από τα εξής κριτήρια:

- Το είδος της οδού: αν είναι αυτοκινητόδρομος, επαρχιακή ή αστική οδός.
- Την τοποθεσία της οδού: αγροτικές περιοχές ή δομημένες με κτίρια περιοχές.
- Το περιβάλλον της οδού: ύπαρξη ή όχι ανάπτυξης παρά την οδό.
- Τη λειτουργία της οδού: σε επίπεδο συνδεσιμότητας ή εξυπηρέτησης.

Βασιζόμενο σε αυτά τα κριτήρια η RIN κατατάσσει τις οδούς σε πέντε ομάδες: MR, RR, TR, UR, SR).



Σχήμα 1: Κατηγορίες οδών όπως εμφανίζονται στο RIN (πηγή: Friedrich M. (2016). *Functional Structuring of Road Networks*).

Τα παραπάνω σε συνδυασμό με έξι επίπεδα λειτουργικής ιεράρχησης (0-V) σχηματίζουν τις κατηγορίες οδών όπως εμφανίζονται στο Σχήμα 1. Οι οδηγίες RIN εισάγουν την έννοια του CFL (Connectivity Function Level) που περιγράφει την σημαντικότητα της σύνδεσης δυο περιοχών (ζευγάρι προέλευσης – προορισμού) και βάσει του οποίου γίνεται ο διαχωρισμός των επιπέδων. Τα έξι επίπεδα ιεράρχησης που διαμορφώνονται είναι τα εξής:

- CFL 0: σύνδεση μεταξύ πόλεων με διεθνή σημασία
- CFL I: σύνδεση πόλεων που απέχουν μεγάλες αποστάσεις και έχουν εθνική σημασία
- CFL II: σύνδεση πόλεων με μεσαίας τάξης απόσταση και με περιφερειακή σημασία
- CFL III: σύνδεση μεταξύ πόλεων ή αστικών περιοχών που απέχουν μικρές αποστάσεις και έχουν τοπική σημασία
- CFL IV: σύνδεση τοπικών περιοχών χωρίς κεντρικές λειτουργίες
- CFL V: σύνδεση των γειτονιών μεταξύ των οικοδομικών τετραγώνων

Η κατάταξη του δικτύου στα 6 προαναφερθέντα επίπεδα λειτουργικής ιεράρχησης γίνεται μέσα από μια διαδικασία στην οποία εντοπίζονται συνδέσεις που συσχετίζονται.

category group		motorway	rural road	urban through road without frontage development	urban through road with frontage development	road serving developments
		MR	RR	TR	UR	SR
continental	0	MR 0		-	-	-
long-distance	I	MR I	RR I		-	-
medium-distance	II	MR II	RR II	TR II		-
regional	III	-	RR III	TR III	UR III	
local	IV	-	RR IV	-	UR IV	SR IV
vicinity	V	-	RR V	-	-	SR V

not common
problematic

-

Σχήμα 2: Κατηγορίες οδών σε συνδυασμό με το επίπεδο εξυπηρέτησης της συνδεσιμότητας όπως εμφανίζονται στο RIN (πηγή: Friedrich M. (2016). Functional Structuring of Road Networks).

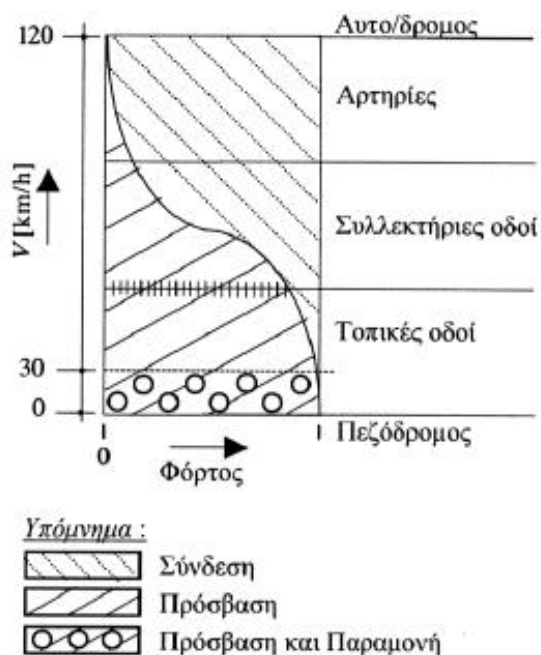
2.1.3. Ιεράρχησης Οδών στην Ελλάδα

Στα ελληνικά δεδομένα η κατάταξη των οδών με βάση το σκοπό λειτουργίας τους διατυπώνεται και αναπτύσσεται μέσα από τις οδηγίες ΟΜΟΕ-ΛΚΟΔ, οι οποίες στηρίχθηκαν στις αντίστοιχες γερμανικές οδηγίες RAS-N/88 και κανονισμούς από άλλες χώρες.

Σύμφωνα με τις ελληνικές οδηγίες, οι **λειτουργίες** που εμφανίζονται σε μία οδό, ή απαιτείται να εξυπηρετηθούν από μία οδό, μπορούν να καταταγούν σε τρεις ομάδες, οι οποίες συνυπάρχουν στο οδικό δίκτυο σε διαφορετική ένταση:

- λειτουργία σύνδεσης: μεταφορά ανθρώπων και αγαθών, συναντάται κυρίως σε υπεραστικές και ημιαστικές οδούς,
- λειτουργία πρόσβασης (στις παρόδιες χρήσεις γης): άμεση πρόσβαση σε παρόδιες χρήσεις γης, συναντάται σε οδούς εντός δομημένων περιοχών και

- λειτουργία παραμονής (επί της οδού): η παραμονή των ανθρώπων επί της οδού που δημιουργείται από τα παρόδιες χρήσεις και τη δόμηση του αστικού χώρου (π.χ. περίπατος, σχολεία και χώροι αναψυχής παρά την οδό, χώροι πρασίνου και ανάπαυσης). ταχύτητας,



Σχήμα 3: Συσχέτιση ταχύτητας, φόρτου και των τριών λειτουργικών κατηγοριών οδού, πηγή: Οδηγία Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) 1 - Άρθρο 2: Κατηγορίες οδών.

Με βάση τις τρεις αυτές βασικές λειτουργίες διακρίνονται στο αστικό οδικό δίκτυο οι εξής λειτουργικές βαθμίδες:

1. Οδικές αρτηρίες: Οι αρτηρίες είναι οι οδοί των οποίων κύριος ρόλος είναι η σύνδεση των περιοχών και οι μετακινήσεις των ατόμων. Τέτοιες οδοί αποτελούν οι αυτοκινητόδρομοι, οι οδοί ταχείας κυκλοφορίας καθώς και οι κύριες και δευτερεύουσες αρτηρίες.
2. Συλλεκτήριες οδοί: Οι συλλεκτήριες είναι υπεύθυνες για τη διανομή της κυκλοφορίας στις διάφορες χρήσεις, εξυπηρετούν δηλαδή βασικά την λειτουργία της πρόσβασης. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι κύριες και δευτερεύουσες συλλεκτήριες.
3. Τοπικές οδοί: Οι τοπικές οδοί εξυπηρετούν τόσο την πρόσβαση όσο και την παραμονή. Σε αυτές τα οχήματα κινούνται με χαμηλές ταχύτητες και επομένως είναι φιλικές προς όλους τους χρήστες –πεζούς, ποδηλάτες.

Οι οδοί κατατάσσονται ακόμα σε ομάδες βάσει της θέσης που έχουν σε σχέση με τη παρόδια δόμηση αλλά και βάσει των διαφόρων χρήσεων που συναντώνται σε αυτή. Πιο συγκεκριμένα αναπτύσσονται οι εξής πέντε ομάδες οδών:

Ομάδα Α	<ul style="list-style-type: none"> Οδοί που διατρέχουν περιοχές εκτός σχεδίου (υπεραστικές) με βασική λειτουργία τη σύνδεση και με περιορισμούς στην εξυπηρέτηση παροδίων ιδιοκτησιών.
Ομάδα Β	<ul style="list-style-type: none"> Οδοί που διατρέχουν περιοχές εντός σχεδίου (ημιαστικές και αστικές) με βασική λειτουργία τη σύνδεση και με περιορισμούς στην εξυπηρέτηση των παροδίων ιδιοκτησιών
Ομάδα Γ	<ul style="list-style-type: none"> Οδοί που διατρέχουν περιοχές εκτός** ή εντός σχεδίου (περιαστικές και αστικές) με βασική λειτουργία τη σύνδεση και με δυνατότητα εξυπηρέτησης των παροδίων ιδιοκτησιών
Ομάδα Δ	<ul style="list-style-type: none"> Οδοί σε περιοχές εντός σχεδίου (αστικές) με βασική λειτουργία την πρόσβαση
Ομάδα Ε	<ul style="list-style-type: none"> Οδοί σε περιοχές εντός σχεδίου (αστικές) με βασική λειτουργία την παραμονή

Οι διάφορες οικιστικές περιοχές, που συνδέονται υπεραστικά, όπως και τα διάφορα αστικά κέντρα, που συνδέονται ενδοοικιστικά, παρουσιάζουν επίπεδα σημαντικότητας ανάλογα με τον χωροταξικό και πολεοδομικό σχεδιασμό. Σχηματίζεται δηλαδή ανάλογα με τις λειτουργίες που εξυπηρετούν μια ιεράρχηση των κέντρων, η οποία καθορίζει και τη λειτουργική ιεράρχηση των οδών που τις διατρέχουν. Οι ομάδες Α-Ε, λοιπόν, διακρίνονται σε υποομάδες όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

	Χαρακτηρισμός οδού	Κατηγορία οδού	Εύρος ταχυτήτων διαδρομής [km/h]		
			εργάσιμες ημέρες	ημέρες αργιών	περίοδοι διακοπών
Υπεραστικές οδοί	Αυτο/δρόμος-Οδός ταχείας κυκλοφ.	A I	70 - 100	60 - 80	60 – 90
	Οδός μεταξύ νομών / επαρχιών	A II	60 - 90	50 - 70	50 – 80
	Οδός μεταξύ επαρχιών/οικισμών	A III	50 - 80	40 - 60	40 – 70
	Οδός μεταξύ μικρών οικισμών Συλλεκτήρια οδός	A IV	40 - 60	40 - 50	40 – 60
	Δευτερεύουσα οδός Αγροτική οδός	A V	καμία	καμία	Καμία
	Τριτεύουσα οδός Δασική οδός	A VI	καμία	καμία	Καμία
Ημιαστικές και Αστικές οδοί	Αστικός αυτοκινητόδρομος	B I	50 - 60	50 - 60	50 – 60
	Αστική οδός ταχείας κυκλοφορίας	B II	40 - 50	40 - 50	40 - 60
	Αστική αρτηρία	B III	30 -40	30 - 40	30 - 50
	Κύρια συλλεκτήρια οδός	B IV	30	30	30 - 40
Αστικές οδοί	Αστική αρτηρία	Γ III	30 - 40	30 - 40	30 - 50
	Κύρια συλλεκτήρια οδός	Γ IV	30	30	30 - 40
	Συλλεκτήρια οδός	Δ IV	20 - 30	20 - 30	20 - 30
	Τοπική οδός	Δ V	καμία	καμία	καμία
	Τοπική οδός	Ε V	καμία	καμία	καμία
	Τοπική οδός κατοικιών	Ε VI	καμία	καμία	καμία

Σχήμα 4: Κατηγορίες Οδών και επιδιωκόμενη ταχύτητα διαδρομής ανά κατηγορία οδού, πηγή: Οδηγία Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) 1 - Άρθρο 2: Κατηγορίες οδών.

2.1.4. Ιεράρχηση Οδών κατά Open Street Map (OSM)

Το OpenStreetMap (OSM) είναι μια πλατφόρμα που παρέχει δωρεάν γεωγραφική πληροφορία. Ιδρύθηκε το 2004 ως ένα τοπικό εγχείρημα και πλέον έχει γίνει ένα διαδεδομένο, παγκόσμιο εργαλείο. Το ενημερωμένο περιεχόμενό του οφείλεται στην συνεισφορά του κοινού, αφού οι χρήστες είναι αυτοί που παρέχουν τα δεδομένα – volunteered geographic information (VGI). Εντοπισμοί με GPS, εναέριες εικόνες ή και γνώσεις των ντόπιων αποτελούν βασικές πηγές δεδομένων. Όπως είναι αναμενόμενο, λόγω του ότι τα δεδομένα δεν παρέχονται από έγκυρους φορείς, η ποιότητα, η ακρίβεια και η αξιοπιστία τους μπορεί να διαφέρει ανά περιοχή.

Το οδικό δίκτυο περιλαμβάνεται στα δεδομένα που μπορεί κανείς να αξιοποιήσει από την πλατφόρμα. Όσον αφορά την ιεράρχηση του οδικού δικτύου όπως έχει καταχωρηθεί για την υπό μελέτη περιοχή του Βερολίνου, είναι διαμορφωμένη όπως παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 1: Κατηγορίες Οδών όπως παρουσιάζονται στο OpenStreetMap¹.

Κατηγορία		Περιγραφή	Λειτουργικός χαρακτήρας (σύνδεση, πρόσβαση)	Προτεραιότητα Μέσων Μεταφοράς (βιώσιμες μεταφορές, μέσα μαζικής μεταφοράς, αυτοκίνητο)	Ταχύτητα (km/h)
motorway	Αυτοκινητόδρομος	Αυτοκινητόδρομοι υψηλής χωρητικότητας με διαχωρισμένες επιφάνειες κυκλοφορίας και ελεγχόμενη πρόσβαση.	Σύνδεση	Αυτοκίνητο	130
trunk	Λεωφόρος – Ταχείας κυκλοφορίας	Μετά τους αυτοκινητόδρομους, αποτελούν τις πιο σημαντικές οδούς για το κυκλοφοριακό σύστημα της χώρας.	Σύνδεση	Αυτοκίνητο	90
primary	Πρωτεύον Δρόμος, Κύρια Οδός	Βασικές οδοί που συνδέουν μεγάλες πόλεις.	Σύνδεση	Αυτοκίνητο	70
secondary	Δευτερεύων Δρόμος, Δευτερεύουσα Οδός	Δρόμοι που συνδέονται με τις κύριες οδούς και συχνά συνδέουν τα κέντρα των περιοχών μιας πόλης.	Σύνδεση	Αυτοκίνητο	70
tertiary	Τριτεύων Δρόμος	Οδοί που συνδέουν τοπικούς δρόμους με το κύριο οδικό δίκτυο.	Σύνδεση και Πρόσβαση	Αυτοκίνητο	50
residential	Οικιστική, Αστική, Τοπική Οδός	Οδοί που παρέχουν πρόσβαση στις κατοικίες, χωρίς να συνδέουν περιοχές.	Πρόσβαση	Αυτοκίνητο	50

¹ <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:highway>

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Πλαίσιο

unclassified	Μη Κατηγοριοποιημένος Δρόμος	Μικρής σημασίας δρόμοι που συνήθως ενώνουν χωριά.	Σύνδεση και Πρόσβαση	Αυτοκίνητο	30
service	Οδός εξυπηρέτησης της πρόσβασης	Δίοδοι για πρόσβαση σε κτίριο, πρατήρια καυσίμων, παραλίες, κατασκηνώσεις, βιομηχανικά πάρκα κ.α.	Πρόσβαση	Αυτοκίνητο	

Ειδικές Κατηγορίες Οδών					
living_street	Οδός σε περιοχή κατοικίας	Οδοί με πολύ χαμηλές ταχύτητες και περιβάλλον φιλικό στον πεζό. Στις οδούς κατοικίας οι πεζοί έχουν προτεραιότητα σε σχέση με τα αυτοκίνητα.	Πρόσβαση	Βιώσιμες Μεταφορές	
pedestrian	Πεζόδρομοι	Οδοί ή χώροι από τους οποίους αποκλείεται η μηχανοκίνητη κυκλοφορία (εκτός ίσως συγκεκριμένων οχημάτων).	Πρόσβαση	Βιώσιμες Μεταφορές	
track	Χωματόδρομοι	Δρόμοι που χρησιμοποιούνται κυρίως για πρόσβαση σε γεωργικές, αγροτικές, υπαίθριες δραστηριότητες	Πρόσβαση	Αυτοκίνητο	
bus_guideway	Διάδρομοι για λεωφορεία	Διάδρομοι για λεωφορεία που μοιάζουν με γραμμές τραίνου και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλα μέσα μεταφοράς.	Σύνδεση	Μέσα Μαζικής Μεταφοράς	
escape	Ράμπα έκτακτης ανάγκης	Ράμπες – Λωρίδες διαφυγής, οι οποίες βρίσκονται παράλληλα σε μια οδό που κατηφορίζει ώστε να σταματούν εκεί οχήματα που αντιμετωπίζουν πρόβλημα με τα φρένα.			
raceway	Διαδρομή ή πίστα για αγώνες (μηχανοκίνητων οχημάτων)			Αυτοκίνητο	

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Πλαίσιο

road	Δρόμος άγνωστης ιεράρχησης				
busway	Δρόμοι αποκλειστικής διέλευσης λεωφορείων	Οδοί που χρησιμοποιούνται από τα μέσα μαζικής μεταφοράς και οι οποίες δίνουν προτεραιότητα στα λεωφορεία όταν σε διασταυρώσεις συναντώνται με άλλα μέσα.	Σύνδεση	Μέσα Μαζικής Μεταφοράς	
construction	Δρόμος υπό κατασκευή				

Μονοπάτια					
footway	Διάδρομοι πεζών	Τα μονοπάτια είναι μικρής σημασίας δρόμοι που χρησιμοποιούνται βασικά από πεζούς αλλά και από ποδηλάτες.		Βιώσιμες Μεταφορές	
bridleway	Δρόμοι για ιππήλατους	Οι οδοί αυτοί συνήθως χρησιμοποιούνται και από πεζούς και ποδήλατα		Βιώσιμες Μεταφορές	
steps	Σκαλοπάτια	Μονοπάτια αποτελούνται από σκαλοπάτια		Βιώσιμες Μεταφορές	
corridor	Διάδρομοι εντός κτιρίων				
path	Μονοπάτι	Μονοπάτια γενικής χρήσης ή απροσδιόριστης, στα οποία δεν επιτρέπεται η πρόσβαση μηχανοκίνητων οχημάτων		Βιώσιμες Μεταφορές	
cycleway	Ποδηλατόδρομος	Υποδεικνύονται για χρήση αποκλειστικά από ποδήλατα		Βιώσιμες Μεταφορές	

Σύνδεσμοι Οδών					
trunk_link	Σύνδεση Λεωφόρου				
primary_link	Σύνδεση Πρωτεύοντος Οδού				

secondary_link	Σύνδεση Δευτερεύοντος Οδού				
tertiary_link	Σύνδεση Τριτεύοντος Οδού				

2.1.5. Συμπεράσματα

Το κλασσικό σύστημα λειτουργικής ιεράρχησης είναι, συμπερασματικά, ένα σύστημα που δεν ανταποκρίνεται στις σημερινές ανάγκες της κοινωνίας, που θέλουν την οργάνωση και τον σχεδιασμό των οδών να είναι κοινωνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμα. Το ισχύον κυκλοφοριακό σύστημα δίνει προτεραιότητα στην κίνηση του αυτοκινήτου –αυτοκίνητο-κεντρικό- και αποκλείει σε μεγάλο βαθμό την πεζή και μαζική μετακίνηση και τη μικροκινητικότητα. Αυτό έχει πλήθος αρνητικών επιπτώσεων ανάμεσα στις οποίες είναι η έλλειψη ασφάλειας, η περιβαλλοντική επιβάρυνση και η απουσία κοινωνικοποίησης των ανθρώπων, η κυκλοφοριακή συμφόρηση.

Επομένως η στροφή των μελετητών, από μια αυτοκίνητοκεντρική σε μια ανθρωποκεντρική προσέγγιση της ιεράρχησης των οδών, κρίνεται απαραίτητη. Η αλλαγή αυτή θα επηρέαζε σε υπερτοπική κλίμακα την οργάνωση της κυκλοφορίας. Για να επιτευχθούν, όμως, η βιωσιμότητα και η ασφάλεια και σε τοπικό επίπεδο μέτρα και πολιτικές ηπιοποίησης της κυκλοφορίας θα συμβάλλουν καταλυτικά.

2.2. Μέτρα ήπιας κυκλοφορίας σε τοπικό επίπεδο

Αφού έχει καθοριστεί η ιεράρχηση της οδού, επομένως της έχει αποδοθεί σαφής λειτουργία, μπορούν να σχεδιαστούν ανάλογα και μέτρα για ηπιοποίηση της κυκλοφορίας σε αυτή. Μέτρα δηλαδή που καταφέρνουν να μειώσουν την ταχύτητα με αποτέλεσμα να βελτιώσουν την οδική ασφάλεια των πόλεων αλλά και να αποτρέψουν την χρήση του αυτοκινήτου, δίνοντας χώρο σε άλλα μέσα μεταφοράς, ενώ καθιστούν την περιοχή πιο βιώσιμη.



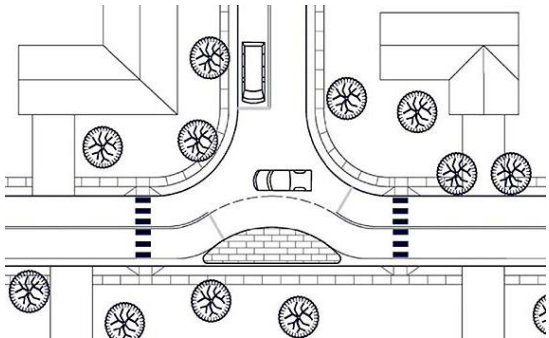
Όσον αφορά την εφαρμογή μέτρων ήπιας κυκλοφορίας, επιλέγεται να διαμορφώνονται σε ολόκληρες περιοχές, και όχι σε μεμονωμένες οδούς ή κόμβους. Η εφαρμογή αυτών σε συγκεκριμένα μόνο σημεία θα έλυνε ίσως κάποια προβλήματα σημειακά, ωστόσο παράλληλα θα μετέθετε την κυκλοφορία σε γειτονικές οδούς με αποτέλεσμα να προκληθούν κυκλοφοριακά και άλλα προβλήματα στην ευρύτερη περιοχή. Επιπλέον, τα μέτρα διαφέρουν ανάλογα με την κατηγορία της οδού στην οποία εφαρμόζονται, για παράδειγμα αρτηρία ή τοπική οδός, ενώ σύμφωνα με την έρευνα (Hernán Gonzalo-Ordona et al, 2016) καλύτερα αποτελέσματα για τη μείωση των ταχυτήτων επιτυγχάνεται όταν σε ένα δρόμο εφαρμόζονται πάνω από ένα μέτρα ήπιας κυκλοφορίας και σε όχι και τόσο μεγάλη απόσταση μεταξύ τους.

Τα μέτρα ήπιας κυκλοφορίας διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Μέτρα που στοχεύουν στη μείωση της ταχύτητας (μέτρα που προκαλούν οριζόντια ή κάθετη εκτροπή της κίνησης των οχημάτων και μέτρα που στοχεύουν στην στένωση της οδού)
- Μέτρα που στοχεύουν στη μείωση του κυκλοφοριακού φόρτου (μέτρα διαχείρισης της κυκλοφορίας που αναγκάζουν τους οδηγούς σε αλλαγή πορείας)

- Μέτρα που στοχεύουν στην αναβάθμιση του περιβάλλοντος (οπτική μείωση του πλάτους της οδού –φωτιστικά, δέντρα, αλλαγή των υλικών ή του χρώματος του οδοστρώματος, κατασκευές-πύλες σε εισόδους, επίπλωση της οδού)

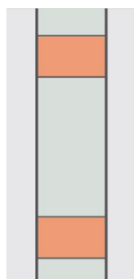
Πίνακας 2: Μέτρα Ήπιας Κυκλοφορίας.

Μέτρα Ήπιας Κυκλοφορίας	
<p>ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΕΚΤΡΟΠΗ: Εμποδίζει τον οδηγό από το να κινείται σε ευθεία. Η μεταβολή της πορείας αποτρέπει τον οδηγό από τα να διτηρεί την ταχύτητά του καθώς ακολουθεί τη διαδρομή που δημιουργεί το μέτρο.</p>	
<p><u>Οφιοειδής διάταξη δρόμου (Chicanes and Lane Shifts)</u></p> <p>Μια σειρά από εναλλάσσουσες καμπύλες ή εναλλαγές λωρίδας. Η τεθλασμένη χάραξη του διαδρόμου κίνησης των οχημάτων τα αναγκάζει να μη κινούνται σε ευθεία. Τοποθετούνται κατάλληλες κατασκευές στα μέσα του οικοδομικού τετραγώνου αλλά μπορεί και σε όλο το μήκος του αν είναι σχετικά μικρό. Συνήθως αποτελείται από τουλάχιστον τρεις στη σειρά καμπύλες, αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις που αποτελείται από μια μόνο καμπύλη «Lateral Shift». Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται και για την οργάνωση της στάθμευσης παρά την οδό. Η προέκταση του πεζοδρομίου με καμπύλες δημιουργούν ένα οφιοειδές σχήμα στο δρόμο αναγκάζοντας τους οδηγούς να κινούνται με χαμηλότερη ταχύτητα.</p>	 <p>Σχήμα 5: Ενδεικτική απεικόνιση και παράδειγμα οφιοειδούς διάταξης δρόμου.</p>  <p>Σχήμα 6: Ενδεικτικό παράδειγμα οφιοειδούς διάταξης δρόμου.</p>
<p><u>Αλλαγή ευθυγραμμίας διασταύρωσης τύπου «T» (Realigned Intersection)</u></p> <p>Οι συγκεκριμένες παρεμβάσεις αλλάζουν την ευθυγραμμία των διασταυρώσεων τύπου «T», αναδιαμορφώνοντας τις προσεγγίσεις του κόμβου από κάθετες γωνίες σε καμπύλες ή εκτρέποντας την άλλοτε ευθεία κίνηση στην κορυφή του «T». Αλλιώς αποκαλούνται τροποποιημένες διασταυρώσεις «modified intersections» και είναι από τα λίγα μέτρα ήπιας κυκλοφορίας που μπορούν να</p>	 <p>Σχήμα 7: Ενδεικτική απεικόνιση αλλαγής ευθυγραμμίας διασταύρωσης τύπου «T».</p>

<p>εφαρμοστούν σε τρισκελείς διασταυρώσεις.</p>	
<p><u><i>Κυκλικόί κόμβοι (Roundabout & Traffic circles)</i></u> Πρόκειται για κεντρικές κυκλικές νησίδες, τοποθετημένες σε διασταυρώσεις, γύρω από τις οποίες τα οχήματα διαγράφουν κυκλική πορεία. Οι κυκλικόί κόμβοι μειώνουν την ταχύτητα των οχημάτων αναγκάζοντας τους οδηγούς να κινηθούν κυκλικά και αποκόβοντας την ορατότητα της ευθείας. Αυξάνουν την οδική ασφάλεια, προσθέτοντας παράλληλα αισθητική αξία στο χώρο. Στους μεγάλους κυκλικούς κόμβους καμιά φορά συναντάται και φωτεινή σηματοδότηση.</p>	 <p>Σχήμα 8: Ενδεικτικό παράδειγμα κυκλικού κόμβου.</p>  <p>Σχήμα 9: Ενδεικτικό παράδειγμα μικρού κυκλικού κόμβου.</p>
<p><u><i>Μικροί Κυκλικόί Κόμβοι (Mini Roundabouts)</i></u> Οι μικροί κυκλικόί κόμβοι επιλέγονται σε επίπεδο γειτονιάς, σε μη σηματοδοτούμενους κόμβους για να μειώσουν τις ταχύτητες. Ακόμη οι κυκλικόί κόμβοι είναι πλήρως προσπελάσιμοι από τα οχήματα.</p>	 <p>Σχήμα 10: Ενδεικτικό παράδειγμα μικρού κυκλικού κόμβου.</p>
<p>ΚΑΘΕΤΗ ΕΚΤΡΟΠΗ: Δημιουργεί υψομετρική διαφορά στο δρόμο αναγκάζοντας τον οδηγό να μειώσει ταχύτητα για να αισθάνεται ασφαλής και άνετος.</p>	

Οδικές υβώσεις (Speed Humps)

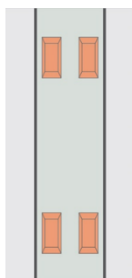
Υπερυψωμένες επιφάνειες κυκλικής διατομής, οι οποίες καλύπτουν όλο το πλάτος του οδοστρώματος και συνήθως αφήνεται ένα αυλάκι για την αποστράγγιση. Οι διαστάσεις εξαρτώνται από τις ταχύτητες που κρίνεται πως πρέπει να εφαρμοστούν στο δρόμο. Τοποθετείται σε κατοικημένες περιοχές και όχι σε αστικά κέντρα.



Σχήμα 11: Ενδεικτική απεικόνιση και παράδειγμα οδικής ύβωσης.

“Μαξιλάρια” (Speed Cushion)

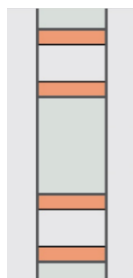
Τα μαξιλάρια είναι υβώσεις όπως οι προαναφερθείσες με μόνη διαφορά κάποια ανοίγματα. Έχουν πλάτος όσο ενός οχήματος και συνήθως τοποθετούνται 2-3 κατά πλάτος του οδοστρώματος. Επιτρέπουν ουσιαστικά την ανεμπόδιστη διέλευση μεγάλων οχημάτων και μοτοσικλετιστών, ενώ αναγκάζουν τα αυτοκίνητα να μειώσουν ταχύτητα.



Σχήμα 12: Ενδεικτική απεικόνιση και παράδειγμα “μαξιλαριών”.

Πλατώ (Speed Tables)

Τα πλατώ είναι επίσης υβώσεις με επίπεδη επιφάνεια και συνήθως έχουν μήκος 6-9μ. Μπορούν επίσης να αποτελούν διαβάσεις πεζών (υπερυψωμένες διαβάσεις), σε μια διασταύρωση ή στη μέση του οικοδομικού τετραγώνου. Είναι κατάλληλα για την διέλευση οχημάτων μεγάλου μήκους, όπως τα λεωφορεία.



Σχήμα 13: Ενδεικτική απεικόνιση και παράδειγμα πλατώ ταχύτητας.

Υπερυψωμένες διασταυρώσεις (Raised Intersections)

Όπως οι υβώσεις με επίπεδη επιφάνεια στην κορυφή και ράμπες, καλύπτουν όμως μια διασταύρωση σε όλο το μήκος και το εύρος της. Συχνά κατασκευάζονται με αδρά υλικά, όπως οι πλίνθοι. Είναι κατάλληλα για διασταυρώσεις που απαιτούν χαμηλές ταχύτητες αλλά και σε εισόδους-πύλες. Δεν αποτελούν εμπόδιο για τη διέλευση λεωφορείων.

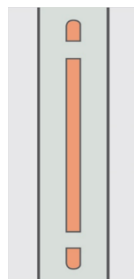


Σχήμα 14: Ενδεικτικό παράδειγμα υπερυψωμένης διάβασης.

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΑΤΟΥΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: στένωση της λωρίδας κίνησης των οχημάτων ώστε ο οδηγός να χρειάζεται να ελαττώσει ταχύτητα για να νιώσει άνετα να διασχίσει την οδό. Έτσι καθίσταται ασφαλέστερη και η διάσχιση του δρόμου από πεζούς.

Νησίδες πεζών (Medians and Refuge Islands)

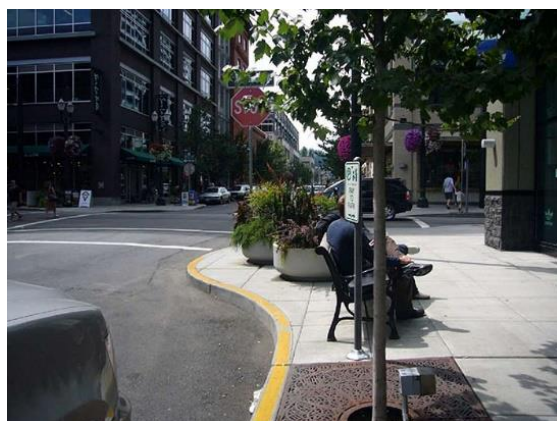
Υπερυψωμένες νησίδες και πλατώ για τους πεζούς χρησιμοποιούνται για να μειώσουν το πλάτος της λωρίδας και να κάνουν επομένως τους δρόμους στενότερους. Ακόμα χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν την κυκλοφορία σε διασταυρώσεις ή να εμποδίζουν την είσοδο σε σημεία.



Σχήμα 15: Ενδεικτική απεικόνιση και παράδειγμα νησίδας πεζών.

Επεκτάσεις γωνιών (Corner Extension/Bulb-Out)

Επεκτάσεις του πεζοδρομίου κυρίως στις γωνίες των οικοδομικών τετραγώνων, οι οποίες δίνουν την εντύπωση στένωσης του δρόμου. Εκτός από τη μείωση της ταχύτητας των οχημάτων το μέτρο αυτό βελτιώνει την ορατότητα των πεζών στο δρόμο αλλά και την απόσταση που χρειάζεται να διανύσουν για να διασχίσουν τον δρόμο, ενώ λόγω του επιπλέον χώρου που διατίθεται στο πεζοδρόμιο μπορεί με κατάλληλες υποδομές και αρχιτεκτονικές



Σχήμα 16: Ενδεικτικό παράδειγμα επέκτασης γωνίας πεζοδρομίου.

<p>παρεμβάσεις να αναβαθμιστεί ο περιβάλλον χώρος.</p>	
<p><u>Επέκταση πεζοδρομίου (Choker)</u></p> <p>Προεκτάσεις πεζοδρομίου στο κέντρο του οικοδομικού τετραγώνου. Ο δρόμος γίνεται πιο στενός εξαιτίας των προεξοχών του πεζοδρομίου και επομένως οι οδηγοί μειώνουν ταχύτητα, ενώ αν η οδός είναι διπλής διέλευσης τα οχήματα θα πρέπει να περνούν κατά προτεραιότητα. Συχνά στο σημείο αυτό υπάρχει και διάβαση πεζών.</p>	 <p>Σχήμα 17: Ενδεικτική απεικόνιση επέκτασης πεζοδρομίου.</p>
<p><u>Μείωση των λωρίδων (Road Diet)</u></p> <p>Αναθεώρηση της χρήσης ή του πλάτους της λωρίδας για να καταλήξει στον ελάχιστο αριθμό και με την ελάχιστη διατομή. Συνήθως εφαρμόζεται σε οδούς τεσσάρων λωρίδων με δυο κατευθύνσεις μετατρέποντάς την σε οδό με τρεις λωρίδες – μια λωρίδα ανά κατεύθυνση και μια κεντρική διπλής κατεύθυνσης για αριστερές στροφές. Εναλλακτικά κάποια λωρίδα παραχωρείται σε άλλο μέσο μετακίνησης, σε στάθμευση ή σε υποδομές πεζών.</p>	 <p>Σχήμα 18: Ενδεικτικό παράδειγμα μείωσης λωρίδων οδού.</p>
<p>ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ: αποτρέπει συγκεκριμένες κινήσεις των οχημάτων σε μια διασταύρωση και στοχεύει στη μείωση της κυκλοφορίας.</p>	
<p><u>Εκτροπείς Κυκλοφορίας (Diverters)</u></p> <p>Εμπόδια που τοποθετούνται υπό γωνία σε τετρασκελείς διασταυρώσεις, αποτρέποντας την κίνηση σε ευθεία. Οι περιορισμοί σε κίνηση και πρόσβαση, είναι τακτικές που οδηγούν σε σημαντική μείωση του όγκου της κυκλοφορίας και άρα προσφέρουν μεγαλύτερη άνεση στην κίνηση των ποδηλατιστών.</p>	 <p>Σχήμα 19: Ενδεικτική απεικόνιση και παράδειγμα εκτροπών κυκλοφορίας.</p>

Αποκλεισμός οδού (Closure)

Προσωρινές πεζοδρομήσεις που γίνονται είτε μέχρι τη μέση της οδού είτε σε όλο το πλάτος της. Ουσιαστικά εφαρμόζονται είτε για να δημιουργήσουν έναν δρόμο μονής κατεύθυνσης είτε για να αποκλείσουν τα οχήματα από μια οδό, παραχωρώντας έτσι χώρο σε πεζούς και ποδηλάτες.



Σχήμα 20: Ενδεικτικό παράδειγμα κλεισίματος οδού.



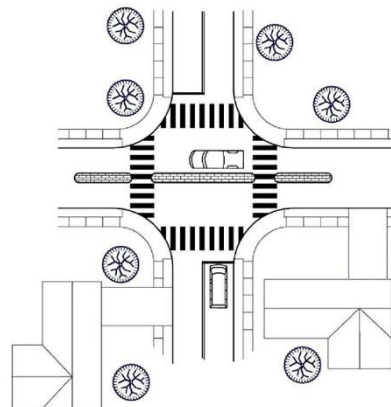
Σχήμα 21: Ενδεικτικό παράδειγμα μερικού κλεισίματος οδού.

Διάμεσο Φράγμα/ Νησίδα στροφής (Median Barrier/Forced Turn Island)

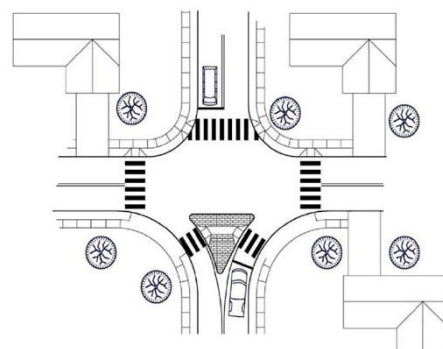
Το διάμεσο φράγμα είναι μια υπερυψωμένη νησίδα που τοποθετείται στη μέση μιας διασταύρωσης για να εμποδίσει τον οδηγό να διανύσει ευθεία την διασταύρωση, ενώ σχεδιάζεται και για να επιτρέπει στροφές από τους κεντρικούς στους δευτερεύοντες άξονες.

Μια νησίδα αναγκαστικής στροφής είναι μια νησίδα τυπικά τριγωνικού σχήματος, τοποθετημένη στο στόμιο μιας διασταύρωσης, η οποία διοχετεύει την κυκλοφορία προς τα δεξιά.

Και τα δυο εμπόδια χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν τις ροές κυκλοφορίας των οχημάτων.



Σχήμα 22: Ενδεικτική απεικόνιση διάμεσου φράγματος.



Σχήμα 23: Ενδεικτική απεικόνιση νησίδας στροφής.

ΑΛΛΕΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ ΗΠΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

Κτίρια και Δέντρα (Buildings and Trees)

Η ύπαρξη κτιρίων και δέντρων παρά την οδό δημιουργούν στον οδηγό την αίσθηση ενός αστικού γεμάτου χώρου και όχι ενός αυτοκινητόδρομου, επομένως οι οδηγοί δεν αναπτύσσουν μεγάλες ταχύτητες.



Σχήμα 24: Ενδεικτικό παράδειγμα οδού με κτίρια και δέντρα.

Υλικά πεζοδρομίου κα εμφάνιση (Pavement Materials and Appearance)

Οι αλλαγές σε ένα τμήμα της οδού γίνονται είτε χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά ή χρωματίζοντας το συγκεκριμένο τμήμα σε συνδυασμό με κάποια οριζόντια σήμανση. Η χρήση συνήθως αδρών υλικών στο οδόστρωμα τaráσσει ελαφρώς τους οδηγούς και γι' αυτό μειώνουν ταχύτητα. Ο χρωματισμός του οδοστρώματος και οι σημάνσεις προειδεάζουν τον οδηγό για μια αλλαγή στην περιοχή και τους αναγκάζουν να προσαρμόσουν την ταχύτητά τους.



Σχήμα 25: Ενδεικτικό παράδειγμα αδρών και χρωματιστών υλικών πεζοδρομίου.

Διάταξη πύλης (Gateway Features)

Κατασκευές ή σημάνσεις που προειδοποιούν τους οδηγούς ότι εισέρχονται σε περιοχή ήπιας κυκλοφορίας.



Σχήμα 26: Ενδεικτικό παράδειγμα σήμανσης εισόδου σε περιοχή με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Οριζόντια ή/και κάθετη σήμανση

Οριζόντια σήμανση με απλές πινακίδες (ήπιας κυκλοφορίας ή με όρια ταχύτητας) ή με ειδικές που να συνοδεύονται από κάποιο φωτεινό σηματοδότη. Η κάθετη σήμανση περιλαμβάνει οριοθετήσεις του χώρου (λωρίδες, θέσεις στάθμευσης), όρια ταχύτητας ή χαρακτηρισμός λωρίδας (π.χ. για ποδήλατα), ακόμα και ιδιαίτερες διαβάσεις πεζών.



Σχήμα 27: Ενδεικτικό παράδειγμα κάθετης σήμανσης (αριστερά) και οριζόντιας σήμανσης (δεξιά).

Φωτεινοί Σηματοδότες (Signal Progression)

Οι φωτεινοί σηματοδότες που λειτουργούν περιοδικά μπορούν να κάνουν τους οδηγούς να επιβραδύνουν κατά μήκος ενός δρόμου που διαφορετικά θα αύξαναν ταχύτητα. Ακόμα η απόδοση περισσότερου χρόνου πρασίνου σε ορισμένες κινήσεις, επιτρέπει την εν δυνάμει διέλευση μεγαλύτερου φόρτου. Σε περιπτώσεις, λοιπόν, κόμβων με συχνή διέλευση πεζών δύναται ο προγραμματισμός των φάσεων να γίνεται προς όφελος των πεζών.



Σχήμα 28: Ενδεικτικό παράδειγμα φαναριού πεζών.

Δρόμοι συνύπαρξης (Shared Space)

Σε ένα περιβάλλον χωρίς φυσικά εμπόδια πεζοί, ποδηλατιστές και αυτοκινητιστές μοιράζονται το χώρο. Σε μια μελέτη που διεξήχθη στο Exhibition Road στο Λονδίνο, οι Kararias και Wang (2020) παρατήρησαν πως η μέση ταχύτητα των οχημάτων μετά την εφαρμογή του μέτρου είχε μειωθεί κατά περίπου 3 έως 5 km/h σε σχέση με τις αρχικές ταχύτητες. Η μελέτη των Batista et al. (2022) διαπίστωσε ότι στον δρόμο συνύπαρξης, οι ταχύτητες των οχημάτων ήταν χαμηλότερες από 15 km/h που ήταν το



Σχήμα 29: Ενδεικτική απεικόνιση δρόμου συνύπαρξης.

όριο ταχύτητας στις εξεταζόμενες περιπτώσεις.	
---	--

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Βάση του συγκοινωνιακού σχεδιασμού αποτελεί η μελέτη και κατανόηση των κυκλοφοριακών συστημάτων. Ως σύστημα ορίζεται ένα σύνολο οντοτήτων των οποίων οι κινήσεις και οι αλληλεπιδράσεις στοχεύουν σε μια ισορροπία, ένα λογικό αποτέλεσμα. Ανάλογα με τους εκάστοτε στόχους της μελέτης του συστήματος μια ομάδα μεταβλητών χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα μια δεδομένη χρονική στιγμή. Τα συστήματα διακρίνονται σε συνεχή (continuous) και διακριτά (discrete). Στα συνεχή συστήματα οι μεταβλητές αλλάζουν με την εξέλιξη του χρόνου, ενώ στα διακριτά οι μεταβλητές αλλάζουν σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Στην πραγματικότητα σπάνια ένα μοντέλο είναι εξ ολοκλήρου συνεχές ή διακριτό.

Για την μελέτη των κυκλοφοριακών συστημάτων χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα. Τη στιγμή που οι αναλυτικές μαθηματικές προσεγγίσεις αδυνατούν να ανταπεξέλθουν στα εξαιρετικά πολύπλοκα προβλήματα της κυκλοφορίας, τα μοντέλα προσομοίωσης είναι εκείνα που καταφέρνουν να δώσουν τη λύση. Τα μοντέλα ή πρότυπα προσομοίωσης είναι μια τεχνική μοντελοποίησης – μαθηματικής προτυποποίησης η οποία μιμείται τη λειτουργία ενός πραγματικού μεταφορικού συστήματος καθώς αυτό αναπτύσσεται μέσα στον χρόνο (ή με παράμετρο τον χρόνο). Ένα μοντέλο έχει ως σκοπό τη διερεύνηση και κατανόηση της λειτουργίας και τρέχουσας συμπεριφοράς των οντοτήτων του συστήματος, τη σύγκριση εναλλακτικών τρόπων λειτουργίας και την εκτίμηση και πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς κάτω από διαφορετικές συνθήκες.

Ανάμεσα στα θετικά της χρήσης προσομοίωσης είναι ότι επιτρέπει τη δοκιμή, ανάλυση και αξιολόγηση πολλών εναλλακτικών σεναρίων, υφιστάμενων ή και μη υλοποιημένων, και σε διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες, σχετικά εύκολα, γρήγορα και οικονομικά. Ακόμα επιτρέπει τη μελέτη μεγάλων σύνθετων προβλημάτων, που άλλες παραδοσιακές μέθοδοι αδυνατούν να επιλύσουν. Στον αντίποδα, θα πρέπει να σημειωθεί πως η προσομοίωση απαιτεί πολλές επαναλήψεις για να είναι αξιόπιστη, και το τελικό αποτέλεσμα δεν θα πρέπει να λαμβάνεται αδιαμφισβήτητα αλλά να κρίνεται ανάλογα. Φυσικά η αρχική ανάπτυξη του μοντέλου απαιτεί χρόνο, χρήμα και κατάλληλα δεδομένα.

Στην κυκλοφοριακή προσομοίωση που χρησιμοποιείται κατά τον συγκοινωνιακό σχεδιασμό, ανάλογα με τον βαθμό λεπτομέρειας που διαθέτουν τα μοντέλα, διακρίνονται στις εξής τρεις βασικές κατηγορίες:

- **Μακροσκοπικά μοντέλα:** όλα τα κυκλοφοριακά μεγέθη υπολογίζονται σε επίπεδο συνόλου. Οι οντότητες και οι δραστηριότητές τους περιγράφονται σε μικρό επίπεδο λεπτομέρειας – δεν μελετώνται ξεχωριστά.
- **Μεσοσκοπικά μοντέλα:** βασίζονται σε κάθε πράκτορα ξεχωριστά. Η συμπεριφορά των πρακτόρων καθορίζεται από τα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά του συνόλου, όπως η πυκνότητα και η μέση ταχύτητα. Οι πράκτορες δεν έχουν άμεση αλληλεπίδραση παρά μόνο στις διασταυρώσεις. Τα μεσοσκοπικά μοντέλα μοντελοποιούν την κυκλοφοριακή ροή με κάποιες απλοποιήσεις σε σχέση με τα μικροσκοπικά μοντέλα. Παρόλο που παρουσιάζουν βασικά χαρακτηριστικά της δυναμικής κίνησης, απαιτούν λιγότερα δεδομένα από τα μικροσκοπικά μοντέλα, ενώ παράλληλα αποδίδουν καλύτερα

χρονικά. Στην ουσία συνδυάζονται χαρακτηριστικά του μικροσκοπικού και του μακροσκοπικού μοντέλου.

- **Μικροσκοπικά μοντέλα:** μοντέλα αναπαριστούν με τον πιο ακριβή τρόπο την πραγματικότητα αλλά παράλληλα είναι και τα πιο ακριβά. Σκοπός τους γενικά είναι να μιμηθούν την πραγματική κυκλοφοριακή δυναμική, με τη μίμηση της ακολουθίας των οχημάτων, προσομοιώνοντας την συμπεριφορά των οδηγών για αλλαγή πορείας, χρησιμοποιώντας τη σύνθετη δυναμική των διασταυρώσεων κτλ. Κάθε πράκτορας αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του, δηλαδή με τους υπόλοιπους πράκτορες ως προς την ταχύτητα και τις αποστάσεις. Η κίνηση μοντελοποιείται ως συνεχής στο χώρο και στον χρόνο. Αποφάσεις σχετικά με την αλλαγή ταχυτήτων και κατευθύνσεων συνήθως σε χρονικά βήματα μικρότερα του 1 δευτερολέπτου. Η συνολική κυκλοφοριακή κατάσταση προκύπτει από τις αποφάσεις όλων των πρακτόρων.

Επομένως τα μακροσκοπικά μοντέλα είναι **αθροιστικά** μοντέλα που αναλύουν τα χαρακτηριστικά στο σύνολο του πληθυσμού που εξετάζεται. Τα αθροιστικά μοντέλα υπολογίζουν ποσοστά ή απόλυτα μεγέθη ζήτησης, βάσει μέσων χαρακτηριστικών του πληθυσμού. Τα μέσο και μικροσκοπικά μοντέλα αποτελούν **εξατομικευμένα** μοντέλα που αναλύουν τα χαρακτηριστικά και τις επιλογές του κάθε μετακινούμενου. Τα εξατομικευμένα μοντέλα υπολογίζουν την πιθανότητα κάθε μετακινούμενος να κάνει μια συγκεκριμένη επιλογή.

Τα μοντέλα προσομοίωσης διακρίνονται επίσης στα εξής:

✚ Στατικά ή Δυναμικά μοντέλα προσομοίωσης

Ένα **στατικό** μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά ένα σύστημα σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ή αναπαριστά ένα σύστημα στο οποίο ο χρόνος δεν έχει σημασία. Ένα **δυναμικό** μοντέλο, από την άλλη πλευρά, αναπαριστά ένα σύστημα, όπως αυτό εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου. Για να γίνει πιο σαφές, χρησιμοποιώντας το παράδειγμα καταμερισμού της κυκλοφορίας, κατά τη μελέτη των κυκλοφοριακών συνθηκών σε μια συγκεκριμένη περίοδο τα στατικά μοντέλα λαμβάνουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες ως σταθερές και ομοιόμορφες, ενώ αντίθετα τα δυναμικά μοντέλα αναπαριστούν χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας που με το χρόνο μεταβάλλονται.

✚ Ντετερμινιστικά ή Στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης

Τα **ντετερμινιστικά** μοντέλα δεν έχουν καθόλου τυχαίες μεταβλητές: όλες οι αλληλεπιδράσεις των οντοτήτων είναι προκαθορισμένες με συγκεκριμένες σχέσεις (μαθηματικές, στατιστικές ή λογικές). Τα **στοχαστικά** μοντέλα έχουν διαδικασίες οι οποίες περιλαμβάνουν συναρτήσεις πιθανότητας. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο ακολουθίας οχημάτων μπορεί να σχηματιστεί είτε ως ντετερμινιστική είτε ως στοχαστική σχέση προσδιορίζοντας τον χρόνο αντίδρασης του οδηγού ως μια σταθερή μεταβλητή ή ως μια τυχαία μεταβλητή, αντίστοιχα.

✚ Συνεχή ή Διακριτά μοντέλα προσομοίωσης

Τα **συνεχή** μοντέλα προσομοίωσης περιγράφουν πώς τα στοιχεία του συστήματος αλλάζουν κατάσταση συνεχώς στο χρόνο ανταποκρινόμενα στα συνεχή ερεθίσματα. Στα **διακριτά** μοντέλα προσομοίωσης οι μεταβλητές που περιγράφουν την κατάσταση κυκλοφορίας αλλάζουν σε καθορισμένες διακεκριμένες χρονικές στιγμές.

Ένα διακριτό μοντέλο δεν χρησιμοποιείται μόνο για την αναπαράσταση ενός διακριτού συστήματος και ένα διακριτό σύστημα δεν αναπαρίσταται μόνο από

ένα διακριτό μοντέλο προσομοίωσης. Η απόφαση για τη χρήση ενός διακριτού ή ενός συνεχούς μοντέλου για ένα συγκεκριμένο σύστημα, εξαρτάται από τους ιδιαίτερους στόχους της μελέτης.

Ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα που προβλέπουν την συμπεριφορά οδήγησης τα μοντέλα αναπτύσσονται είτε βάσει των ταξιδιών (trip-based models), είτε βάσει των δραστηριοτήτων των πρακτόρων (activity-based models), είτε βάσει της συμπεριφοράς των πρακτόρων (agent-based models).

3.1. Μοντέλο Διαδρομών ή Μοντέλο των τεσσάρων βημάτων (Trip – based model / Four – Steps Model)

Η πιο κλασσική προσέγγιση προτυποποίησης του σχεδιασμού των μεταφορών είναι το **μοντέλο των τεσσάρων βημάτων**:

1. Γένεση μετακινήσεων: απόφαση για πραγματοποίηση μετακίνησης για συγκεκριμένο σκοπό
2. Κατανομή των μετακινήσεων: επιλογή προορισμού
3. Καταμερισμός στα Μεταφορικά Μέσα: επιλογή μέσου μετακίνησης
4. Καταμερισμός στο Δίκτυο: επιλογή διαδρομής.

Η προσέγγιση αρχίζει με τον ορισμό της περιοχής μελέτης την οποία και θεωρεί ως σύστημα ζωνών, δηλαδή χωρικές ενότητες με όμοια πρωτογενή στοιχεία –ομοιογένεια στις χρήσεις γης, συμβατή διοικητική διαίρεση, όμοιοι σκοποί μετακίνησης κ.α. Μετά την απαραίτητη συλλογή των στοιχείων σχεδιασμού, αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο, το οποίο βαθμονομείται, για να προκύψουν οι προβλέψεις των μεταβλητών του σχεδιασμού, και ακολούθως εφαρμόζεται και ελέγχεται ως προς την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του.

Τα συλλεγόμενα στοιχεία είναι κοινωνικό – οικονομικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, και τα χαρακτηριστικά των μετακινήσεων για το έτος βάση. Έτος βάση ονομάζεται το έτος για το οποίο έχουν μετρηθεί οι μετακινήσεις μέσω κυκλοφοριακών ερευνών και μετρήσεων. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση του μοντέλου, τον έλεγχο της ορθότητας των προβλέψεων αλλά και τον προσδιορισμό της ακρίβειάς του (διαφορετικά στοιχεία από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην βαθμονόμηση). Η βάση δεδομένων που δημιουργείται για το έτος βάσης περιλαμβάνει:

- ✓ Τον **Πίνακα Προέλευσης – Προορισμού**: πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό των μετακινήσεων που γίνονται μεταξύ κάθε ζεύγους ζωνών της περιοχής μελέτης,
- ✓ **Κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά της κάθε ζώνης**: ο πληθυσμός, το εισόδημα, η ιδιοκτησία ΙΧ, μεγέθη οικονομικής δραστηριότητας, απασχόληση, χαρακτηριστικά εμπορικών δραστηριοτήτων, επιφάνεια καταστημάτων, χώρων γραφείου, βιομηχανικών εγκαταστάσεων, βιοτεχνίας κλπ., επιφάνεια χώρων εκπαίδευσης και αναψυχής κλπ.
- ✓ **Χαρακτηριστικά όλων των μεταφορικών συστημάτων**, όπως μορφή δικτύων, μήκος, κυκλοφοριακή ικανότητα, ταχύτητες ελεύθερης ροής, σχέσεις φόρτου – καθυστερήσεων, κόστος μετακίνησης για κάθε τμήμα του οδικού δικτύου, συχνότητα, κόστος και ταχύτητα των μέσων μαζικής μεταφοράς κα
- ✓ **Κυκλοφοριακές μετρήσεις** σε οδικά τμήματα και φόρτοι των MMM για την σύγκριση με τα τελικά αποτελέσματα του μοντέλου.

Αξιοποιώντας, λοιπόν, τα στοιχεία που έχουν συλλεχθεί για το έτος βάσης, υπολογίζονται μέσω του μοντέλου της γένεσης, οι μετακινήσεις που εκτιμάται ότι παράγει και προσελκύει κάθε ζώνη της περιοχής μελέτης στο μέλλον, δηλαδή οι μετακινήσεις που ξεκινούν και που καταλήγουν σε κάθε ζώνη. Στη συνέχεια με το μοντέλο της κατανομής υπολογίζεται πόσες από τις μετακινήσεις που παράγει κάθε ζώνη θα καταλήξουν σε κάθε μια από τις υπόλοιπες ζώνες. Η προσομοίωση γίνεται για κάθε δυνατό ζεύγος ζωνών με αποτέλεσμα να διαμορφωθεί ο πίνακας Προέλευσης-Προορισμού. Ακολούθως πραγματοποιείται ο καταμερισμός των μετακινήσεων στα διάφορα μεταφορικά μέσα. Για κάθε ζεύγος Προέλευσης-Προορισμού δημιουργείται και ένας Πίνακας Π-Π για κάθε μέσο μετακίνησης. Οι νέοι αυτοί πίνακες προκύπτουν βάσει: α) των στοιχείων που αφορούν την απόδοση των μεταφορικών συστημάτων και το επίπεδο εξυπηρέτησης που παρέχουν, και β) τον πίνακα των συνολικών μετακινήσεων. Στο τελικό βήμα του μοντέλου των τεσσάρων βημάτων προσδιορίζεται η διαδρομή που επιλέγει κάθε μετακινούμενος και επομένως κυκλοφοριακά μεγέθη, όπως ο κυκλοφοριακός φόρτος, οι χρόνοι διαδρομής, οι καθυστερήσεις του δικτύου κτλ.

3.2. Μοντέλο Δραστηριοτήτων (Activity – based Model)

Το μοντέλο δραστηριοτήτων έρχεται να καλύψει μια πολύ βασική παράλειψη του μοντέλου διαδρομών, την συμπεριφορά των ταξιδιωτών ανάλογα με το διαθέσιμο χρόνο και χώρο.

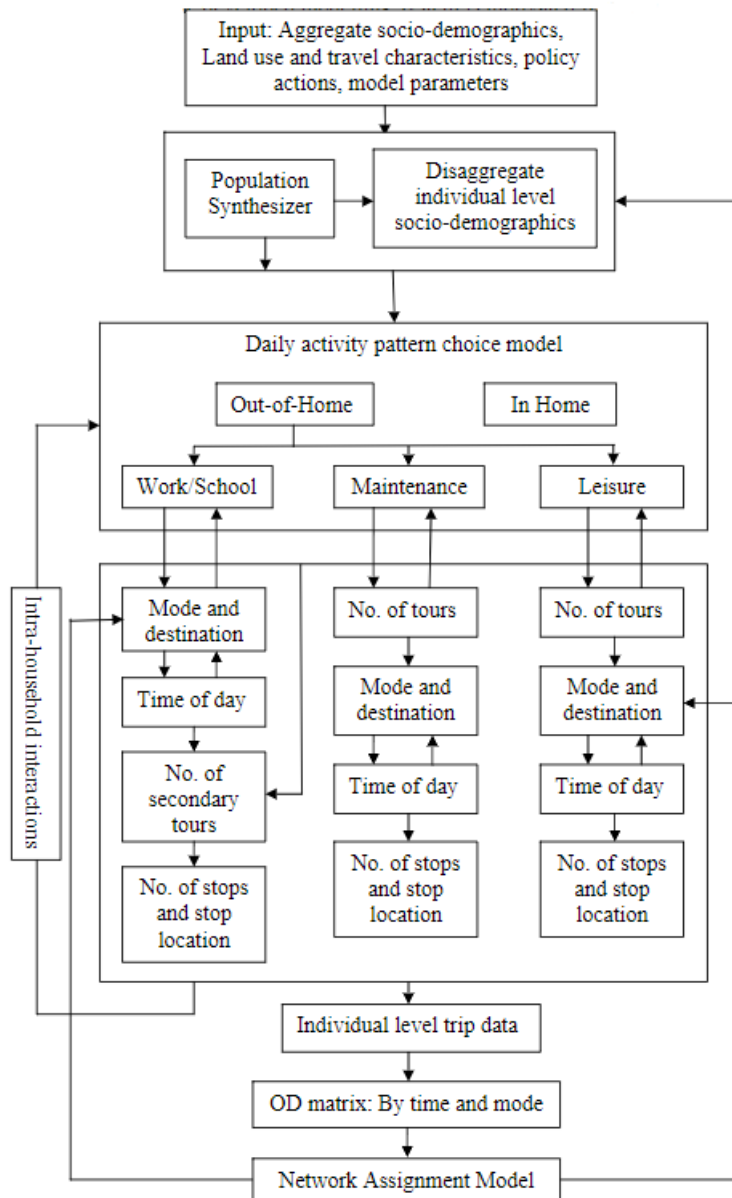
Βασικοί παράγοντες για την ανάπτυξη του μοντέλου αποτέλεσαν επίσης: οι αυξανόμενες απαιτήσεις πληροφόρησης από τα μοντέλα ζήτησης μετακινήσεων, η ανάγκη για αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας βραχυπρόθεσμων πολιτικών διαχείρισης της ζήτησης καθώς και η αναγνώριση των περιορισμών που έχει το μοντέλο διαδρομών σε θέματα εγκυρότητας και ακρίβειας των προβλέψεων.

Το μοντέλο δραστηριοτήτων προσφέρει ένα πλαίσιο πιο θεμελιώδες και περιεκτικό για να αναπαραστήσει ρεαλιστικά την συμπεριφορά των μετακινούμενων και να γίνει κατανοητή η φύση των αποφάσεων των ατόμων και των νοικοκυριών αναφορικά με τις δραστηριότητες και τις διαδρομές που ακολουθούν. Μια δραστηριότητα μπορεί να οριστεί ως μια φυσική δέσμευση ενός ατόμου σε κάτι που τον ικανοποιεί ή ικανοποιεί τις ανάγκες της οικογένειας. Η ζήτηση για μετακίνηση προέρχεται από την εξήγηση και την ανάλυση των αποφάσεων των ατόμων και των νοικοκυριών. Η ανεξαρτησία αυτών των αποφάσεων λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν σε μια τέτοια προσέγγιση.

Το μοντέλο δραστηριοτήτων βασίζεται σε κάθε νοικοκυριό και τα άτομα που το αποτελούν και τα οποία επηρεάζουν το ένα το άλλο ως προς τις μετακινήσεις που θα εκτελέσουν. Για καθορισμένο χρόνο προσδιορίζεται το πλάνο δραστηριοτήτων που θα ακολουθήσει κάθε άτομο ξεχωριστά, πού είναι αυτές οι δραστηριότητες, πώς θα βρεθεί εκεί (διαδρομή και μέσο μεταφοράς), πότε και για τι χρονικό διάστημα. Οι παραπάνω πληροφορίες προκύπτουν βάσει των χρήσεων γης, της χωρητικότητας των υποδομών και των μέσων μεταφοράς στο οδικό δίκτυο καθώς και τα κοινωνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά κάθε ατόμου.

Όλες οι ενέργειες των ατόμων έχουν σχέση με τον χρόνο και τον τόπο. Η τοποθεσία των προορισμών και ο αριθμός των μετακινήσεων που απαιτείται για την ολοκλήρωση των δραστηριοτήτων επιβάλλει κάποιους περιορισμούς στη δέσμευση με αυτές τις δραστηριότητες. Αυτοί οι χρονικοί-χωρικοί περιορισμοί περιορίζουν τις δραστηριότητες στις οποίες μπορούν να συμμετέχουν τα άτομα και τους κατευθύνουν στις δραστηριότητες που τελικά εκτελούν.

Κάθε άτομο είναι υπεύθυνος λήψης αποφάσεων που αντιμετωπίζει ένα τεράστιο σύνολο επιλογών από διάφορα μοτίβα δραστηριοτήτων. Κάθε συνδυασμός δραστηριοτήτων με τις τοποθεσίες τους, τα σημεία εκκίνησης και οι διάρκειές τους σχηματίζουν ένα μοναδικό μοτίβο δραστηριότητας. Τα άτομα επιλέγουν (ή τουλάχιστον σκοπεύουν να επιλέξουν) τα μοτίβα στα οποία η χρησιμότητα είναι η μέγιστη λύνοντας κατά κάποιον τρόπο ένα μεγάλης κλίμακας συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Διαφορετικά από τα μοντέλα που βασίζονται σε ταξίδια, τα μοντέλα δραστηριοτήτων θεωρούν τη λήψη αποφάσεων από τα άτομα ως υποδιεργασίες της εκτίμησης της ζήτησης. Αυτές οι υποδιεργασίες εμφανίζονται συνήθως σε μικροσκοπική προσομοίωση των μετακινήσεων σχηματίζοντας μια συγκεντρωτική πρόβλεψη των μετακινήσεων του υπό μελέτη πληθυσμού.



Σχήμα 30: Εννοιολογικό πλαίσιο μοντέλου δραστηριοτήτων, πηγή: (Subbarao & Krishnarao, 2020)

Το σύστημα του μοντέλου περιλαμβάνει την σύνθεση του πληθυσμού και ένα μοντέλο καθημερινών πλάνων δραστηριοτήτων. Το μοντέλο λαμβάνει συγκεντρωτικά δεδομένα πληθυσμού και δεδομένα χρήσεων γης και μετακινήσεων ως στοιχεία εισόδου για το έτος βάσης καθώς και πολιτικές που θα ισχύουν το έτος πρόβλεψης. Τα συνολικά κοινωνικό-δημογραφικά δεδομένα, μετατρέπονται ακολούθως σε χωριστά δεδομένα για τα νοικοκυριά και τα άτομα με το εργαλείο σύνθεσης του πληθυσμού. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιούνται για το μοντέλο επιλογής των καθημερινών πλάνων δραστηριοτήτων. Το μοντέλο καθορίζει εάν οι δραστηριότητες διεξάγονται στο σπίτι ή έξω από το σπίτι, όπως προσδιορίζει και τις αλληλεπιδράσεις των ατόμων εντός του νοικοκυριού. Οι δραστηριότητες εκτός σπιτιού ταξινομούνται ως υποχρεωτικές δραστηριότητες (mandatory) (εργασία/σχολείο), δραστηριότητες συντήρησης (maintenance) και αναψυχής (leisure). Επιπλέον, στο επίπεδο προγραμματισμού περιλαμβάνονται μοντέλα πρόβλεψης επιλογής μέσου μετακίνησης, επιλογής ώρας της ημέρας, επιλογής προορισμού, επιλογής επιπρόσθετων δευτερευουσών διαδρομών κ.λπ. Αυτό το μοντέλο παράγει τα αποτελέσματα σε μορφή ατομικών καταγραφών οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε πίνακες ΠΠ είτε βάσει την ώρα της ημέρας είτε βάσει το μέσο μετακίνησης. Το οδικό δίκτυο που έχει εκχωρηθεί λαμβάνει αυτά τα δεδομένα και παράγει δεδομένα για τα επίπεδα εξυπηρέτησης και άλλες παραμέτρους αφού πρώτα καταναίμει το συνολικό φόρτο στο δίκτυο. Αν και, το παραπάνω πλαίσιο προέρχεται από τα διάφορα μοντέλα δραστηριοτήτων που έχουν εφαρμοστεί, πρέπει να επικυρωθεί με βάση τα δεδομένα που προκύπτουν από την πραγματική έρευνα δραστηριότητας-ταξιδιού που αφορά την περιοχή μελέτης.

Συγκρίνοντας το μοντέλο δραστηριοτήτων με το κλασσικό μοντέλο των τεσσάρων βημάτων, τα μοντέλα δραστηριοτήτων καταφέρνουν να πετύχουν:

- ✓ Επίλυση πολύπλοκων και μεγάλης κλίμακας προβλημάτων
- ✓ Αποτελέσματα που προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματικότητα

Ενώ σημαντικές προκλήσεις για τη χρήση των μοντέλων δραστηριοτήτων αποτελούν τα παρακάτω:

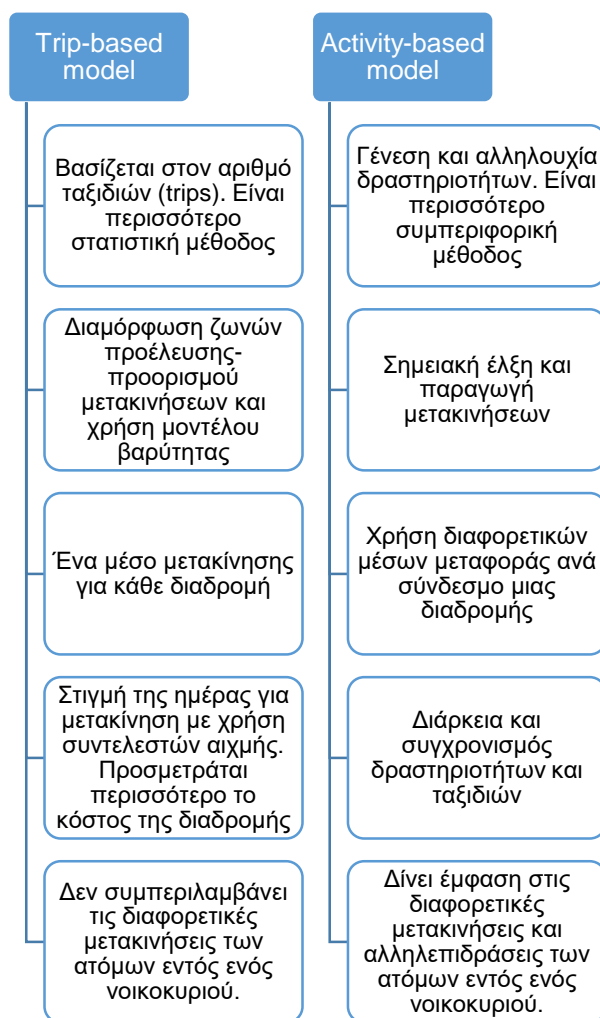
- × Το μοντέλο πρέπει να τρέξει πολλές φορές έως ότου φτάσει στη βέλτιστη λύση
- × Εξεζητημένες απαιτήσεις εξοπλισμού
- × Μεγαλύτερες προσπάθειες για καλιμπράρισμα του μοντέλου
- × Έλλειψη εμπειρίας
- × Έλλειψη καθορισμένων και αναγνωρισμένων λογισμικών πακέτων

Η γένεση μετακινήσεων στην κλασική προσέγγιση των τεσσάρων βημάτων αντικαθίσταται με ένα καθημερινό πλάνο δραστηριοτήτων που συνυπολογίζει μια ποικιλία αλληλοσχετίσεων και ανταλλαγών μεταξύ των μετακινήσεων που γεννιούνται μέσα στη μέρα. Το καθημερινό μοντέλο δραστηριοτήτων επηρεάζεται από το περιβάλλον των μετακινήσεων και την προσβασιμότητά τους, κάτι που δεν συμβαίνει στην διαδικασία παραγωγής μετακινήσεων της κλασικής προσέγγισης. Στο πλαίσιο του μοντέλου δραστηριοτήτων, η κλασική έλξη μετακινήσεων παίρνει τη μορφή μεταβλητών που σχετίζονται με την επιλογή τοποθεσίας σε κλίμακα ζώνης. Αυτές οι χωρικές μεταβλητές χωρίζονται σε τμήματα διαφοροποιώντας τους πρωτεύοντες με τους δευτερεύοντες προορισμούς. Τα κλασσικά μοντέλα αποτυγχάνουν να συμπεριλάβουν αυτή τη διαφορά όταν χρησιμοποιούν διαδοχικές διαδικασίες εκτίμησης για το μοντέλο έλξης και κατανομής μετακινήσεων.

Η κατανομή μετακινήσεων στην κλασική προσέγγιση των τεσσάρων βημάτων μοντελοποιεί όλες τις δραστηριότητες που δεν παράγονται από ή έλκονται σε κατοικία ως ανεξάρτητες, ενώ

στο μοντέλο δραστηριοτήτων, οι τοποθεσίες των προελεύσεων και προορισμών των μετακινήσεων που δεν σχετίζονται με το σπίτι βρίσκονται στην ίδια διαδρομή. Επιπλέον, στην κλασική προσέγγιση, η επιλογή του μέσου για κάθε διαδρομή επιλέγεται ξεχωριστά επομένως παράγονται πολλοί μη λογικοί συνδυασμοί μέσων, ενώ στα μοντέλα δραστηριοτήτων, η απόφαση για την επιλογή του μέσου (αν θα επιλέξουν δημόσια συγκοινωνία ή ιδιωτικό όχημα) είναι κατάλληλα μοντελοποιημένη στο επίπεδο ολόκληρης της διαδρομής.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα της προσέγγισης δραστηριοτήτων σε σχέση με την κλασική προσέγγιση είναι το πλήρως σταθερό-συνεπές μοντέλο των επιλογών σε συγκεκριμένο χρόνο μεταξύ διαφορετικών μετακινήσεων μέσα στη μέρα και για διαφορετικές διαδρομές της ίδιας μετακίνησης. Αυτό καθιστά το μοντέλο δραστηριοτήτων ευαίσθητο σε μέτρα πολιτικής και σε αλλαγές προς άλλες κατευθύνσεις της ζήτησης μετακινήσεων. Οι διαδικασίες εκχώρησης του δικτύου εφαρμόζονται στο μοντέλο δραστηριοτήτων όπως και στο μοντέλο των τεσσάρων βημάτων. Ως εκ τούτου το αποτέλεσμα της μικρό προσομοίωσης των μοντέλου δραστηριοτήτων συγκεντρώνεται σε ένα πίνακα που έχει τη μορφή που έχει ο πίνακας ΠΠ της κλασικής προσέγγισης.



Σχήμα 31: Σύγκριση μοντέλου διαδρομών και μοντέλου δραστηριοτήτων.

3.3. Μοντέλο Πρακτόρων (Agent-based Model)

Τα μοντέλα πρακτόρων βασίζονται στους οδηγούς, που αποκαλούνται πράκτορες, και δεν προσομοιώνουν απλά την κυκλοφορία των οχημάτων αλλά εισάγουν τις αυτόνομες αποφάσεις των πρακτόρων. Συνήθως η προσομοίωση δεν γίνεται με βάση κάποιο σενάριο αλλά σε πραγματικό χρόνο. Ξεκινά από τους κανόνες των πρακτόρων και φτάνει έως πιο πολύπλοκες συμπεριφορές που αφορούν την προσαρμοστικότητα στις καταστάσεις, ανάλογα με τις αποφάσεις και των υπόλοιπων γειτονικών πρακτόρων.

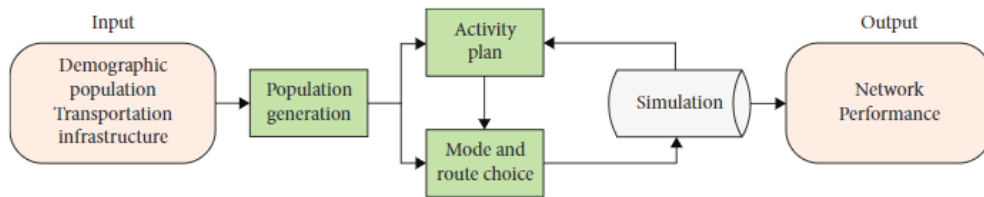
Η δομή, η ευελιξία και τα υπολογιστικά πλεονεκτήματα που βασίζονται σε πράκτορες τα έχουν καταστήσει ισχυρά εργαλεία στη μοντελοποίηση πολύπλοκων συστημάτων. Γενικά ένα μοντέλο που βασίζεται σε πράκτορες αποτελείται από τρία στοιχεία: πράκτορες, περιβάλλον και κανόνες.

Οι πράκτορες είναι σαν τους ανθρώπους που έχουν χαρακτηριστικά, στόχους και κανόνες συμπεριφοράς. Αποτελούν τη βασική ανεξάρτητη μονάδα που δραστηριοποιείται στο μοντέλο αναπαριστώντας οδηγούς, επιβάτες ή οχήματα. Ένας τυπικός πράκτορας μπορεί να διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: (α) αυτονομία: λειτουργεί χωρίς άμεση εξωτερική παρέμβαση, (β) κοινωνικότητα: συνεργασία με το περιβάλλον ή/και άλλους πράκτορες για την επίτευξη των καθηκόντων του, (γ) αντιδραστικότητα/αντιληπτικότητα: αντίληψη εξωτερικής επιρροής και αντίδραση σε αλλαγές, (δ) προορατικότητα: εκτέλεση δραστηριοτήτων με δικιά του πρωτοβουλία και βάσει των στόχων του, (ε) προσαρμογή/μάθηση: εκμάθηση γνώσεων από την εμπειρία και το περιβάλλον και προσαρμογή στους στόχους του περιβάλλοντος και της προσομοίωσης.

Το περιβάλλον παρέχει έναν χώρο στον οποίο ζουν οι πράκτορες. Οι κανόνες συμπεριφοράς καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι πράκτορες ενεργούν στο περιβάλλον και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Τα χαρακτηριστικά του ίδιου του περιβάλλοντος αλλάζουν επίσης ανάλογα με τις δραστηριότητες των πρακτόρων.

Ο προσδιορισμός της ζήτησης μετακινήσεων είναι συνήθως το πρώτο βήμα στην προσομοίωση κυκλοφορίας. Το μοντέλο πρακτόρων στηρίζεται στην προσέγγιση των δραστηριοτήτων για την γένεση των μετακινήσεων. Με βάση δημογραφικά χαρακτηριστικά, κοινωνικά χαρακτηριστικά, έρευνες και στατιστικά στοιχεία δημιουργούνται πλάνα δραστηριοτήτων. Αυτά στη συνέχεια χρησιμοποιούνται από το μοντέλο πρακτόρων σε μια προσομοίωση σε επίπεδο μεσοσκοπικό ή και μικροσκοπικό.

Τα οχήματα είναι πράκτορες στον προσομοιωτή και ένα στατικό οδικό δίκτυο είναι το περιβάλλον. Τα οχήματα «γεννιούνται» στις εισόδους του δικτύου και «πεθαίνουν» στις εξόδους. Κανόνες, όπως η οδήγηση σε ελεύθερη ροή, η ακολουθία μπροστινού αυτοκινήτου και η αλλαγή λωρίδας, ορίζουν πώς ένα όχημα συμπεριφέρεται και αλληλεπιδρά με άλλα οχήματα και το οδικό δίκτυο, τους παράγοντες που εμπλέκονται στο σύστημα και στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά κάθε τύπου πράκτορα. Οι κανόνες για τις συμπεριφορές των πρακτόρων πρέπει να δημιουργηθούν σωστά, προκειμένου να καταστήσουν το μοντέλο χρήσιμο στην πρόβλεψη μετακινήσεων. Δεδομένης μιας αρχικής συνθήκης, όλοι οι πράκτορες θα συμπεριφέρονται με βάση τα «προσωπικά» χαρακτηριστικά τους, τη μάθηση και τους κανόνες αλληλεπίδρασης. Στη συνέχεια, το σύστημα μεταφοράς θα εξελιχθεί σε ένα πρότυπο, ίσως μια ισορροπία, από το οποίο μπορούν να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες σε επίπεδο δικτύου.



Σχήμα 32: Δομή μοντέλου πρακτόρων σε εφαρμογές μεταφορών, πηγή: (Jiangyan et al., 2022)

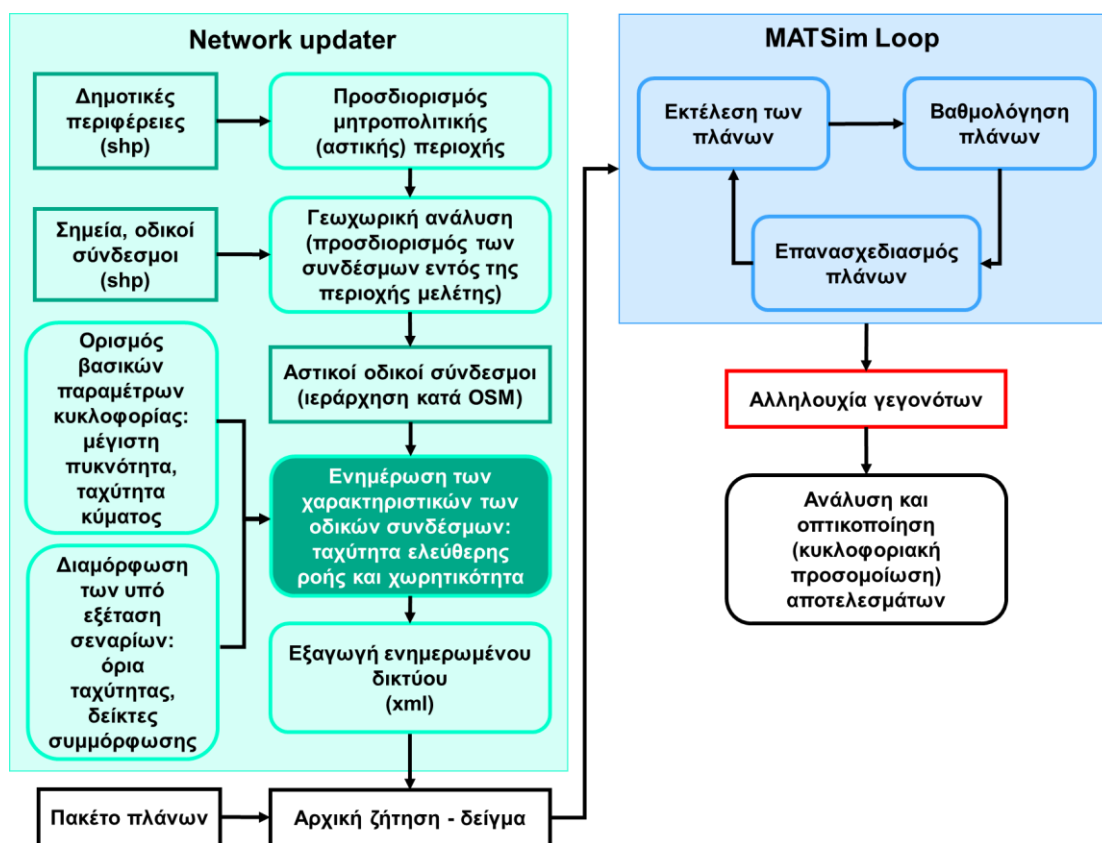
Στα πλεονεκτήματα των μοντέλων με πράκτορες συγκαταλέγονται:

- ⇒ Επιτρέπει τη μοντελοποίηση περίπλοκων αποφάσεων και αλληλεπιδράσεων των πρακτόρων λαμβάνοντας υπόψιν πληροφορίες που αλλάζουν στο χρόνο
- ⇒ Μοντελοποιεί τη συμπεριφορά μεμονωμένων οδηγών. Ουσιαστικά σε σενάρια επιλογής διαδρομής, κάθε πράκτορας-οδηγός έχει μια στρατηγική, ένα σκεπτικό για να κάνει την καλύτερη επιλογή.
- ⇒ Ευκολία στη δημιουργία διαφορετικών σεναρίων, αλλάζοντας κάποιες παραμέτρους του μοντέλου
- ⇒ Οπτικοποιείται η συμπεριφορά μεμονωμένων οδηγών με διαφορετικό τρόπο οδήγησης και έτσι μπορεί να παρακολουθηθεί ώστε να εντοπιστούν τυχών σφάλματα

Η ικανότητά του μοντέλου πρακτόρων να προσεγγίζει την ετερογένεια των ατόμων, να προσαρμόζει τα πλάνα και να επιτρέπει τους οδηγούς να επιλέγουν διαδρομή και μέσο, το καθιστά ένα ιδιαίτερο και σημαντικό εργαλείο για τους μελετητές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΛΕΙΑ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα εργασία, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, γίνεται μια προσπάθεια μελέτης των επιπτώσεων της μείωσης ταχυτήτων στο κυκλοφοριακό σύστημα του μητροπολιτικού δικτύου του Βερολίνου. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένα βασικό σενάριο που υπάρχει εκ των προτέρων για το Βερολίνο. Το σενάριο αυτό περιλαμβάνει τα αρχικά πλάνα δραστηριοτήτων των πρακτόρων και τα χαρακτηριστικά του πληθυσμού που χρειάζεται το λογισμικό της προσομοίωσης MATSim. Το οδικό δίκτυο που λαμβάνεται από το OpenStreetMap ενημερώνεται μέσω ενός ειδικού εργαλείου (που ονομάζεται: network updater) ώστε στην συνέχεια να εισαχθεί μαζί με τα υπόλοιπα δεδομένα στο πρόγραμμα κυκλοφοριακής προσομοίωσης MATSim και να εφαρμοστούν τα διαμορφωμένα σενάρια. Τα αποτελέσματα της MATSim αναλύονται με χρήση λογισμικού R και πακέτου ggplot. Οι ροές κυκλοφορίας οπτικοποιούνται και αναλύονται χρησιμοποιώντας το Simunto VIA για τον εντοπισμό σημείων συμφόρησης και συνδέσεων με μεγάλους όγκους οχημάτων.



Σχήμα 33: Μεθοδολογικό διάγραμμα ροής.

4.1. Προσομοίωση πολλαπλών πρακτόρων (MATSim)

Το MATSim είναι μια πλατφόρμα μικροσκοπικής προσομοίωσης η οποία υλοποιείται με γλώσσα προγραμματισμού Java. Υιοθετεί το μοντέλο δραστηριοτήτων για τη γένεση των μετακινήσεων ατόμων και το μοντέλο πρακτόρων για την προσομοίωση αυτών. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο «πράκτορες» αποκαλούνται οι μεμονωμένοι ταξιδιώτες ενώ όταν γίνεται αναφορά στη συμπεριφορά του πράκτορα εννοείται το πλάνο δραστηριοτήτων, την ακολουθία των δραστηριοτήτων που θα εκτελέσει μέσα στη μέρα, άρα και μετακινήσεων στη καθημερινότητα ενός ατόμου και η επιλογή διαδρομής.

Η MATSim είναι ένα εργαλείο που παρέχει το περιβάλλον και το υπόβαθρο για την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης της κυκλοφορίας σε μεγάλης κλίμακας σενάρια. Πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνει:

- ⇒ Μικροσκοπική προσομοίωση της κυκλοφορίας: η MATSim εκτελεί ενσωματωμένη μικροσκοπική προσομοίωση των κυκλοφοριακών ροών που προκύπτουν και της συμφόρησης που προκαλείται.
- ⇒ Μικροσκοπική μοντελοποίηση συμπεριφοράς των πρακτόρων: η MATSim χρησιμοποιεί σε μικροσκοπικό επίπεδο την περιγραφή της ζήτησης με τον εντοπισμό του ημερήσιου προγράμματος και των συνθετικών αποφάσεων των ταξιδιωτών.
- ⇒ Γρήγορη υπολογιστική επίδοση με 10^7 ή και περισσότερα σωματίδια να εμφανίζονται στην προσομοίωση,
- ⇒ Πολύπλοκα προσαρμοστικά συστήματα/συν-εξελικτικοί αλγόριθμοι: η MATSim βελτιστοποιεί τα πλάνα των πρακτόρων μέσω της συν εξελικτικής αναζήτησης για την προκύπτουσα ισορροπία ή σταθερή κατάσταση, αφού συνυπολογίζει τις δραστηριότητές τους.

Η MATSim σχεδιάζει δυο επίπεδα: το «φυσικό», το οποίο προσομοιώνει τον πραγματικό κόσμο όπου οι πράκτορες κινούνται, και το «νοητικό», στο οποίο οι πράκτορες ακολουθούν κάποια στρατηγική σχετικά με την επιλογή διαδρομής, μέσου μετακίνησης και πλάνου δραστηριοτήτων. Είναι σαφές ότι το «νοητικό» επίπεδο παραπέμπει στη λογική του μοντέλου, που καθορίζει τις αποφάσεις των πρακτόρων, και το «φυσικό» επίπεδο αφορά την προσομοίωση. Τα αποτελέσματα και των δυο ανατροφοδοτούν το υπό μελέτη κυκλοφοριακό σύστημα και με επαναληπτική διαδικασία παράγεται η προσομοίωσή του σε μικροσκοπικό επίπεδο.

4.1.1. Λίγα λόγια για τη MATSim

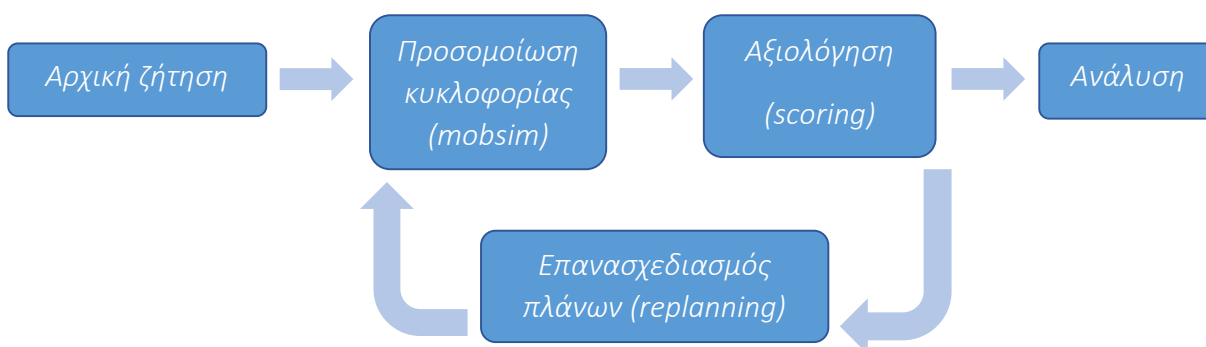
Η MATSim αναπτύχθηκε από το Swiss Federal Institute of Technology στη Ζυρίχη (ETH Zurich) και το Technical University of Berlin (TU Berlin) και παρέχει το πλαίσιο προσομοίωσης των δραστηριοτήτων (activity based) πολλαπλών ευφύων πρακτόρων (multi-agent) ενώ δύναται να επεκταθεί. Τόσο το πρόγραμμα και οι επεκτάσεις του² όσο και βιβλιογραφικό υλικό³ διατίθενται δωρεάν στο διαδίκτυο.

² MATSim, 2016; GitHub, 2015

³ Horni, Nagel, & Axhausen, The Multi-Agent Transport Simulations MATSim, 2016

Μέχρι σήμερα, η MATSim είναι σχεδιασμένη για να μοντελοποιεί μια μέρα (24 ώρες), αλλά καταρχήν ένα μοντέλο πολλαπλών ημερών θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί (Horni and Axhausen, 2012).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η MATSim βασίζεται στην αρχή της συν- εξέλιξης. Δηλαδή, κάθε πράκτορας επανειλημμένα βελτιστοποιεί το ημερήσιο πρόγραμμα δραστηριοτήτων του ενώ παράλληλα αλληλεπιδρά με όλους τους άλλους πράκτορες. Καθένας από αυτούς αναζητά διαθέσιμο χώρο και χρόνο για να πραγματοποιήσει τη μεταφορά του. Σκοπός του συν-εξελικτικού αλγορίθμου είναι να φτάσει σε ένα σημείο ισορροπίας στο οποίο κάθε πράκτορας δεν θα μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω το πλάνο του, σε αντίθεση με ένα εξελικτικό αλγόριθμο με τον οποίο η προσομοίωση φτάνει στη βέλτιστη λειτουργικότητα όταν στο σύνολο ο πληθυσμός λειτουργεί κατάλληλα.



Σχήμα 34: Το διάγραμμα ροής – ο κύκλος της MATSim.

Η MATSim πραγματοποιεί έναν αριθμό επαναλήψεων - βρόχο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 34, αποτελούμενο από τα εξής τρία βασικά βήματα:

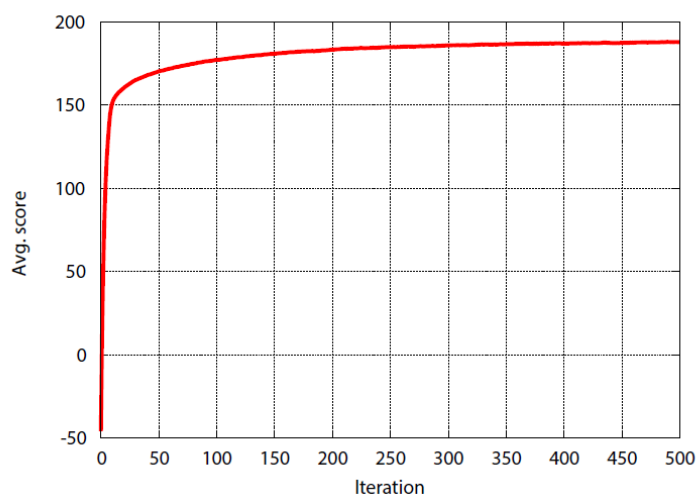
- α) προσομοίωση της κυκλοφορίας (mobsim): εκτέλεση του πλάνου δραστηριοτήτων που έχει επιλεγεί για κάθε πράκτορα, αποτελεί το βήμα φόρτισης του δικτύου
- β) αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (scoring): η απόδοση του κάθε πλάνου στην συνθετική πραγματικότητα αξιολογείται βάσει κάποιων παραμέτρων οπότε προκύπτει ένας βαθμός για το κάθε πλάνο, και
- γ) επανασχεδιασμός των πλάνων (replanning): αν ένας πράκτορας έχει παραπάνω πλάνα από τον μέγιστο αριθμό πλάνων (το οποίο καθορίζεται στο αρχείο διαμόρφωσης), τότε κάποια πλάνα αφαιρούνται σύμφωνα με παραμέτρους του τίθενται επίσης στο αρχείο διαμόρφωσης. Για κάποιους πράκτορες, ένα πλάνο αντιγράφεται, τροποποιείται και στη συνέχεια επιλέγεται για την επόμενη επανάληψη, ενώ όλοι οι άλλοι πράκτορες επιλέγουν ένα πλάνο από τα ήδη ορισμένα.

Κύρια στοιχεία που πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα είναι η αρχική ζήτηση, που ουσιαστικά αντιστοιχεί στην αλληλουχία των δραστηριοτήτων του πληθυσμού στην υπό μελέτη περιοχή, το οδικό δίκτυο, που αποτελείται από συνδέσμους και σημεία, που αντιστοιχούν σε οδικά τμήματα και κόμβους. Όλα τα παραπάνω αποτελούνται από ορισμένα στοιχεία-χαρακτηριστικά (όπως η τοποθεσία του σπιτιού των πρακτόρων, η χωρητικότητα των συνδέσμων κ.α.) τα οποία είναι καθοριστικά για τη διαδικασία.

Η αλληλουχία των δραστηριοτήτων των πρακτόρων λαμβάνεται είτε από εμπειρικά δεδομένα είτε από μοντέλο διακριτών επιλογών. Κατά τις επαναλήψεις, η αρχική ζήτηση βελτιστοποιείται για κάθε πράκτορα ξεχωριστά. Κάθε πράκτορας διαθέτει μνήμη με ένα συγκεκριμένο αριθμό

καθημερινών πλάνων και κάθε πλάνο αποτελείται από μια σειρά δραστηριοτήτων και μια συνδεδεμένη με αυτό αξιολόγηση-«βαθμό». Το σκόρ μπορεί να ερμηνευτεί και ως οικονομική σκοπιμότητα. Σε κάθε επανάληψη πριν τη προσομοίωση της κυκλοφορίας, κάθε πράκτορας επιλέγει από τη μνήμη ένα πλάνο δραστηριοτήτων. Η επιλογή αυτή εξαρτάται από το βαθμό κάθε πλάνου, το οποίο υπολογίζεται μετά από την εκτέλεση κάθε προσομοίωσης, βασιζόμενο στην απόδοση του πλάνου. Στη συνέχεια ένας συγκεκριμένος αριθμός πρακτόρων (συνήθως το 10%) επανασχεδιάζει και τροποποιεί το πλάνο του. Στο βήμα φόρτωσης του δικτύου, είναι διαθέσιμες και επιδέχονται διαμορφώσεις πολλές κυκλοφοριακές προσομοιώσεις. Οι παράμετροι που επιδέχονται αλλαγή είναι: η ώρα αποχώρησης (departure time) (και άρα μπορεί να επηρεαστεί και η διάρκεια κάποιας δραστηριότητας), η διαδρομή που ακολουθείται από τον πράκτορα, το μέσο που χρησιμοποιείται και ο προορισμός. Άλλες παράμετροι, όπως η προσθήκη ή η αφαίρεση κάποιας δραστηριότητας, η στάθμευση ή επιλογές που επηρεάζονται από άλλους πράκτορες, είναι ακόμα υπό επεξεργασία και διατίθενται σαν επιλογές μόνο πειραματικά. Τα αρχικά πλάνα των πρακτόρων δεν είναι απαραίτητο να είναι τέλεια καθορισμένα, ωστόσο ρεαλιστικά αρχικά δεδομένα έχουν ως αποτέλεσμα την διεξαγωγή λιγότερων επαναλήψεων για την τελική επιθυμητή ισορροπία. Αν ένας πράκτορας, από όσους κάνουν επανασχεδιασμό των πλάνων της ημέρας, καταλήξει να έχει πολλά πλάνα, αυτό με το χαμηλότερο βαθμό απομακρύνεται από τη μνήμη. Μια επανάληψη θεωρείται ολοκληρωμένη όταν έχει γίνει η αξιολόγηση των εμπειριών των πρακτόρων από τα υλοποιημένα πλάνα καθημερινότητας. Η επαναληπτική διαδικασία λήγει όταν σταθεροποιείται ο μέσος βαθμός του πληθυσμού.

Η τυπική καμπύλη αξιολόγησης είναι μια πρόοδος. Δεδομένου ότι οι προσομοιώσεις είναι στοχαστικές, δεν είναι δυνατή η χρήση κριτηρίων σύγκλισης, που είναι κατάλληλα για ντετερμινιστικούς αλγορίθμους.



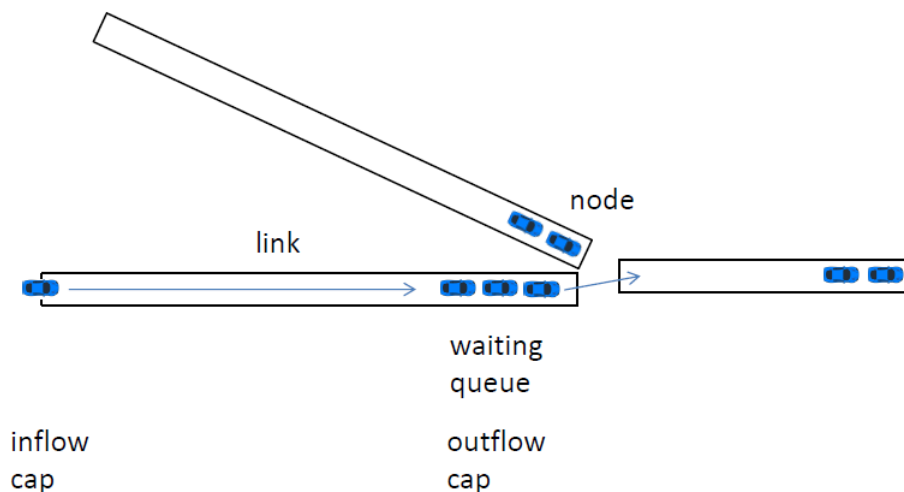
Σχήμα 35: Τυπική εξέλιξη της αξιολόγησης (scoring), πηγή: (Horni, Nagel, & Axhausen, 2016)

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η MATSim προσφέρει δυνατότητα προσαρμογών. Η MATSim βασίζεται έντονα σε γεγονότα που προέρχονται από την προσομοίωση της κυκλοφορίας. Κάθε ενέργεια στην προσομοίωση δημιουργεί ένα γεγονός, το οποίο καταγράφεται για ανάλυση. Αυτές οι εγγραφές συμβάντων μπορούν να συγκεντρωθούν για την αξιολόγηση οποιαδήποτε μέτρησης στην επιθυμητή ανάλυση.

4.1.2. Μοντέλο Προσομοίωσης της Κυκλοφορίας

Η MATSim προσφέρει δυο βασικούς προσομοιωτές της κυκλοφορίας: η QSim, η οποία βασίζεται σε χρονικά βήματα, και η JDEQSim (Java Discrete Event Queue Simulation), η οποία βασίζεται σε γεγονότα, αλλά υπάρχουν και εξωτερικοί προσομοιωτές που μπορούν να προστεθούν στο πρόγραμμα. Η QSim είναι αυτή που το πρόγραμμα έχει ως προεπιλογή.

Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, η MATSim ακολουθεί τη λογική της ουράς αναμονής (queue-based traffic simulation) για να υπολογίσει τους χρόνους ταξιδιού ανά διαδρομή και επομένως στο σύνολο του πλάνου του πράκτορα. Κάθε αυτοκίνητο που εισέρχεται στον σύνδεσμο –οδικό τμήμα- προστίθεται στο τέλος της ουράς που έχει σχηματιστεί από προπορευόμενα αυτοκίνητα και μένει εκεί ώσπου να έχει περατωθεί ο χρόνος ταξιδιού με ταχύτητα ελεύθερης ροής αλλά και μέχρις ότου να είναι στην αρχή της ουράς αναμονής και ο επόμενος σύνδεσμος να επιτρέπει την προσπέλασή του. Οι χρόνοι ταξιδιών που προκύπτουν αργότερα χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς του βαθμού που πέτυχε το πλάνο. Οι βαθμοί υπολογίζονται βάσει μιας συνάρτησης που αφορά την χρησιμότητα του πλάνου του εκάστοτε πράκτορα. Η χρησιμότητα του πλάνου είναι μικρότερη όταν η διάρκεια της δραστηριότητας μειώνεται ή/και όταν ο χρόνος/κόστος ταξιδιού αυξάνεται. Στο τέλος, κάθε πράκτορας, από όσους επανασχεδίασαν το πλάνο τους, επιλέγει είτε το πλάνο με το τον καλύτερο βαθμό (ντετερμινιστική προσέγγιση) είτε το πλάνο που βασίζεται σε πιθανότητες που υπολογίζονται από ένα πολυωνυμικό λογιστικό μοντέλο (στοχαστική προσέγγιση). Η τελευταία επιλογή φαίνεται να επηρεάζει τον χρόνο που χρειάζεται για να επιτευχθεί η σύγκλιση. Τα αποτελέσματα της MATSim είναι μια σειρά από γεγονότα: γεγονότα που μπορούν να αναλυθούν και να χρησιμοποιηθούν από ειδικά προγράμματα.



Σχήμα 36: Μοντέλο προσομοίωσης της κυκλοφορίας στη MATSim, πηγή: (Horni, Nagel, & Axhausen, 2016).

Το μοντέλο της ουράς, που χρησιμοποιείται τόσο από τη QSim όσο και από την JDEQSim εφαρμόζει τους εξής περιορισμούς:

(α) Περιορισμός αποθήκευσης των οχημάτων στον σύνδεσμο, τα οχήματα μπορούν να εισέλθουν μόνο όταν ο σύνδεσμος δεν είναι γεμάτος. Εξαίρεση συναντάται στην QSim όταν το

όχημα περιμένει πολύ χρόνο για να εισέλθει στον επόμενο σύνδεσμο τελικά μπορεί να μεταφερθεί εκεί ακόμα κι αν δεν υπάρχει αποθηκευτική χωρητικότητα.

(β) Περιορισμός ταχύτητας ελεύθερης ροής: τα οχήματα μπορούν να εγκαταλείψουν έναν σύνδεσμο μόνο αφού παρέλθει ο χρόνος που θα χρειαζόταν για να διανύσουν τον σύνδεσμο με ταχύτητα ελεύθερης ροής.

(γ) Περιορισμός εκροής οχημάτων: τα οχήματα μπορούν να εξέρχονται από έναν σύνδεσμο ανά κάποια χρονική περίοδο, μέγιστος ρυθμός ροής εξόδου.

Σε αυτήν την εργασία δεν έχει γίνει αλλαγή στην MATSim. Το οδικό δίκτυο έχει ενημερωθεί με τη χρήση ενός προγραμματιστικού εργαλείου, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Το μοντέλο κυκλοφοριακής ροής της MATSim βασίζεται στα εξής δυο χαρακτηριστικά: τη χωρητικότητα του δικτύου (storage capacity): ο αριθμός των οχημάτων που χωράνε στον σύνδεσμο του οδικού δικτύου, και τη μέγιστη πυκνότητα κυκλοφορίας του δικτύου (flow capacity): πόσοι ταξιδιώτες φεύγουν από τον σύνδεσμο σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Κάθε σύνδεσμος έχει ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Στην παρούσα έκδοση η QSim δεν έχει καθορισμένη μέγιστη τιμή για τα οχήματα που εισέρχονται στον σύνδεσμο.

Για να τρέξει κανείς το πρόγραμμα της MATSim θα πρέπει να έχει στον υπολογιστή του γλώσσα προγραμματισμού java, έτσι ώστε να μπορούν να διαβαστούν οι κώδικες που τρέχουν σε αυτό, καθώς και αρχείο με τις παραμέτρους που διαμορφώνουν το υπό μελέτη σενάριο.

4.1.3. Αρχεία εισόδου στη MATSim

Απαραίτητα αρχεία εισόδου για τη χρήση της εφαρμογής είναι:

➤ **Config.xml:**

Το αρχείο διαμόρφωσης είναι αυτό που περιέχει τις παραμέτρους του σεναρίου. Όλες οι παράμετροι είναι απλά ζευγάρια “όνομα και τιμή” και οργανώνονται σε ομάδες. Σε μια από αυτές τις ομάδες περιέχονται και τα στοιχεία που σχετίζονται με τον ελεγκτή των προσομοιώσεων (Controller), όπως για παράδειγμα ο αριθμός των επαναλήψεων, ή σε άλλη ομάδα ρυθμίσεις για την προσομοίωση, όπως για παράδειγμα ο χρόνος λήξης αυτής.

➤ **Network.xml:** αρχείο που περιγράφει το οδικό δίκτυο. Το οδικό δίκτυο αποτελείται από συνδέσμους και σημεία με μοναδικό id το καθένα. Τα σημεία περιγράφονται από x,y, συντεταγμένες. Οι σύνδεσμοι, από την άλλη, περιγράφονται με περισσότερες όπως είναι αναμενόμενο, πληροφορίες:

- Από ποιο έως ποιο σημείο εκτείνεται ο σύνδεσμος
- Το μήκος του, συνήθως σε εκφρασμένο σε μέτρα,
- Τον φόρτο, πόσα οχήματα διασχίζουν τον σύνδεσμο, συνήθως μετρείται σε οχήματα ανά ώρα
- Τη μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορούν να κινηθούν τα οχήματα στον σύνδεσμο, συνήθως εκφράζεται σε μέτρα ανά δευτερόλεπτα (m/s)
- Τον αριθμό των λωρίδων ανά κατεύθυνση, τα οποία προσδιορίζονται με σημεία από και προς τα οποία εκτείνονται.
- Μια λίστα με τους τρόπους μετακίνησης που περιλαμβάνονται στον σύνδεσμο και συνήθως χωρίζονται μεταξύ τους με κόμμα, για παράδειγμα modes= “car, bike, taxi”.

➤ **population.xml** ή **plans.xml**: αρχείο που παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ζήτηση για ταξίδια, δηλαδή τη λίστα των πρακτόρων –που στο σύνολο αποτελούν τον πληθυσμό- και των ημερήσιων πλάνων τους. Ο πληθυσμός αποτελείται από μια λίστα με άτομα, κάθε άτομο κατέχει μια λίστα με πλάνα και κάθε πλάνο αποτελείται από μια σειρά δραστηριοτήτων και τρόπους για να φτάσει το άτομο σε αυτές. Για κάθε πράκτορα επιλέγεται και εκτελείται ένα πλάνο στην προσομοίωση της κυκλοφορίας. Κατά το στάδιο του επανασχεδιασμού των πλάνων, μπορεί να επιλεγεί ένα διαφορετικό πλάνο. Κάθε πλάνο συνοδεύεται και από κάποιο «βαθμό» που προκύπτει, μετά την εκτέλεσή του στην προσομοίωση, κατά το στάδιο της βαθμολόγησης.

Οι δραστηριότητες κατηγοριοποιούνται και συνοδεύονται από τον χρόνο λήξης τους, εκτός φυσικά από το τελευταίο πλάνο. Σε κάποιες μόνο περιπτώσεις δηλώνεται η διάρκεια της δραστηριότητας αντί για το χρόνο λήξης αυτής. Η τοποθεσία κάθε δραστηριότητας παρουσιάζεται στο xml αρχείο με τις συντεταγμένες x και y ή με την πληροφορία για το ποιος σύνδεσμος φτάνει εκεί. Όταν για την δραστηριότητα δίνονται συντεταγμένες αντί για τον σύνδεσμο τότε ο Controller υπολογίζει ποιος είναι ο κοντινότερος σε αυτές σύνδεσμος, αφού αυτή η πληροφορία είναι απαραίτητη για την προσομοίωση.

Άλλη πληροφορία που συμπεριλαμβάνεται στο εν λόγω αρχείο είναι το «leg» ο τρόπος με τον οποίο ένας πράκτορας σχεδιάζει να μεταφερθεί από τη μια δραστηριότητα στην επόμενη, η διαδρομή που θα ακολουθήσει. Η μορφή της διαδρομής διαφοροποιείται βάσει του μέσου μετακίνησης, ενώ αν το επιλέξει ο χρήστης, μπορεί στα χαρακτηριστικά της μετακίνησης με το μέσο «leg» να συμπεριληφθεί και ο χρόνος που αναμένεται να χρειαστεί για ο ταξίδι. Η MATSim παράγει αυτόματα τις διαδρομές για τα αρχικά πλάνα που δεν τις περιέχουν.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η κίνηση ενός πράκτορα στην προσομοίωση βασίζεται στο μέσο μετακίνησής του. Το πρόγραμμα υποστηρίζει ορθά το αυτοκίνητο και τα μέσα μαζικής μεταφοράς, ενώ αν δεν αναγνωρίζει το μέσο τότε ο πράκτορας «τηλεμεταφέρεται» από μια τοποθεσία σε μια άλλη. Στην περίπτωση της «τηλεμεταφοράς» ο πράκτορας εξαφανίζεται από την πρώτη σημείο και επανεμφανίζεται στον προορισμό του ταξιδιού που θα έκανε στον αντίστοιχο χρόνο.

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 προ-κύψουν 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.

4.1.4. Αρχεία εξόδου

Αφού ολοκληρωθούν οι προσομοιώσεις, η MATSim δημιουργεί κάποια αρχεία τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναλυθούν τα αποτελέσματα αλλά και να αξιολογηθεί η διαδικασία της προσομοίωσης. Τα αρχεία αυτά αποθηκεύονται σε φακέλους. Υπάρχει ο φάκελος που ορίζει ο χρήστης στο αρχείο διαμόρφωσης (config.xml) και στον οποίο αποθηκεύονται τα τελικά αρχεία που προέκυψαν αλλά και κάποιοι υποφάκελοι που αφορούν τις επαναλήψεις και δημιουργούνται ύστερα από κάθε επανάληψη. Κάποια αρχεία δημιουργούνται αυτόματα, όπως τα αρχεία με τα στατιστικά της βαθμολόγησης, ενώ άλλα θα πρέπει να ζητηθεί να δημιουργηθούν στο αρχείο διαμόρφωσης (config.xml).

Τα παρακάτω αρχεία δημιουργούνται για όλες τις επαναλήψεις:

Log file: Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της MATSim δημιουργείται ένα αρχείο log στο οποίο περιέχονται πληροφορίες που μπορούν αργότερα στην ανάλυση να χρησιμοποιηθούν, ή και σε περίπτωση που υπάρξει πρόβλημα κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Τέτοιες πληροφορίες είναι για παράδειγμα το πότε ξεκίνησε ή τελείωσε μια επανάληψη ή ο χρόνος που χρειάστηκε η κάθε μια για να ολοκληρωθεί. Επίσης μπορεί να περιλαμβάνει προειδοποιήσεις και μηνύματα σχετικά με σφάλματα που έχουν προκύψει κατά την προσομοίωση ή κατά τη διαμόρφωση αυτής.

Warnings and Errors Log File: Επειδή το αρχείο log περιέχει πάρα πολλές πληροφορίες, τα μηνύματα που περιγράφουν τα σφάλματα μπορεί να αγνοηθούν. Για αυτόν τον λόγο δημιουργείται ένα ξεχωριστό αρχείο στον φάκελο, που περιέχει μόνο τις προειδοποιήσεις και τα μηνύματα που αφορούν προβλήματα και σφάλματα στην προσομοίωση ή στο αρχείο διαμόρφωσης.

Score Statistics: Σχετικά με τα σκορ των πλάνων, στο τέλος, διατίθενται σε μορφή εικόνας (scorestats.png) και κειμένου (scorestats.txt). Εκεί βρίσκει κανείς το σκορ για το κατά μέσο όρο καλύτερο και χειρότερο πλάνο δραστηριοτήτων, αυτού που εκτελέστηκε για κάθε πράκτορα και τον μέσο όρο για κάθε επανάληψη.

Leg Travel Distance Statistics: Εξάγονται μια εικόνα (traveldistancestats.png) και ένα κείμενο (traveldistancestats.txt) που αφορούν στατιστικά για την απόσταση που διανύθηκε.

Stopwatch: Το αρχείο χρονομέτρου (stopwatch.txt) περιέχει την ώρα που συνέβησαν κάποιες ενέργειες όπως ο επανασχεδιασμός των πλάνων ή η εκτέλεση της προσομοίωσης για κάθε επανάληψη.

Τα ακόλουθα αρχεία εξόδου δημιουργούνται για συγκεκριμένες επαναλήψεις:

Events: Κάθε ενέργεια στην προσομοίωση καταγράφεται ως συμβάν, είτε πρόκειται για έναρξη μιας δραστηριότητας είτε για κάποια αλλαγή σε σύνδεσμο του οδικού δικτύου, ενώ καταγράφεται και η ώρα που αυτό τελέστηκε. Κάθε γεγονός έχει ένα ή περισσότερα

χαρακτηριστικά. Επιπλέον, σε αυτό το αρχείο μπορεί να συμπεριληφθούν πληροφορίες σχετικά με το ποιος πράκτορας προκάλεσε το γεγονός και σε ποιον σύνδεσμο συνέβη.

Plans: Σε επαναλήψεις με δυνατότητα διαμόρφωσης, εξάγεται η τρέχουσα κατάσταση του πληθυσμού, με τα σχέδια των πρακτόρων. Τα σχέδια της τελικής επανάληψης δημιουργούνται επίσης στο ανώτερο επίπεδο του φακέλου εξόδου.

Leg Histogram: Σε κάθε επανάληψη, σχεδιάζεται ένα ιστόγραμμα σκέλους. Ένα ιστόγραμμα σκέλους απεικονίζει τον αριθμό των πρακτόρων που φθάνουν, αναχωρούν ή βρίσκονται καθ' οδόν, ανά μονάδα χρόνου. Για κάθε μέσο μεταφοράς αλλά και για το σύνολο των μέσων δημιουργούνται ιστογράμματα. Κάθε αρχείο ξεκινά με τον αριθμό επανάληψης και τελειώνει με το μέσο μεταφοράς (π.χ. 1.legHistogram_car.png ή 1.legHistogram_all.png). Ακόμα δημιουργείται ένα αρχείο κειμένου (π.χ. 1.legHistogram.txt), που περιέχει τα δεδομένα για όλους τα μέσα μετακίνησης.

Trip Duration: Για κάθε επανάληψη, δημιουργείται ένα αρχείο κειμένου που αφορά τη διάρκεια του ταξιδιού (π.χ. 1.tripdurations.txt). Περιλαμβάνει αρίθμηση των μετακινήσεων και της διάρκειάς τους, για κάθε ζεύγος δραστηριοτήτων (π.χ. από τη δουλειά στο σπίτι ή από το σπίτι μέχρι τα ψώνια).

Link Stats: Για κάθε σύνδεσμο, οδικό τμήμα, παράγεται σε κάθε επανάληψη, ένας φάκελος με τα στατιστικά αυτού, που περιλαμβάνει ωριαίες τιμές και χρόνους ταξιδιών. Τα στατιστικά στοιχεία των συνδέσμων είναι ιδιαίτερα σημαντικά για σύγκριση με τον πραγματικά δεδομένα.

4.2. Το σενάριο του Βερολίνου

Το «MATSim Open Berlin Scenario» είναι ένα σενάριο προσομοίωσης των μεταφορών της μητρόπολης του Βερολίνου που αναπτύσσεται μέσω του προγράμματος «MATSim». Το σενάριο περιέχει το πλάνο μετακινήσεων όλης της ημέρας των ενήλικων ατόμων που ζουν στο Βερολίνο και στο Βρανδεμβούργο. Το σενάριο βασίζεται σε ανοιχτά δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με οποιοδήποτε τρόπο και τα οποία γεννιούνται από μια διαδικασία που μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε περιοχή. Για τις μετακινήσεις λαμβάνονται ως μέσα το επιβατηγό ΙΧ -ως οδηγός ή ως επιβάτης, η πεζή μετακίνηση, το ποδήλατο, τα εμπορευματικά και τα μέσα μαζικής μεταφοράς. Για την διαμόρφωση των πλάνων των χρηστών η MATSim εφαρμόζει αλλαγές είτε στη διαδρομή είτε στο μέσο μεταφοράς είτε στην ώρα αναχώρησης. Η ανάπτυξη των σεναρίων βασίζεται σε ένα μικροσκοπικό, οικονομετρικό μοντέλο και αναπτύσσεται σε μια διαδικασία που βασίζεται στην μέτρηση της κυκλοφορίας που καλιμπράρεται αυτόματα. Διαδικτυακά, υπάρχουν δυο εκδοχές του σεναρίου του Βερολίνου. Στην πρώτη προσομοιώνεται το 1% του συνολικού πληθυσμού και χρησιμοποιείται κυρίως για δοκιμαστικούς σκοπούς. Στην δεύτερη προσομοιώνεται το 10% του συνολικού πληθυσμού και είναι βαθμονομημένη βάσει πραγματικών μετρήσεων. Και στις δυο εκδοχές του σεναρίου ανάλογα με το ποσοστό του πληθυσμού που προσομοιώνεται, οι χωρητικότητες του δικτύου μειώνονται ανάλογα.

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το σενάριο του Βερολίνου που αναπαριστά το 1% του πληθυσμού της πόλης για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου. Άλλωστε σκοπός της μελέτης είναι η σύγκριση των επιπτώσεων της ήπιας κυκλοφορίας μέσω των υποθετικών σεναρίων που αναπτύσσονται και όχι η ακριβής πρόβλεψη των μελλοντικών επιπτώσεων.

Τα στοιχεία που εισάγονται είναι το οδικό δίκτυο και τα πλάνα δραστηριοτήτων των πρακτόρων. Όσον αφορά το οδικό δίκτυο, χρησιμοποιείται αυτό που διατίθεται στο OpenStreetMap (OSM). Το οδικό δίκτυο του Βερολίνου στο OSM αποτελείται από 73689 κόμβους και 159039 συνδέσμους μονής κατεύθυνσης μόνο για αυτοκίνητο και 43900 συνδέσμους δημόσιας συγκοινωνίας. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται είναι το EPSG: 31468. Εκτός από τους αστικούς δρόμους που αναπαρίστανται, στο δίκτυο περιλαμβάνονται και βασικές αρτηρίες που συνδέουν την πόλη με γειτονικές περιοχές.

Τα πλάνα δραστηριοτήτων που χρειάζεται το σενάριο συνθέτονται από την CEMDAP (Comprehensive Econometric Microsimulator for Daily Activity-Travel Patterns). Η CEMDAP είναι ένα μοντέλο δραστηριοτήτων που έχει αναπτυχθεί από τον Bhat et al. (2004). Για κάθε άτομο του συνθετικού πληθυσμού δημιουργεί αρχικά πλάνα δραστηριοτήτων αναπαριστώντας τη συμπεριφορά των ατόμων ως προς τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τις μετακινήσεις τους. Στο σενάριο του Βερολίνου, η εφαρμογή της CEMDAP για τη δημιουργία ενός αρχικού πακέτου πλάνων για τα άτομα γίνεται κατ'επανάληψη (συγκεκριμένα πέντε φορές). Τα αρχικά πλάνα, στη συνέχεια, εκτελούνται στον προσομοιωτή της MATSim με σκοπό τη βαθμονόμηση του μοντέλου, και σε συνδυασμό με τη διαδικασία βαθμονόμησης CaDyTS, για την απόκτηση των τελικά κατάλληλων αρχικών πλάνων, τις αλυσίδες δηλαδή των μετακινήσεων για κάθε πράκτορα, στις οποίες δίνονται η προέλευση, ο προορισμός, ο χρόνος, ο τρόπος και ο σκοπός (ή δραστηριότητα) για κάθε μια.

Κοινωνικά, δημογραφικά δεδομένα και άλλες πληροφορίες που χρειάζεται η CEMDAP προέρχονται από τις εξής πηγές: «Zensus 2011» απογραφή της Γερμανίας σε εθνικό επίπεδο, «Pendlerstatistik 2009» στατιστικές μετακινήσεων, OpenStreetMap, τοπικά δεδομένα GTFS, μετρήσεις τοπικής κυκλοφορίας, μετρήσεις κυκλοφορίας BASt για τα εμπορευματικά οχήματα, διανυσματικά αρχεία που περιγράφουν τις γεωμετρίες του δήμου στο Βρανδεμβούργο και τις γεωμετρίες των περιοχών (LOR⁴) στο Βερολίνο και στοιχεία κάλυψης γης CORINE. Για την επικύρωση διαφόρων ιδιοτήτων των μετακινήσεων, στο σενάριο χρησιμοποιούνται οι έρευνες μετακινήσεων: Berlin SrV 2008 και Berlin MiD 2008.

Ο πληθυσμός που χρησιμοποιείται στο σενάριο προέρχεται από τα στοιχεία της απογραφής «Zensus 2011» και περιλαμβάνει τον ενήλικο πληθυσμό που κατοικεί σε κάθε ένα από τους δήμους του Βερολίνου και του Βρανδεμβούργου. Μεταξύ των πληροφοριών που λαμβάνονται, είναι ο συνολικός πληθυσμός, ο οποίος κατηγοριοποιείται κατά φύλο και έντεκα ηλικιακές ομάδες, ο αριθμός των εργαζομένων, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται κατά φύλο και ο αριθμός των μαθητών. Τα στατιστικά για τα άτομα που μετακινούνται προς την εργασία τους λαμβάνονται από «Pendlerstatistik 2009», δίνοντας τις πληροφορίες για τις τοποθεσίες των εργασιών των μετακινούμενων. Τα αρχεία αυτά περιλαμβάνουν τον αριθμό των κοινωνικά ασφαλισμένων υπαλλήλων, οι οποίοι είναι κατηγοριοποιημένοι κατά φύλο, για κάθε δήμο και κατοικία/απασχόληση. Με βάση τα παραπάνω για κάθε δήμο δημιουργείται ο πληθυσμός με τα χαρακτηριστικά του. Για κάθε άτομο επιλέγεται τυχαία το σπίτι του να βρίσκεται σε μια από τις ζώνες του Βερολίνου και δημιουργείται ένα νοικοκυριό. Όλες οι πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν για τον πληθυσμό εγγράφονται σε ατομικά αρχεία τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται από το μοντέλο δραστηριοτήτων CEMDAP.

⁴ LOR (Lebensweltlich orientierte Raume) είναι το ζωνικό σύστημα γειτονιών του Βερολίνου. Συνολικά το Βερολίνο διαιρείται σε 447 LOR (neighborhood-oriented districts).

Για το μοντέλο είναι επίσης απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν το επίπεδο εξυπηρέτησης των μεταφορών, συμπεριλαμβανομένων των χρόνων των μετακινήσεων και του κόστους τους. Για τη δημόσια συγκοινωνία χρησιμοποιούνται τα χρονοδιαγράμματά τους, που περιέχουν τις τοποθεσίες των στάσεων/σταθμών και τις αντίστοιχες αφίξεις και αναχωρήσεις των μέσων μαζικής μεταφοράς ενώ και οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης αποτελούν δεδομένα που αξιοποιούνται από το μοντέλο της CEMDAP.

Τα πλάνα των δραστηριοτήτων που δημιούργησε η CEMDAP για τους πράκτορες, εισάγονται στη συνέχεια στο λογισμικό της MATSim, η οποία και μέσω της διαδικασίας που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, προσομοιώνει την κυκλοφορία των κατοίκων του Βερολίνου. Στο Open-Berlin σενάριο, τα χαρακτηριστικά του οχήματος τόσο των μέσων δημόσιας όσο και ιδιωτικής μεταφοράς όπως και οι μονάδες επιβατικών αυτοκινήτων - MEA (passenger car equivalents -pce) που προκύπτουν εισάγονται στην αρχή της προσομοίωσης. Σύμφωνα με αυτό το αρχείο, ένα φορτηγό (και κάθε εμπορευματικό μέσο μεταφοράς) ισούται με 3,5 μονάδες επιβατικών αυτοκινήτων (MEA). Οι θέσεις επιβατών και η χωρητικότητα όρθιων επιβατών είναι μια σημαντική μεταβλητή στο σύνολο των δεδομένων για τα οχήματα των δημόσιων μεταφορών. Το τρένο S-Bahn και το μετρό U-Bahn έχουν χωρητικότητα θέσεων μεγαλύτερη από 300 άτομα, ενώ η χωρητικότητα σε όρθια θέση υπερβαίνει τα 600 άτομα. Τα λεωφορεία και τα τραμ έχουν σημαντικά μικρότερη χωρητικότητα.

Στο Open-Berlin, τα αυτοκίνητα και τα μέσα μαζικής μεταφοράς (εκτός από τις μετακινήσεις με μετρό ή τρένο) προσομοιώνονται στο δίκτυο χρησιμοποιώντας μια μέθοδο προσομοίωσης κυκλοφορίας που βασίζεται στην ουρά (δηλαδή QSim). Σε αυτόν τον προσομοιωτή, η εισροή των οχημάτων σε ένα οδικό σύνδεσμο περιορίζεται με βάση τη χωρητικότητά αυτού. Τα κυκλοφοριακά μεγέθη κάθε συνδέσμου (δηλαδή ταχύτητα ελεύθερης ροής και χωρητικότητα) έχουν δοθεί με βάση την κατηγορία OSM τους. Επομένως, είναι σταθερά ανά ιεραρχικό επίπεδο (Zilske et al., 2011). Τα μέσα μαζικής μεταφοράς μπορούν να μετακινούνται μόνο μέσω των συνδέσμων που αντιστοιχούν σε αυτά, τηρώντας πλήρως το χρονοδιάγραμμά τους. Έτσι, η ταχύτητα ελεύθερης ροής ποικίλλει ανά σύνδεσμο. Οι μετακινήσεις με ποδήλατο και η πεζή τηλεμεταφέρονται.

Αυτό σημαίνει ότι το MATSim μεταφέρει τους πράκτορες από την προηγούμενη θέση δραστηριότητάς τους στην επόμενη με χρονική καθυστέρηση, η οποία αντιστοιχεί στον απαιτούμενο χρόνο για την κάλυψη του 1.3 της Ευκλείδειας απόστασης (όπως έχει οριστεί) ακολουθώντας μια προκαθορισμένη ταχύτητα, δηλαδή: 4 km /ώρα για πεζούς και 12 km/h για ποδηλάτες. Σε ταξίδια με δημόσια μέσα μεταφοράς, το σενάριο Open-Berlin θεωρεί μια απόσταση σε ευθεία γραμμή (ή μια ακτίνα) 500 μέτρα ως τη μέγιστη για πρόσβαση ή έξοδο από στάσεις λεωφορείων και σταθμούς μετρό.

Τα σχέδια στο Open-Berlin βαθμολογούνται με βάση το γενικευμένο κόστος ταξιδιού που σχετίζεται με τον χρόνο και την απόσταση (Ziemke, Kaddoura, et al., 2019). Το γενικευμένο κόστος χρόνου σχετίζεται με τον χρόνο που αφιερώνεται στην εκτέλεση κάθε δραστηριότητας καθώς και με την πρόωρη ή καθυστερημένη άφιξη στην τοποθεσία της δραστηριότητας (Nagel et al., 2016). Το σενάριο δεν χρησιμοποιεί για συγκεκριμένα μέσα μετακίνησης παραμέτρους «β» του κόστους χρόνου. Ωστόσο, χρησιμοποιεί διαφορετικό δείκτη κόστους της απόστασης (EUR/m) ανά μέσο μεταφοράς. Για παράδειγμα, σε ιδιωτικά αυτοκίνητα και μοτοσυκλέτες (δηλαδή, οδήγηση), αυτή η παράμετρος έχει οριστεί σε -0,0002 EUR/m. στα φορτηγά αυτή η παράμετρος είναι ίση με -0,0004 EUR/m. Η συνάρτηση χρησιμότητας των μέσων μαζικής

μεταφοράς χρησιμοποιεί μια ημερήσια νομισματική σταθερά, η οποία ισούται με 2,1 EUR/ημέρα, για καθημερινούς χρήστες, ενώ σε ενεργές λειτουργίες, δεν υπάρχει κόστος απόστασης. Έχουν εισαχθεί διαφορετικές εναλλακτικές συγκεκριμένες σταθερές ανά τρόπο λειτουργίας, π.χ. αυτοκίνητο: -1 utils, διαδρομή: 0 utils, φορτίο: 0 utils, δημόσια συγκοινωνία: -0,3 utils, ποδήλατο: -1,8 utils και περπάτημα: 0,0 utils. Όσον αφορά τη διαδικασία επανασχεδιασμού, δημιουργεί νέα σχέδια μόνο για το 15% όλων των πρακτόρων σε κάθε επανάληψη. Κάθε πράκτορας έχει τρεις επιλογές: α) αλλαγή του τρόπου μεταφοράς (5%), β) τροποποίηση της ώρας αναχώρησης (5%) και γ) να ακολουθήσει μια εναλλακτική διαδρομή για μεγιστοποίηση της χρησιμότητας. Για το 85% των πρακτόρων, ο αλγόριθμος επιλέγει ένα σχέδιο μεταξύ όλων των προσομοιωμένων πλάνων (από τις προηγούμενες επαναλήψεις) με βάση πιθανότητες, οι οποίες υπολογίζονται από ένα μοντέλο MNL.

4.3. Διαμόρφωση Σεναρίων

Τα σενάρια αφορούν πιθανές και επιθυμητές αλλαγές για το μέλλον και τρόπους που αυτές μπορούν να επιτευχθούν. Αφού το Βερολίνο έχει ήδη κάνει σημαντική πρόοδο στη μείωση των ορίων ταχύτητας, στην παρούσα διπλωματική γίνεται μικρή τροποποίηση αυτών. Στην σημερινή κατάσταση της κυκλοφορίας το αυτοκίνητο κυριαρχεί. Πιο συγκεκριμένα, τα όρια ταχύτητας σε οδούς μικρής σημασίας (unclassified) και κατοικίας (residential) είναι 30 km/h. Στις τοπικές (residential) και συλλεκτήριες (tertiary) τα όρια είναι της τάξης των 50 km/h. Στις δευτερεύουσες (secondary) και πρωτεύουσες οδούς (primary) τα όρια είναι κατά 20 km/h υψηλότερα ενώ στις οδούς ταχείας κυκλοφορίας (trunk) και τους αυτοκινητόδρομους (motorway) τα όρια είναι πολύ υψηλότερα, 90 km/h και 130 km/h αντίστοιχα.

Στο συγκεκριμένο σενάριο θεωρείται πλήρης συμμόρφωση των οδηγών με τα όρια ταχύτητας επομένως ο δείκτης συμμόρφωσης ισούται με τη μονάδα. Για την δημιουργία και των υπόλοιπων σεναρίων, σχηματίστηκαν ακόμα δυο ομάδες ταχυτήτων (σενάριο 2 και 3) που προσβλέπουν σε σταδιακά αυστηρότερη πολιτική ορίων ταχύτητας ως ριζοσπαστικό μέτρο ηπιοποίησης της κυκλοφορίας. Κάθε μια από αυτές τις ομάδες ταχυτήτων συνδυάστηκε με τρεις ακόμα στρατηγικές συμμόρφωσης (σενάρια a,b,c). Επομένως, διαμορφώθηκαν τελικά 6 σενάρια (2*3) προς εξέταση.

Για τον καθορισμό νέων ορίων ταχύτητας, δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στο δευτερεύον δίκτυο (secondary roads). Τα όρια ταχύτητάς τους μειώθηκαν από 70 km/h στο 1^ο σενάριο σε 50 km/h και σε 30 km/h στο 2^ο και 3^ο σενάριο αντίστοιχα. Στο σενάριο 2, τα όρια ταχύτητας του τριτεύοντος δικτύου (tertiary roads) μειώνονται στα 30 km/h. Το 3^ο σενάριο περιγράφει ακραίες καταστάσεις, στις οποίες σε όλους τους αστικούς δρόμους εκτός από τους πρωτεύοντες (primary), τους ταχείας κυκλοφορίας (trunk) και τους αυτοκινητόδρομους (motorway), εφαρμόζονται όρια ταχύτητας μικρότερα ή ίσα των 30 km/h.

Για τη διαμόρφωση των τριών σεναρίων που περιέχουν τους δείκτες συμμόρφωσης, ακολουθήθηκαν αντίστοιχα τρεις κανόνες. Σύμφωνα με τον Elvik, 10 km/h αλλαγή σε όρια ταχύτητας οδηγεί σε αλλαγή μόλις 2.5 km/h στη μέση ταχύτητα των οδηγών. Τα σενάρια «a» σχεδιάζονται ακολουθώντας αυτόν ακριβώς τον κανόνα. Τα σενάρια «b», αντιστοιχούν σε δείκτη συμμόρφωσης 1 σε κάθε περίπτωση. Με την υλοποίηση παρεμβάσεων ήπιας κυκλοφορίας στο αστικό περιβάλλον των γειτονιών του Βερολίνου εξασφαλίζεται και η υψηλότερη συμμόρφωση των οδηγών με τα νέα όρια. Τέλος, τα σενάρια «c» παρουσιάζουν μια ιδανική πραγματικότητα, στην οποία η ταχύτητα ελεύθερης ροής σε περιοχές που έχουν

υλοποιηθεί μέτρα ηπιοποίησης της κυκλοφορίας είναι 0.9 φορές μικρότερη από το όριο ταχύτητας της περιοχής, ενώ στους υπόλοιπους δρόμους οι οδηγοί ακολουθούν τα όρια ταχύτητας. Αυτή η πραγματικότητα είναι συνδεδεμένη με την έννοια του δρόμου συνύπαρξης (shared space), για τους οποίους έχουν παρατηρηθεί χαμηλότερες ταχύτητες κυκλοφορίας σε σύγκριση με τα όρια (Karagiannis et al., 2020; Batista et al., 2022). Ωστόσο, αυτό σχετίζεται με τις αλληλεπιδράσεις των μετακινούμενων που συμβαίνουν σε πολυσύχναστα περιβάλλοντα κοινόχρηστου χώρου. Αυτές οι δυναμικές σχέσεις δεν λαμβάνονται υπόψη σε αυτή τη μελέτη, καθώς θα αύξανε την πολυπλοκότητα του μοντέλου προσομοίωσης και συνεπώς τον χρόνο υπολογισμού.

Πίνακας 3: Σενάρια με προτεινόμενα όρια ταχυτήτων.

Ιεράρχηση OSM	Όρια ταχύτητας (km/h)			Όρια ταχύτητας (m/s)		
	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
motorway	130	130	130	36.11	36.11	36.11
motorway_link	130	130	130	36.11	36.11	36.11
trunk	90	90	90	25.00	25.00	25.00
trunk_link	90	90	90	25.00	25.00	25.00
primary	70	70	50	19.44	19.44	13.89
primary_link	70	70	50	19.44	19.44	13.89
secondary	70	50	30	19.44	13.89	8.33
tertiary	50	30	30	13.89	8.33	8.33
residential	50	30	15	13.89	8.33	4.17
living street	30	15	15	8.33	4.17	4.17
unclassified	30	15	15	8.33	4.17	4.17

Πίνακας 4: Κανόνες δεικτών συμμόρφωσης.

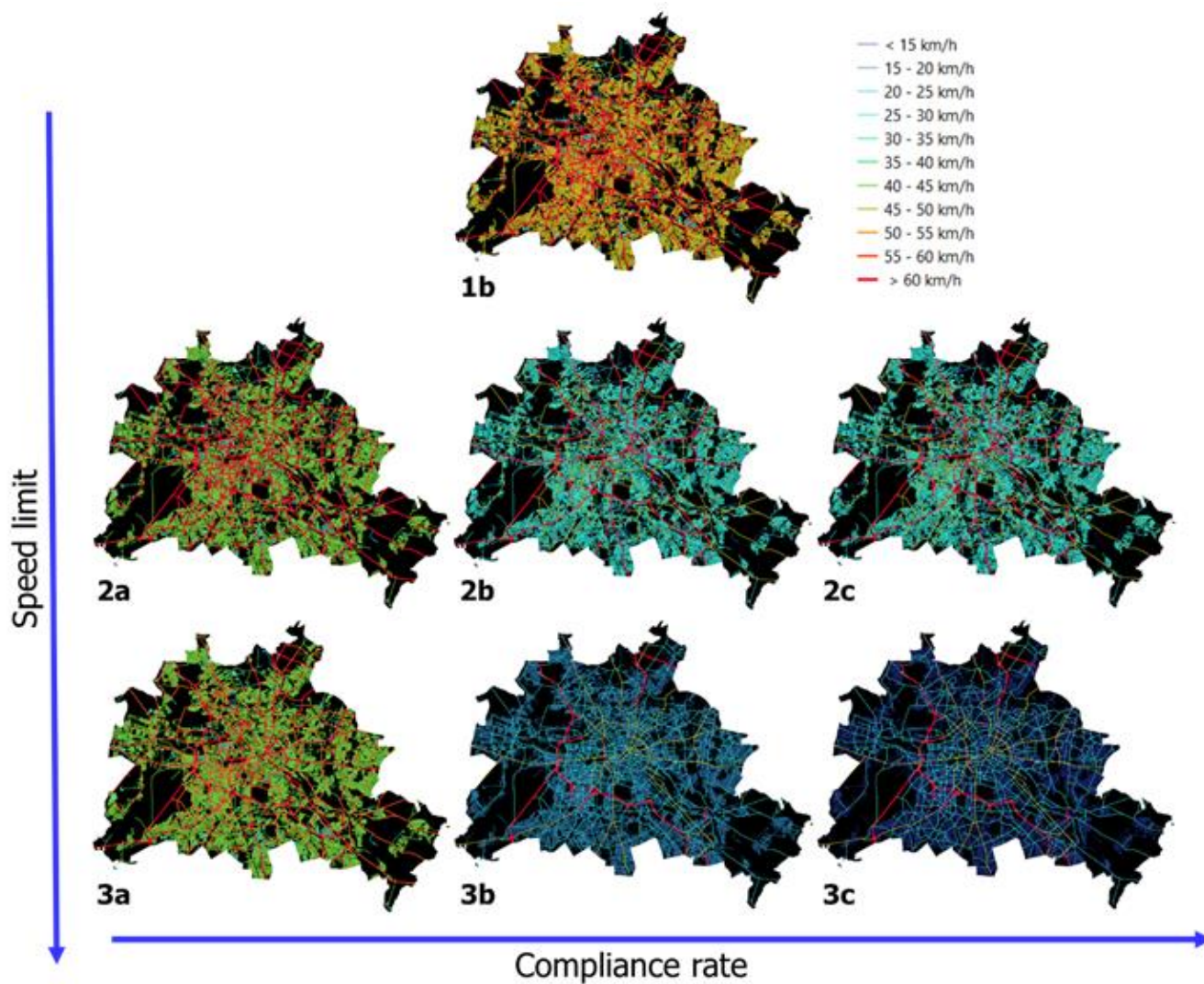
Σενάρια a	10% αύξηση της ταχύτητας ισοδυναμεί με 2.5 km/h αύξηση στη μέση ταχύτητα. Ο δείκτης συμμόρφωσης υπολογίζεται ανάλογα.
Σενάρια b	Η ταχύτητα ελεύθερης ροής ισούται με το όριο ταχύτητας. Επομένως ο δείκτης συμμόρφωσης είναι ίσος με τη μονάδα.
Σενάρια c	Στο αστικό περιβάλλον με όριο ταχύτητας μικρότερο των 30km/h, ο δείκτης συμμόρφωσης ισούται με 0.9. Στους υπόλοιπους δρόμους, είναι ίσος με 1.

Πίνακας 5: Σύνοψη σεναρίων ταχυτήτων ελεύθερης ροής βάσει των προτεινόμενων νέων ταχυτήτων και των δεικτών συμμόρφωσης.

	Σενάριο 1b	Σενάριο 2a	Σενάριο 2b	Σενάριο 2c	Σενάριο 3a	Σενάριο 3b	Σενάριο 3c
motorway	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00
motorway_link	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00
trunk	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
trunk_link	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
primary	70.00	70.00	70.00	70.00	65.00	50.00	50.00
primary_link	70.00	70.00	70.00	70.00	65.00	50.00	50.00
secondary	70.00	65.00	50.00	50.00	60.00	30.00	27.00
tertiary	50.00	45.00	30.00	27.00	45.00	30.00	27.00
residential	50.00	45.00	30.00	27.00	41.25	15.00	13.50
living street	30.00	26.25	15.00	13.50	26.25	15.00	13.50
unclassified	30.00	26.25	15.00	13.50	26.25	15.00	13.50

Πίνακας 6: Δείκτες συμμόρφωσης που προκύπτουν για κάθε σενάριο βάσει των κανόνων του τέθηκαν.

	Σενάριο 1b	Σενάριο 2a	Σενάριο 2b	Σενάριο 2c	Σενάριο 3a	Σενάριο 3b	Σενάριο 3c
motorway	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
motorway_link	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
trunk	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
trunk_link	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
primary	1.00	1.00	1.00	1.00	1.30	1.00	1.00
primary_link	1.00	1.00	1.00	1.00	1.30	1.00	1.00
secondary	1.00	1.30	1.00	1.00	2.00	1.00	0.90
tertiary	1.00	1.50	1.00	0.90	1.50	1.00	0.90
residential	1.00	1.50	1.00	0.90	2.75	1.00	0.90
living street	1.00	1.75	1.00	0.90	1.75	1.00	0.90
unclassified	1.00	1.75	1.00	0.90	1.75	1.00	0.90



Σχήμα 37: Παρουσίαση σεναρίων με τις υπολογισμένες νέες ταχύτητες ελεύθερης ροής για κάθε οδικό σύνδεσμο.

4.3. Ενημέρωση του οδικού δικτύου

Για την ενημέρωση του οδικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε ένα εργαλείο επέκτασης στη MATSim, το «network updater» το οποίο έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Python. Το συγκεκριμένο εργαλείο επιτρέπει την τροποποίηση των συνδέσμων του οδικού δικτύου που εισάγεται στο πρόγραμμα, αλλάζοντας παραμέτρους που αφορούν κυκλοφοριακά μεγέθη, όπως η ταχύτητα ελεύθερης ροής και η χωρητικότητα του δικτύου.

Στην αρχή πρέπει να οριστεί το αστικό οδικό δίκτυο, δηλαδή οι σύνδεσμοι που βρίσκονται εντός της μητροπολιτικής αστικής περιοχής. Ο χρήστης εισάγει στον κώδικα το διανυσματικό αρχείο (shapefile) με τα πολύγωνα που ορίζουν τους δήμους ή κοινότητες της υπό μελέτη περιοχής. Για την παρούσα εργασία απομονώθηκαν τα στοιχεία που αφορούν την υπό μελέτη περιοχή, δηλαδή το Βερολίνο. Η μητρόπολη του Βερολίνου αποτελείται από 12 περιοχές⁵: Mitte, Friedrichshain-Kreuzberg, Pankow, Charlottenburg - Wilmersdorf, Spandau, Steglitz - Zehlendorf, Tempelhof - Schöneberg, Neukölln, Treptow - Köpenick, Marzahn - Hellersdorf, Lichtenberg and Reinickendorf. Με τη χρήση χωρικών εργαλείων στο QGIS, και πιο συγκεκριμένα «τομή» μεταξύ του επιπέδου των περιοχών και του οδικού δικτύου, βρέθηκαν οι σύνδεσμοι και τα σημεία που περιλαμβάνονται στην περιοχή που εξετάζεται.



Σχήμα 38: Λειτουργική ιεράρχηση κατά το OSM του οδικού δικτύου του Βερολίνου.

Το μοντέλο της MATSim που απεικονίζει την κυκλοφοριακή ροή με ουρές, χρησιμοποιεί ένα οδικό δίκτυο που αποτελείται γραφικά από σημεία, που αντιστοιχούν σε διασταυρώσεις, και συνδέσμους, που αντιστοιχούν σε οδικά τμήματα. Κάθε εγγραφή συνοδεύεται από κάποια χαρακτηριστικά όπως οι συντεταγμένες x, y, ένας μοναδικός αριθμός id, σημεία αρχής και

⁵ <https://daten.berlin.de/datensaetze>

τέλους για κάθε σύνδεσμο κ.α. Κύρια χαρακτηριστικά που συμπεριλαμβάνονται στον πίνακα του οδικού δικτύου για τους συνδέσμους – οδικά τμήματα είναι:

- ⇒ **η ταχύτητα ελεύθερης ροής:** η ταχύτητα με την οποία κινούνται τα οχήματα όταν δεν προπορεύεται κάποιο άλλο όχημα και
- ⇒ **η χωρητικότητά τους:** μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος (οχήματα/ ώρα) και μέγιστη πυκνότητα (οχήματα/ χλμ.). [1] Ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος καθορίζει τον μέγιστο αριθμό των οχημάτων που εγκαταλείπουν τον σύνδεσμο-οδικό τμήμα στη μονάδα του χρόνου ενώ η μέγιστη πυκνότητα τον μέγιστο αριθμό οχημάτων που μπορεί να περιέχει ένα οδικό τμήμα στη μονάδα του χρόνου. Όταν ο σύνδεσμος είναι γεμάτος από οχήματα, η προσομοίωση δεν προσθέτει άλλα οχήματα στην ουρά, και δηλώνεται από το πρόγραμμα πως έχει προκληθεί κυκλοφοριακή συμφόρηση.

Η επέκταση “network updater” ουσιαστικά τροποποιεί αυτές τις δυο κυκλοφοριακές παραμέτρους των συνδέσμων σε κάθε υπό εξέταση σενάριο που έχει διαμορφωθεί. Κάθε σενάριο περιγράφεται από δυο βασικούς παράγοντες, τα όρια ταχύτητας κάθε κατηγορίας OSM (κάθε επιπέδου ιεράρχησης του οδικού δικτύου) και του δείκτη συμμόρφωσης των οδηγών με αυτά. Η ταχύτητα ελεύθερης ροής υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό του ορίου ταχύτητας με τον δείκτη συμμόρφωσης,

Εξίσωση 1: Ταχύτητα ελεύθερης ροής

$$u_{f,i} = u_{lim,j} * c_{f,j}$$

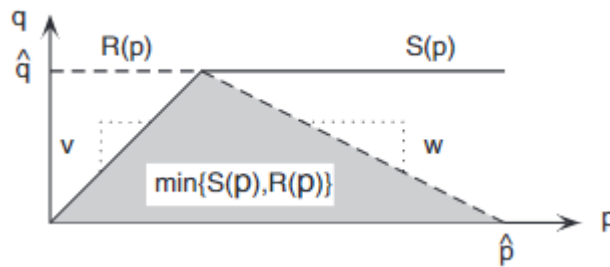
Όπου,

$u_{lim,j}$: ταχύτητα της κλάσης j του OSM

$c_{f,j}$: δείκτης συμμόρφωσης της κλάσης j του OSM

Μια αλλαγή στην ταχύτητα ελεύθερης ροής μπορεί να προκαλέσει αύξηση ή μείωση στη χωρητικότητα, δηλαδή την μέγιστη ροή που εξέρχεται από ένα σύνδεσμο σε μια ώρα.

Ο (Flotterod) κάνει μια συσχέτιση του μοντέλου της MATSim με την κλασική θεωρία κυκλοφοριακής ροής. Βασική αρχή της προσομοίωσης είναι η σχέση φόρτου-πυκνότητας. Χρησιμοποιείται το θεμελιώδες τριγωνικό διάγραμμα φόρτου-πυκνότητας, υποθέτοντας ομοιογένεια στα κυκλοφοριακή κατάσταση. Με δεδομένο έναν ομοιόμορφο δρόμο και τη μέση πυκνότητα των οχημάτων (ρ οχήματα ανά μονάδα μήκους), το μοντέλο προβλέπει το μέσο κυκλοφοριακό φόρτο (q οχήματα ανά μονάδα χρόνου) του δρόμου. Η μέγιστη ταχύτητα είναι παρατηρούμενη παράμετρος, η οποία ορίζεται στο “network file” (στο πεδίο *freespeed* του αντίστοιχου *link*), ενώ η μέγιστη πυκνότητα ισούται με τον αριθμό των λωρίδων (*permlanes*) του δρόμου προς το μήκος αυτού (πεδίο *effectivecellsize* του αντίστοιχου *link*). Η μέγιστη χωρητικότητα αντιστοιχεί στο σημείο καμπής της ταχύτητας, όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα, που διαχωρίζει την μη συμφορημένη κατάσταση από την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Η ταχύτητα φθίνει όταν ο λόγος του φόρτου προς την πυκνότητα είναι αρνητικός, οπότε και όταν το μήκος του οχήματος προς τον χρόνο που αφήνεται ως κενό ασφάλειας σε συμφορημένη κατάσταση είναι αρνητικό. Αυτή η παράμετρος είναι σταθερή: 7.5 μέτρα το όχημα και 2 δευτερόλεπτα το χρονικό κενό, επομένως ισούται με -13.5 km/h. Η ταχύτητα (backward wave speed) δηλώνεται στη JDEQSim στο πεδίο *gapTravelSpeed*: ενώ στη QSim δεν υπάρχει δυνατότητα να οριστεί.



Σχήμα 39: Θεμελιώδες Διάγραμμα Φόρτου-Πυκνότητας, πηγή: (Flotterod).

Η σχέση Φόρτου-Πυκνότητας που αναλύεται βρίσκει εφαρμογή μόνο σε σταθερές συνθήκες, όπου:

- i. ο φόρτος αυξάνεται γραμμικά με την πυκνότητα σε μικρές πυκνότητες (δηλαδή σε μη συμφορημένη περιοχή)
- ii. ο φόρτος μειώνεται γραμμικά με την πυκνότητα σε υψηλές πυκνότητες (δηλαδή σε συμφορημένη περιοχή) και
- iii. στην ενδιάμεση κατάσταση ο κυκλοφοριακός φόρτος του οδικού τμήματος φθάνει στη μέγιστη τιμή και υπολογίζεται από τη σχέση

Εξίσωση 2: Μέγιστος Κυκλοφοριακός Φόρτος, (Flötteröd, 2016)

$$q_{max} = \frac{v * w * \rho}{v + w}$$

Η μέγιστη πυκνότητα οχημάτων ορίζεται σταθερή και ίση με 125 οχήματα/χλμ., θεωρώντας κάθε όχημα μαζί με τα κενά που έχει από το προηγούμενο και το επόμενο 8 μέτρα. Επομένως, η χωρητικότητα της οδού προκύπτει από τις σχέσης:

Εξίσωση 3: Χωρητικότητα

$$c_i = \frac{u_{lim,j} * c_{f,j} * w * (l_i * k_{jam})}{u_{lim,j} * c_{f,j} + w} = \frac{u_{lim,j} * c_{f,j} * 13.5 * (l_i * 125)}{u_{lim,j} * c_{f,j} + 125}$$

Όπου,

c_i : χωρητικότητα του οδικού τμήματος-συνδέσμου i σε οχήματα/ώρα (veh/h)

w : ταχύτητα ρεύματος σε χλμ./ώρα (km/h) – θεωρείται ίση με 13.5 km/h

k_{jam} : πυκνότητα σε συνθήκη κυκλοφοριακής συμφόρησης ανά λωρίδα του συνδέσμου i σε οχήματα/χλμ. (veh/km) – θεωρείται ίσο με 125 veh/km

$u_{f,i}$: ταχύτητα ελεύθερης ροής στο σύνδεσμο i σε χλμ./ώρα (km/h)

$u_{lim,j}$: ταχύτητα της κλάσης j του OSM

$c_{f,j}$: δείκτης συμμόρφωσης της κλάσης j του OSM

l_i : αριθμός λωρίδων κυκλοφορίας του συνδέσμου i

Δεδομένου ότι υπάρχει μεγάλος αριθμός συνδέσμων, η διαδικασία αναζήτησης έχει βελτιστοποιηθεί. Για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος υπολογισμού, το εργαλείο ενημέρωσης δικτύου προσδιορίζει τις κλάσεις OSM που πρέπει να ενημερωθούν με βάση τα δεδομένα εισόδου που παρέχονται από τον χρήστη. Υπολογίζει την ταχύτητα και την χωρητικότητα ελεύθερης ροής για τις αντίστοιχες κατηγορίες OSM. Στη συνέχεια, δημιουργεί ένα υποσύνολο αστικών οδικών συνδέσμων με την ιεράρχηση του OSM και σε αυτό επικολλά τις νέες παραμέτρους κυκλοφορίας. Εάν ο αριθμός των λωρίδων είναι μεγαλύτερος από 1, η χωρητικότητα του δρόμου ενημερώνεται ανάλογα (βλ. Εξίσωση 3). Τέλος, το πρόγραμμα ενημέρωσης δικτύου δεν πραγματοποιεί καμία αλλαγή στις συνδέσεις δημόσιων συγκοινωνιών, οι οποίες εξαιρούνται από αυτή τη διαδικασία.

Η MATSim χρησιμοποιεί ως μονάδα μέτρησης της ταχύτητας τα μέτρα/δευτερόλεπτο (m/s) αντί για χλμ./ώρα (km/h), ενώ η χωρητικότητα του συνδέσμου εκφράζεται συχνά και σε οχήματα/ώρα (veh/h). Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι το Open-Berlin Scenario δεν προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις των οχημάτων στις διασταυρώσεις ούτε τους φωτεινούς σηματοδότες. Για να συμπεριλάβει όμως τον επιπλέον χρόνο ταξιδιού που προκύπτει από τα παραπάνω, το σενάριο καλιμπράρεται μειώνοντας τις ταχύτητες ελεύθερης ροής κατά 50%. Και στην παρούσα μελέτη το χαρακτηριστικό αυτό έχει αντίστοιχα ληφθεί υπόψιν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για την πραγματοποίηση της μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ένας υπολογιστής γραφείου με επεξεργαστή Intel Core i7 - 4790 CPU και 16,0 Gb μνήμη RAM. Για την εκτέλεση του συν-εξελικτικού αλγόριθμου της MATSim, διατέθηκαν 6,0 Gb μνήμης RAM. Ο χρόνος υπολογισμού ανά σενάριο ήταν περίπου ίσος με 11 ώρες και 10 λεπτά (500 επαναλήψεις), ενώ ο μέσος χρόνος υπολογισμού ανά επανάληψη ήταν μικρότερος από 80 δευτερόλεπτα. Επομένως, ο συνολικός χρόνος που απαιτήθηκε για την προσομοίωση ήταν 3 ημέρες 6 ώρες και 10 λεπτά.

5.1. Ανάλυση στατιστικών αποτελεσμάτων των μετακινήσεων

Στο τέλος της προσομοίωσης η MATSim παράγει κάποια στατιστικά στοιχεία σχετικά με τα σκορ, τα μέσα μεταφοράς, τα μήκη των ταξιδιών και τους χρόνους (scorestats, modestats, traveldistancestats, stopwatch).

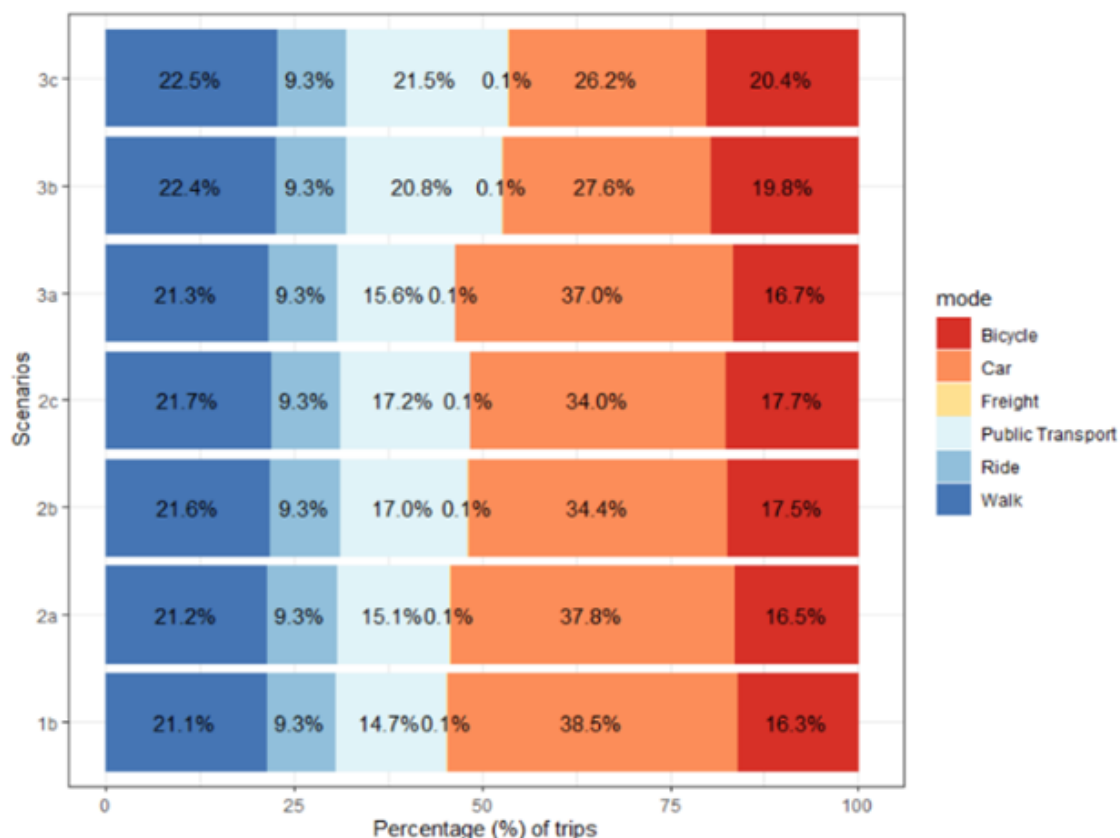
Η παρούσα εργασία έχοντας ως σκοπό να μελετήσει τις επιπτώσεις της μείωσης των ταχυτήτων στην μητρόπολη του Βερολίνου, αξιοποιεί κυρίως τα αποτελέσματα που αφορούν την αλλαγή στη συμπεριφορά των ατόμων σε κάθε σενάριο. Η ανάλυση, δηλαδή, των αποτελεσμάτων στρέφεται γύρω από το πώς άλλαξε στο εκάστοτε σενάριο η προτίμηση του κοινού στο μέσο που θα χρησιμοποιήσει για τη μετακίνησή του.

Στην MATSim η κατανομή των μετακινήσεων στα διάφορα μέσα μεταφοράς, δηλαδή το αυτοκίνητο (ως οδηγός), το αυτοκίνητο (ως επιβάτης), τις δημόσιες μεταφορές, το ποδήλατο, το περπάτημα και τα εμπορευματικά οχήματα, εκφράζεται με τρεις τρόπους: (α) το ποσοστό των μετακινήσεων ανά μέσο μεταφοράς, (β) τις ώρες που οι επιβάτες βρίσκονταν σε κάποιο μέσο μεταφοράς και (γ) τα χιλιόμετρα που διένυσαν οι επιβάτες με κάθε μέσο μεταφοράς. Τα στατιστικά που παράγονται από το πρόγραμμα για κάθε σενάριο που τρέχει εξάγονται και σε μορφή κειμένου και παρουσιάζουν ποσοστά ανά μέσο για κάθε επανάληψη. Από αυτά τα αρχεία δημιουργήθηκαν αρχεία excel που περιελάμβαναν τα ποσοστά της τελευταίας μόνο επανάληψης για κάθε σενάριο. Στη συνέχεια μέσω του λογισμικού Rstudio και το πακέτο ggplot δημιουργήθηκαν κατάλληλα γραφήματα ώστε να είναι δυνατή η ανάλυση των στατιστικών και η σύγκριση των σεναρίων.

Ποσοστά μετακινήσεων ανά μέσο μεταφοράς ανά σενάριο

Στο σενάριο βάσης 1b, της πλήρους συμμόρφωσης των οδηγών στα ισχύοντα όρια ταχύτητας, όπως είναι λογικό το αυτοκίνητο με ποσοστό 38.5% αποτελεί το κυρίαρχο μέσο μεταφοράς. Ακολουθεί το περπάτημα με ποσοστό της τάξης του 21.1%, το οποίο δεν διαφέρει ιδιαίτερα και στα υπόλοιπα σενάρια. Με σταθερό ποσοστό και ίσο με 9.3% σε όλα τα σενάρια φαίνεται να είναι και η μετακίνηση των επιβατών αυτοκινήτου, όπως και η κίνηση των εμπορευματικών οχημάτων, η οποία είναι ελάχιστη (0.1%). Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα στα δυο σενάρια 2 και 3 που παρουσιάζουν τις μειωμένες ταχύτητες, όσο αυξάνεται η συμμόρφωση των οδηγών με τα όρια τόσο τα άτομα προτιμούν άλλα μέσα μετακίνησης τα οποία βασικά είναι πρώτα το περπάτημα (21.2%-22.5%) και μετά οι δημόσιες συγκοινωνίες (15.1%-21.5%) και το ποδήλατο (16.5%-20.4%). Αξίζει να σημειωθεί πως οι μετακινήσεις με τα δημόσια μέσα μεταφοράς ενώ ξεκινούν στο βασικό σενάριο με ποσοστό από την συνολική κυκλοφορία της τάξης του περίπου 15% , στα σενάρια 2b, 2c και 3b, 3c φτάνουν στα 17.0%, 17.2% και 21.5% αντίστοιχα. Στο σενάριο 3a που οι ταχύτητες είναι πολύ μειωμένες αλλά ο δείκτης συμμόρφωσης των οδηγών

με αυτές ξεπερνάει τη μονάδα, παρατηρείται πως το ποσοστό μετακίνησης με δημόσια μέσα (15.6%) είναι σχετικά κοντά στο ποσοστό του βασικού σεναρίου (14.7%), γεγονός που τονίζει τη σημασία της αποδοχής και υιοθέτησης των μέτρων από τους χρήστες της οδού. Επίσης άξιο αναφοράς είναι ότι στο τελευταίο σενάριο 3c, η διαφορά στα ποσοστά του ιδιωτικού ΙΧ και των δημόσιων μέσων μεταφοράς είναι λιγότερο από 5%. Παρατηρείται παράλληλα, πως η μείωση των ταχυτήτων σε συνδυασμό με τη συμμόρφωση των οδηγών έχει ως αποτέλεσμα οι κάτοικοι του Βερολίνου να χρησιμοποιούν περισσότερο το ποδήλατο ως μέσο μετακίνησης για τις δραστηριότητές τους. Πράγματι, μεταξύ των σεναρίων 1b και 3c η χρήση των ποδηλάτων αυξήθηκε από 16.35% σε 20.4%.



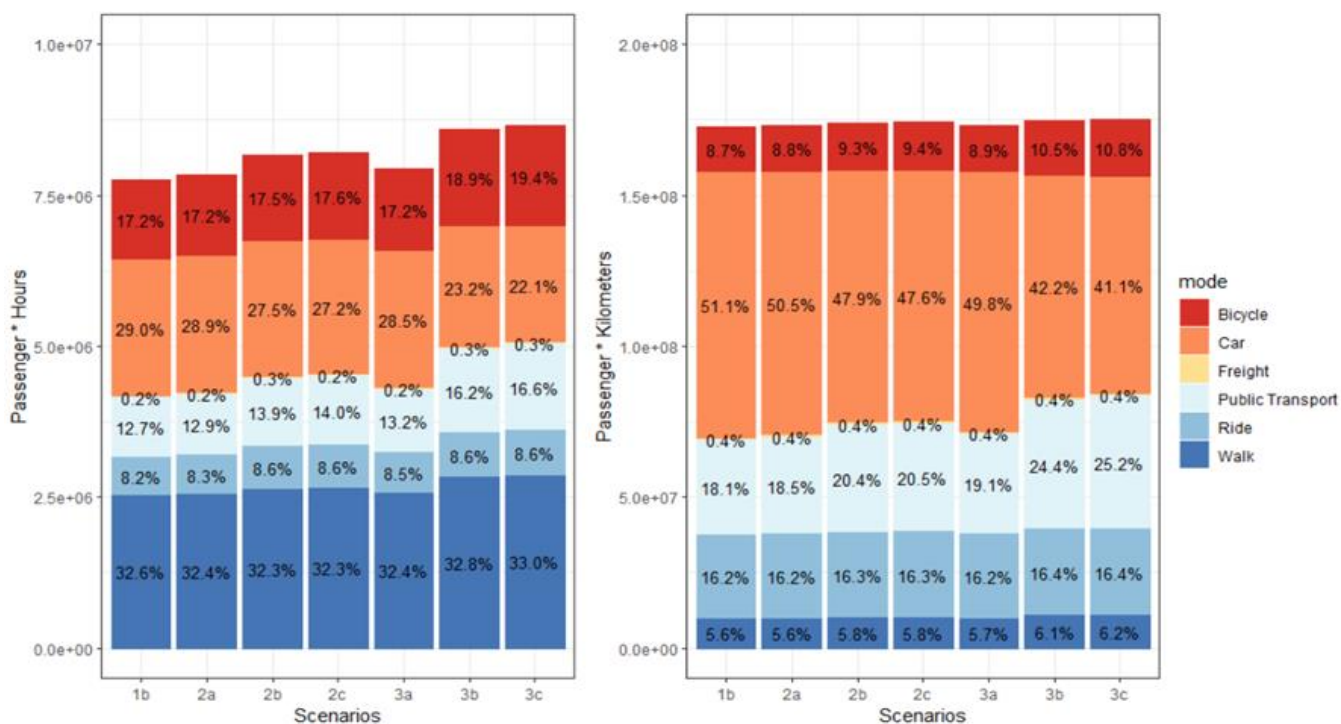
Σχήμα 40: Κατανομή μετακινήσεων (%) στα μέσα μεταφοράς ανά σενάριο.

✚ Ποσοστά συνολικών επιβατικών ωρών και χιλιομέτρων

Όσον αφορά τα ποσοστά των επιβατικών ωρών, σύμφωνα με την προσομοίωση της MATSim οι συνολικές ώρες των επιβατών στα διάφορα μέσα μετακίνησης παρουσιάζουν αύξηση 11,61% μεταξύ των δυο ακραίων σεναρίων, δηλαδή από το σενάριο 1b στο σενάριο 3c. Καταγράφονται ακόμα, παρόμοιες επιβατικές ώρες στο βασικό σενάριο 1b και στα άλλα δυο σενάρια ταχυτήτων, όταν η συμμόρφωση είναι σε χαμηλά επίπεδα, δηλαδή στα σενάρια 2a,3a. Σε όλες τις περιπτώσεις, η διαφορά φαίνεται να είναι υψηλή μεταξύ σεναρίων με χαμηλό ποσοστό συμμόρφωσης (2a ή 3a) και εκείνων με υψηλό (2c ή 3c) (βλ. σχήμα. 41 – αριστερό γράφημα). Το υψηλότερο ποσοστό επιβατικών ωρών (32.6% έως 33.0%) αφορά τη πεζή μετακίνηση. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, αφού η πεζή μετακίνηση είναι μεταξύ όλων η πιο αργή. Η πιο αισθητή διαφορά μεταξύ των σεναρίων εμφανίζεται στις επιβατικές ώρες των αυτοκινήτων. Παρατηρείται μείωση της τάξης του 15% από το σενάριο 1b έως το

σενάριο 3c. Από την άλλη πλευρά, το μερίδιο των επιβατικών ωρών των μέσων μαζικής μεταφοράς αγγίζει το 16.2% και το 16.6% στο σενάριο 3b και 3c, αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει αύξηση των ωρών επιβατών κατά περίπου 30% συνολικά. Το μερίδιο των ωρών ποδηλάτου παρέμεινε σταθερό σε σενάρια με χαμηλή συμμόρφωση στα νέα όρια ταχύτητας.

Τα συνολικά επιβατο-χιλιόμετρα δεν διέφεραν μεταξύ των σεναρίων. Το αποτέλεσμα αυτό, δεν προκαλεί εντύπωση, αφού οι πράκτορες κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού των μετακινήσεων, δεν ακυρώνουν τις δραστηριότητές τους, παρά μόνο επιλέγουν διαφορετικό μέσο μετακίνησης, διαφορετική διαδρομή να ακολουθήσουν για τον προορισμό τους ή διαφορετική ώρα για να ξεκινήσουν την μετακίνηση. Στο βασικό σενάριο, τα ταξίδια με αυτοκίνητο αντιπροσωπεύουν το 51.1% της συνολικής απόστασης που διανύουν οι πράκτορες. Σε σύγκριση με το βασικό σενάριο, προβλέπεται πτώση -16,3% και -18,5% στα επιβατικά χιλιόμετρα με την εφαρμογή του σεναρίου 3b και 3c, αντίστοιχα (βλ. σχήμα. 41 – δεξιά γράφημα). Αντίθετα, η συνολική απόσταση που διανύεται από τα μέσα μαζικής μεταφοράς προβλέπεται να αυξηθεί σε σενάρια με υψηλό ποσοστό συμμόρφωσης κατά περίπου 14% στα σενάρια 2b και 2c και κατά 40% στα σενάρια 3b και 3c. Σε άλλα μέσα μεταφοράς, δεν καταγράφηκαν μεγάλες διαφορές στην απόσταση διαδρομής.



Σχήμα 41: Επιβατικές ώρες (αριστερά) και επιβατοχιλιόμετρα (δεξιά) ανά μέσο μετακίνησης ανά σενάριο.

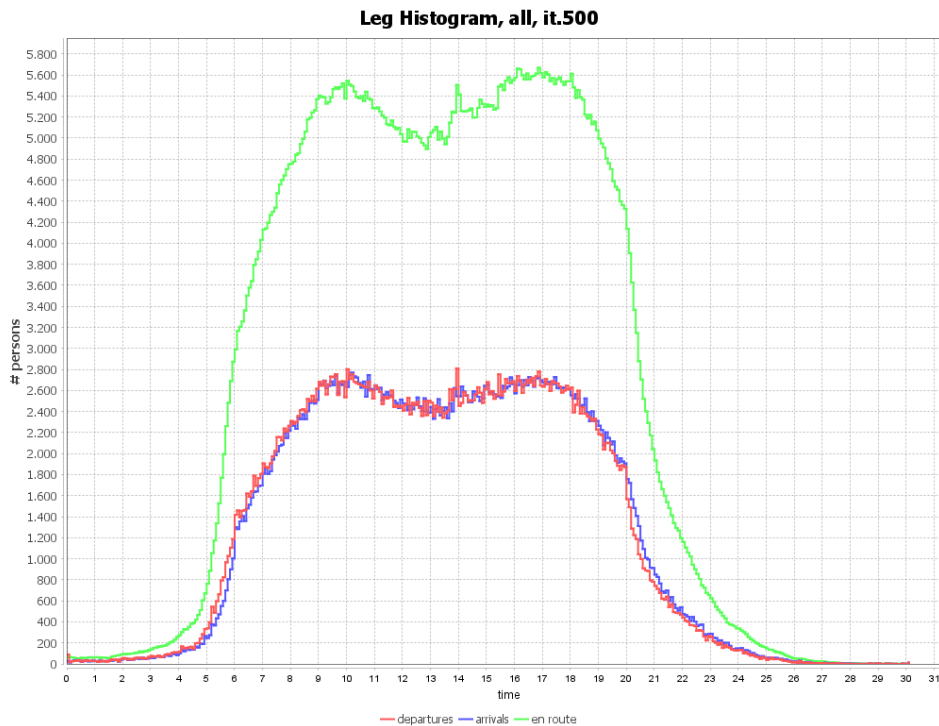
5.2. Ανάλυση αποτελεσμάτων οπτικοποίησης των υπό μελέτη σεναρίων

Στο επόμενο βήμα, το οδικό δίκτυο και τα συμβάντα, που εξήχθησαν από την τελευταία επανάληψη κάθε σεναρίου, εισάγονται στον οπτικοποιητή. Με βάση αυτές τις εισόδους, μπορούν να υπολογιστούν οι κυκλοφοριακοί φόρτοι και η μέση ταχύτητα σε κάθε σύνδεσμο. Οι κυκλοφοριακοί φόρτοι στους οδικούς συνδέσμους οπτικοποιούνται με τα διαφορετικά μεγέθη στα πλάτη των συνδέσμων. Η μέση ταχύτητα που υπολογίζεται από το πρόγραμμα για κάθε σύνδεσμο, αξιοποιείται για να αναδειχθούν τα σημεία που έχει προκληθεί κυκλοφοριακή συμφόρηση στον εκάστοτε σύνδεσμο. Πιο συγκεκριμένα για τον εντοπισμό συμφορημένων συνδέσμων, χρησιμοποιούνται σχετικές ταχύτητες, οι οποίες προκύπτουν από τον λόγο:

Εξίσωση 4: Σχετική ταχύτητα οχημάτων στο σύνδεσμο.

$$\text{σχετική ταχύτητα} = \frac{\text{μέση ταχύτητα}}{\text{ταχύτητα ελεύθερης ροής}}$$

Στην MATSim συνήθως τα οχήματα κινούνται με ταχύτητες πολύ κοντά στις ταχύτητες ελεύθερης ροής, εκτός από την περίπτωση που στον σύνδεσμο υπάρχουν περισσότερα οχήματα από ότι καθορίζεται με την μέγιστη πυκνότητα του συνδέσμου. Τότε, τα οχήματα καθυστερούν να εξέλθουν από τον σύνδεσμο και επομένως περνάνε περισσότερο χρόνο σε αυτόν κινούμενη με μειωμένες ταχύτητες. Καθώς οι ταχύτητες ελεύθερης ροής έχουν ήδη μειωθεί κατά 50%, για να ληφθούν υπόψη οι καθυστερήσεις στους κόμβους, μια αναλογία μικρότερη από 0.90 υποδηλώνει συμφόρηση. Επίσης, επειδή οι φόρτοι ποικίλλουν σε διαφορετικές ώρες της ημέρας, επιλέχθηκε η απογευματινή ώρα αιχμής (δηλαδή 16:50) για να γίνουν οι συγκρίσεις μεταξύ των σεναρίων. Από το ιστόγραμμα σκελών (Leg Histogram) του της τελευταίας επανάληψης σεναρίου βάσης 1b φαίνεται ότι εκείνη την ώρα συναντώνται τα περισσότερα άτομα εν κινήσει (βλ.σχ.42).



Σχήμα 42: Ιστόγραμμα σκέλους για όλα τα μέσα μετακίνησης, 500η επανάληψη σεναρίου 1b.

Τα αποτελέσματα της οπτικοποίησης παρουσιάζονται στα Σχήματα 42-49, όπου το πλάτος του συνδέσμου υποδεικνύει τους φόρτους κυκλοφορίας των αυτοκινήτων και τα σημεία συμφόρησης επισημαίνονται ως εξής;

- ✓ Με σκούρο κόκκινο οι οδικοί σύνδεσμοι με σχετική ταχύτητα ≤ 0.85 ,
- ✓ Με κόκκινο οι οδικοί σύνδεσμοι με σχετική ταχύτητα ≤ 0.875
- ✓ Με πορτοκαλί οι οδικοί σύνδεσμοι με σχετική ταχύτητα ≤ 0.90
- ✓ Με κίτρινο οι οδικοί σύνδεσμοι με σχετική ταχύτητα ≤ 0.925
- ✓ Με ανοιχτό κίτρινο οι οδικοί σύνδεσμοι με σχετική ταχύτητα ≤ 0.95
- ✓ Με μπλε οι οδικοί σύνδεσμοι με σχετική ταχύτητα > 0.875

Όπως φαίνεται, στο σενάριο 1b, 2a και 3a, σημεία συμφόρησης εξαπλώνονται στο δίκτυο του κέντρου της πόλης. Οι δευτερεύοντες και τριτεύοντες σύνδεσμοι είναι αυτοί με τον μεγαλύτερο αριθμό σημείων συμφόρησης. Η μείωση των ορίων ταχύτητας σε αυτούς τους δρόμους και η υψηλή συμμόρφωση οδηγεί σε μείωση του φόρτου της κυκλοφορίας των αυτοκινήτων σε όλες τις συνδέσεις εκτός από τους αυτοκινητόδρομους και τους κύριους δρόμους, όπου τα όρια ταχύτητας παρέμειναν σταθερά. Το κέντρο της πόλης είναι προσβάσιμο μέσω του κύριου οδικού δικτύου που συνδέει το κέντρο της πόλης με τα προάστια. Ο πράκτορας που χρησιμοποιεί αυτοκίνητο φαίνεται να προτιμά αυτούς τους δρόμους που του επιτρέπουν τις υψηλότερες ταχύτητες ώστε να καλύπτουν μεγαλύτερες αποστάσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, με την παρατήρηση των χαρτών, επισημαίνεται μια σαφής πτώση των ροών κυκλοφορίας που διέρχονται από το κέντρο της πόλης.



Σχήμα 43: Οπτικοποίηση σεναρίου 1b.



Σχήμα 44: Οπτικοποίηση σεναρίου 2a



Σχήμα 45: Οπτικοποίηση σεναρίου 2b.



Σχήμα 46: Οπτικοποίηση σεναρίου 2c.



Σχήμα 47: Οπτικοποίηση σεναρίου 3a.



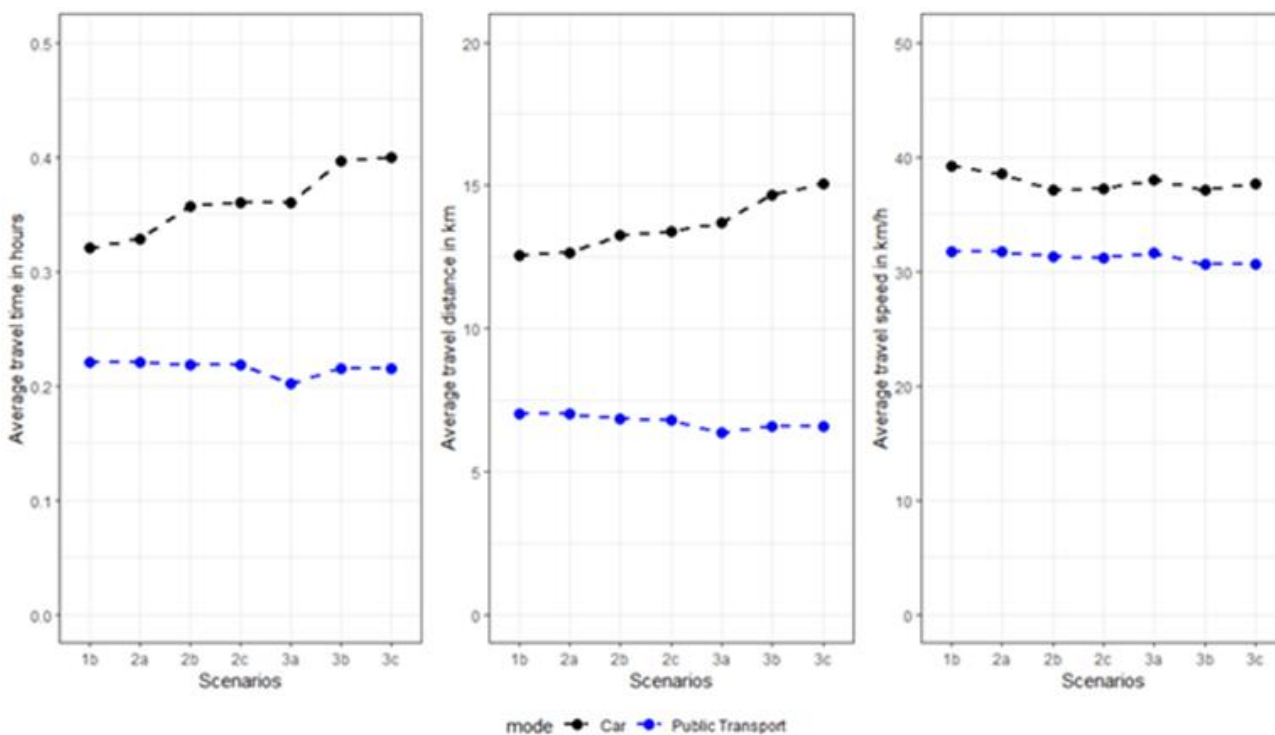
Σχήμα 48: Οπτικοποίηση σεναρίου 3b.



Σχήμα 49: Οπτικοποίηση σεναρίου 3c.

5.3. Ανάλυση αποτελεσμάτων για τα μέσα: αυτοκίνητο και δημόσιες μεταφορές

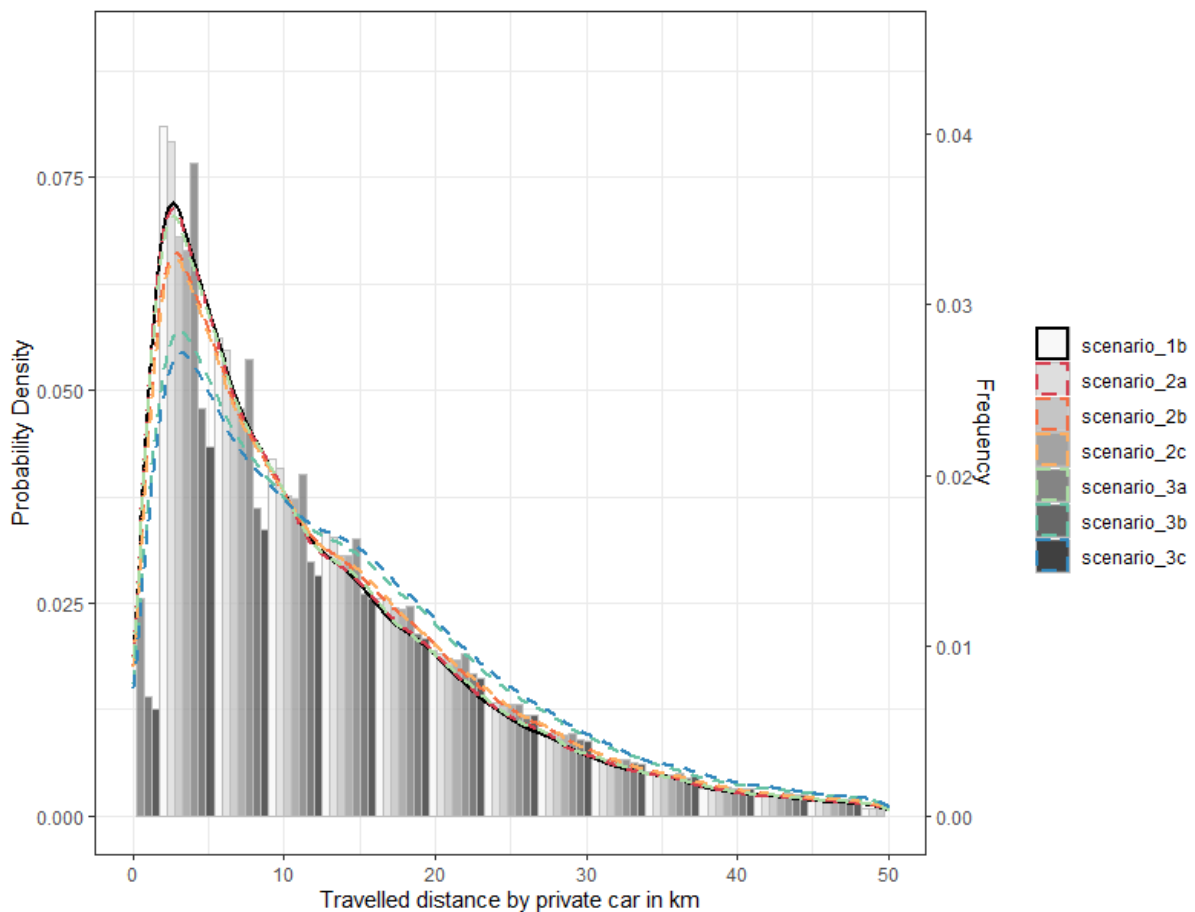
Καθώς οι δημόσιες συγκοινωνίες φαίνεται να είναι ο ισχυρότερος ανταγωνιστής του ιδιωτικού αυτοκινήτου, στο επόμενο βήμα, χρησιμοποιήθηκαν και εκτιμήθηκαν σχετικοί δείκτες για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, ο μέσος χρόνος μετακίνησης, η απόσταση και η ταχύτητα είναι τρεις δείκτες που εισάγονται σε αυτή την ανάλυση (βλ. σχ. 50). Στο σενάριο 1b, ο μέσος χρόνος ταξιδιού των ταξιδιών με αυτοκίνητο προβλέπεται να είναι περίπου 19.2 λεπτά. Στο σενάριο 2b, αυτός ο χρόνος ταξιδιού αυξάνεται στα 21.3 λεπτά, ενώ στο σενάριο 3c αναμένεται να φτάσει τα 23.8 λεπτά. Αντίθετα, στα ταξίδια με τα μέσα μαζικής μεταφοράς, η διαφορά του μέσου χρόνου ταξιδιού μεταξύ του σεναρίου 1b και 3c είναι μικρότερη από 1 λεπτό. Όσον αφορά την απόσταση ταξιδιού, εισάγοντας χαμηλότερα όρια ταχύτητας, οι ταξιδιώτες χρησιμοποιούν τα ιδιωτικά τους αυτοκίνητα για να διανύσουν μεγαλύτερες αποστάσεις. Πράγματι, η αύξηση της μέσης απόστασης ταξιδιού μεταξύ του σεναρίου 1b και 3c προβλέπεται να είναι 2.11 χιλιόμετρα. Από την άλλη πλευρά, η μέση απόσταση ταξιδιού με τα μέσα μαζικής μεταφοράς μειώνεται κατά 6.1% μεταξύ των προαναφερθέντων σεναρίων. Τέλος, στο σενάριο 1b, το αυτοκίνητο κινήθηκε στο οδικό δίκτυο με ταχύτητα 39.2 km/h, ενώ στο σενάριο 3c, η μέση ταχύτητα του αυτοκινήτου υπολογίστηκε ότι είναι ίση με 37.6 km/h. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τις ώρες αιχμής μόνο (08:00 έως 10:00 και 16:00 έως 18:00) στη μητροπολιτική περιοχή του Βερολίνου, η μέση ταχύτητα του αυτοκινήτου φάνηκε να είναι υψηλότερη στο σενάριο 3c σε σύγκριση με όλα τα άλλα σενάρια.



Σχήμα 50: Μέσος χρόνος ταξιδιού (αριστερά), Μέση απόσταση (στο κέντρο) και μέση ταχύτητα (δεξιά) ανά σενάριο και μέσο μεταφοράς (αυτοκίνητο και δημόσια συγκοινωνία).

5.4. Κατανομές αποστάσεων και ταχυτήτων ανά σενάριο για το αυτοκίνητο

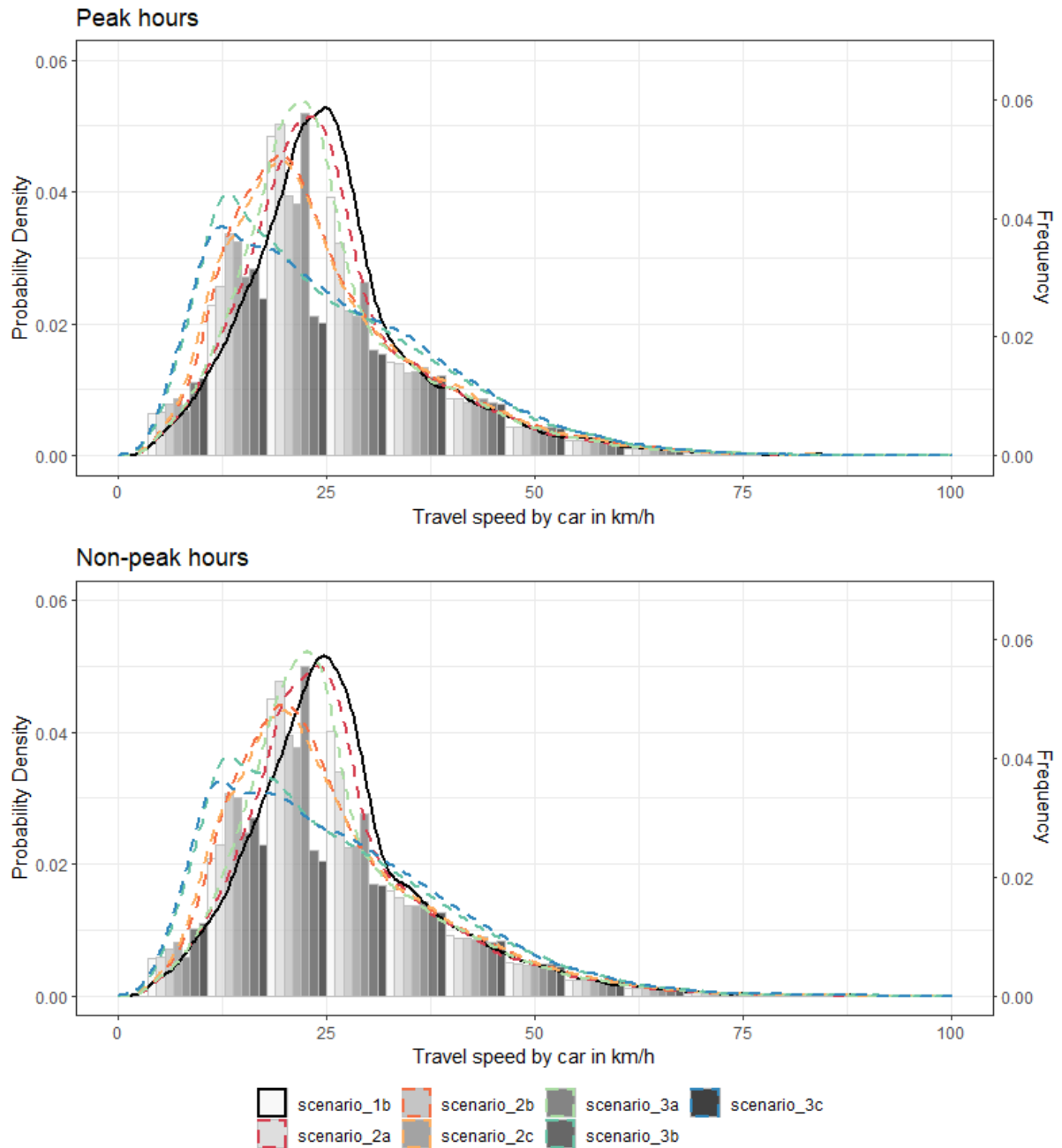
Για να καταστεί πιο σαφής ο ρόλος του αυτοκινήτου στα διάφορα σενάρια δημιουργήθηκαν ιστογράμματα κατανομής των αποστάσεων των μετακινήσεων και των μέσων ταχυτήτων των αυτοκινήτων σε κάθε σενάριο με την παράλληλη απεικόνιση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Στο Σχήμα 51, παρουσιάζεται η κατανομή των αποστάσεων των μετακινήσεων με αυτοκίνητο. Αρχικά, παρατηρείται ότι το σενάριο βάσης 1b κορυφώνεται σε χαμηλότερες τιμές αποστάσεων, γεγονός που δείχνει ότι περισσότερα αυτοκίνητα κινούνται σε κοντινές διαδρομές και επομένως δημιουργούνται κυκλοφοριακά προβλήματα στο εσωτερικό των αστικών περιοχών. Το σενάριο 3c, από την άλλη πλευρά, το οποίο επίσης κορυφώνεται σε χαμηλές τιμές χιλιομετρικής απόστασης, φαίνεται να είναι πιο απλωμένο, να υπάρχει, δηλαδή, μεγαλύτερη διακύμανση στις τιμές των αποστάσεων. Παράλληλα, μετά από κάποιο σημείο ξεπερνάει τη καμπύλη του σεναρίου 1b, το οποίο σημαίνει πως το αυτοκίνητο με τα νέα όρια ταχύτητας και με την ανάλογη συμμόρφωση των οδηγών σε αυτά χρησιμοποιείται για την κάλυψη μεγαλύτερων και πιο κρίσιμων αποστάσεων μετακίνησης.



Σχήμα 51: Κατανομή αποστάσεων μετακίνησης ανά σενάριο. Παρουσίαση ιστογράμματος και συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.

Στο Σχήμα 52, απεικονίζονται στο πρώτο ιστόγραμμα η κατανομή της μέσης ταχύτητας των αυτοκινήτων στα εξεταζόμενα σενάρια τις ώρες αιχμής, δηλαδή 8:00-10:00 και 16:00-19:00, και στο δεύτερο ιστόγραμμα η κατανομή της μέσης ταχύτητας των αυτοκινήτων στα εξεταζόμενα σενάρια τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας. Και στα δυο διαγράμματα παρατηρείται πως στο σενάριο βάσης 1b η κατανομή εμφανίζει χαμηλότερη διακύμανση και γενικά υψηλότερες τιμές ταχύτητας σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια και κυρίως τα σενάρια 3b, 3c. Επίσης η διακύμανση της καμπύλης αυτής αποδεικνύει ότι υψηλότερες ταχύτητες δεν υποστηρίζονται (απότομη πτώση των τιμών των ταχυτήτων) λόγω υψηλών φόρτων που επιφέρουν κορεσμό στο δίκτυο. Αυτό οδηγεί σε μία ομογενοποίηση των λειτουργικών ταχυτήτων κατά τις ώρες αιχμής. Άρα το κάθε ιεραρχικό επίπεδο του οδικού δικτύου δεν εξυπηρετεί το ρολό που έχει καθοριστεί από το σχεδιασμό. Εν αντιθέσει με το βασικό σενάριο, τα σενάρια με τις πιο χαμηλές ταχύτητες και με συμμόρφωση σε αυτές φαίνεται να έχουν μια πιο «απλωμένη» κατανομή, δηλαδή με πολύ μικρή διακύμανση. Υπάρχει δηλαδή ποικιλία στις λειτουργικές ταχύτητες και επομένως κάθε επίπεδο ιεράρχησης ακολουθείται από αντίστοιχα όρια που διαμορφώνουν την ομαλή λειτουργία του κυκλοφοριακού συστήματος. Αυτό λειτουργεί υπέρ της αποδοτικότητας ενός συγκοινωνιακού συστήματος.

Συγκρίνοντας τις ταχύτητες στις ώρες αιχμής με τις ταχύτητες τις υπόλοιπες ώρες, αυτό που διακρίνεται είναι ότι στα δυο πιο ακραία σενάρια 3b και 3c, περισσότερα οχήματα κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα (~36 km/h). Οι μεγαλύτερες ταχύτητες σε ώρες αιχμής υποδηλώνουν μια καλύτερη σε σχέση με την αρχική κατάσταση κυκλοφοριακή ροή στο οδικό σύστημα.



Σχήμα 52: Κατανομή ταχυτήτων αυτοκινήτου ανά σενάριο. Παρουσίαση ιστογράμματος και συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας σε ώρες αιχμής (πάνω διάγραμμα) και τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας (κάτω διάγραμμα).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1. Σύνοψη ευρημάτων, συζήτηση και περιορισμοί

Η διπλωματική αυτή προσπάθησε να συνδέσει την έννοια της ήπιας κυκλοφορίας με ένα μοντέλο ABM, δηλαδή τη MATSim, ενσωματώνοντας δύο πρόσθετες παραμέτρους: όρια ταχύτητας και ποσοστό συμμόρφωσης, που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την παροχή του συστήματος μεταφορών και συνεπώς τις εξόδους προσομοίωσης. Σε σύγκριση με προηγούμενες μελέτες που ενημέρωσαν το πλαίσιο του μοντέλου MATSim για προσομοίωση μικτής κυκλοφορίας (Agarwal et al., 2016), ενεργής μετακίνησης και πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων που συμβαίνουν σε αστικούς δρόμους (Ziemke, Metzler, et al., 2019), αυτή η μελέτη ακολούθησε μια απλούστερη μεθοδολογική προσέγγιση με την ανάπτυξη ενός εξωτερικού εργαλείου για την ενημέρωση των παραμέτρων κυκλοφορίας ανά κατηγορία OSM με βάση τους προαναφερθέντες παράγοντες. Αυτή η προσέγγιση καθιστά εφικτή την προσομοίωση μεγάλης κλίμακας δικτύων ήπιας κυκλοφορίας, τα οποία καλύπτουν μια ολόκληρη μητροπολιτική περιοχή, δηλαδή το Βερολίνο, καθώς δεν αυξάνει την πολυπλοκότητα της διαδικασίας προσομοίωσης εξισορροπώντας αποτελεσματικά την αντιστάθμιση μεταξύ χρόνου υπολογισμού και επιπέδου λεπτομέρειας. Αυτό είναι ένα κρίσιμο ζήτημα, το οποίο συζητείται ευρέως σε προηγούμενες μελέτες σχετικά με τη μοντελοποίηση δικτύων μεταφορών μητροπολιτικής κλίμακας με βάση τους πράκτορες (Charapar et al., 2009; Waraich et al., 2015; Cao et al., 2021; Tzouras et al., 2022). Ένας σημαντικός περιορισμός αυτής της προσέγγισης είναι ότι προϋποθέτει ομοιογένεια της κυκλοφορίας για την εκτίμηση της προκύπτουσας χωρητικότητας (και συνεπώς της παροχής οδικού δικτύου) λόγω μείωσης της μέσης ταχύτητας χρησιμοποιώντας ένα τριγωνικό θεμελιώδες διάγραμμα. Προηγούμενες μελέτες έχουν παρατηρήσει μια σχετικά χαμηλή διακύμανση των ταχυτήτων ελεύθερης ροής σε δρόμους συνύπαρξης και οδικά περιβάλλοντα με ήπια κυκλοφορία (Batista et al., 2022), επειδή εξ ορισμού, αυτοί οι δρόμοι έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να καθοδηγούν τους οδηγούς των οχημάτων προς μια ομοιογενή και ασφαλή συμπεριφορά. Επομένως, η υπόθεση του μοντέλου περί ομοιογένειας είναι δυνατό να είναι έγκυρη. Ωστόσο, απαιτεί περαιτέρω έρευνα και εμπειρικές μελέτες. Τέλος, το εργαλείο που αναπτύχθηκε, δηλαδή το πρόγραμμα ενημέρωσης δικτύου, χρησιμοποιεί την ιεράρχηση των οδών κατά OSM για την προετοιμασία των σεναρίων του δικτύου. Στην πράξη, οι κλάσεις OSM (ως είσοδος) χρησιμοποιούνται σπάνια από σχεδιαστές μεταφορών. Συνεπώς, απαιτείται αναβάθμιση του εργαλείου ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι GIS και χωρικής ανάλυσης.

Τα αποτελέσματα της εργασίας δείχνουν ότι η μείωση των ορίων ταχύτητας οδηγεί σε μεγαλύτερη χρήση των μέσων μαζικής μεταφοράς. Τα ποσοστά μετακινήσεων, επιβατικών ωρών και επιβατοχιλιομέτρων αυξήθηκαν σημαντικά σε όλα τα σεναρία στα οποία τα όρια ταχύτητας μειώθηκαν σημαντικά. Οι δημόσιες συγκοινωνίες (ως ο κύριος τρόπος μεταφοράς) φαίνεται να είναι ο κύριος ανταγωνιστής του αυτοκινήτου στις μητροπολιτικές περιοχές. Αυτό είναι κάτι που έχει παρατηρηθεί από προηγούμενες μελέτες (Milakis et al., 2008; Klinger, 2017) και σχετίζεται στενά με τις αποστάσεις των μετακινήσεων μεταξύ σπιτιού και εργασίας, οι οποίες είναι μεγαλύτερες στις μητροπολιτικές πόλεις σε σύγκριση με πόλεις μεσαίου ή μικρού μεγέθους και επομένως δεν μπορούν να καλυφθούν μόνο από ενεργά μέσα μεταφοράς (ποδήλατο, πεζή μετακίνηση). Η αυξημένη χρήση των μέσων μαζικής μεταφοράς οδηγεί σε αισθητή μείωση των επιβατοχιλιομέτρων των αυτοκινήτων και κατά συνέπεια στα σημεία συμφόρησης τις ώρες αιχμής. Αν και τα όρια ταχύτητας μειώθηκαν στους εσωτερικούς αστικούς δρόμους, η μείωση της μέσης ταχύτητας μετακίνησης με αυτοκίνητο δεν ήταν τόσο

υψηλή, όσο αναμενόταν. Ειδικά, σε ώρες αιχμής, έχει αναφερθεί αύξηση της μέσης ταχύτητας κυκλοφορίας σε αυτό το πείραμα προσομοίωσης. Αυτό είναι σύμφωνο με μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε μεμονωμένους διαδρόμους ήπιας κυκλοφορίας, όπου οι καθυστερήσεις δεν αυξήθηκαν αισθητά λόγω των χαμηλότερων ορίων ταχύτητας (Karagiannis et al., 2020). Τα άτομα άρχισαν να μετακινούνται με αυτοκίνητα για μεγαλύτερες αποστάσεις, ακολουθώντας δρόμους, όπου τα όρια ταχύτητας παρέμειναν σταθερά σε όλα τα σενάρια. Αυτό σχετίζεται με την έννοια των πόλεων χωρίς αυτοκίνητα, στις οποίες τα ταξίδια των 5 χιλιομέτρων αντικαθίστανται από εναλλακτικούς και πιο βιώσιμους τρόπους ταξιδιού, π.χ., λεωφορείο, ποδήλατο και περπάτημα (Nieuwenhuijsen et al., 2016). Επίσης, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δραματική μείωση των χιλιομέτρων του οχήματος που οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και λιγότερες εκπομπές CO₂. Ωστόσο, η συμμόρφωση των οδηγών φαίνεται να είναι ένας καταλυτικός παράγοντας που καθορίζει την αποτελεσματικότητα των πολιτικών που σχετίζονται με τη μείωση των ορίων ταχύτητας στους αστικούς δρόμους. Λαμβάνοντας υπόψη τα πειραματικά αποτελέσματα, τα σενάρια με χαμηλά ποσοστά συμμόρφωσης δεν έχουν καμία διαφορά σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Η συμμόρφωση των οδηγών συνδέεται με το σχεδιασμό του αστικού δρόμου και ορισμένα μέτρα ήπιας κυκλοφορίας (Elvik, 2010; García et al., 2011). Ωστόσο, ένα κοινόχρηστο οδικό περιβάλλον φαίνεται να είναι μια πιο ελπιδοφόρα και «ομαλή» σχεδιαστική προσέγγιση (Hammond et al., 2013)

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η δυναμική της προσομοίωσης του σεναρίου Open-Berlin σε σχέση με τα ευρήματα αυτής της μελέτης προκειμένου να εξαχθούν έγκυρα συμπεράσματα. Καταρχάς, οι υπηρεσίες δημόσιων συγκοινωνιών είναι πλήρως αξιόπιστες σε αυτό το σενάριο, τηρώντας πλήρως το χρονοδιάγραμμα διέλευσης. Η χαμηλότερη αξιοπιστία θα επηρέαζε σημαντικά την ελκυστικότητα των δημόσιων συγκοινωνιών σε σύγκριση με τα αυτοκίνητα στις αστικές περιοχές, με αποτέλεσμα χαμηλότερη επιβατική κίνηση στα μέσα μαζικής μεταφοράς. Στο Open-Berlin, δεν έχουν επιβληθεί κυρώσεις στην αξιολόγηση των δημόσιων μεταφορών λόγω αλλαγής δημόσιας μεταφοράς/γραμμής. Στην πράξη, η μεταφορά, η πρόσβαση/έξοδος και ο χρόνος αναμονής μειώνουν σε μεγάλο βαθμό τη χρησιμότητα των μέσων μαζικής μεταφοράς (Korsidas et al., 2019). Όσον αφορά την ενεργή μετακίνηση, δεν παρατηρήθηκε, όπως ήταν αναμενόμενο, υψηλή αύξηση σε αυτού του είδους τα ταξίδια. Η MATSim δεν λαμβάνει υπόψη παραμέτρους που σχετίζονται με το αστικό οδικό περιβάλλον που επηρεάζουν σημαντικά την συμπεριφορά των χρηστών, και ειδικά όσων χρησιμοποιούν πεζή μετακίνηση ή ποδήλατο (Ziemke, Metzler, et al., 2019; Tzouras et al., 2021). Η αντιληπτή ασφάλεια είναι μια κρίσιμη παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη βαθμολογία ποδηλατικών ή πεζοπορικών ταξιδιών. Εξάλλου, η ήπια κυκλοφορία ως έννοια φιλοδοξεί να δημιουργήσει ένα οδικό περιβάλλον πιο ανθρωποκεντρικό, το οποίο είναι ασφαλές για ποδήλατο ή περπάτημα. Ως εκ τούτου, σε οδικά περιβάλλοντα ήπιας κυκλοφορίας, αυξάνεται η αντιληπτή ασφάλεια και επομένως η χρήση ενεργών μέσων μετακίνησης. Σε σχέση με τον πρώτο περιορισμό που αναφέρεται στην παρούσα παράγραφο, αυτό είναι αρνητικό αποτέλεσμα.

Οφείλει ακόμα να σημειωθεί ότι η MATSim είναι ένα μεσοσκοπικό μοντέλο προσομοίωσης μεταφορών που σχεδιάστηκε για να μοντελοποιήσει τη βραχυπρόθεσμη συμπεριφορά των μετακινήσεων, π.χ. αποφάσεις που λαμβάνονται εντός της ημέρας. Σε σύγκριση με τα κλασικά μοντέλα διακριτών επιλογών, τα οποία υποθέτουν ότι οι μετακινούμενοι γνωρίζουν καλά όλες τις εναλλακτικές επιλογές, το πλαίσιο της MATSim αποτυγχάνει να μοντελοποιήσει την τακτική ή στρατηγική απόφαση που λαμβάνεται από τους πράκτορες (Hörl, 2021). Η MATSim εξετάζει τα αρχικά σχέδια, τα οποία εξάγονται από ένα μοντέλο που βασίζεται στις δραστηριότητες,

προκειμένου να ορίσει ένα νέο σημείο ισορροπίας, όπου οι πράκτορες δεν μπορούν να αυξήσουν περαιτέρω τη χρησιμότητα των σχεδίων τους. Ωστόσο, η δημιουργία δικτύου ήπιας κυκλοφορίας θα προκαλούσε σημαντικές τροποποιήσεις τόσο στο χρόνο όσο και στον χώρο των μετακινήσεων μετά από μερικές εβδομάδες ή μήνες. Αυτό σημαίνει νέα αρχικά σχέδια, άρα νέες εισοδοί στην προσομοίωση. Επομένως, η MATSim μπορεί να θεωρηθεί ως το κατάλληλο ABM για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των μέτρων ήπιας κυκλοφορίας αμέσως μετά την εφαρμογή τους. Συνήθως, αυτή η αρχική φάση είναι που ερευνούν οι μελετητές για την εφαρμογή αυτών των μέτρων. Έτσι, η προτεινόμενη προσέγγιση με τους δικούς της περιορισμούς μπορεί να αποδειχθεί πολύ χρήσιμη στην πράξη.

6.2. Συμπεράσματα

Οι επιπτώσεις των συστημάτων ήπιας κυκλοφορίας στην ασφάλεια της κυκλοφορίας έχουν συζητηθεί ευρέως σε προηγούμενες μελέτες. Ωστόσο, λίγοι προσπάθησαν να εξετάσουν εάν η ήπια κυκλοφορία μπορεί να ενισχύσει την αποτελεσματικότητα του συστήματος ταυτόχρονα. Υποτίθεται ότι τα μειωμένα όρια ταχύτητας μειώνουν την προσβασιμότητα των αυτοκινήτων στις αστικές περιοχές. Η ταχύτητα ελεύθερης ροής και οι χωρητικότητες των οδικών συνδέσμων είναι παράμετροι κυκλοφορίας που επηρεάζονται. Αυτή η υπόθεση προσομοιώθηκε στη MATSim. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα νέο εξωτερικό εργαλείο που ονομάζεται «network updater». Σε αυτή τη διαδικασία, δύο σημαντικοί παράγοντες μπορούν να διαμορφωθούν ανά σύνδεσμο, και συγκεκριμένα: όριο ταχύτητας και ποσοστό συμμόρφωσης. Σε αυτή τη μελέτη, προετοιμάστηκαν ένα βασικό σενάριο συν έξι «ακραία» σενάρια για τη Μητροπολιτική Περιοχή του Βερολίνου, προκειμένου να δοκιμαστεί η προαναφερθείσα υπόθεση σε ένα δίκτυο μεγάλης κλίμακας.

Η προτεινόμενη μεθοδολογική προσέγγιση είχε ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του χρόνου υπολογισμού, καθώς το εργαλείο που αναπτύχθηκε δρα εξωτερικά χωρίς να αυξάνει την πολυπλοκότητα της διαδικασίας προσομοίωσης. Με βάση αυτή την προσέγγιση, τα δίκτυα ήπιας κυκλοφορίας μπορούν να προσομοιωθούν χρησιμοποιώντας ένα ABM διαμορφώνοντας απλώς το όριο ταχύτητας και το ποσοστό συμμόρφωσης. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που σχετίζονται με το επίπεδο λεπτομέρειας προσομοίωσης και το πλαίσιο MATSim γενικά. Όσον αφορά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αυτή η εργασία αποκαλύπτει ότι τα δίκτυα ήπιας κυκλοφορίας σε μητροπολιτικές περιοχές μπορούν να αυξήσουν την ελκυστικότητα και κατά συνέπεια την επιβατική κίνηση στα μέσα μαζικής μεταφοράς (που είναι πλήρως αξιόπιστα), ενώ τα αυτοκίνητα χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερες αποστάσεις. Εξαιτίας αυτού, τα σημεία κυκλοφοριακής συμφόρησης μειώνονται αισθητά οδηγώντας σε υψηλότερες ταχύτητες στη μετακίνηση με αυτοκίνητο τις ώρες αιχμής. Αυτό σημαίνει ότι οι πόλεις μπορούν να βελτιώσουν την ασφάλεια των οδικών δικτύων χωρίς να υποβαθμίσουν την απόδοσή τους. Ωστόσο, η συμμόρφωση των οδηγών στα μειωμένα όρια ταχύτητας είναι ένας καταλυτικός παράγοντας που συνδέεται στενά με τη σχεδίαση του οδικού περιβάλλοντος. Όσον αφορά τις διαδρομές ποδηλάτου και περπατήματος, δεν παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη αλλαγή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παράγοντες όπως η αντιληπτή ασφάλεια ή η άνεση των ποδηλατών και των πεζών, που ενισχύονται σε οδικά περιβάλλοντα ήπιας κυκλοφορίας, δεν λαμβάνονται υπόψη κατά τη βαθμολόγηση των μέσων μεταφοράς ή των διαδρομών στη MATSim. Γενικά, η προτεινόμενη μεθοδολογική προσέγγιση μπορεί να προβλέψει τις επιπτώσεις των δικτύων ήπιας κυκλοφορίας βραχυπρόθεσμα (εντός ημέρας), αμέσως μετά την εφαρμογή αυτών των μέτρων, όταν οι χρήστες γνωρίζουν όλες τις νέες

Κεφάλαιο 6: Σύνοψη - Συμπεράσματα

διαθέσιμες επιλογές. Ωστόσο, η ήπια κυκλοφορία ως έννοια φαίνεται να είναι ένας από τους κύριους οδηγούς προς πόλεις χωρίς αυτοκίνητα.

BIBΛIOΓPAΦIA

- Agarwal, A. and Lämmel, G. (2016) 'Modeling Seepage Behavior of Smaller Vehicles in Mixed Traffic Conditions Using an Agent Based Simulation', *Transportation in Developing Economies*, pp. 4–9.
- Axhausen, K. W. et al. (2016) 'Introducing MATSim', in Horni, A., Nagel, K., and Axhausen, K. W. (eds) *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London: Ubiquity Press,
- Batista, M. and Friedrich, B. (2022) 'Investigating spatial behaviour in different types of shared space', *Transportation Research Procedia*. Elsevier B.V., 60(2021), pp. 44–51
- Batista, M. and Friedrich, B. (2022) 'Investigating spatial behaviour in different types of shared space', *Transportation Research Procedia*. Elsevier B.V., 60(2021), pp. 44–51
- Benhamza, K., Ellagoune, S., Seridi, H., et al. (2012). *Agent Based Modeling for Traffic Simulation*. *Courrier du Savoir –N°14*, pp.51-56
- Bhat, C. R. et al. (2004) 'Comprehensive econometric microsimulator for daily activity-travel patterns', *Transportation Research Record*, (1894),
- Bhat, C. R., Pinjari, A., *Activity based travel demand analysis*. Chapter 17. The University of Texas at Austin
- Cao, Z. et al. (2021) 'E-scooter sharing to serve short-distance transit trips: A Singapore case', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Elsevier Ltd, 147, pp. 177–196
- Charypar, D., Balmer, M. and Axhausen, K. W. (2009) *A High-Performance Traffic Flow Microsimulation for Large Problems*, Working paper. Zurich
- Creutzig, F. et al. (2020) 'Fair street space allocation: ethical principles and empirical insights', *Transport Reviews*, 40(6), pp. 711–733.
- Directives for the Design of Urban Roads (2006), FGSV
- Domenichini, L., Branzi, V. and Meocci, M. (2018) 'Virtual testing of speed reduction schemes on urban collector roads', *Accident Analysis and Prevention*. Elsevier, 110,
- Elvik, R. (2010) 'A restatement of the case for speed limits', *Transport Policy*. Elsevier, 17(3), pp. 196–204
- FHWA COURSE ON BICYCLE AND PEDESTRIAN TRANSPORTATION. Lesson 11. Traffic Calming
- Flötteröd, G. (2016) 'Queueing Representation of Kinematic Waves', *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*, pp. 347–352.
- García, A. et al. (2011) 'Traffic microsimulation study to evaluate the effect of type and spacing of traffic calming devices on capacity', *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 16, pp. 270–281
- Gargoum, S., El-Basyouny, K., Kim, A. (2016). *Towards setting credible speed limits: Identifying factors that affect driver compliance on urban roads*. *Accident Analysis and Prevention* 95, p.138–148

- Gerike, R., Gerlach, J., Rau, A. (2009). Accessibility Standards-Discussion of their Necessity with the Example of the German "Guidelines for Integrated Network Design" (RIN)
- Gerike, R., Koszowski, C., Schröter, B., Wittwer, R., et al (2019). Urban Corridor Road Design: Guides, Objectives and Performance Indicators
- Gonzalo-Orden, H., Rojo, M., Perez-Acebo, H., & Linares, A. (2016). Traffic calming measures and their effect on the variation of speed. *Transportation Research Procedia*, 18, σσ. 349-356
- Hammond, V. and Musselwhite, C. (2013) 'The Attitudes, Perceptions and Concerns of Pedestrians and Vulnerable Road Users to Shared Space: A Case Study from the UK', *Journal of Urban Design*, 18(1), pp. 78–97.
- Hörl, S., Balac, M. and Axhausen, K. W. (2018) 'A first look at bridging discrete choice modeling and agent-based microsimulation in MATSim', *Procedia Computer Science*. Elsevier B.V., 130, pp. 900–907.
- Ian M.Lockwood (1997). Institute of Transportation Engineers, *ITE Journal*; Washington, Vol.67, Iss. 7
- Jiangyan, H., Youkai,C., Zhang, L., et al (2022). An Overview of Agent-Based Models for Transport Simulation and Analysis. *Journal of Advanced Transportation*
- Johanna Guth, Sina Keller, Stefan Hinz, and StephanWinter (2020). Towards detecting, characterizing, and rating of road class errors in crowd-sourced road network databases
- Kaparias, I. and Wang, R. (2020) 'Vehicle and pedestrian level of service in street designs with elements of shared space', *Transportation Research Record*, 2674(9), pp. 1–13
- Klinger, T. (2017) 'Moving from monomodality to multimodality? Changes in mode choice of new residents', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Elsevier Ltd, 104, pp. 221–237
- Klugl, F., Bazzan, A (2012). *Agent-Based Modeling and Simulation*
- Lieberman, E., Rathi, A., *Traffic Simulation*
- Markus Friedrich (2016), *Functional Structuring of Road Networks*, World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai
- Marshall, S. (2004), *Building on Buchanan: Evolving road hierarchy for today's streets-oriented design agenda*. Proceedings of European Transport Conference. Strasbourg, France
- Marshall, S. (2005). *Streets & Patterns*.Abbingdon: Spon Press
- Moeckel, R., Kuehnel, N., Llorca, C. (2020). Agent-Based Simulation to Improve Policy Sensitivity of Trip-Based Models. *Journal of Advanced Transportation*
- Nagel, K. et al. (2016) 'A Closer Look at Scoring', in Horni, A., Nagel, K., and Axhausen, K. W. (eds) *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London, UK: Ubiquity Press, pp. 23–34.
- Niazi, M. A. and Hussain, A. (2011) 'A novel agent-based simulation framework for sensing in complex adaptive environments', *IEEE Sensors Journal*. IEEE, 11(2), pp. 404–412

- Nieuwenhuijsen, M., & Khreis, H. (2016). Car free cities: Pathway to healthy urban living. *Environment International*, 94
- O'Hern, S. et al. (2019) 'A simulator study of driving behavior and mental workload in mixed-use arterial road environments', *Traffic Injury Prevention*, 20(6), pp. 648–654
- Olmez, S., Douglas-Mann, L., Manley, E., et al. (2021). Exploring the impact of driver adherence to speed limits and the interdependence of roadside collisions in an urban environment: An agent-based modelling approach. *Appl. Sci.*, 11, 5336
- Saladi Sv Subbarao, K V Krishna Rao (2020). Activity based approach to travel demand modelling: An overview. *European Transport\Trasporti Europei*, Issue 61, Paper no 6
- Silvano, Ary P. and Bang, Karl L. (2016). Impact of Speed Limits and Road Characteristics on Free-Flow Speed in Urban Areas. *Journal of Transportation Engineering*
- Traffic Calming: State of the Practice ITE/FHWA, August 1999
- Tsigdinos, S. et al. (2022) 'The future urban road : A systematic literature review-enhanced Q-method study with experts', *Transportation Research Part D. Elsevier Ltd*, 102,
- Tsigdinos, S., & Vlastos, T. (2019). Strategic road network formulation: developing an alternative methodology towards sustainable mobility. 22nd EURO Working Group on Transportation Meeting
- Tzouras, P. G. et al. (2021) 'A Concept Agent-Based Simulation Model to Evaluate the Impacts of a Shared Space Network', *Procedia Computer Science. Elsevier B.V.*, 184(C), pp. 680–685.
- Tzouras, P. G. et al. (2022) 'Agent-based models for simulating e-scooter sharing services: A review and a qualitative assessment', *International Journal of Transportation Science and Technology. Tongji University and Tongji University Press*, (March)
- Waraich, R. A. et al. (2015) 'Performance Improvements for Large-Scale Traffic Simulation in MATSim', in M., H., J., J. A., and M., L. (eds) *Computational Approaches for Urban Environments, Geotechnologies and the Environment*. Cham: Springer, pp. 211–233
- Zhang, L., Levinson, D. (2004). Agent-Based Approach to Travel Demand Modeling Exploratory Analysis. *Journal of the Transportation Research Board*, No. 1898, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 28–36
- Ziemke, D., Kaddoura, I. and Nagel, K. (2019) 'The MATSim open Berlin scenario: A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data', *Procedia Computer Science. Elsevier B.V.*, 151(2018), pp. 870–877
- Ziemke, D., Metzler, S. and Nagel, K. (2019) 'Bicycle traffic and its interaction with motorized traffic in an agent-based transport simulation framework', *Future Generation Computer Systems. Elsevier B.V.*, 97(June 2018), pp. 30–40
- Zilske, M., Neumann, A. and Nagel, K. (2011) *OpenStreetMap For Traffic Simulation*.
- Βλαστός Θ. & Μπακογιάννης Ε. (2019). Προς μια Ελλάδα με λιγότερα αυτοκίνητα: Χωρικός Σχεδιασμός και «Στρατηγικές Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας-ΣΒΑΚ» απέναντι στην κλιματική αλλαγή.
- Βλαστός, Θ., & Μηλάκης, Δ. (2006). Πολεοδομία vs Μεταφορές: από την απόκλιση στη σύγκλιση. Αθήνα.

- Βλαστός, Θ. (2007). Στοιχεία εφαρμογής των επί μέρους πολιτικών . Στο Α. Αραβαντινός, Πολεοδομικός σχεδιασμός για μια βιώσιμη ανάπτυξη του αστικού χώρου(σσ. 477-506)
- Γιαννής, Γ., Καρλαύτης, Μ., Γκόλιας, Ι. (2001) Παρόδιες χρήσεις γης και διαχείριση προσβάσεων, ΠΣΔΑΤΜ - ΤΕΕ, Επιστημονική Ημερίδα, Ιεράρχηση του αστικού οδικού δικτύου και οδική ασφάλεια, ΕΜΠ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής
- Γκρέμη, Α. (2013). Δρόμοι για πεζούς: Αστικός Σχεδιασμός Ήπιας Κυκλοφορίας. Ερευνητική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης, ΑΠΘ. Θεσσαλονίκη
- Κουτούλας, Α. (2010). Η χρήση των μέτρων ήπιας κυκλοφορίας στη διαμόρφωση μιας πολιτικής στη διαχείριση της ταχύτητας. Η περίπτωση της ιεράρχησης του οδικού δικτύου του δήμου Πυλαίας. Διπλωματική Εργασία, ΔΠΜΣ "Σχεδιασμός, Οργάνωση και Διαχείριση των συστημάτων Μεταφορών", Πολυτεχνική Σχολή ΑΠΘ. Θεσσαλονίκη.
- Κωνσταντινίδης, Ι. (2009). Μελέτη και αξιολόγηση των μέτρων ήπιας κυκλοφορίας. Διπλωματική εργασία, ΔΠΜΣ "Σχεδιασμός, Οργάνωση και Διαχείριση Συστημάτων Μεταφορών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών και Σχολή Αγρονόμων-Τοπογράφων Μηχανικών, ΑΠΘ. Θεσσαλονίκη.
- Μουρτάκος Β. (2020). Αξιολόγηση της Κυκλοφοριακής Ανθεκτικότητας στην εποχή των Αυτόνομων Οχημάτων. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- Οδηγία Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) 1 - Άρθρο 2: Κατηγορίες οδών
- Σημειώσεις Αντωνίου και Σπυροπούλου, «Αρχές Κυκλοφοριακής Τεχνικής και Προσομοίωσης», Κεφ.9: Εισαγωγή στην κυκλοφοριακή προσομοίωση
- Σημειώσεις: Εισαγωγή στον σχεδιασμό των μεταφορών
- Τσιγδινός, Σ. (2018). Θεωρήσεις επαναπροσδιορισμού της ιεράρχησης των αστικών δικτύων στην κατεύθυνση της χάραξης μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής ήπιας κυκλοφορίας. Διπλωματική Εργασία, ΔΠΜΣ «Αρχιτεκτονική–Σχεδιασμός του χώρου», Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, ΕΜΠ. Αθήνα
- Φρατζεσκάκης, Ι., & Γκόλιας, Ι. (1994). Οδική Ασφάλεια. Αθήνα: Παπασωτηρίου

Ιστοσελίδες

- <https://globaldesigningcities.org/publication/global-street-design-guide/designing-streets-people/designing-for-motorists/traffic-calming-strategies/>
- https://safety.fhwa.dot.gov/speedmgmt/traffic_calm.cfm<https://www.fhwa.dot.gov/Road Safety>
- <https://www.nrso.ntua.gr>
- <https://www.ite.org/technical-resources/traffic-calming/traffic-calming-measures/>
- <https://www.pps.org/article/livememtraffic>
- <https://www.myptv.com/en/application-areas/traffic-simulation>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

A. Κώδικας «Network Updater»

```
import pandas as pd
import xml.etree.ElementTree as ET

mytree=ET.parse("berlin-v5.5-network.xml") #import open-berlin scenario network
network=mytree.getroot() # create a tree to process the data

# define link class from OSM, link class is important to update the network parameters
afterwards

myhier= ET.parse ("new_berlin_network_hierarchy.xml")
hierarchy=myhier.getroot()

L = []
C = []
D = []
E = []

for x in range(0,202939): # 202939 is the number of links in open berlin scenario
    if x < 159039: # 159038 (as we start from 0) is the number of street links, while the pt links
are 202939-159037
        L.append(hierarchy[1][x].attrib["id"])
        C.append(hierarchy[1][x][0][1].attrib["class"]) # import class according to OSM hierarchy
        D.append(hierarchy[1][x].attrib["freespeed"]) # import free flow speed
        E.append(hierarchy[1][x].attrib["capacity"]) # import link capacity

hr=pd.DataFrame(L, columns=["link_id"])
hr["class1"]=C
hr["freespeed"]=D
hr["capacity"]=E
hr.to_csv("id_hierarchy.csv") # CSV to import it in GIS

# import road classification according to OSM processed in GIS
df1=pd.read_csv("id_hierarchy.csv")
# import dataframe from GIS. It has all the urban links + info about city districts
```

```

df2=pd.read_csv("berlin_urban_network.csv")
# merge df1 and df2 to know road clacification and city district per link
df2 = pd.merge(left=df2, right=df1, how="inner", left_on='ID', right_on='link_id')
# remove the not necessary columns
df2=df2.drop(columns=['Unnamed: 0', 'link_id'])
# tranform to string the ID, this will help the searching process
df2['ID'] = df2['ID'].map(str)
# sort the values considering strign, same sorting we can see in the xml file
df2=df2.sort_values(by=["ID"])
# create a new index
df2 = df2.reset_index(drop=True)

scen=pd.read_csv("scenario_example.csv") # import scenarios, we change only the speed
limit and the free flow speed
scen=scen.set_index('class1') # the road class is the key
scen

def traffic_param(ulim,factor,lane): #estimate the new traffic parameters
    ufree=ulim*factor # in kilometer per hour, ulim = speed limit, if factor = 1, speed limit = free
    flow speed
    cell=7.5 # in meters, cell is constant, it means one car per 7.5 meters
    kmax=lane*(1000/cell) # in vehicles per kilometer
    wave=13.5 #kilometers per hour, w is constant
    qmax=(ufree*wave*kmax)/(ufree+wave) #updated capacity in vehicles per hour
    return ufree, qmax

# add a column in the dataframe that will check if the ID was found
df2["check"] = "no"

k1=0 # the number of IDs found in the first searching loop
l=0 # the starting point of searching
t=10 # the ending point of searching

```

```

for i in range(0,159039): # search only the road links and the transit links
    id=network[1][i].attrib["id"] # search according to id

    if k1 > len(df2):
        break # stop iterations when k1 is equal to the total number of urban links

    for j in range(l,t):
        if df2.ID[j]==id: #it is true if you find the id from xml in the dataframe file
            l=j # keep j so that in the next iteration you search only the rest elements

            if j>len(df2)-10: # in the last js you search until the end
                t=len(df2)
            else:
                t=l+10 # every time you search only the next 10 links
                k1=k1+1 # the number of identified IDs in both data sets
                df2.check[j]="yes" # yes if we found it, usefull for the next searching process

freeflow,capacity=traffic_param(scen["ulim"][df2.class1[j]],scen["factor"][df2.class1[j]],
                                float(network[1][1].attrib["permlanes"]))
# update traffic parameters using the developed function considering hierarchy
network[1][i].attrib["capacity"]=str(capacity)
network[1][i].attrib["freespeed"]=str(freeflow)

k2=0 # the number of ID found in the second searching loop
for j in range(0,len(df2)):
    if df2.check[j]=="no":
        id=df2.ID[j] # check following the opposite direction from df to xml
        for i in range(0,159039):
            if network[1][i].attrib["id"]==id:
                k2=k2+1
                df2.check[j]="yes" # add checks in next elements

freeflow,capacity=traffic_param(scen["ulim"][df2.class1[j]],scen["factor"][df2.class1[j]],

```

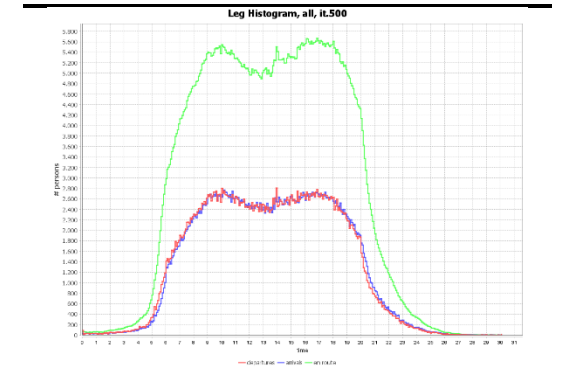
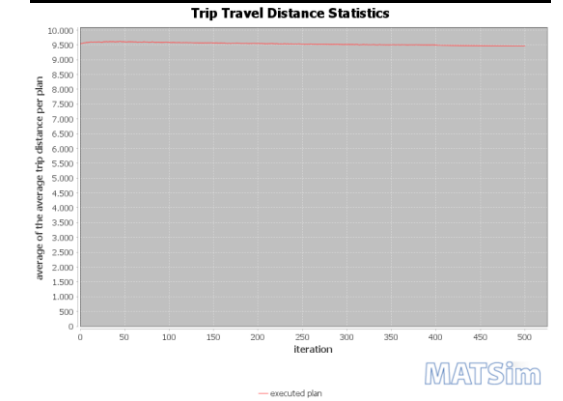
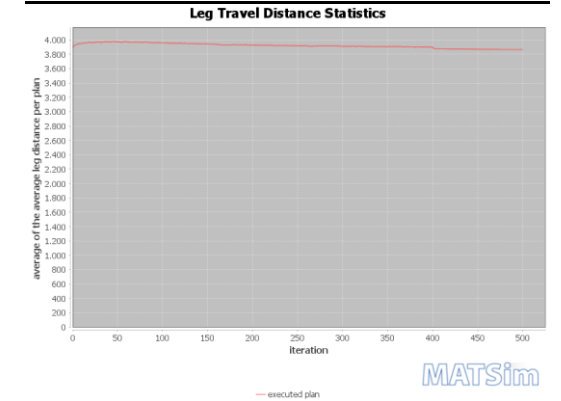
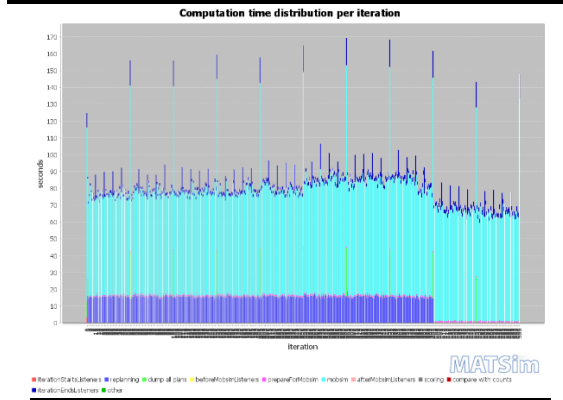
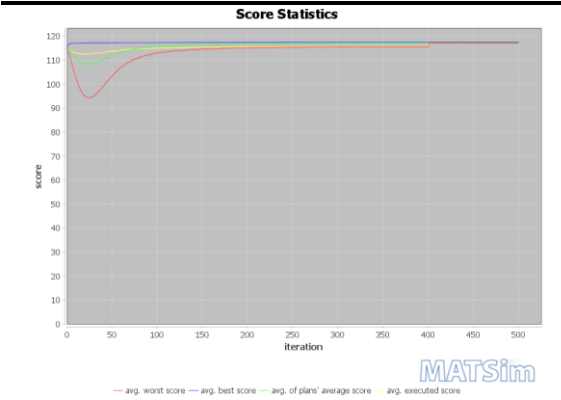
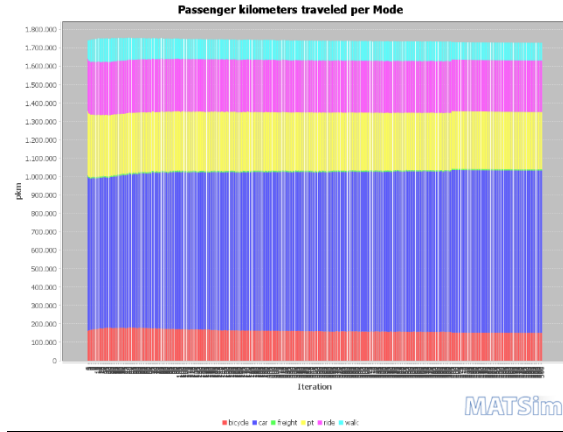
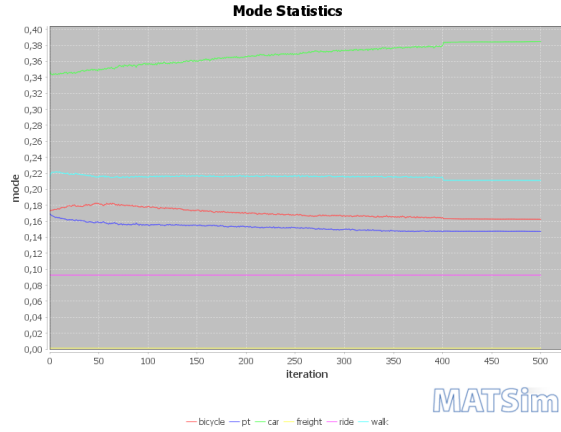
```
float(network[1][1].attrib["permlanes"]))
network[1][i].attrib["capacity"]=str(capacity)
network[1][i].attrib["freespeed"]=str(freeflow)
break

print(len(df2)-k1-k2) # check if k1+k2 is equal with the length of df2, i.e. the number of links

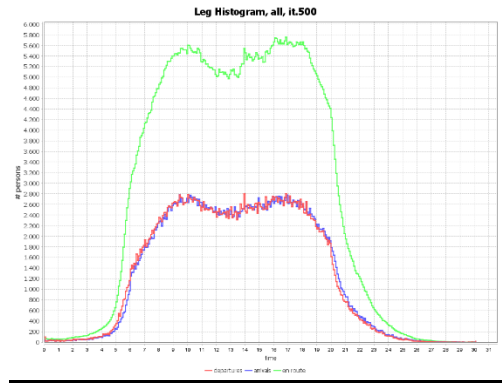
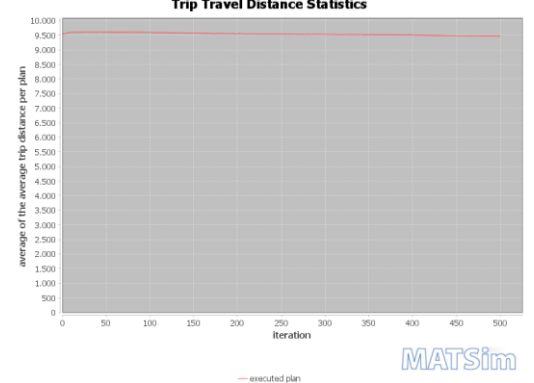
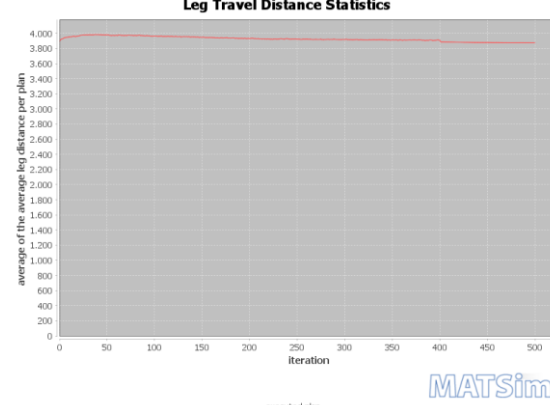
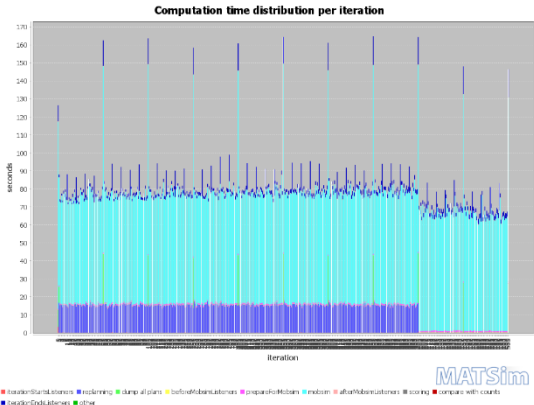
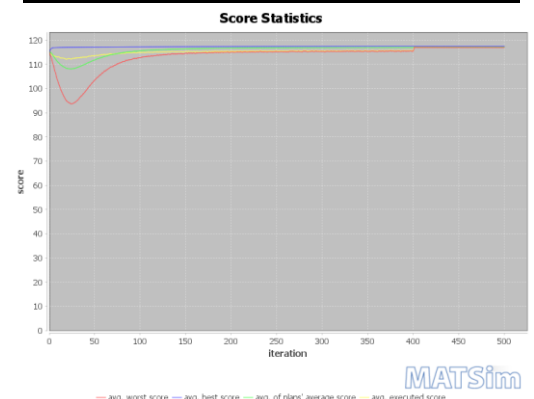
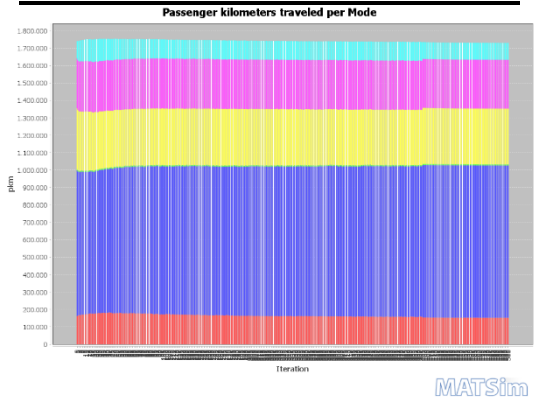
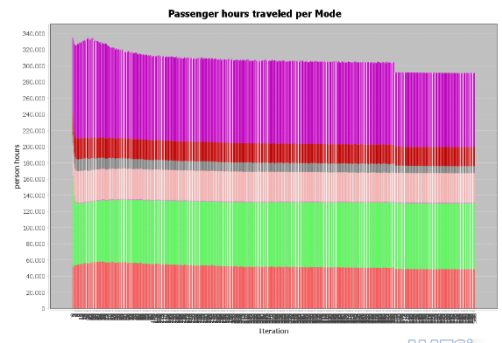
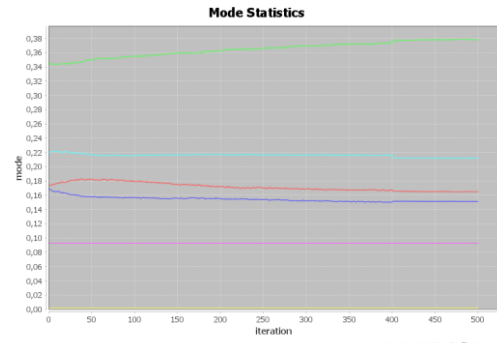
mytree.write('output.xml')
```

B. Αρχεία εξόδου MATSim σε μορφή εικόνων

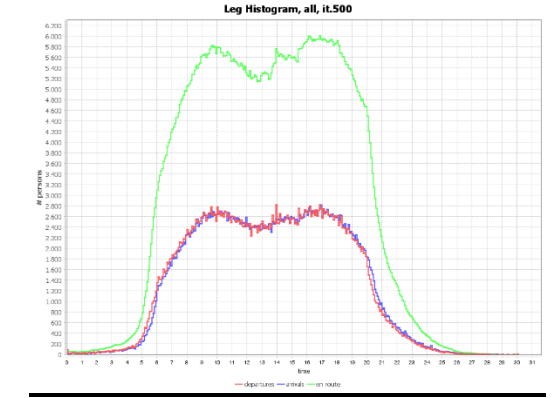
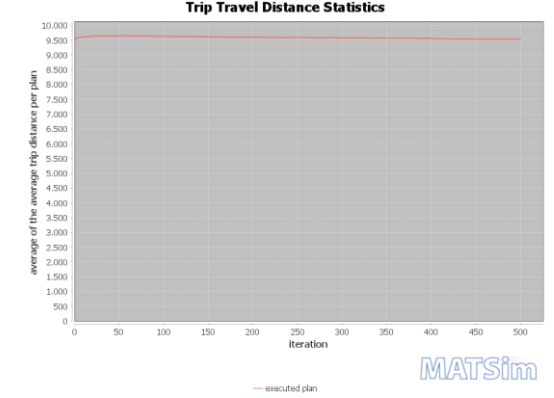
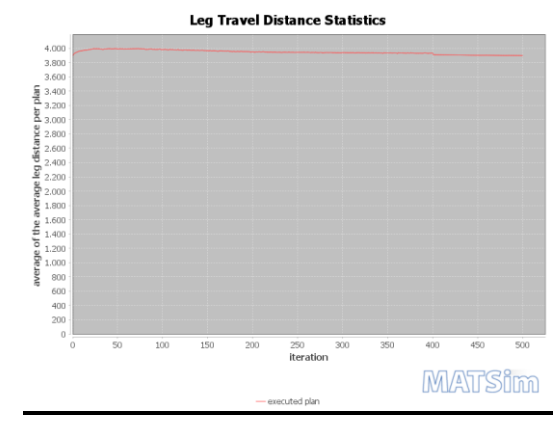
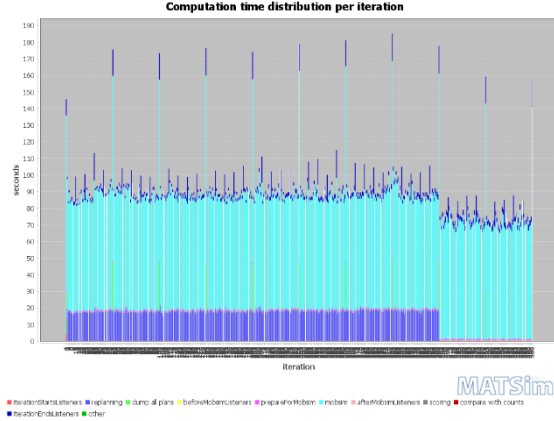
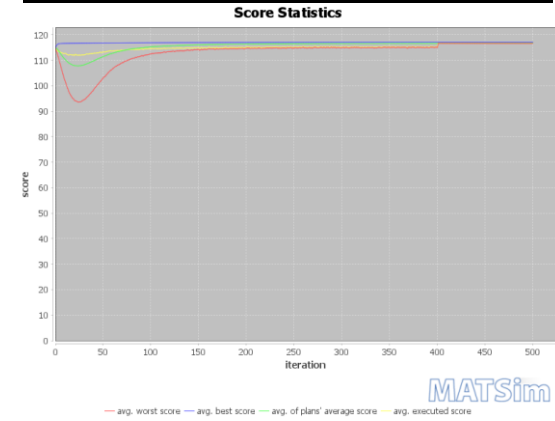
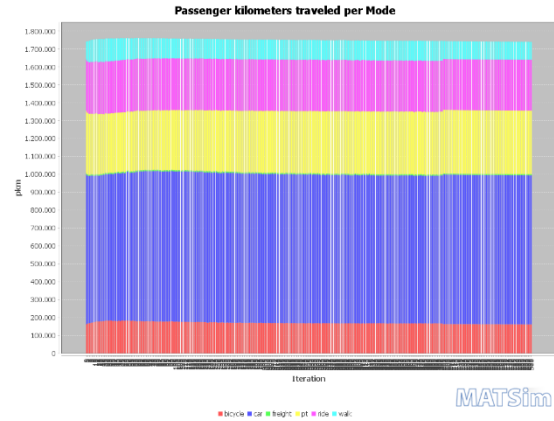
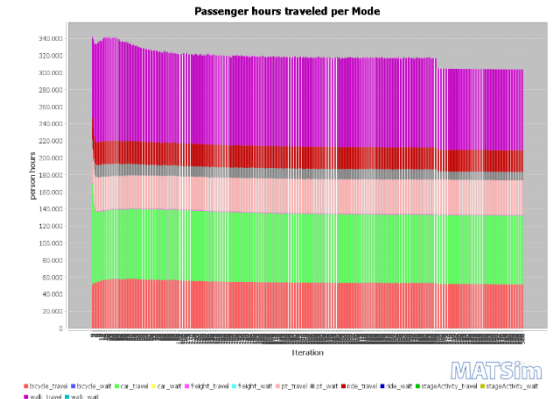
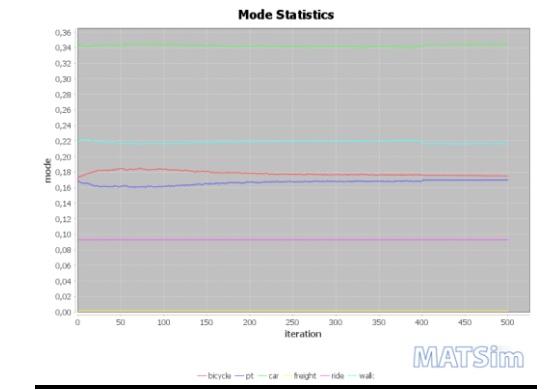
Σενάριο 1b



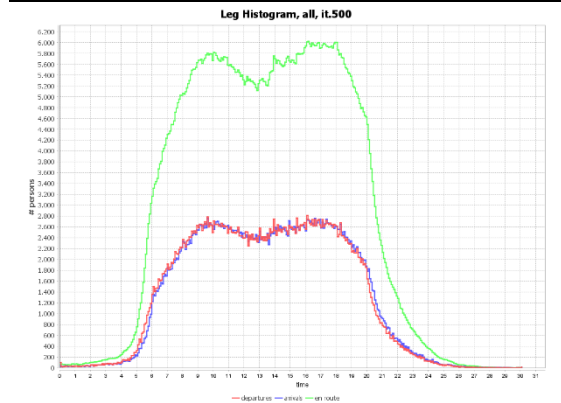
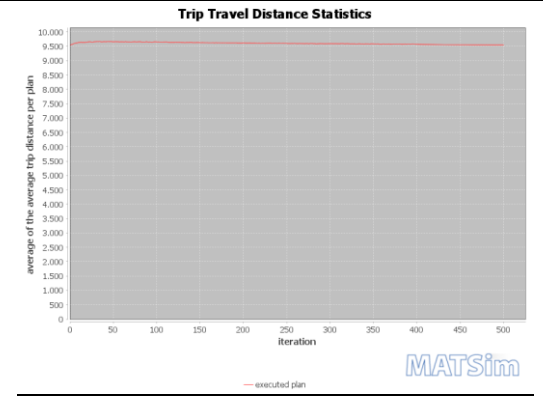
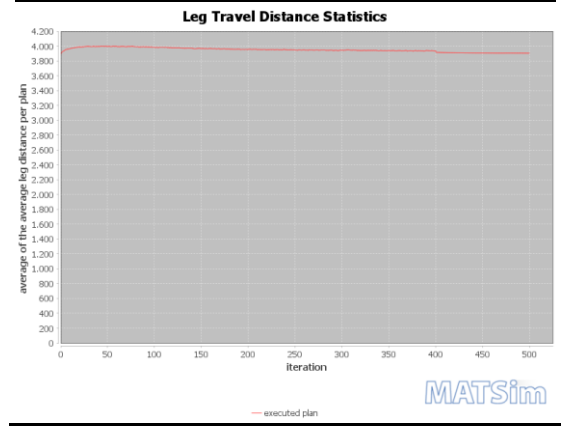
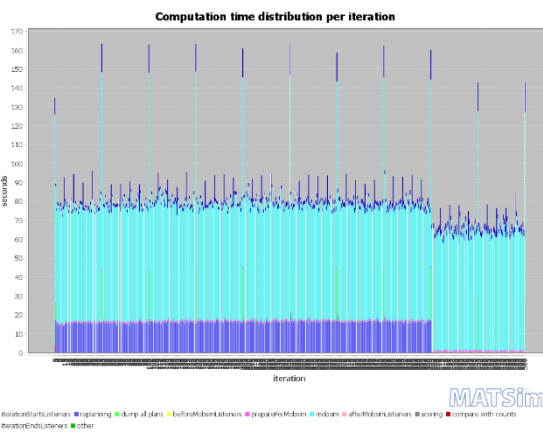
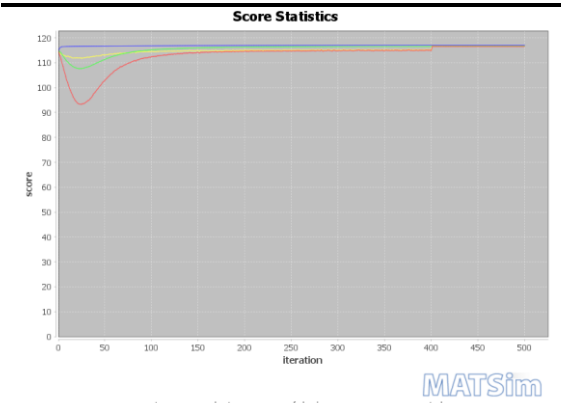
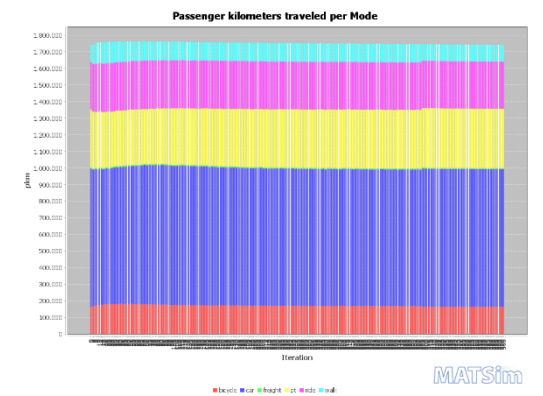
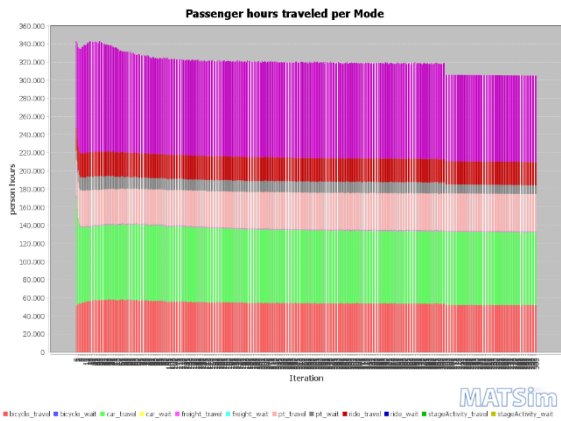
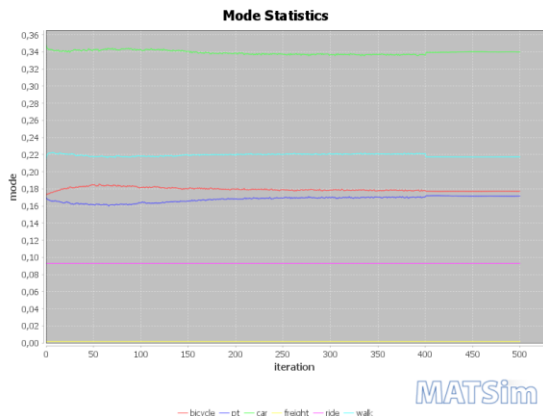
Σενάριο 2a



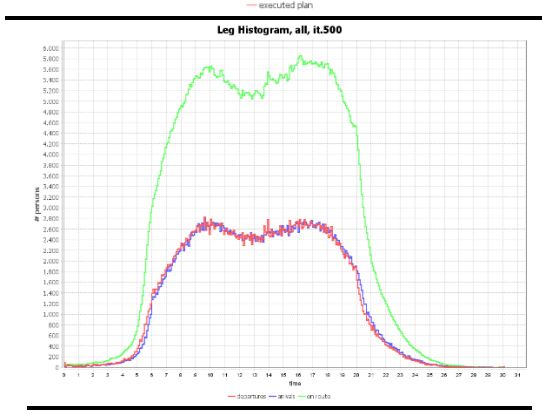
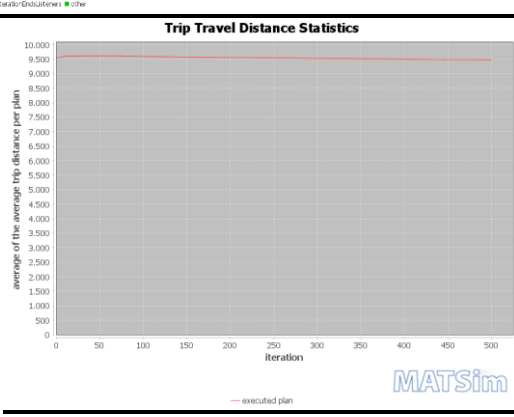
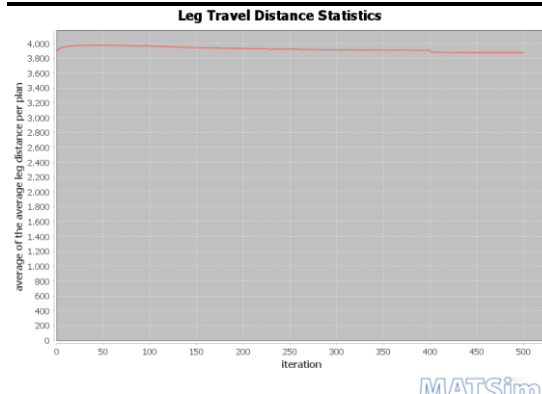
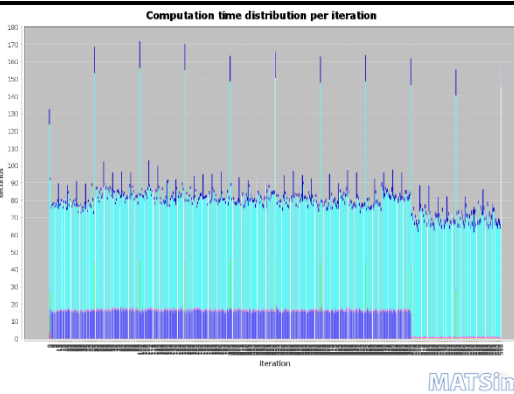
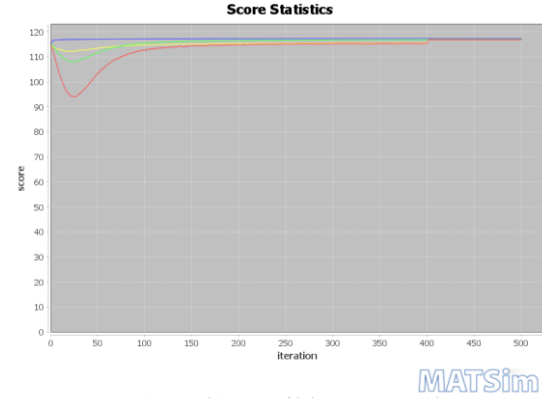
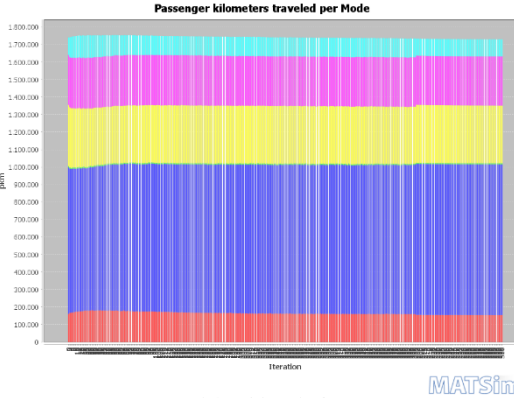
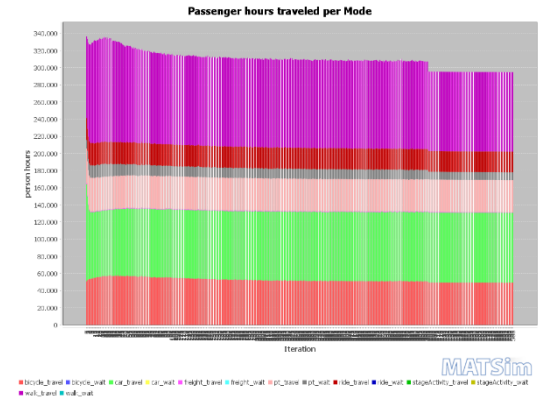
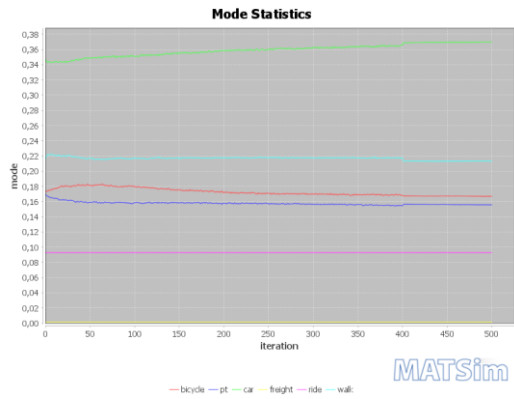
Σενάριο 2b



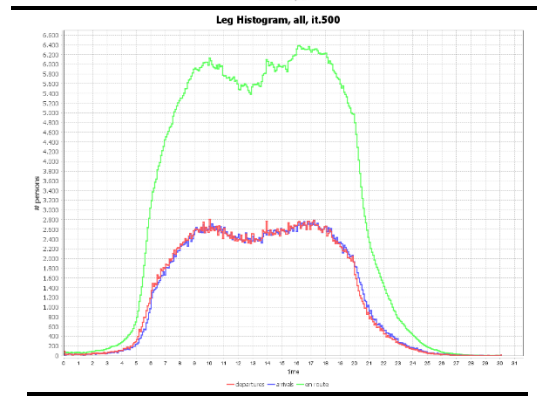
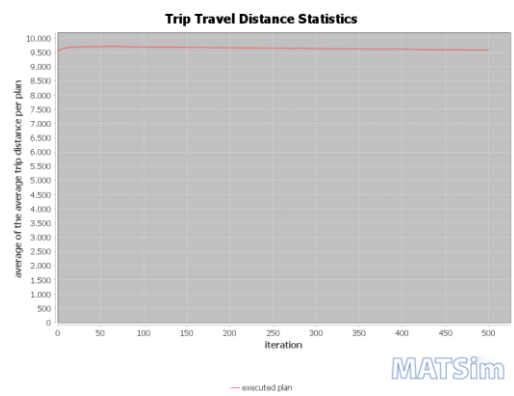
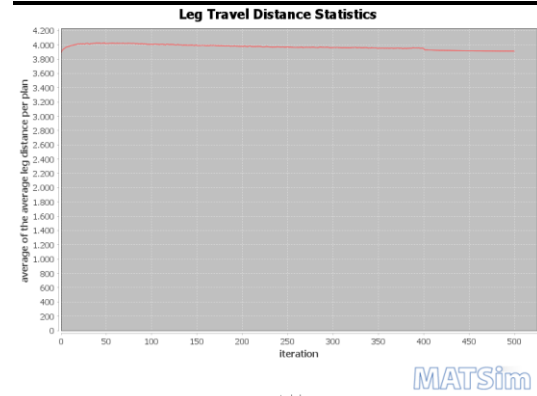
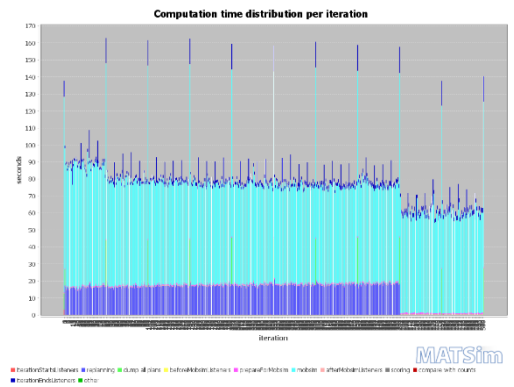
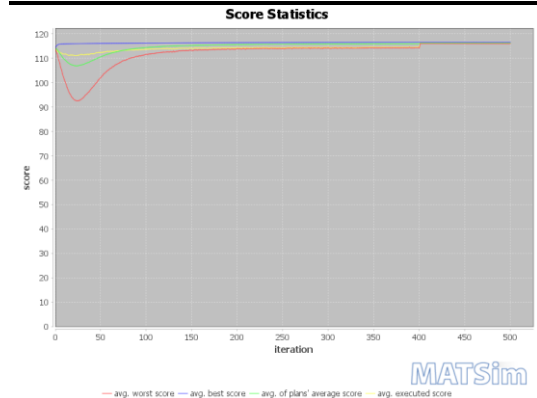
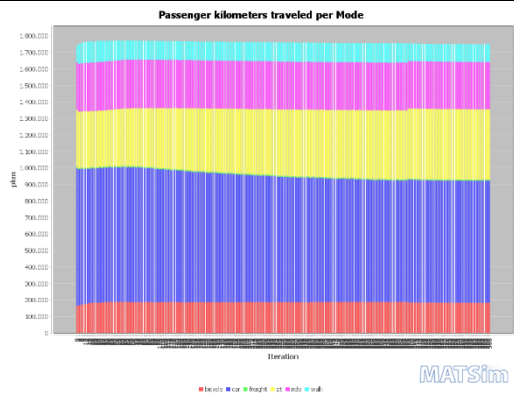
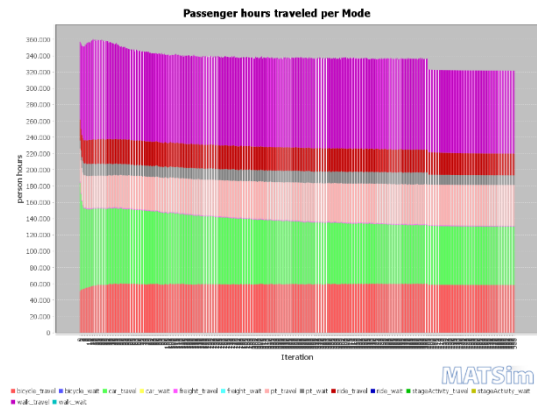
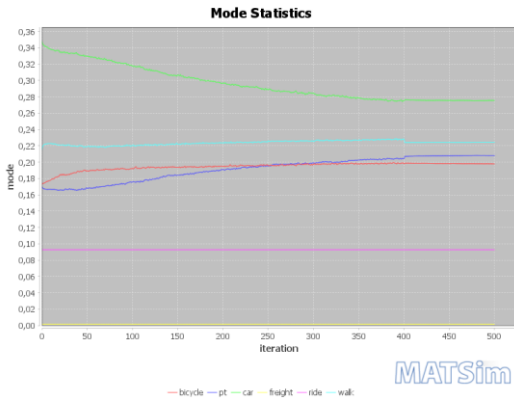
Σενάριο 2c



Σενάριο 3a



Σενάριο 3b



Σενάριο 3c

