



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ
ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ & ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**«Βέλτιστος Σχεδιασμός Δικτύου
Κυκλοφορίας Ηλεκτρικών Πατινιών με
Εφαρμογή Γεωγραφικής Περιήφραξης»**

Λιάζος Αλέξανδρος

**Επιβλέπων: Κεπαπτσόγλου Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής καθηγητής
ΕΜΠ**

Αθήνα, Οκτώβριος 2020



***NATIONAL TECHNICAL
UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL AND
SURVEYING ENGINEERING***

***DEPARTMENT OF INFRASTRUCTURE & RURAL
DEVELOPMENT***

***LABORATORY OF TRANSPORTATION
ENGINEERING***



DIPLOMA THESIS:

**«Optimal Network design for e-scooters
with Geofenced links»**

Liazos Alexandros

Supervisor: Kepaptsoglou Konstantinos, Associate Professor, NTUA

Athens, October 2020

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των Προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, και συγκεκριμένα στη σφαίρα των ερευνητικών ενδιαφερόντων του τομέα Συγκοινωνιακής Τεχνικής, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Κεπαπτσόγλου.

Θα ήθελα συνεπώς, πρωτίστως, να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου, Επίκουρο Καθηγητή του Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης ΕΜΠ, που με βοήθησε στην επιλογή ενός θέματος που άπτεται απόλυτα των ερευνητικών μου ενδιαφερόντων, καθώς και για την καθοδήγηση και βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Φυσικά, όλοι οι καθηγητές με τους οποίους συναναστράφηκα κατά την φοίτηση μου, μου παρείχαν σημαντική βοήθεια, τόνωση των ερευνητικών μου ενδιαφερόντων, και συμβουλές, και θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για αυτό, με ιδιαίτερη μνεία στους καθηγητές του τομέα Συγκοινωνιακής Τεχνικής, και του τομέα Περιφερειακού και Αστικού Σχεδιασμού και Ανάπτυξης.

Επιπρόσθετα, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς τους οικείους μου, και κυρίως τους γονείς μου για την διαχρονική συμπαράστασή τους, σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και τους συμφοιτητές και φίλους μου, οι οποίοι με στήριξαν άλλες φορές έμπρακτα, κι άλλες φορές ψυχολογικά, ιδιαίτερα με δεδομένο ότι η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε ως επί το πλείστον κατά τις πρωτοφανείς συνθήκες του εγκλεισμού στο σπίτι στη διάρκεια της πανδημίας του ιού COVID-19.

Τέλος, ειδική αναφορά θα ήθελα να κάνω στην υποψήφια διδάκτορα της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, Δις Χριστίνα Ηλιοπούλου, που στάθηκε καταλυτικός αρωγός στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας και μου έδωσε κατατοπιστικές συμβουλές, διέθεσε προσωπικό χρόνο για να βοηθήσει στην επίλυση προβλημάτων που προέκυψαν σε όλη τη διάρκεια της εργασίας, και συνεπώς είχα μία άριστη συνεργασία μαζί της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση των κοινόχρηστων ηλεκτροκίνητων πατινιών κατά τα τελευταία χρόνια έχει μπει στις ζωές των ανθρώπων, ειδικότερα στις ευρωπαϊκές και αμερικανικές πόλεις, ως ένας νέος, καινοτόμος τρόπος μετακίνησης. Η ασφαλής ένταξη τους στα αστικά οδικά δίκτυα είναι ένα πρόβλημα το οποίο δεν έχει λυθεί παρά τις προσπάθειες, λόγω του ότι η επίλυση του περιλαμβάνει νομικές, κοινωνικές, και τεχνοκρατικές πτυχές, αλλά και λόγω του ότι πρόκειται για μία αρκετά νέα μορφή μετακίνησης που τώρα μελετάται. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία προσπάθεια περιορισμού της ανεξέλεγκτης χρήσης αυτού του νέου μέσου μεταφοράς στα αστικά δίκτυα, θέτοντας κάποιους κανόνες. Ο περιορισμός έγκειται στον αποκλεισμό κάποιων οδικών αρτηριών από το δίκτυο κίνησης των e-scooter. Οι σκοποί του προβλήματος που αναπτύσσεται προς επίλυση είναι, αφενός η μεγιστοποίηση του μήκους των οδικών αρτηριών που αποκλείονται από το οδικό δίκτυο για την κίνηση πατινιών, για λόγους ασφαλείας, και αφετέρου, η ελαχιστοποίηση του κόστους του δικτύου υπό μορφή οχηματοωρών. Με τον τρόπο αυτό, θεωρητικώς, επιτυγχάνουμε την βέλτιστη συνθήκη τόσο για την μείωση ατυχημάτων (καθώς το μέγεθος και η δομή ενός ηλεκτροκίνητου πατινιού το καθιστούν ευάλωτο σε σχέση με τα υπόλοιπα οχήματα οπότε είναι χρήσιμο το να μην είναι απαραίτητη η κίνηση του παντού στο οδικό δίκτυο), όσο και για την ταχεία μετακίνηση, προκειμένου ένας χρήστης να βρίσκει ωφέλιμο να χρησιμοποιήσει το e-scooter έναντι άλλων ανταγωνιστικών μέσων μεταφοράς. Το πρόβλημα διαμορφώνεται ως πρόβλημα πολύ-κριτηριακής βελτιστοποίησης, με δύο αντικρουόμενους στόχους. Από τη μία επιλύεται το πρόβλημα ακεραίου προγραμματισμού που βρίσκει το συνολικό μήκος των γεωγραφικά περιφραγμένων συνδέσμων, και από την άλλη, μέσω της ανάθεσης φόρτου σε συνδέσμους, υπολογίζεται το συνολικό κόστος του δικτύου σε οχηματοώρες. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται ο γενετικός αλγόριθμος NSGA-II και παράγεται ένα μέτωπο Pareto μη κυριαρχούμενων λύσεων, όπου κάθε λύση χαρακτηρίζεται από δύο αντικειμενικές συναρτήσεις (μήκος φραγμένων συνδέσμων, οχηματοώρες). Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας, που καταδεικνύουν ότι η αυστηροποίηση παραμέτρων ασφαλείας, οδηγεί τελικά σε μικρότερη ασφάλεια, ενώ αναφέρονται και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις -κλειδιά: Γεωγραφική περίφραξη (geofencing), E-scooters, Διακριτό Πρόβλημα Σχεδιασμού Δικτύων, Πολύ-αντικειμενική βελτιστοποίηση, Μέτωπο Pareto, Αλγόριθμος Dijkstra, Γενετικός Αλγόριθμος.

ABSTRACT

The rise in number of users of shared e-scooters, is a new phenomenon, and has been growing more and more during the last few years. E'-scooters constitute an innovative, and user-friendly means of transportation. However, the incorporation of e-scooters in urban networks in a safe manner, remains unsolved. Indeed, this problem is complex; it has legal, social and technical-technocratic aspects. In this context, this thesis proposes a methodological tool for assisting decision-making in regulating e-scooter usage in urban areas. On the one hand, the objective is to maximize the length of links to be geofenced (restricted), in the sake of maximizing safety, and on the other hand, the objective is to minimize network cost (vehicle hours). A network design model is introduced for that purpose, whose goal is to maximize the extent of geofences in an urban area, while considering travel time impacts for users. The model seeks to determine the type of geofencing implemented in each road network segment (speed reduction or restricted access) so that safety can be enhanced for e-scooter operation at the network level. The problem is formed as a multi-objective optimization model, with deterministic constraints. An integer programming model is used in order to find total geofenced length in every iteration, and subsequently, demand assignment on shortest paths, is performed to compute total network cost in terms of vehicle hours. A Non Dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II, is employed to generate a Pareto front, i.e. the set of non-dominated solutions. Finally, sensitivity analysis is performed, showing that stricter constraints may lead to worse solutions, and future research directions are proposed.

Keywords: geofencing, e-scooters, Discrete Network Design Problem, Multi-Objective Optimization, Pareto Front, Dijkstra Algorithm, Genetic Algorithm.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό υπόβαθρο	3
2.1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	3
2.2: ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΠΕΡΙΦΡΑΞΗ (GEO-FENCING) ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΑΥΤΗΣ	5
2.3: ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΠΑΤΙΝΙΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ	8
2.3.1: ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΠΑΤΙΝΙΑ	8
2.3.2: ΕΙΔΗ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΩΝ ΠΑΤΙΝΙΩΝ	9
2.3.3: ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟΥΣ ΠΑΡΟΧΟΥΣ ΜΙΚΡΟ-ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	11
2.3.4: ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΑΤΙΝΙΩΝ	12
2.3.5: ΥΠΕΡ, ΚΑΤΑ ΚΑΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΩΝ ΠΑΤΙΝΙΩΝ	14
2.3.6: ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΩΝ ΠΑΤΙΝΙΩΝ	18
2.4: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ανάπτυξη μοντέλου για την το πρόβλημα βέλτιστης επιλογής συνδέσμων προς περιγραφή	28
3.1: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΓΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	28
3.1.1: ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ, ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ, ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΥ-ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	28
3.1.2: ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	33
3.1.3: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	35
3.2: ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	41
3.2.1: ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ	42
3.2.2: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	46
3.2.3: ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΕΥΡΕΣΗ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΠΡΟΣ ΠΕΡΙΦΡΑΞΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΕΚΤΕΛΕΣΗ	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογή του μοντέλου και ανάλυση των αποτελεσμάτων	54
4.1: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – CASE STUDY	54
4.1.1: ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΥΤΩΝ ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ (Q)GIS	54
4.1.2: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ MICROSOFT EXCEL	57
4.1.3: ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΟΥ MICROSOFT EXCEL ΜΕ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ΤΗΣ PYTHON	57
4.1.4: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ XL OPTIMIZER	58
4.2: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	59
4.2.1: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΧΩΡΙΣ ΦΡΑΓΜΕΝΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ	59
4.2.2: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΦΡΑΓΜΕΝΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ	61
4.3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	68

4.3.1: ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΠΟΥ ΘΕΩΡΕΙΤΑΙ ΕΠΙΤΡΕΠΤΟ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΝΩΦΕΡΕΙΕΣ/ΚΑΤΩΦΕΡΕΙΕΣ	68
4.3.2: ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΠΟΥ ΘΕΩΡΕΙΤΑΙ ΕΠΙΤΡΕΠΤΟ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΝΩΦΕΡΕΙΕΣ-ΚΑΤΩΦΕΡΕΙΕΣ.....	71
4.3.3: ΧΡΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ (ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ) ΠΟΙΝΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ 2 (ΚΥΡΙΕΣ ΑΡΤΗΡΙΕΣ).....	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Γενικά συμπεράσματα – προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	78
5.1: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	78
5.2: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81
ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	91

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 2.1: πίνακας προέλευσης-προορισμού (*Orientation-Destination, OD table*), με μηδενικές ενδοζωνικές μετακινήσεις (*Arash*).....4
- Εικόνα 2.2: τομή κατά την οποία απεικονίζονται τα βασικά μεγέθη για τον υπολογισμό της κλίσης μεταξύ 2 σημείων *A* και *B* (*Wikipedia*).....5
- Εικόνα 2.3: μία πολυγωνικού τύπου εικονική φραγή.....6
- Εικόνα 2.4: επεξηγηματική του πότε «ενεργοποιείται» και πότε «απενεργοποιείται» το γεγονός μίας εικονικής φραγής (<https://developers.google.com/location-context/geofencing>).....7
- Εικόνα 2.5: η πατέντα “*self-propelled vehicle*” από τον *A.H.C. Gibson*, στις 25 Ιουλίου του 1916 (<https://www.smithsonianmag.com/history/motorized-scooter-boom-hit-century-dockless-scooters-180971989/>).....8
- Εικόνα 2.6: το ηλεκτρικό πατίνι *Peugeot Scoot'Elec* (<https://ecopress.gr/to-prototipo-ilektrokinito-ochima-ine-20-et/>).....9
- Εικόνα 2.7: ηλεκτροκίνητο πατίνι τύπου *Moped* (<https://www.treehugger.com/vespa-electric-scooter-offers-clean-silent-commuting-4857417>).....10
- Εικόνα 2.8: ηλεκτροκίνητο πατίνι τύπου *standing* της εταιρείας *Bird* (<https://www.theverge.com/2018/10/4/17937510/bird-scooter-delivery-uber-zero-rugged>).....10
- Εικόνα 2.9: η οθόνη που θα εμφανιστεί στον χρήστη αν θέλει να ενοικιάσει ένα διαθέσιμο σκούτερ της *Lime* (<https://www.digitallife.gr/dokimasame-ta-ilektrika-patinia-lime-pou-irthan-pros-enoikiasi-kai-stin-ellada-osa-prepei-na-gnorizete-32312>).....12
- Εικόνα 2.10: η εικόνα που εμφανίζεται στον χρήστη του πατινιού όταν βρίσκεται εν κινήσει (<https://www.digitallife.gr/dokimasame-ta-ilektrika-patinia-lime-pou-irthan-pros-enoikiasi-kai-stin-ellada-osa-prepei-na-gnorizete-32312>).....13
- Εικόνα 2.11: γράφημα από την εταιρεία *Lime*.....14
- Εικόνα 2.12: Διάγραμμα από την μελέτη των *Blomberg κ.α.* που αφορά τα ατυχήματα με κέντρο κάποιου είδους πατίνι (*Bloomberg et al*).....16
- Εικόνα 2.13: Δείγμα από την μελέτη των *Kobayashi et al*, που δείχνει την συνεχή αύξηση των περιπτώσεων τραυματισμών κατά τους τελευταίους μήνες του 2018 (*Kobayashi et al*).....17
- Εικόνα 2.14: απεικόνιση λειτουργικής ιεράρχησης οδών σε αστικό δίκτυο (*Γαβανάς et al*).....19
- Εικόνα 2.15: η εικόνα που θα εμφανίζεται στον χρήστη που κινείται σε ποσοστό πάνω από 50% της βόλτας του στο πεζοδρόμιο (<https://mashable.com/article/lime-escooter-sidewalk-street-detection/?europa=true>).....20

<i>Εικόνα 2.16: σχηματική αναπαράσταση της κίνησης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο γωνίας θ με το οριζόντιο επίπεδο</i>	22
<i>Εικόνα 3.1: Απεικόνιση δύο αντικρουόμενων συναρτήσεων προς βελτιστοποίηση, μέσω ενός μετώπου Pareto (Κεπατσόγλου)</i>	31
<i>Εικόνα 3.2: Γενικό διάγραμμα ροής ενός γενετικού αλγορίθμου (https://apacheignite.readme.io/v2.7.6/docs/genetic-algorithms)</i>	34
<i>Εικόνα 3.3: Αλγόριθμος Dijkstra-1 (https://brilliant.org/wiki/dijkstras-short-path-finder/)</i>	48
<i>Εικόνα 3.4: Αλγόριθμος Dijkstra-2 (https://brilliant.org/wiki/dijkstras-short-path-finder/)</i>	48
<i>Εικόνα 3.5: Αλγόριθμος Dijkstra-3 (https://brilliant.org/wiki/dijkstras-short-path-finder/)</i>	49
<i>Εικόνα 3.6: Αλγόριθμος Dijkstra -4 (https://brilliant.org/wiki/dijkstras-short-path-finder/)</i>	50

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ - ΧΑΡΤΩΝ

Πίνακας 2.1 (Rodriguez et al).....	6
Πίνακας 4.1.....	64
Πίνακας 4.2.....	70
Πίνακας 4.3.....	73
Πίνακας 4.4.....	76
Διάγραμμα 3.1.....	41
Διάγραμμα 4.1.....	63
Διάγραμμα 4.2.....	69
Διάγραμμα 4.3.....	72
Διάγραμμα 4.4.....	75
Χάρτης 4.1.....	54
Χάρτης 4.2.....	56
Χάρτης 4.3.....	57
Χάρτης 4.4.....	60
Χάρτης 4.5.....	60
Χάρτης 4.6.....	65
Χάρτης 4.7.....	66
Χάρτης 4.8.....	66
Χάρτης 4.9.....	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

Ένα από τα πολύ βασικά κίνητρα εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η αναγκαιότητα για περιορισμό στην -μέχρι την στιγμή που αυτή η εργασία γράφεται- χωρίς περιορισμούς χρήση των ηλεκτροκίνητων πατινιών στους δρόμους των μεγάλων αστικών κέντρων. Η διαπίστωση μη ορθής κάποιες φορές χρήσης, μπορεί να γίνει ακόμα και με απλή παρατήρηση, εάν κάποιος ως πεζός κινηθεί, για παράδειγμα, στο κέντρο της Αθήνας.

Συνεπώς, προτείνεται η ιδέα της μείωσης του διαθέσιμου δικτύου, με τη μορφή γεωγραφικής περιφράξης (geofencing), για την κίνηση αυτού του νέου μέσου μεταφοράς, προκειμένου να περιοριστούν οι κίνδυνοι ατυχήματος, αλλά ταυτόχρονα διατηρώντας τις διαδρομές συμφέρουσες προς τους χρήστες. Με βάση τα παραπάνω, επιζητείται ταυτόχρονα η μεγιστοποίηση των οδών που μπορούν να αποκοπούν από το δίκτυο, με δεδομένη όμως την ελαχιστοποίηση του κόστους διάνυσης του δικτύου. Η μη ελαχιστοποίηση του κόστους δικτύου ως αντίβαρο θα ήταν προβληματική, καθώς θα έδινε μεν καλύτερες λύσεις, οι οποίες όμως θα ήταν οικονομικά ασύμφορες, τόσο για τις εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον χώρο της κοινοχρησίας ηλεκτροκίνητων πατινιών, όσο και για τους χρήστες που επί πληρωμή ενοικιάζουν τα πατίνια.

Η συγκεκριμένη εργασία απαρτίζεται από 6 κεφάλαια. Το παρόν, εισαγωγικό, είναι το Κεφάλαιο 1, ενώ στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται χρήσιμοι όροι, ορισμοί, και αναλύσεις μεγεθών που θα χρησιμοποιηθούν στην πορεία της εργασίας, ιστορική αναδρομή για το αναλυόμενο μεταφορικό μέσο και την μικρό-κινητικότητα εν γένει, καθώς και μία ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που μελετήθηκε. Εν συνεχεία, στο κεφάλαιο 3 αναπτύσσεται και αναλύεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, οι μεταβλητές του, οι περιορισμοί του, οι παραδοχές του, και η μαθηματική προτυποποίηση του. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται η εφαρμογή του, τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγει η μελέτη, καθώς και οι αλλαγές σε αυτά, δηλαδή τα διαφορετικά αποτελέσματα που προέκυψαν με την εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας. Τέλος, το κεφάλαιο 5 αποτελεί το ερευνητικό συμπέρασμα του μελετητή, και οι προτάσεις προς ενδεχόμενη μελλοντική έρευνα στη συγκεκριμένη επιστημονική περιοχή, ενώ μετά και το πέρας αυτού του κεφαλαίου αναπτύσσεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στην γλώσσα προγραμματισμού Python, για τον καταμερισμό της κυκλοφορίας σε κατάσταση ισορροπίας χωρίς στοιχεία κορεσμού, για δεδομένο δίκτυο με δεδομένα στοιχεία ζήτησης.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΠΑΤΙΝΙΩΝ ΜΕ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΕΡΙΦΡΑΞΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Στο παρόν κεφάλαιο θα δοθούν ορισμοί κάποιων βασικών εννοιών της κυκλοφοριακής τεχνικής που θα χρησιμοποιηθούν πιο κάτω, προκειμένου να γίνει ευκολότερη η κατανόηση της εργασίας στον αναγνώστη.

Κυκλοφοριακή ροή

Αφορά την κίνηση των οχημάτων σε μία οδό. Προσδιορίζεται από τα μετρήσιμα κυκλοφοριακά μεγέθη, τα οποία είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος, η ταχύτητα και η πυκνότητα.

(Φραντζεσκάκης et al, 2009)

Κυκλοφοριακός φόρτος

Πρόκειται για τον συνολικό αριθμό οχημάτων που διέρχονται από ένα σημείο ή μια διατομή οδού στη μονάδα του χρόνου. Μονάδα μέτρησης του κυκλοφοριακού φόρτου είναι τα οχήματα ανά μονάδα χρόνου.

(Φραντζεσκάκης et al, 2009)

Κυκλοφοριακή ικανότητα – ροή κορεσμού

Είναι ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος που μπορεί να διέλθει από μία διατομή ή μία ομάδα λωρίδων που εξυπηρετούν από κοινού μία κατεύθυνση κυκλοφορίας, υπό τις επικρατούσες οδικές, κυκλοφοριακές και ρυθμιστικές συνθήκες

Αναφερόμαστε στον μέγιστο κυκλοφοριακό φόρτο που μπορεί να διέλθει από μία διατομή ή μία ομάδα λωρίδων που εξυπηρετούν από κοινού μία κατεύθυνση κυκλοφορίας, υπό τις επικρατούσες οδικές, κυκλοφοριακές και ρυθμιστικές συνθήκες, με την παραδοχή πλήρους (100%) χρήσης του χρησιμοποιούμενου χρόνου πράσινης ένδειξης.

(Σπυροπούλου, Αντωνίου, 2015)

Σύνδεσμος – Κόμβος

Ένας κόμβος σε ένα συγκοινωνιακό σύστημα αντιστοιχεί σε μία υπαρκτή ή ιδεατή διασταύρωση, ενώ ένας σύνδεσμος αντιστοιχεί σε οδικό τμήμα μεταξύ 2 κόμβων που εξυπηρετεί συγκεκριμένη φορά κίνησης οχημάτων. Ένα μονόδρομο οδικό τμήμα αναπαρίσταται από έναν σύνδεσμο με κατεύθυνση την υπαρκτή κατεύθυνση, ενώ ένα αμφίδρομο οδικό τμήμα αναπαρίσταται από 2 συνδέσμους αντίθετης κατεύθυνσης.

(Σπυροπούλου, Αντωνίου, 2015)

Οδός

Ως οδό ορίζουμε ένα οδικό τμήμα που εξυπηρετεί είτε και τις δύο αντίρροπες κατευθύνσεις κίνησης είτε μόνο την μία. Αναφέρεται δηλαδή σε ένα οδικό τμήμα με

όποια λειτουργικά και κατασκευαστικά στοιχεία το διακρίνουν, όπως μήκος, πλάτος, μέση κλίση κ.α.

Πίνακας προέλευσης – προορισμού μετακινήσεων

Πρόκειται για μια μορφή αναπαράστασης των μετακινήσεων, όπου οι στήλες αντιστοιχούν στις ζώνες προέλευσης και οι γραμμές στις ζώνες προορισμού. Το κελί [I,j] αναπαριστά μετακίνηση από την περιοχή I προς την περιοχή j, ενώ διαγώνια κελιά (αυτά στα οποία $i=j$), αναπαριστούν ενδοζωνικές μετακινήσεις.

(Σπυροπούλου, Αντωνίου, 2015)

OD Zones	2	1	4	7	8	9	3	Total
2	-	505	572	111	875	111	17	2200
1	505	-	260	50	398	50	8	1271
4	572	260	-	57	451	57	9	1405
7	111	50	57	-	87	11	2	219
8	875	398	451	87	-	87	13	1911
9	111	50	57	11	87	-	2	219
3	17	8	9	2	13	2	-	51
Total	2200	1271	1405	219	1911	219	51	9810

Εικόνα 2.1: πίνακας προέλευσης-προορισμού (Orientation-Destination, OD table), με μηδενικές ενδοζωνικές μετακινήσεις

Συνθήκες ελεύθερης ροής

Αναφέρεται σε κίνηση οχημάτων (στην προκειμένη περίπτωση, πατινιών) η οποία δεν διακόπτεται. Πρόκειται για την περίπτωση όπου ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι αρκετά χαμηλός και δεν εμποδίζεται από διασταυρώσεις, σηματοδοτήσεις.

(Σπυροπούλου, Αντωνίου, 2015)

Χρόνος ελεύθερης ροής

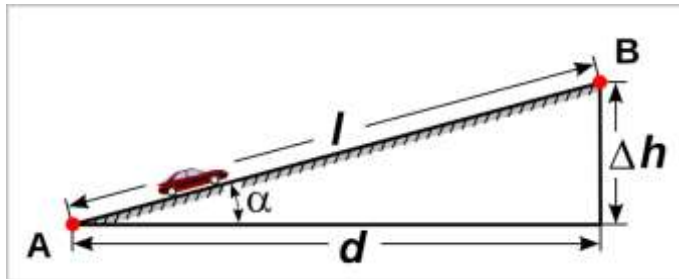
Αναφέρεται στον χρόνο που απαιτείται ώστε να διανυθεί ένας σύνδεσμος σε συνθήκες ελεύθερης ροής, και συνεπώς το κινούμενο όχημα δεν καθυστερεί λόγω αλληλεπίδρασης με κάποιο άλλο όχημα που βρίσκεται στον ίδιο σύνδεσμο. Ουσιαστικά πρόκειται για τον ελάχιστο χρόνο διάνυσης ενός συνδέσμου.

(Σπυροπούλου, Αντωνίου, 2015)

Κλίση οδού

Η κλίση ενός φυσικά κατασκευασμένου στοιχείου όπως ράμπα ή οδικό τμήμα, ορίζεται από την εφαπτόμενη της γωνίας α που σχηματίζει αυτό το στοιχείο με το οριζόντιο επίπεδο. Στη συνηθέστερη εκδοχή της, η κλίση (η εφαπτομένη) υπολογίζεται ως το κλάσμα $\Delta H/d$, όπου ΔH η διαφορά υψομέτρου μεταξύ του αρχικού και του τελικού

σημείου υπολογισμού, και d η οριζόντια απόσταση μεταξύ των 2 σημείων. Ανάγλυφα παρουσιάζεται στο σχήμα:



Εικόνα 2.2: τομή κατά την οποία απεικονίζονται τα βασικά μεγέθη για τον υπολογισμό της κλίσης μεταξύ 2 σημείων A και B.

(Wikipedia, 'Grade (slope)')

2.2: ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΠΕΡΙΦΡΑΞΗ (GEO-FENCING) ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΑΥΤΗΣ

Η γεωγραφική περίφραξη (geofencing) έγκειται στην δημιουργία εικονικού φράχτη ή φανταστικού ορίου σε μια υπαρκτή γεωγραφική περιοχή που απεικονίζεται σε χάρτη. Μπορεί να είναι είτε δυναμικής μορφής, δηλαδή σε ακτίνα γύρω από την κάθε φορά τρέχουσα τοποθεσία, ή και προκαθορισμένη ντετερμινιστικά, με χρήση οριογραμμών. Η βασική λειτουργία του συστήματος είναι η ενεργοποίηση ενός γεγονότος και ειδοποίηση του χειριστή της εφαρμογής εικονικής φραγής ή/και του ίδιου του χρήστη μιας συσκευής με ενεργοποιημένες υπηρεσίες τοποθεσίας, όταν αυτή μετακινείται εντός ή εκτός του εικονικού φράχτη. Χρησιμοποιεί GPS (Global Positioning System) και RFID (Ραδιοσυχνотική ταυτοποίηση), Wi-Fi, καθώς και συνδυασμούς των ανωτέρω για να καθορίσει την θέση της υπό παρακολούθηση συσκευής. (Audiopedia)

Επομένως, τα 4 βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν και ορίζουν πλήρως την γεωγραφική περίφραξη είναι:

- Τα όρια, που έχουν εκ προοιμίου σχεδιαστεί, και με βάση τον πίνακα 2.1 μπορεί να είναι γεωμετρικά ή συμβολικά
- Η διάσχιση, δηλαδή η ταύτιση των συντεταγμένων της κινούμενης συσκευής με τις συντεταγμένες ενός σημείου του ορίου
- Το μήνυμα, το οποίο μπορεί να είναι μηνύματα στο κινητό τηλέφωνο, δόνηση της συσκευής, ή διαφημίσεις στην οθόνη
- Η αδειοδότηση, καθώς ο εκάστοτε χρήστης πρέπει να ενεργοποιήσει την τοποθεσία της συσκευής του

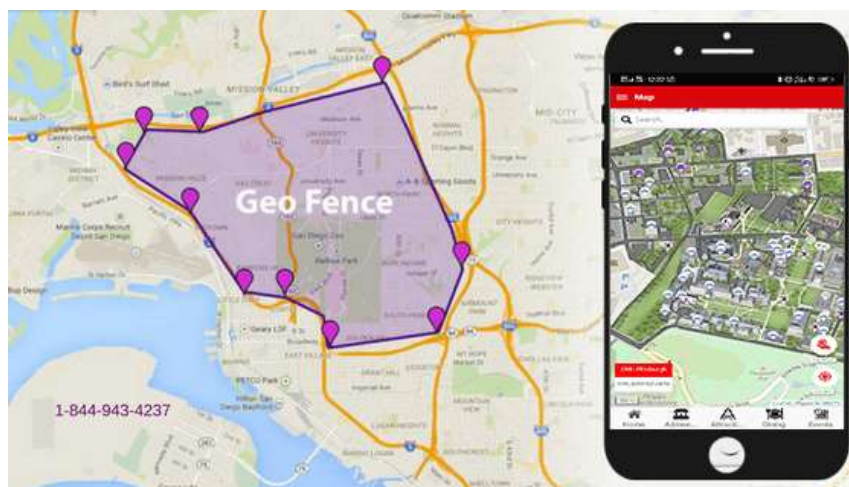
(Pigeon Technology, 'Geofencing: Applications, Benefits, and Challenges [Geofencing Technology], 2019)

Οι γεωγραφικές περιφράξεις περιγράφονται ως γεωγραφικές περιοχές, και είναι δύο τύπων, γεωμετρικές και συμβολικές. Οι μεν γεωμετρικές ορίζουν συγκεκριμένες

περιοχές με σχήματα (συνηθέστερα κύκλος), οι δε συμβολικές δημιουργούν για κάθε τοποθεσία ένα κλειδί του τύπου Greece/Athens/Syntagma-Square, ή και με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και περισσότερα επίπεδα, με την ίδια λογική που γράφονται και αποθηκεύονται στη μνήμη ενός υπολογιστή τα μονοπάτια (paths) των αρχείων. Εκτός των παραπάνω, υπάρχουν και οι semantically enhanced γεωγραφικές περιφράξεις, στις οποίες το ακριβές μέγεθος και σχήμα της περιοχής που περιφράσσεται εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνική εύρεσης θέσης και την ακρίβεια αυτής. (Rodriguez-Garzon, Deva, 2014). Σε γενικές γραμμές, αυτά συνοψίζονται στον πίνακα 4.1.

ΤΥΠΟΣ	ΤΡΟΠΟΣ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ
Spatial	Γεωμετρικός	Κύκλοι, γραμμές, πολύγωνα	Region of Berlin
Hierarchy-based	Συμβολικός	Χώρα, πόλη, οδός, κτήριο κ.λ.π.	Germany/Berlin/Ernst-Reuter-Platz
Network-based	Συμβολικός	ID κελιού, WLAN of BSSID κ.α.	BSSID of WLAN σε ένα εστιατόριο McDonalds
Semantic	Γεωμετρικός και συμβολικός	Συνδυασμός των παραπάνω	Κοντά σε ένα εστιατόριο McDonalds

Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτικά στοιχεία για τα βασικά είδη γεωγραφικής περιφράξης



Εικόνα 2.3: μία πολυγωνικού τύπου εικονική φραγή

Αν πρόκειται για εφαρμογή σε κάποια κινητή συσκευή, η τελευταία πρέπει να έχει πρόσβαση στα δεδομένα θέσης της συσκευής παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, τα οποία στην πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι συντεταγμένες γεωγραφικού μήκους

και πλάτους, από συσκευή με δυνατότητα GPS. Γίνεται κάθε χρονική στιγμή σύγκριση των συντεταγμένων της συσκευής την δεδομένη στιγμή, με τις συντεταγμένες ορίου, και αν αυτές ταυτίζονται, δημιουργείται το γεγονός είτε ειδοποίησης είτε ενεργοποίησης/απενεργοποίησης λειτουργιών.



Εικόνα 2.4: επεξηγηματική του πότε «ενεργοποιείται» και πότε «απενεργοποιείται» το γεγονός μίας εικονικής φραγής

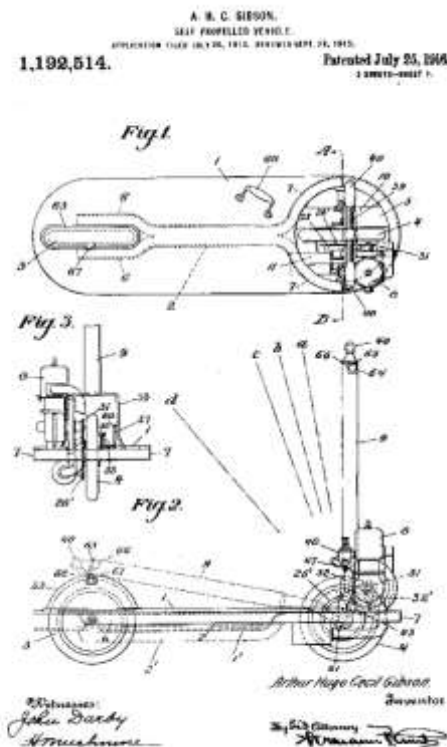
Ενδεικτικά αναφέρονται μερικές από τις χρήσεις και εφαρμογές της γεωγραφικής περιφραξης (geo-fencing):

- Σε συνδυασμό με υπηρεσίες γονικής προστασίας, χρησιμοποιείται για γονική προστασία προκειμένου ο γονέας να γνωρίζει αν το ανήλικο παιδί του έχει απομακρυνθεί από μια συγκεκριμένη ζώνη (Wikipedia, ‘Geo-fence’)
- Στην τηλεματική, καθώς επιτρέπει στους χρήστες του συστήματος να σχεδιάσουν ζώνες και περιοχές γύρω από τον χώρο εργασίας, περιοχές που θεωρούν ασφαλείς ή αντίστοιχα, επισφαλείς, και μπορούν να ειδοποιούν τον χρήστη ή τον δημιουργό του συστήματος αν κάποιο όχημα βρεθεί στην εν λόγω ζώνη. (Wikipedia, ‘Geo-fence’)
- Σε χώρους εργασίας, οι εργοδότες συχνά ελέγχουν ιδιαίτερα τους υπαλλήλους που εργάζονται στο πεδίο και σε ανοιχτούς χώρους ώστε να βεβαιωθεί η μη απουσία τους. (Wikipedia, ‘Geo-fence’)
- Σε εταιρείες που διαχειρίζονται στόλους οχημάτων, ειδικότερα σε στόλους οχημάτων μεταφοράς βαρέων υλικών (HGV) προκειμένου να αποφεύγουν συγκεκριμένα τμήματα του οδικού δικτύου, όπως οδικά τμήματα που δεν μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλα βάρη ή ύψη, οδικά τμήματα εντός αστικών ιστών, που παρουσιάζουν μεγάλο κυκλοφοριακό φόρτο κατά συγκεκριμένες ώρες. (Reclus, Drouard, 2009)
- Στην αποστολή μηνυμάτων βάσει τοποθεσίας, σε ανθρώπους που βρίσκονται σε περιοχές υψηλής επικινδυνότητας (π.χ. μαζικά μηνύματα για εκκένωση σε χρήστες των οποίων οι τοποθεσίες είναι ενεργοποιημένες, και βρίσκονται σε μία ακτίνα από την εστία της πυρκαγιάς). (Wikipedia, ‘Geo-fence’)

Επιπλέον εφαρμογές βρίσκονται στον χώρο του μάρκετινγκ, με ειδοποιήσεις ή και διαφημίσεις στον επίδοξο πελάτη από τις επιχειρήσεις που βρίσκονται κοντά του, ή και μελλοντικά, στον χώρο των Έξυπνων Συστημάτων Μεταφορών, με χρήση περιορισμών στον χώρο κίνησης των οχημάτων. (Wikipedia, ‘Geo-fence’)

2.3: ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΠΑΤΙΝΙΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ

2.3.1: ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΠΑΤΙΝΙΑ



Εικόνα 2.5: η πατέντα “self-propelled vehicle” από τον A.H.C. Gibson, στις 25 Ιουλίου του 1916

Ο Ogden Bolton το 1895 διαμόρφωσε το πρώτο σχέδιο για ηλεκτρικό πατίνι, με κατοχυρωμένο δικαίωμα πατέντας. Στην συγκεκριμένη συσκευή μετακίνησης το ηλεκτρικό μοτέρ ήταν τοποθετημένο στο καπάκι της πίσω ρόδας, ενώ η συσκευή επιπλέον θα διέθετε και μπαταρία 10 volt. Ωστόσο δεν τέθηκε ποτέ σε λειτουργία ούτε ενδεχομένως κατασκευάστηκε το εν λόγω πατίνι, ήταν όμως η πρώτη απόπειρα σχεδιασμού. (Madcharge, 2018). Η πατέντα ευρεσιτεχνίας του οχήματος «self-propelled vehicle» δόθηκε στον εφευρέτη Arthur Hugo Cecil Gibson, ο οποίος βοηθήθηκε σημαντικά και από τον Joseph F. Merkel. Τα μοντέλα αυτά κατασκευάστηκαν από την αμερικανική εταιρεία Autoped, και βγήκαν στην αγορά το φθινόπωρο του 1915.

Αργότερα, μαζική για τα δεδομένα της εποχής παραγωγή φέρεται να πραγματοποιήσει η εταιρεία Ajax Motor στην Νέα Υόρκη, ενώ το 1927, οι Ramsons, Sims και Jeffreys σε συνεργασία με γαλλική εταιρεία, κατασκεύασαν ηλεκτρικό ποδήλατο και συγκεκριμένα το μοντέλο Electrocyclette. Επρόκειτο για ένα τρίκυκλο ποδήλατο με μπαταρία στο κάτω μέρος της σέλας. Μολονότι δεν σημείωσε ιδιαίτερες πωλήσεις, πρόκειται για το πρώτο μοντέλο που λειτουργικά και κατασκευαστικά είναι κοντά στο «ηλεκτρικό» πατίνι. (Madcharge, 2018).

Κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, παρατηρήθηκε σημαντική έλλειψη ορυκτών καυσίμων καθώς αυτά χρησιμοποιούνταν ως επί το πλείστον στις πολεμικές επιχειρήσεις. Ο εφευρέτης Earl Williams μετέτρεψε, στην προσπάθεια μετάβασης σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας για την μετακίνηση, το βενζινοκίνητο ποδήλατο σε ηλεκτροκίνητο, και η Marketer χρησιμοποίησε την πατέντα του και το έβγαλε στις αγορές ως Par-Car. Ταυτόχρονα η γαλλική εταιρεία Sokovel κατασκεύασε 400 ηλεκτροκίνητα οχήματα τύπου πατινι. (Madcharge, 2018).

Στα 1960 και 1970 αναπτύχθηκε η τεχνολογία αλκαλικών κυψελών καυσίμου, που έμελλε να χρησιμοποιηθεί στους ηλεκτρικούς κινητήρες. Συγκεκριμένα, το 1967, ο εφευρέτης Karl Kordesch κατασκεύασε ένα υβριδικό μοντέλο πατινιού που κινούνταν με συνδυασμό βενζίνης και ηλεκτρικού ρεύματος, με αυτονομία κίνησης 200 μιλίων και ταχύτητα 2 m/h. Επτά χρόνια αργότερα, η Auranthic Corp κατασκεύασε μοντέλο ηλεκτρικού πατινιού με όνομα Charger, με αυτονομία κίνησης 50 μιλίων και ταχύτητα έως 30 m/h, ενώ το 1996 προωθήθηκε στην αγορά το μοντέλο Peugeot Scoot'Elec, που διαθέτει μπαταρίες νικελίου-καδμίου και η ταχύτητα του μπορούσε να φτάσει τα 25 m/h. (Madcharge, 2018)



Εικόνα 2.6: το ηλεκτρικό πατινι Peugeot Scoot'Elec

2.3.2: ΕΙΔΗ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΩΝ ΠΑΤΙΝΙΩΝ

Υπάρχουν 2 τεχνοτροπίες-τύποι ηλεκτρικών πατινιών, είτε χρησιμοποιούμενα από ιδιώτες, είτε ενοικιαζόμενα και κοινόχρηστα από εταιρείες μικρό-κινητικότητας, τα τύπου standing, και τα τύπου Moped.

Τα πρώτα έχουν την τυπική δομή του πατινιού, όπως το γνωρίζει κανείς ως παιδικό παιχνίδι, συνεπώς διαθέτουν τιμόνι, κορμό και σανίδα στην οποία πατούν τα πόδια του αναβάτη, ο οποίος οδηγεί σε όρθια θέση, ενώ οι ρόδες τους είναι μικρού μεγέθους με μικρής ελαστικότητας λάστιχα. Τα συνήθη υλικά κατασκευής του κορμού τους είναι το τιτάνιο, το αλουμίνιο και το ατσάλι. Τροφοδοτούνται από ηλεκτρική μηχανή. (Shaheen, Cohen, 2019)

Τα Moped-style ομοιάζουν περισσότερο με ένα δίκυκλο τύπου μοτοσυκλέτας, με τις δυνατότητες τους να είναι μεγαλύτερες σε ό,τι αφορά στην κίνηση στο οδικό δίκτυο. Ο οδηγός τους είναι σε καθιστή θέση. Μπορεί να τροφοδοτούνται τόσο από ηλεκτρισμό, όσο και από υγρά καύσιμα. Συνήθως είναι ακριβότερα, τόσο στην αγορά τους όσο και στην ενοικίαση τους από εταιρείες κοινοχρησίας, από τα standing. (Shahee, Cohen, 2019)

Στην Ελλάδα, όταν αναφερόμαστε σε ηλεκτροκίνητα πατίνια, αναφερόμαστε στα standing, καθώς τα Moped-style υπάγονται στα δίκυκλα τύπου μοτοσυκλέτας.



Εικόνα 2.7: ηλεκτρικό πατίνι τύπου Moped. Τα μηχανικά και κινητικά του χαρακτηριστικά είναι περισσότερο κοντά σε μία μοτοσυκλέτα από ό,τι σε ένα ηλεκτρικό πατίνι.

τόπους, στους οποίους να σταθμεύουν όταν δεν χρησιμοποιούνται, αλλά μπορούν πρακτικά να σταθμεύσουν σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου, με την προϋπόθεση ότι δεν προκαλούν όχληση στην κίνηση των υπόλοιπων μέσω μεταφοράς με τα οποία μοιράζονται το δίκτυο, δηλαδή οχήματα, ποδήλατα και πεζούς.



Εικόνα 2.8: Ηλεκτροκίνητο πατίνι τύπου standing, της εταιρείας Bird

2.3.3: ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟΥΣ ΠΑΡΟΧΟΥΣ ΜΙΚΡΟ-ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Αρχικά, ως όχημα μικρό-κινητικότητας (Personal Transportation Device-PTD) ορίζεται ένα όχημα σχεδιασμένο για μεταφορά μόνο 1 ατόμου σε όρθια ή καθιστή θέση, το οποίο λειτουργεί με ανθρώπινη, ηλεκτρική ή μηχανική δύναμη, με μέγιστο πλάτος 24 και μέγιστο μήκος 42 ιντσών, ή αλλιώς, με μέγιστες διαστάσεις 61*107 εκατοστά. Τέτοια οχήματα είναι το ποδήλατο, ηλεκτρικό πατίνι ή μοτοποδήλατο, και παραλλαγές αυτών. Σε συνθήκες συμφόρησης τα οχήματα αυτά αποκτούν προβάδισμα καθώς ο κορεσμός τα επηρεάζει λιγότερο λόγω μικρού μεγέθους τους και δυνατότητας ελιγμών. Επιπλέον και λόγω της φορητότητας τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμένες μετακινήσεις, μαζί με την χρήση Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, καθώς είναι δυνατό κάποιος χρήστης να χρησιμοποιήσει ένα ηλεκτρικό πατίνι για να μετακινηθεί από την οικεία του μέχρι τον κοντινότερο σταθμό λεωφορείου ή μετρό. (Clewlow, 2018)

Κάνοντας μία σύντομη (πρόσφατη) ιστορική αναφορά, στα τέλη του 2016 στις ΗΠΑ έγινε η αρχή της ενοικίασης ποδηλάτων χωρίς ύπαρξη συγκεκριμένων χώρων στάθμευσης, από εταιρείες όπως η LimeBike (Lime) και η Spin, ενώ η Mobike, εταιρεία με βάση την Κίνα, ξεκίνησε τη λειτουργία της στις ΗΠΑ. Το 2017 οι εταιρείες Motivate και Social Bicycles (JUMP Bikes), εταιρείες που χρησιμοποιούσαν σταθμούς, ξεκίνησαν να ερευνούν την χρήση της lock-to τεχνολογίας με βάση την οποία ο χρήστης μπορεί να κλειδώσει το ποδήλατο οπουδήποτε χωρίς ύπαρξη σταθμών. Την ίδια χρονιά η εταιρεία Bird άρχισε να διαθέτει στόλο πατινιών στην Σάντα Μόνικα της Καλιφόρνια, ενώ από το 2018 ήδη επεκτείνεται. Πρόκειται για την μόνη εταιρεία της οποίας η επιχειρηματική πρωτοβουλία ξεκίνησε από πατίνια και όχι από ποδήλατα.

Σε ό,τι αφορά την Ελλάδα, τα πρώτα πατίνια στην χώρα εμφανίστηκαν τον Ιανουάριο του 2019 με πρωτοβουλία της Lime. Το χρονικό εύρος εξυπηρέτησης είναι μεταξύ 8.00 και 21.00 καθημερινά. Ο επίδοξος χρήστης θα πρέπει να έχει κατεβάσει στο κινητό του την εφαρμογή της εταιρείας, να εντοπίσει το πιο κοντινό σε αυτόν όχημα και να κάνει την διαδρομή του. Λίγο καιρό αργότερα δραστηριοποιήθηκε και η γερμανική Εταιρεία Hive.

2.3.4: ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΑΤΙΝΙΩΝ

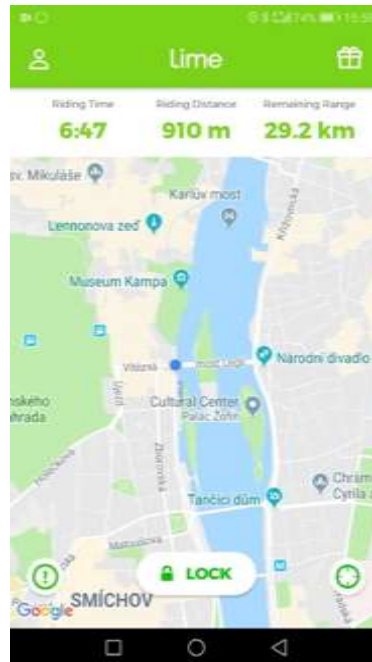
Η εκάστοτε εταιρεία-φορέας διανέμει στην πόλη ενδιαφέροντος έναν σημαντικό αριθμό ηλεκτροκίνητων πατινιών, συγκεντρωμένα σε διάφορους κόμβους, και πλήρως φορτισμένα, έτοιμα προς χρήση. Διαθέτουν λάστιχα χωρίς αεροθάλαμο, κάτι που αποτρέπει σε μεγαλύτερο βαθμό από τα συμβατικά λάστιχα τη δημιουργία ζημιάς από αιχμηρά αντικείμενα ή λακκούβες, ενώ επιπλέον φέρουν και πομποδέκτη GPS.



Εικόνα 2.9: η οθόνη που θα εμφανιστεί στον χρήστη αν θέλει να ενοικιάσει ένα διαθέσιμο σκούτερ της Lime

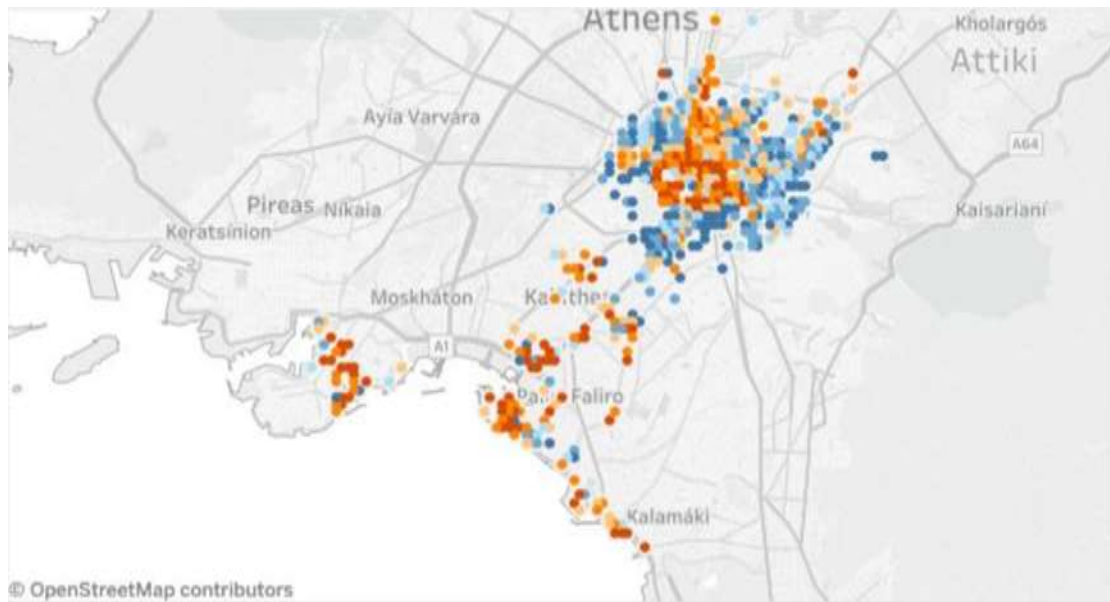
Ένας χρήστης αρκεί να έχει κατεβάσει στο κινητό του τηλέφωνο την εφαρμογή της εταιρείας (Lime, Hive, Bird ή άλλη), αφού πρώτα δημιουργήσει λογαριασμό τον οποίο έχει συνδέσει με πιστωτική ή χρεωστική κάρτα. Εν συνεχεία, ο χρήστης μπορεί να δει το στίγμα του σε σχέση με το στίγμα των διαθέσιμων προς χρήση πατινιών σε ζωντανό χρόνο, άρα και την απόσταση του από κάθε όχημα, το ποσοστό φόρτισης καθενός από αυτά, καθώς και τα χιλιόμετρα αυτονομίας που του απομένουν, προσεγγιστικά. Τα οχήματα είναι κλειδωμένα στην τοποθεσία που τα είχε αφήσει ο προηγούμενος αναβάτης τους, η οποία συνίσταται να είναι τοποθεσία που δεν ενοχλεί την κίνηση πεζών, παρόδων ιδιοκτητών ή/και οχημάτων. Παράδειγμα «καλής» τοποθεσίας είναι για παράδειγμα, κάποια γωνία ενός πλατιού πεζοδρομίου. (Σκιάνη, 2018)

Οι ενδεικτικές τιμές διαδρομών (Lime), τοποθετούνται στο 1 ευρώ για το ξεκλείδωμα και επιπλέον 0,15 ευρώ για κάθε 1' χρήσης. Από εμπειρίες χρηστών, η μέση ταχύτητα με ένα τέτοιο όχημα αγγίζει τα 10-15 χλμ/ώρα. Τα πατίνια συλλέγονται κατά τις νυχτερινές ώρες, με τρόπο που όμως πάντα κάποια εξ' αυτών να μένουν διαθέσιμα, από υπαλλήλους της εταιρείας ώστε να είναι διαθέσιμα το επόμενο πρωί. Η εταιρεία Lime δίνει την δυνατότητα, επί πληρωμή, σε οποιονδήποτε να φορτίσει ένα ή περισσότερα scooters κατ' οίκον. Πρόκειται για τους "juicers" όπως ορίζονται ακριβώς στην ιστοσελίδα της εταιρείας. (Σκιάνης 2018)



Εικόνα 2.10 : η εικόνα που εμφανίζεται στον χρήστη του πατινιού όταν βρίσκεται εν κινήσει.

Μια τυπική κατανομή της χρήσης των πατινιών στον χώρο, από έρευνα της εταιρείας Lime, φαίνεται στην εικόνα, από την οποία φαίνεται ότι η χρήση στον δήμο Αθηναίων και ειδικά στο Α, Β, Δ δημοτικό διαμέρισμα, είναι αρκετά μεγάλη, με κέντρο το ιστορικό τρίγωνο, την περιοχή Συντάγματος, Μοναστηρακίου, Ακρόπολης, καθώς και σε κεντρικούς άξονες όπως η Ελευθερίου Βενιζέλου (Πανεπιστημίου), Σταδίου, Ακαδημίας, Βασιλίσσης Σοφίας και Αλεξάνδρας.



Εικόνα 2.11: στοιχεία από την εταιρεία μικρό-κινητικότητας Lime για την συγκέντρωση ηλεκτροκίνητων πατινιών στην Αττική

2.3.5: ΥΠΕΡ, ΚΑΤΑ ΚΑΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΩΝ ΠΑΤΙΝΙΩΝ

Πλεονεκτήματα

Μερικά ενδεικτικά πλεονεκτήματα που έχουν παρατηρηθεί από την μικρή παγκόσμια εμπειρία στην χρήση ηλεκτροκίνητων και συγκεκριμένα κοινόχρηστων πατινιών, είναι τα εξής:

- Πρόκειται για ένα μέσο που μπορεί να καλύψει τις λεγόμενες διαδρομές τελευταίου μιλίου (last-mile rides)
- ο χρήστης δεν έχει την αγωνία για πιθανή κλοπή ή φθορά του οχήματος
- δεν χρειάζεται το πατίνι να τοποθετηθεί σε ειδικό σύστημα στάθμευσης
- για διαδρομές μικρού μήκους είναι φθηνότερη επιλογή από τα πιθανά υποκατάστατα του όπως ταξί
- η χρήση του συμβαδίζει περισσότερο με την προστασία του περιβάλλοντος καθώς κινείται με ρεύμα και δεν ρυπαίνει άμεσα τον αστικό αέρα

(Jogi, 2018)

Μειονεκτήματα

Δύο ενδεικτικά μειονεκτήματα της χρήσης αυτού του μέσου μεταφοράς, είναι τα εξής:

- Η έλλειψη ρυθμιστικού πλαισίου λειτουργίας για αυτό το μέσο, σε συνδυασμό με τις αντιδράσεις των τοπικών αρχών. Το συγκεκριμένο πρόβλημα προκύπτει από το γεγονός ότι πρώτα εδραιώνονται σε μια νέα αγορά οι εταιρείες, και εν συνεχεία προσπαθούν να επιλύσουν τα νομικά προβλήματα που προκύπτουν.

- Η αμφισβήτηση για την «οικολογικότητα» του μέσου, καθώς οι μπαταρίες λιθίου πρέπει να αντικαθίστανται περίπου 300-1000 φορτίσεις μετά την πρώτη χρήση, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η ίδια η διαδικασία φόρτισης γίνεται με συμβατικά μέσα.

(Jogi, 2018)

Επικινδυνότητα – περιπτώσεις στην Ελλάδα

Όσον αφορά τους κινδύνους, ένα ατύχημα μπορεί να προκληθεί από όχημα που χτυπά το πατίνι, από πατίνι που χτυπά έναν πεζό, από κακό οδόστρωμα του οποίου η επιρροή στο μικρού μεγέθους και βάρους πατίνι θα είναι αρκετά μεγάλη, ή από τεχνικό πρόβλημα του πατινιού. Στην περίπτωση ατυχήματος, η ευθύνη αποδίδεται στον οδηγό, δηλαδή στο άτομο που προκάλεσε το ατύχημα. Επιπρόσθετα, δεν απαιτείται ασφάλεια αστικής ευθύνης, ούτε δίπλωμα οδήγησης, για να χρησιμοποιηθεί ένα πατίνι. Τα ατυχήματα στα οποία έχουν εμπλακεί πατίνια έχουν κατά καιρούς προκαλέσει από ελαφρύ τραυματισμό ως και θάνατο. (Dobush, 2018)

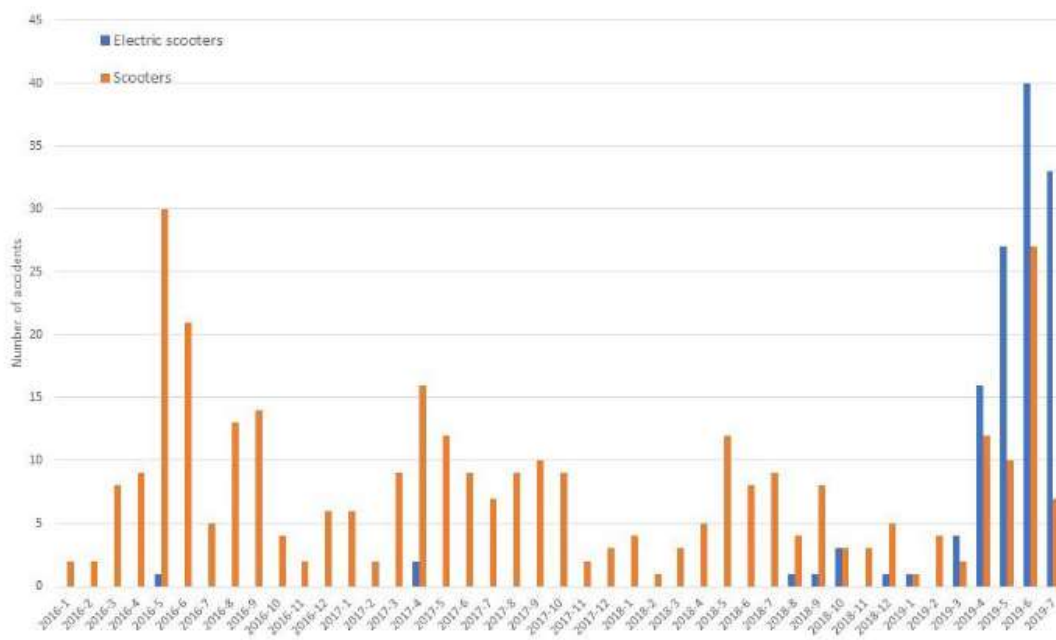
Η επικινδυνότητα της χρήσης των ηλεκτρικών πατινιών είναι το ζήτημα που απασχολεί αρκετούς ερευνητές, καθώς ο σκοπός για τον οποίο εισήχθησαν στους αστικούς ιστούς έχει θετικό περιβαλλοντικό πρόσημο, ωστόσο προβληματίζει η δυσκολία ένταξης τους στα δίκτυα των πόλεων χωρίς δυσκολίες. Η πρόσβαση σε αυτά είναι ελεύθερη με μόνο περιορισμό την ηλικία του χρήστη (άνω των 12 ετών) και την ύπαρξη τραπεζικού λογαριασμού. Επιπρόσθετα, η χρήση τους γίνεται χωρίς έλεγχο από τις εταιρείες, κι ενώ έχουν σκοπό να εξυπηρετήσουν περιοχές του κέντρου των πόλεων, πολύ συχνά βρίσκονται πολύ μακριά από αυτό μετά την χρήση τους, ενώ είναι πολύ σύνηθες φαινόμενο η μη χρήση κράνους, καθώς δεν υπάρχει κατάλληλη μέριμνα από τους φορείς ενοικίασης. Οι εν λόγω φορείς-εταιρείες αποποιούνται κάθε ευθύνη, καθώς έχουν εκδώσει γενικές οδηγίες, και άρα οι ευθύνες βαραίνουν τον ενοικιαστή-χρήστη. Στις χώρες της Ε.Ε. χωρίς ειδικό θεσμικό πλαίσιο, τα πατίνια προτείνεται να εντάσσονται στα μοτοποδήλατα έως 5 κυβικών, αλλά μέχρι στιγμής κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει.

Στις μεγάλες ελληνικές πόλεις, και πιο συγκεκριμένα σε Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Ηράκλειο, λήφθηκαν αποφάσεις που σκοπό είχαν τον περιορισμό του μέσου. Τον Σεπτέμβριο του 2019 απομακρύνθηκαν εντελώς από το Ηράκλειο, και η εταιρεία Lime που δραστηριοποιούνταν στην πόλη, ανέστειλε την λειτουργία των στόλων της. (Σκιάνης, 2019). Στην Αθήνα, προτάθηκε από τις δημοτικές αρχές, και ακολουθήθηκε από την εταιρεία Lime, η μείωση του ορίου ταχύτητας τους από τα 25 χιλιόμετρα/ώρα σε 20 χιλιόμετρα/ώρα, για λόγους ασφαλείας. Η παραπάνω ενέργεια συνοδεύτηκε και από δέσμευση των εταιρειών για παροχή δωρεάν κράνους στους αναβάτες. ('Ηλεκτρικά πατίνια: Αλλαγές στην Αθήνα-μείωση ταχύτητας και δωρεάν κράνη', TyposThes, 2019)

Μελέτες για τραυματισμούς από την χρήση ηλεκτροκίνητων πατινιών

Μετά την ταχύτατη εισροή του νέου αυτού μέσου στις ευρωπαϊκές πόλεις, και με δεδομένες τις ελλείψεις σε ό,τι αφορά το πλαίσιο ένταξης τους σε αυτές, δημιουργήθηκε η ανάγκη να ερευνηθούν στατιστικά στοιχεία σχετικά με τους τραυματισμούς που έχουν προκύψει από τα ηλεκτροκίνητα πατίνια. Πρόκειται για έναν τομέα στον οποίο η εξέλιξη είναι ραγδαία, καθώς η αύξηση του αριθμού των οχημάτων αυτών στην αστική κυκλοφορία, έχει, όπως δείχνουν τα στοιχεία, οδηγήσει και σε αύξηση των ατυχημάτων.

Το 2019 μελετήθηκαν, από τους Bloomberg et al, στοιχεία από την Κοπεγχάγη της Δανίας, όπου για την ακρίβεια μελετήθηκαν συγκεκριμένα 468 ιατρικές αναφορές από άτομα που οδηγούσαν πατίνι, είτε ηλεκτροκίνητο είτε χειροκίνητο, και υπέστησαν τραυματισμό, στο διάστημα από τον Ιανουάριο του 2016 ως τον Ιούλιο του 2019.

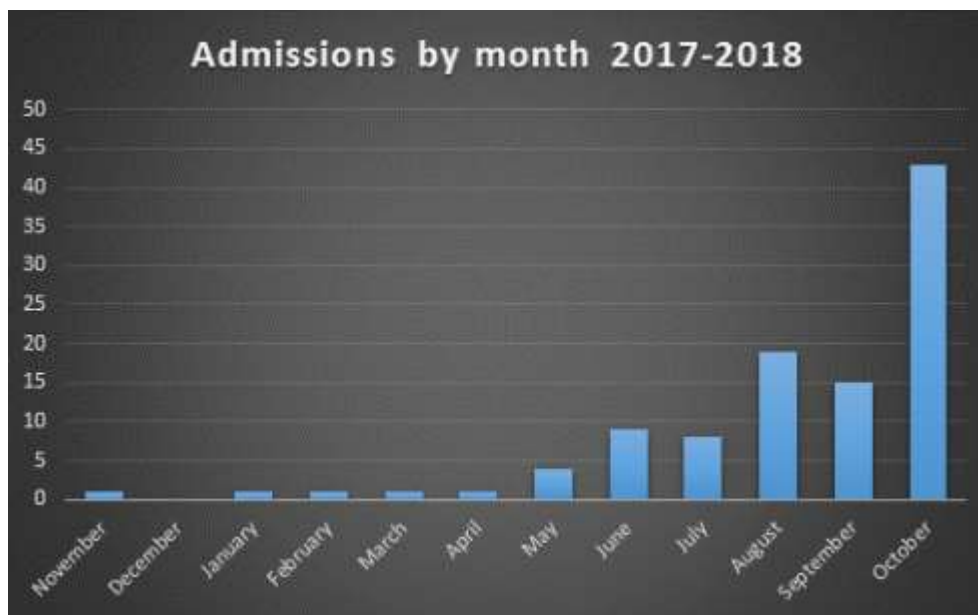


Εικόνα 2.12: Διάγραμμα από την μελέτη των Blomberg κ.α. που αφορά τα ατυχήματα με κέντρο κάποιου είδους πατίνι

Όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει, και με δεδομένο ότι στην Δανία τα ηλεκτροκίνητα πατίνια από εταιρείες κοινοχρησίας έκαναν την εμφάνιση τους στις αρχές του 2019, η αύξηση του αριθμού των ατυχημάτων είναι από εκείνη τη στιγμή κι έπειτα ραγδαία. Η μέση ηλικία των χρηστών ηλεκτροκίνητου πατινιού που τραυματίστηκαν σε αυτό το διάστημα, σύμφωνα με τη μελέτη, είναι τα 27 έτη, ενώ η πλειοψηφία των ατυχημάτων συμβαίνει μεταξύ 15.00 και 23.00, με ένα επίσης σημαντικό 33,9% να συμβαίνει μεταξύ 23.00 και 07.00. Επιπλέον, φαίνεται ότι μόλις το 3,6% των τραυματισμένων χρηστών ηλεκτροκίνητου πατινιού φορούσε κράνος, και το 36,6% βρέθηκε να χρησιμοποιεί το πατίνι μετά από κατανάλωση αλκοόλ ή ναρκωτικών ουσιών. Σε ό,τι αφορά τον τύπο του τραυματισμού, ένα ποσοστό 26,8% βρέθηκε με μώλωπες, ένα 44,6% με σχίσσιμο ή πληγή, και ένα ποσοστό 20,5% με τραυματισμό στο κεφάλι.

Γενικότερα, ένα 38,4% του δείγματος είχε υποστεί τραυματισμό στο πρόσωπο. (Bloomberg et al, 2019)

Σε άλλη έρευνα που διεξήχθη με μελέτη περίπτωσης το San Diego της Καλιφόρνια (Kobayashi et al, 2019), με στοιχεία από το χρονικό διάστημα Σεπτέμβριος 2017 έως Οκτώβριος 2018, μελετήθηκαν τα στοιχεία από 103 άτομα που φέρονται να τραυματίστηκαν σε ατύχημα που περιλάμβανε ηλεκτροκίνητο πατίνι σε όλη τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Το στοιχείο αυτό συνδέεται με την αύξηση του αριθμού των πατινιών που πωλούνται καθώς και με την πλήρη δραστηριοποίηση χωρίς περιορισμούς των εταιριών κοινοχρησίας.



Εικόνα 2.13 : Δείγμα από την μελέτη των Kobayashi et al, που δείχνει την συνεχή αύξηση των περιπτώσεων τραυματισμών κατά τους τελευταίους μήνες του 2018

Από την επεξεργασία των στοιχείων, προέκυψε ότι από τον Μάιο του 2018 έως τον Οκτώβριο της ίδιας χρονιάς παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση του αριθμού των τραυματιών. Ο μέσος όρος ηλικίας των εμπλεκόμενων ήταν τα 37,1 έτη, ενώ σημαντικά στοιχεία αποτελούν η μη χρήση κράνους (μόλις 2% φορούσε, σύμφωνα με την έρευνα) και η κατανάλωση αλκοόλ, σε ποσοστό 48%. Ένα ενθαρρυντικό στοιχείο είναι ότι με βάση την ποσοτική κλίμακα IQR, η μέση σοβαρότητα των τραυματισμών δεν ξεπερνούσε το 5,5, σε μία κλίμακα με τιμές στο εύρος [5,9], με κάτω άκρο τις ελαφριές και άνω άκρο τις βαριές περιπτώσεις. (Kobayashi et al, 2019)

Σε συνάφεια με τα παραπάνω, η μελέτη και στατιστική ανάλυση δεδομένων των Namiri et al, η οποία διεξήχθη το 2020, κατέδειξε σημαντικά αυξητικές τάσεις στους τραυματισμούς και εισαγωγές σε νοσοκομεία στο διάστημα 2014-2018, σε ανθρώπους ηλικίας 18-34 ετών, με πολύ μεγάλη αύξηση (της τάξης του 354%) συγκεκριμένα, των εισαγωγών σε νοσοκομεία. Αξιοσημείωτο στατιστικό της μελέτης είναι ότι το ποσοστό της τάξης του 33% των τραυματισμένων υπέστη χτύπημα στο κεφάλι. Μάλιστα, συγκρίνοντας την παραπάνω μελέτη με αντίστοιχη μελέτη (Sanford et al, 2015) που εξετάζει την στατιστική των τραυματισμών που προέρχεται από χρήση ποδηλάτου, το

ποσοστό των τραυματών στο κεφάλι είναι διπλάσιο στην περίπτωση των ηλεκτροκίνητων πατινιών.

2.3.6: ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΩΝ ΠΑΤΙΝΙΩΝ

Σε ό,τι αφορά την κίνηση των ηλεκτροκίνητων πατινιών, η διεθνής βιβλιογραφία δεν αναφέρει με συγκεκριμένο τρόπο τους περιορισμούς που πρέπει ή που μπορούν να τεθούν στην κίνηση τους. Ωστόσο, πολλά άρθρα και μελέτες, καταδεικνύουν ότι είτε για λόγους ασφαλείας είτε για λόγους μη οικονομικής οδήγησης, είτε για συνδυασμό των παραπάνω λόγων, υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες τα ηλεκτροκίνητα πατινία καλό θα είναι να περιοριστούν.

Λειτουργική Ιεράρχηση αστικού οδικού δικτύου

Πρόκειται για την κατάταξη των οδών σε κατηγορίες, ανάλογα με τον βαθμό της βασικής λειτουργίας που επιτελούν, είτε είναι κινητικότητα είτε πρόσβαση.

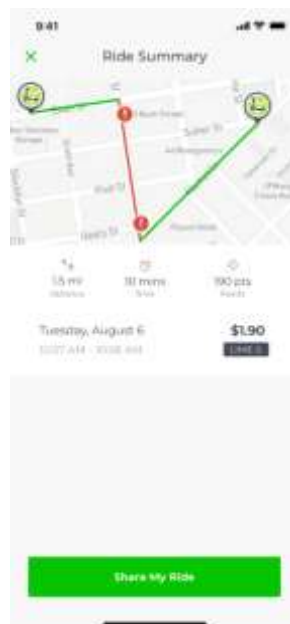
- «Ελεύθερη λεωφόρος». Πρόκειται για τις κύριες αρτηρίες με μη διακοπτόμενη ροή, δηλαδή για οδούς στις οποίες υπάρχει πλήρης έλεγχος των προσβάσεων μέσω ανισόπεδων κόμβων/διαβάσεων σε όλους τους κόμβους, και με χρήση παράπλευρων οδών για την εξυπηρέτηση της τοπικής κυκλοφορίας. Η συγκεκριμένη λειτουργική κατηγορία προορίζεται για την εξυπηρέτηση μετακινήσεων μεγάλου μήκους με υψηλή ταχύτητα (π.χ. Αττική Οδός).
- «Κύρια αρτηρία». Πρόκειται για αρτηρίες με μερικό έλεγχο των προσβάσεων με χρήση ανισόπεδων και σηματοδοτούμενων κόμβων. Επιπλέον χαρακτηρίζεται από περιορισμένη απευθείας πρόσβαση από τις κατώτερες ιεραρχικά οδούς του δικτύου, ώστε να εξασφαλίζεται η δυνατότητα εξυπηρέτησης διαμπερών μετακινήσεων με σχετικά υψηλή ταχύτητα.
- «Δευτερεύουσα αρτηρία». Οι αρτηρίες αυτές εξυπηρετούν μετακινήσεις μικρότερου μήκους και με μικρότερη ταχύτητα σε σύγκριση με μία κύρια αρτηρία.
- «Συλλεκτήρια οδός». Πρόκειται για τις οδούς που κατανέμουν και μεταφέρουν την κυκλοφορία από τις αρτηρίες στο δίκτυο των τοπικών οδών και αντίστροφα. Διακρίνονται σε κύριες και δευτερεύουσες.
- «Τοπική οδός». Εξυπηρετούν την άμεση πρόσβαση από και προς το υπόλοιπο οδικό δίκτυο, προς και από, αντίστοιχα, τις παρόδιες χρήσεις γης. Επιδιώκονται χαμηλές ταχύτητες μέσω των χαρακτηριστικών τους (πλάτος οδοστρώματος, κατά πλάτος δομή, έλλειψη προτεραιότητας σε σχέση με όλες τις προαναφερθείσες κατηγορίες οδών).

(Γαβανάς et al, 2015)

την ανεκτικότητα των πεζοδρόμων έναντι οχημάτων όπως το ηλεκτροκίνητο πατίνι, κι αυτό συμβαίνει επειδή το ίδιο το πατίνι δεν συμπεριλαμβάνεται σε συγκεκριμένη κατηγορία οχημάτων του Κ.Ο.Κ. Ωστόσο, σε πιλοτικό και ερευνητικό τουλάχιστον επίπεδο, έχουν ληφθεί κάποιες πρωτοβουλίες.

Τον Οκτώβριο του 2016, στην Στουτγάρδη και στο Έσλιγκεν της Γερμανίας, εκ μέρους της εταιρείας TrottiElec, η οποία δραστηριοποιείται στον χώρο των ηλεκτροκίνητων πατινιών, πραγματοποιήθηκε πείραμα το οποίο κατέδειξε πως για το συγκεκριμένο μέσο, το να θεσπιστεί ένα όριο ταχύτητας 6 χλμ/ώρα είναι μια καλή πρακτική για μείωση των υπαρχόντων προβλημάτων στους πεζοδρόμους με μεγάλη κίνηση και συγκέντρωση πεζών. Με τη χρήση αυτού του ορίου δεν υπάρχει πλέον μεγάλη διαφορά ταχύτητας με τους υπόλοιπους χρήστες της οδού, δηλαδή τους πεζούς, ακόμα κι εκείνους που περπατούν αρκετά αργά. Η έρευνα αυτή επίσης κατέδειξε ότι κάτι τέτοιο μπορεί να συμβάλλει στην αποφυγή ατυχημάτων, αλλά και στην μη δυσαρέσκεια των πεζών για τα πατίνια, άρα και στην μελλοντική επιθυμία χρήσης τους, παράμετρος σημαντική για ένα μέσο που ακόμα αναπτύσσει το κοινό του. Σε πεζοδρόμους που δεν έχουν μεγάλη κίνηση πεζών, τα πατίνια μπορούν να κινούνται στην λεγόμενη “jogging speed”. Στο συγκεκριμένο πείραμα αναπτύχθηκε το λογισμικό αναπτύχθηκε το ASL-Assistant, το οποίο εντοπίζει εάν ο πεζοδρόμος είναι ελεύθερος εμποδίων ή όχι. (Kastenbauer et al, 2017)

Στις αρχές του 2020, η εταιρεία Lime ξεκίνησε την λειτουργία ενός πιλοτικού προγράμματος στο Σαν Χοσέ της Καλιφόρνια, παρακολουθώντας και κρατώντας δεδομένα από τις ακριβείς πορείες ενός αριθμού χρηστών, και πιο συγκεκριμένα έλαβε τα επιθυμητά αποτελέσματα ελέγχοντας τα επιταχυνσιόμετρα και τα δεδομένα ταχύτητας των πατινιών. Μέσω αυτών, και με τη βοήθεια Τεχνητής Νοημοσύνης, ισχυρίζεται ότι με ποσοστό επιτυχίας 95%, μπορεί η εταιρεία να είναι σίγουρη για το αν ο χρήστης έχει χρησιμοποιήσει το οδόστρωμα ή το πεζοδρόμιο για την κίνηση του, και εάν ο χρήστης έχει κατά ποσοστό πάνω από 50 τοις εκατό κινηθεί στο πεζοδρόμιο, θα ειδοποιηθεί σχετικά την επόμενη φορά που θα χρησιμοποιήσει την εφαρμογή. (Lime Tech, 2020)



Εικόνα 2.15 : η εικόνα που θα εμφανίζεται στον χρήστη που κινείται σε ποσοστό πάνω από 50% της βόλτας του στο πεζοδρόμιο

Ικανότητα και συνέπειες της κίνησης ηλεκτροκίνητων πατινιών σε ανωφέρειες/κατωφέρειες

Ένα ηλεκτρικό σκούτερ γενικά έχει την κατασκευαστική δυνατότητα να κινηθεί σε οδούς με μεγάλη κλίση, ωστόσο οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι το μέγεθος της κλίσης, το βάρος του οδηγού, την μηχανή και επομένως την ενέργεια που μπορεί να αποδώσει ένα πατίνι, καθώς και από τις διαστάσεις του κορμού του. Ωστόσο, η πλειοψηφία των ηλεκτρικών πατινιών δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν με επιτυχία στις πολύ απότομες κλίσεις, καθώς έχουν κατασκευαστεί με το σκεπτικό κίνησης σε αστικούς ιστούς, όπου κατά κανόνα οι κλίσεις δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες.

Ο μέσος χρήστης ηλεκτροκίνητου πατινιού, ειδικότερα εάν στο παρελθόν έχει χρησιμοποιήσει ποδήλατο, μπορεί να αναγνωρίσει τα προβλήματα που προκύπτουν στις ανωφέρειες, όπου συχνά κανείς όταν συναντά μεγάλη κλίση, και η φυσική του κατάσταση δεν είναι η καλύτερη δυνατή, κατεβαίνει από το ποδήλατο και το ανεβάζει με ταχύτητα βαδίσματος ως το τέλος της μεγάλης ανωφέρειας. Η δυνατότητα αυτή υπάρχει και στα ηλεκτροκίνητα σκούτερ, τα οποία ωστόσο, αν το μήκος της ανωφέρειας δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο, θα καταφέρουν να ανεβάσουν τον χρήστη στην κορυφή, αλλά θα έχουν επηρεαστεί οι επιδόσεις τους, καθώς αφενός θα κινηθούν πιο αργά, και αφετέρου, δεν θα είναι πλέον αξιόπιστες οι πληροφορίες που αφορούν την μπαταρία τους και την απόσταση που μπορούν να διανύσουν μέχρι την αποφόρτιση τους, η οποία θα είναι μειωμένη σε σχέση με τις ενδείξεις. Αυτό διότι οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βάση μικρότερης κλίσης από την υπό συζήτηση υποθετική μεγάλη ανωφέρεια.

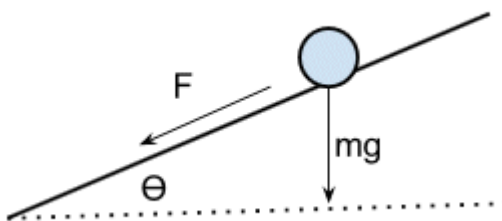
Χαρακτηριστικά που θα πρέπει να διακρίνουν τα ηλεκτροκίνητα πατίνια για μεγάλες ανωφέρειες είναι:

- κλίση οδού: Για ορισμένα πατίνια, μία κλίση της τάξης των 20° θεωρείται απαγορευτική, ενώ άλλα μπορούν να ανέβουν με ευκολία τέτοιες οδούς. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από την μηχανή και συνεπώς την δύναμη κάθε οχήματος. Όσο υψηλότερη η κλίση, τόσο εκθετικά μεγαλύτερη είναι η δύναμη που χρειάζεται. Ένα εμπειρικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως τα οχήματα με ισχύ μικρότερη των 500 Watt έχουν μικρή ικανότητα ανάβασης, ενώ χρειάζεται ισχύς ίση ή μεγαλύτερη των 1000 Watt για να θεωρείται ένα πατίνι ικανό για ανάβαση σχεδόν κάθε ανωφέρειας.
- βάρος αναβάτη: Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το βάρος του αναβάτη τόσο μεγαλύτερη η δύναμη που πρέπει να χρησιμοποιήσει το ηλεκτροκίνητο όχημα για να τον οδηγήσει στον προορισμό του. όσο μεγαλύτερο το βάρος του αναβάτη τόσο μεγαλύτερη η ενδεχόμενη δυσκολία ανάβασης.
- Μπαταρία και μηχανή: η πλειοψηφία των ηλεκτροκίνητων σκούτερ χρησιμοποιούν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου, οι οποίες είναι η βέλτιστη ως τώρα επιλογή από πλευράς μέγιστης χωρητικότητας, μέγιστης διάρκειας ζωής και ελάχιστου χρόνου φόρτισης σε σύγκριση με τα υποκατάστατα αυτών.

- Ελαστικά: η ύπαρξη μικρών σε ακτίνα ελαστικών (και τροχών) καταπονεί ιδιαίτερα τα ίδια τα ελαστικά και κάνει δυσκολότερη την ανάβαση. Τα κλασσικά πατίνια που παρατηρούνται έχουν μικρά ελαστικά, σχεδιασμένα για κίνηση στην πόλη, συνήθως 8.5", ενώ για ικανοποιητική διαχείριση των ανωφερειών χρειάζονται ελαστικά μεγαλύτερα των 11". Το μέγεθος, με όρους διαμέτρου, των ελαστικών, παίζει επιπλέον ρόλο και στην μείωση των τρανταγμάτων, και άρα στην καλύτερη ισορροπία και ασφάλεια του οχήματος.
- Ανάρτηση: κυρίως επηρεάζει την άνεση στην οδήγηση, και κάνει τον αναβάτη να αισθάνεται λιγότερο την όποια «δυσκολία» του οχήματος να ανέβει μία πλαγιά. Η ύπαρξη ή όχι ανάρτησης δεν βοηθά από πλευράς φυσικής και μηχανικής το όχημα.

(‘Can Electric Scooters go uphill?’, Poljak)

Όλα τα παραπάνω μπορούν να εξηγηθούν με βάση την μηχανική. Έστω ένα ηλεκτροκίνητο πατίνι, μάζας m , σε ανωφέρεια γωνίας θ . Η συνιστώσα του βάρους του επί του κεκλιμένου επιπέδου δίνεται από τον τύπο $F = mg * \sin\theta$. Έστω επιπλέον ότι οι τροχοί του οχήματος έχουν ακτίνα r , τότε η ροπή που σχηματίζεται είναι $\tau = r * mg * \sin\theta$, κάτι που σημαίνει ότι όταν αυτή η ροπή εξισωθεί με την ροπή που δημιουργεί η μηχανή του ίδιου του πατινιού, εκείνο θα σταματήσει. Από τα παραπάνω, μπορεί κανείς να εξάγει το συμπέρασμα ότι η ικανότητα ενός οχήματος να ανέλθει μια οδό με συγκεκριμένη κλίση θ , εξαρτάται από το βάρος του, το οποίο μπορεί να αναλυθεί σε (βάρος οχήματος + βάρος αναβάτη), και άρα με δεδομένο και σταθερό το βάρος του οχήματος, εξαρτάται από το βάρος του αναβάτη. Επιπλέον εξαρτάται από την ακτίνα των τροχών του οχήματος, καθώς μεγαλύτεροι τροχοί δίνουν μεγαλύτερη ροπή.



Εικόνα 2.16 : σχηματική αναπαράσταση της κίνησης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο γωνίας θ με το οριζόντιο επίπεδο.

Με το όχημα να κινείται διαρκώς σε οδούς με μεγάλες κλίσεις, και με δεδομένη φόρτιση μπαταρίας, οι χιλιομετρικές αποστάσεις που θα μπορεί να διανύσει ένα πατίνι θα είναι αισθητά μικρότερες από αυτές που θα διένυε αν οι κλίσεις ήταν μηδαμινές ή μικρές. Τα ποσοστά μείωσης του χιλιομετρικού εύρους κίνησης κυμαίνονται από 20% έως, σε ακραίες περιπτώσεις, και 50%. Επιπροσθέτως, η κίνηση επί πολλή ώρα σε εκτεταμένες ανωφέρειες μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στο να σπάσουν οι τροχοί, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται τόσο στους τροχούς, όσο και στην διεπιφάνεια τροχού και αμαξώματος, έχει αρνητικές επιπτώσεις στην λειτουργία της

μηχανής, και άρα θέτει σε κίνδυνο την λειτουργία του ίδιου του οχήματος. ('Do Electric scooters Go Uphill?', eScooter Rider)

Κανονιστικό πλαίσιο – περιορισμοί - εισηγήσεις για περιορισμούς στην Ελλάδα

Τον Απρίλιο του 2019 πραγματοποιήθηκε στην Ελλάδα η πρώτη προσπάθεια προσέγγισης ενός κανονιστικού πλαισίου για τα πατίνια, προκειμένου να περιοριστούν τα ατυχήματα και οι τραυματισμοί πολιτών από αυτά, αλλά και προκειμένου να περιλαμβάνονται σε ένα νομικό πλαίσιο ως μέσα μεταφοράς με συγκεκριμένα στοιχεία και προδιαγραφές. Πιο αναλυτικά, ομάδα εργασίας του Υπουργείου Μεταφορών απηύθυνε ορισμένες προτάσεις σε μία (νεοσυσταθείσα) επιτροπή, υπεύθυνη για την διαμόρφωση του πλαισίου λειτουργίας των ηλεκτροκίνητων πατινιών. (Ντελέζος, 2019)

Ως ΕΠΗΟ (Ελαφριά Προσωπικά Ηλεκτρικά Οχήματα), τα ηλεκτροκίνητα πατίνια εντάσσονται στην ίδια κατηγορία με τα τροχοπέδιλα, τις τροχοσανίδες και άλλα μονόκυκλα ή δίκυκλα οχήματα διπλής τροχιάς. Σε όλα τα οχήματα αυτά, θεσπίζεται η υποχρεωτική χρήση κράνους, η απαραίτητη ελάχιστη προϋπόθεση ηλικίας του οδηγού να τίθεται στα 15 έτη (ή 12 έτη, αν συνοδεύεται από κηδεμόνα), καθώς η ατομική χρήση των οχημάτων αυτών. Τα ΕΠΗΟ ταξινομούνται ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης, με την πρώτη κατηγορία να περιλαμβάνει εκείνα των οποίων η ταχύτητα δεν ξεπερνά τα 6 km/h, την δεύτερη, στην οποία εντάσσονται τα περισσότερα ηλεκτροκίνητα πατίνια και τα ποδήλατα, να περιλαμβάνει τα οχήματα εκείνα που φτάνουν ταχύτητες 6 έως 25 km/h, και την τρίτη να περιλαμβάνει vespa-like ηλεκτροκίνητα πατίνια, τα οποία ξεπερνούν τα 25 km/h. Στην περίπτωση των οχημάτων που κινούνται με ταχύτητες έως 6 km/h, αυτά θεωρούνται πεζοί και μπορούν να κινηθούν οπουδήποτε κινούνται εκείνοι, όπως πλατείες, πεζοδρόμους, όχι όμως στο υπόλοιπο δίκτυο, ενώ τα οχήματα που κινούνται στο εύρος 6 ως 25 km/h, θεωρούνται ποδήλατα, και οι περιορισμοί κίνησης τους τίθενται από το άρθρο 1 του νόμου 2696/99 (ΦΕΚ 57/Α') -Κύρωση του Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας. Σύμφωνα με τους υπάρχοντες περιορισμούς για τα ποδήλατα, η κίνηση τους επιτρέπεται σε ειδικά διαμορφωμένες διαδρομές καθώς και σε όλο το οδικό δίκτυο, πλην των οδών ταχείας κυκλοφορίας. (Ντελέζος, 2019)

Κανονιστικό πλαίσιο - περιορισμοί – εισηγήσεις για περιορισμούς κίνησης σε χώρες του εξωτερικού

Στην συγκεκριμένη ενότητα γίνεται αναφορά στους κανονισμούς σε πολλές χώρες της Ευρώπης, και τους αντίστοιχους περιορισμούς που αφορούν κατά βάση την ταχύτητα κίνησης και τους χώρους χρήσης των πατινιών. Δεν επηρεάζουν την παρούσα μελέτη κανόνες όπως η χρήση κράνους, κόρνας, φρένων, ή η μη χρήση κινητού τηλεφώνου και ακουστικών, καθώς θεωρούνται δεδομένοι στα πλαίσια αυτής.

- Στο Βέλγιο και συγκεκριμένα στην πρωτεύουσα της χώρας, Βρυξέλλες, το ηλεκτρικό πατίνι εντάσσεται στο ίδιο καθεστώς με τα ποδήλατα και τους πεζούς, και αρχικά ο περιορισμός ταχύτητας που τέθηκε ήταν της τάξης των 18

km/h, ενώ αργότερα το όριο αυτό αυξήθηκε στα 25km/h, αλλά ταυτόχρονα θεσπίστηκε η συμμόρφωση του μέσου με τις αρχές των πεζών, ήτοι προσαρμογή στην ταχύτητα βαδίσματος, χρήση διαβάσεων και χρήση σηματοδοτών (για πεζούς). Εφόσον το πατίνι ξεπερνά την ταχύτητα των 25 km/h, θεωρείται ποδήλατο και θα πρέπει να κινείται στην κοντινότερη προς το πεζοδρόμιο λωρίδα της οδού, να χρησιμοποιεί ποδηλατοδρόμους και ποδηλατολωρίδες όπου αυτά υπάρχουν, και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις το πεζοδρόμιο. Επιπλέον, δεν τίθεται στην κίνηση του απαγόρευση ως προς την χρήση μονόδρομων, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον χρήστη του πατινιού προς όποια κατεύθυνση επιθυμεί. (<https://mobilite-mobiliteit.brussels/en/electric-scooters-in-brussels>)

- Στο Παρίσι της Γαλλίας, και έπειτα από αναφορά σε 284 τραυματισμούς και 5 θανάτους με ευθύνη οδηγών πατινιών σε ένα μόλις έτος (2017), κρίθηκε απαραίτητη η λήψη περιοριστικών μέτρων, και η χρήση προστίμων σε όσους διέρχονταν με το ηλεκτροκίνητο πατίνι στα πεζοδρόμια και σε δημόσιους χώρους, ή σε όσους στάθμευαν το όχημα σε σημεία δυνητικά ενοχλητικά για παρόδιους ιδιοκτήτες ή για τους πεζούς. (<https://m.lifo.gr/now/greece/231836/gkalop-ti-na-ginei-me-ta-patinia-tis-athinas-ti-isxyei-stin-eygori-kai-roioi-lene-oristikoxi>). Μάλιστα, στην πρωτεύουσα της Γαλλίας, πρόκειται να δημιουργηθούν εκατοντάδες χώροι στάθμευσης ειδικά για πατίνια, καταργώντας ωστόσο έτσι την dock-less λογική του μέσου, που αποτελεί πλεονέκτημα του. Σε ό,τι αφορά τα όρια ταχύτητας, θεσπίζεται το ανώτατο όριο των 20 km/h οπουδήποτε εντός του οδικού δικτύου, και 8 km/h σε πολυσύχναστους δημόσιους χώρους (πεζοδρόμους, πλατείες). (Scavuzzo, 2019)
- Στην Γερμανία, αποφασίστηκε τα ηλεκτροκίνητα πατίνια να μην επιτρέπονται στα πεζοδρόμια εκτός των ποδηλατοδρόμων, να κινούνται με ταχύτητα το πολύ στα 20 km/h. (Χάλλας, 2019)
- Στην Ισπανία, ο δήμος της πρωτεύουσας Μαδρίτης έχει ορίσει συγκεκριμένες περιοχές για την κίνηση των ηλεκτροκίνητων πατινιών, και επιπλέον απαγορεύει την κίνηση του μέσου σε πεζοδρόμια, λεωφορειολωρίδες και αρτηρίες ταχείας κυκλοφορίας, ενώ στο υπόλοιπο οδικό δίκτυο και στους ποδηλατόδρομους η κίνηση επιτρέπεται κανονικά, με όριο ταχύτητας τα 30 km/h. (Saiz, 2019)
- Στην Ιταλία, όπου στις πόλεις Μιλάνο, Τορίνο και Ρίμινι η χρήση των πατινιών κατά το έτος 2019 ήταν ιδιαίτερα αυξημένη, το Υπουργείο Μεταφορών εξέδωσε πλαίσιο σύμφωνα με το οποίο στις οδικές αρτηρίες το όριο κυκλοφορίας τους τίθεται στα 30 km/h, στους ποδηλατοδρόμους στα 20 km/h και στους δημόσιους χώρους σε 6 km/h, ήτοι ταχύτητα βαδίσματος. Εκτός αυτών, κάθε πόλη έχει υποχρέωση να ορίσει σε ποιες ευρύτερες περιοχές της θα επιτρέψει την κίνηση του μέσου. (Scavuzzo, 2019)
- Στην Ολλανδία, μέχρι τα τέλη του 2019, δεν γινόταν χρήση πατινιών στο οδόστρωμα ούτε σε δημόσιους χώρους όπως πλατείες και πεζοδρόμους. Τα ηλεκτροκίνητα πατίνια, εξαιτίας του μεγάλου φόρτου στους ποδηλατοδρόμους των ολλανδικών πόλεων, δεν επιτρέπεται να κινούνται σε αυτούς αν δεν διαθέτουν διπλό σύστημα τροχοπέδησης (δεν το διαθέτουν τα κοινόχρηστα

πατίνια). Επί της ουσίας, χρήση του μέσου δεν γίνεται πουθενά, αφού επιτρέπεται μόνο στο οδόστρωμα, και εκεί τα πατίνια δεν προτιμώνται από τους Ολλανδούς, οι οποίοι έχουν συνηθίσει, αν δεν χρησιμοποιούν αυτοκίνητο, να επιλέγουν ως εναλλακτική πρωτίστως το ποδήλατο (μηχανικό ή ηλεκτροκίνητο). (Scavuzzo, 2019)

2.4: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η βιβλιογραφία που αφορά γενικά τα θέματα σχεδιασμού δικτύων, είναι αρκετά πυκνή, και περιλαμβάνει πολλές και διαφορετικές μελέτες για εύρεση μονοπατιών σε δίκτυα καθώς και για εύρεση κατάλληλων διαδρομών για συγκεκριμένους σκοπούς. Ταυτόχρονα, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι που αφορούν τα δίκτυα με «περιορισμένους» συνδέσμους ή με μη χρησιμοποιούμενους συνδέσμους. Για τα ηλεκτροκίνητα πατίνια, σε πιο συγκεκριμένο επίπεδο, έχουν διεξαχθεί περιορισμένες έρευνες τεχνικής φύσης, οι οποίες αφορούν την χωροθέτηση σταθμών για πατίνια, ή την επανεξισορρόπηση (rebalancing) ενός δικτύου με στόλους πατινιών. Για το εξεταζόμενο ζήτημα της δημιουργίας συστημάτων απόφασης σε προβλήματα σχεδιασμού δικτύων ηλεκτροκίνητων πατινιών, η βιβλιογραφία είναι μηδαμινή. Χρήσιμες, ωστόσο, μπορούν να θεωρηθούν για το θέμα μελέτης και ερευνητικές προσπάθειες που αφορούν την εύρεση κατάλληλων σημείων προς τοποθέτηση γεωγραφικών περιφράξεων σε συστήματα bike-sharing, εφόσον μπορεί να θεωρηθεί ότι τα ποδήλατα παρουσιάζουν κάποιες ομοιότητες με τα ηλεκτροκίνητα πατίνια, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά την κίνηση τους σε δίκτυα. Γενικότερα, η βιβλιογραφία γύρω από το ευρύτερο θέμα, είναι πρόσφατη και διαρκώς εξελισσόμενη.

Οι Drezner και Wesolowsky (2002) μελετούν τον σχεδιασμό ενός οδικού δικτύου με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, αναζητώντας πιο συγκεκριμένα τον βέλτιστο, για τα κριτήρια που θέτουν, σύνδεσμο, μέσα από ένα σύνολο συνδέσμων. Ο σύνδεσμος αυτός θα πρέπει, σύμφωνα με τον αλγόριθμο τους, να αριστοποιεί την κυκλοφοριακή κατάσταση και να εξυπηρετεί την μεγαλύτερη δυνατή ζήτηση. Οι συναρτήσεις που λήφθηκαν υπόψη στη συγκεκριμένη έρευνα ήταν το κατασκευαστικό και το μεταφορικό κόστος. Το πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση μεθευρετικού αλγορίθμου.

Σε επίπεδο αλγορίθμων σε γράφους και εύρεσης συντομότερων διαδρομών σε μονοπάτια γενικότερα, οι Hsu et al (2009) ασχολούνται με το πρόβλημα εύρεσης συντομότερης διαδρομής σε δίκτυο με απαγορευμένα μονοπάτια, εν συντομία SPPFP (Shortest Path Problem with Forbidden Paths). Τα απαγορευμένα μονοπάτια δεν μπορούν να αποτελούν μέρος καμίας εφικτής λύσης. Προτείνουν έναν αλγόριθμο ο οποίος μειώνει σημαντικά τον χρόνο εκτέλεσης του SPPFP, βελτιώνοντας την όλη εκτέλεση, και χωρίς να επηρεάζει την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Νωρίτερα, οι Villeneuve και Desaulniers (2003) είχαν επιλύσει το πρόβλημα αυτό ως πρόβλημα εύρεσης των k-συντομότερων διαδρομών, με τη χρήση επιπλέον, εικονικών, συνδέσμων για ανάθεση των φόρτων.

Σημαντική είναι και η μελέτη των Zhang, et al (2018), οι οποίοι ανέπτυξαν ένα μοντέλο σχεδιασμού γεωγραφικών περιφράξεων, με στόχο την τοποθέτηση εκεί χώρων στάθμευσης κοινόχρηστων ποδηλάτων, με στοιχεία από την πόλη της Σανγκάης. Στο μοντέλο αυτό, με δεδομένο ένα οδικό δίκτυο και στοιχεία ζήτησης, και χωρίζοντας την αστική περιοχή σε ζώνες-κελιά, επιλέγονται υποψήφιας ζώνες προς περιφράξη, με

βάση την ζήτηση και τον διαθέσιμο χώρο, προσδιορίζονται εκτός των ακριβών θέσεων των χώρων στάθμευσης, οι χωρητικότητες τους. Η συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποίησε μία παραλλαγή του προβλήματος μεγιστοποίησης κάλυψης.

Η μελέτη του Wang (2007) αφορούσε την βέλτιστη χωροθέτηση σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτροκίνητων πατινιών σε ένα αστικό δίκτυο, και ήταν από τις πρώτες χρονικά σχετικές με το ζήτημα, ενώ οι Chen et al (2018), μοντελοποίησαν το σχετικό πρόβλημα χωροθέτησης ως δι-κριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης, με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης, αφενός, και την μεγιστοποίηση της κάλυψης της ζήτησης, αφετέρου.

Οι Zuniga-Garcia et al (2020), εκπόνησαν έρευνα σχετική με την χρήση των ηλεκτροκίνητων πατινιών στον αστικό ιστό, και συγκεκριμένα σε πεζοδρόμια, ποδηλατοδρόμους και ποδηλατολωρίδες, καθώς και στις οδικές αρτηρίες, και εξήγαγαν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Βασιζόμενοι σε τροχιακά δεδομένα από την πόλη Austin του Τέξας, και με μεθόδους στατιστικής ανάλυσης, συμπέραναν ότι από το 60% των πατινιών που κινήθηκαν σε προσδιορισμένου τύπου τμήματα (ένα 40% κινήθηκε σε απροσδιόριστου τύπου οδικά τμήματα), το 33% κινήθηκε στο οδόστρωμα, το 18% στα πεζοδρόμια, και το 11% σε ποδηλατολωρίδες και ποδηλατοδρόμους, ενώ το 60% των χρηστών οδοστρώματος χρησιμοποίησε κεντρικές οδικές αρτηρίες. Παρατηρήθηκε, επιπρόσθετα, ότι οι μέσες ταχύτητες στα πεζοδρόμια ήταν κατά περίπου 6-8% χαμηλότερες από εκείνες στους ποδηλατοδρόμους και στο οδόστρωμα.

Έρευνες που αφορούν την χρήση των ηλεκτροκίνητων πατινιών σε συνάρτηση με την χωρική κάλυψη, όπως εκείνη των Moran et al (2020), διαπιστώνουν ότι, σε κάποιες πόλεις, όπως στο San Francisco (CA) απαιτείται η κατάθεση σχεδίου γεωγραφικών περιφράξεων από τις υποψήφιες εταιρείες προς τις αρχές της πόλης, πριν την έναρξη λειτουργίας του στόλου οχημάτων. Η ίδια έρευνα καταδεικνύει ότι οι κανόνες και οι περιορισμοί που τίθενται στις πόλεις είναι ευμετάβλητοι, καθώς συχνά αλλάζουν σε διαστήματα μικρότερα των 3 μηνών. Άλλες μελέτες, όπως αυτή του Gossling (2020), αναφέρουν ότι οι περισσότερες πόλεις στις οποίες δραστηριοποιούνται κοινόχρηστοι στόλοι ηλεκτρικών πατινιών ακολουθούν πολιτικές ad-hoc χαρακτήρα, όπως πρόστιμα στους χρήστες ή οικονομικές κυρώσεις στις εταιρείες, όχι όμως κάποιο τεχνοκρατικού τύπου μοντέλο.

Σύμφωνα με τους Arellano και Fang (2019), μία ενδεικτική μέση ταχύτητα ενός πατινιού με μηχανή είναι αυτή των 9 mph, που μεταφράζεται σε 14,5 km/h, στις οδούς μεικτής χρήσης. Σε οδούς κυκλοφορίας οχημάτων, έχουν παρατηρηθεί υψηλότερες ταχύτητες, της τάξης των 11 mph, ή αλλιώς 17,5 km/h. Η πολυσχιδής μελέτη τους, οδήγησε σε συγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές και προτάσεις για το μέλλον. Πρόκειται για την παραχώρηση προτεραιότητας σε πεζούς από τον χρήστη του πατινιού, την οδήγηση με αντίληψη του μικρού μεγέθους και του ευάλωτου του πατινιού, και τη χρήση ποδηλατοδρόμων, αν αυτοί υπάρχουν, προκειμένου να μην εμπλέκεται το πατίνι με οχήματα ταχυτήτων πολλαπλάσιων από αυτό, όπως τα οχήματα, αλλά με οχήματα με τα οποία έχει πιο συγκρίσιμη ταχύτητα. Προτείνεται επιπλέον, από την εν λόγω μελέτη, η μείωση της ταχύτητας τους σε αυτή του βαδίσματος, όταν πλησιάζουν σε κόμβους με διάβαση, ή όταν διασχίζουν πεζοδρόμους, προσαρμοζόμενοι σε αυτή των πεζών.

Μεγάλος, τέλος, χαρακτηρίζεται γενικά ο αριθμός των ατυχημάτων που σχετίζονται με ηλεκτροκίνητα πατίνια σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι Yang et al (2020), χρησιμοποιώντας μεθόδους επιχειρηματικής αναλυτικής σε δεδομένα ειδησεογραφικών πρακτορείων και ιστοσελίδων, διαπίστωσαν ότι σύνηθες φαινόμενο είναι η εμπλοκή πατινιών με δικυκλιστές, πεζούς ή και οχήματα, σε λωρίδες μεικτής κυκλοφορίας, επομένως στο βασικό οδικό δίκτυο, εάν δεν υπάρχει απαγόρευση κίνησης του πατινιού εκεί. Επιπλέον προβλήματα δημιουργεί η μη ύπαρξη νομικού πλαισίου για το μέσο αυτό, όπως αναφέρει ο Gossling (2020). Η ίδια έρευνα αναφέρει ότι έχουν υιοθετηθεί τεχνικές γεωγραφικής περίφραξης από τις αρμόδιες εταιρείες κοινοχρησίας, μεταβάλλοντας τα όρια ταχύτητας του μέσου, ανάλογα με την κατηγορία οδού στην οποία πρόκειται να κινηθεί, για παράδειγμα μειωμένες ταχύτητες όταν ο χρήστης εισέρχεται σε πεζοδρομημένες ζώνες.

Μέσα, επομένως, από τα παραπάνω ερευνητικά δεδομένα, καταδεικνύεται ότι υπάρχει η ανάγκη σχεδιασμού ενός δικτύου στο οποίο θα πρέπει να περιορίζεται η χρήση των κεντρικών οδικών αρτηριών, η οποία μέχρι στιγμής, με την μη ύπαρξη περιφράξεων στο δίκτυο, δεν αποφεύγεται, και ταυτόχρονα υπάρχουν μαθηματικά εργαλεία προς την κατεύθυνση αυτή. Τέλος φαίνεται η αδήριτη ανάγκη μείωσης της ταχύτητας στις μη ασφαλτοστρωμένες οδούς και ειδικότερα σε πεζοδρόμους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ανάπτυξη μοντέλου για την το πρόβλημα βέλτιστης επιλογής συνδέσμων προς περιγραφή

3.1: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΓΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικές θεωρητικές έννοιες που αφορούν την βελτιστοποίηση, τους γράφους, τα δίκτυα, καθώς και αλγόριθμοι σχετικοί με αυτά. Επιπλέον, αναλύεται η βασική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την διαμόρφωση του μοντέλου προς επίλυση.

3.1.1: ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ, ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ, ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΥ-ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Επιχειρησιακή έρευνα

Πρόκειται για την συστηματική εφαρμογή ποσοτικών μεθόδων, τεχνικών και εργαλείων στην ανάλυση προβλημάτων που εμπεριέχουν την λειτουργία συστημάτων.

Βασικά στάδια της επιχειρησιακής έρευνας, ανεξάρτητα από το πεδίο εφαρμογής και ανεξάρτητα από το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί, είναι η ανάλυση του συστήματος, η διατύπωση στόχων, η διατύπωση του μοντέλου, η επίλυση του, και η ανάλυση ευαισθησίας αυτού.

(Κολέτσος, Στογιάννης, 2017)

Διακριτό πρόβλημα βελτιστοποίησης

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να χωριστούν σε διακριτά και συνεχή, ανάλογα με το αν οι μεταβλητές τους είναι αντίστοιχα διακριτές ή συνεχείς. Σε ένα διακριτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, ψάχνουμε για ένα αντικείμενο όπως ακέραιος αριθμός, μετάθεση ή γράφημα από κάποιο πεπερασμένο σύνολο.

(Wikipedia, 'Discrete Optimization Problem')

Αντικειμενική συνάρτηση

Σε ένα πρόβλημα, η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζει τον στόχο που επιχειρείται να ελαχιστοποιηθεί ή να μεγιστοποιηθεί. Συνεπώς η συνάρτηση αυτή περιγράφει το πρόβλημα μέσω μίας σχέσης μεταξύ μίας ή περισσότερων μεταβλητών απόφασης (βλ. αντίστοιχο ορισμό). Η μορφή μιας αντικειμενικής συνάρτησης είναι η εξής:

$$\min Z \text{ or } \max Z$$

$$\text{όπου, } Z = \beta_1 * \sum \alpha_1 + \alpha_2 * \sum \alpha_2 + \beta_3 * \sum \alpha_3 + \dots$$

όπου $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος και $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots$ τα βάρη της αντικειμενικής συνάρτησης, που χρησιμοποιούνται εξαιτίας των διαφορετικών μεγεθών και μονάδων των μεταβλητών αποφάσεων.

Μεταβλητές απόφασης

Πρόκειται για μεταβλητές, οι οποίες καθορίζονται από τον επίδοξο λύτη του προβλήματος, και οφείλουν να αντανακλούν και, μαθηματικά, να μοντελοποιούν το ζητούμενο της απόφασης, μέσω του περιβάλλοντος εντός του οποίου θα ληφθεί η απόφαση, και σύμφωνα με τις αξίες της κοινωνίας.

(Κολέτσος, 2006)

Περιορισμοί

Πρόκειται για τους φυσικούς ή τεχνολογικής φύσεως παράγοντες που δεν είναι απεριόριστοι ποσοτικά και συνεπώς πρέπει να προστεθούν στους παράγοντες επίλυσης.

Σενάριο

Ορίζεται ως το σύνολο των παραμέτρων ενός προβλήματος, με συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση, μεταβλητές απόφασης, και περιορισμούς. Αν κάποια ή κάποιες από αυτές τις παραμέτρους αλλάξει, τότε πρόκειται για διαφορετικό σενάριο.

Ανάλυση ευαισθησίας

Πρόκειται για την μεταβολή μίας παραμέτρου του σεναρίου, προκειμένου να δούμε την αντίδραση του μοντέλου σε αυτή την μεταβολή, και το πώς θα επηρεαστούν τα αποτελέσματα αυτού συναρτήσει της μεταβολής που επιβλήθηκε.

(Κολέτσος, Στογιάννης, 2017)

Συνάρτηση ποινής

Πρόκειται για συναρτήσεις που μετατρέπουν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, σε ένα πρόβλημα χωρίς περιορισμούς. Διακρίνονται σε εσωτερικές (Barrier Methods) και εξωτερικές. Επηρεάζουν την λύση και συχνά χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ευαισθησίας, για να δώσουν βελτιωμένη εκδοχή της λύσης αν αυτό είναι εφικτό.

(Wikipedia, 'Penalty function')

Πολύ-αντικειμενικός προγραμματισμός-μέτωπο Pareto

Ένα πρόβλημα πολύ-αντικειμενικού προγραμματισμού δεν είναι παρά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που περιλαμβάνει περισσότερες από μία, διακριτές μεταξύ τους, αντικειμενικές συναρτήσεις. Με μαθηματικό τρόπο μπορεί να γραφεί:

$$\min(f_1(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})), k \geq 2$$

Με k να ισούται με τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων. Αν κάποια από τις συναρτήσεις προς βελτιστοποίηση πρέπει να μεγιστοποιηθεί, σύμφωνα με την

παραπάνω μοντελοποίηση, θα πρέπει να γραφεί ως -f. (Wikipedia, ‘multi-objective optimization’)

Ένα στοιχείο $\vec{x} \in X$, καλείται εφικτή λύση ή εφικτή απόφαση του προβλήματος. Στην πολύ-αντικειμενική βελτιστοποίηση, δεν υπάρχει μία ακριβώς εφικτή λύση η οποία να βελτιστοποιεί όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις ταυτόχρονα. Συνεπώς, θα πρέπει να εξετάζονται οι λύσεις που καλούνται Pareto optimal, δηλαδή οι λύσεις εκείνες που δεν μπορούν να βελτιωθούν σε κάποια από τις αντικειμενικές συναρτήσεις χωρίς να χειροτερέψουν σε τουλάχιστον μία από τις υπόλοιπες. Αυτό μπορεί να γραφεί ως εξής: Μια εφικτή λύση $\vec{x}_1 \in X$ κυριαρχεί κατά Pareto σε μία άλλη $\vec{x}_2 \in X$, αν

$$f_i(\vec{x}_1) \leq f_i(\vec{x}_2), \text{ για κάθε } i = 1, \dots, k$$

Και

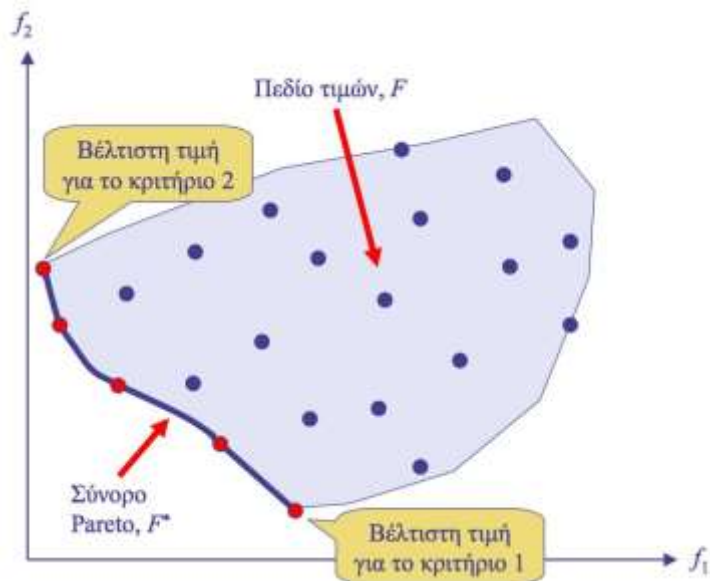
$$f_j(\vec{x}_1) < f_j(\vec{x}_2), \text{ για τουλάχιστον ένα από τα } j = 1, \dots, k$$

(σχέση 3.1)

(Wikipedia, ‘multi-objective optimization’)

Για την απεικόνιση προβλημάτων πολύ-αντικειμενικού προγραμματισμού, γίνεται χρήση του μετώπου Pareto, το οποίο δημιουργείται ως αποτέλεσμα της κατάστασης Pareto efficiency (Pareto optimality). Δεδομένων συγκεκριμένων αρχικών συνθηκών και προς μεγιστοποίηση μεγεθών, μια βελτίωση κατά Pareto είναι μια κατάσταση στην οποία κάποιες βέλτιστες λύσεις θα βελτιωθούν (τουλάχιστον μία), και καμία δεν θα χειροτερέψει. Συνεπώς, κυριαρχούμενη κατά Pareto λέγεται μία λύση αν μπορεί να βελτιωθεί κατά Pareto. Αντιστοίχως, βέλτιστη κατά Pareto ονομάζεται η κατάσταση κατά την οποία καμία αλλαγή δεν θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιωμένη λύση για όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις. (Wikipedia, ‘Pareto optimality’)

Έστω ότι πρόκειται να επιλέξουμε μία από 5 πιθανές διαδρομές για να μεταβούμε από συγκεκριμένη αφετηρία προς συγκεκριμένο προορισμό. Κάθε μία από τις πιθανές διαδρομές έχει συγκεκριμένο χρόνο και κόστος. Έστω επιπλέον, ότι η διαδρομή A απαιτεί χρόνο 10 ώρες και κοστίζει 1700 ευρώ, ενώ η διαδρομή B απαιτεί χρόνο 9 ώρες και κοστίζει 2000 ευρώ. Με δεδομένο ότι δεν γνωρίζουμε την σχετική βαρύτητα μεταξύ χρόνου και κόστους, δεν μπορούμε να αποφασίσουμε ποια επιλογή είναι καλύτερη. Οι δύο αυτές λύσεις λέγονται μη-κυριαρχούμενες η μία έναντι της άλλης. Αντίστοιχα, αν η διαδρομή C απαιτεί 8 ώρες



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση δύο αντικρουόμενων συναρτήσεων προς βελτιστοποίηση, μέσω ενός μετώπου Pareto

και κοστίζει 1800 ευρώ, έχει μικρότερο κόστος και μικρότερο χρόνο από την B, και συνεπώς κυριαρχεί έναντι αυτής.

Για το πεδίο τιμών F , με αντικειμενικές συναρτήσεις f_1 και f_2 , οι οποίες ελαχιστοποιούνται, εάν βελτιστοποιείται μόνο η f_1 βρίσκουμε την τιμή f_2 για αυτό το f_1 , κι έτσι βρίσκουμε το ένα άκρο του μετώπου. Αντίστοιχα, και αν θεωρήσουμε όπου f_1 το f_2 , βρίσκουμε τι άλλο άκρο του μετώπου. (Κεπαπτσόγλου, 2015)

Γράφοι και προσκείμενες έννοιες

- Ορίζεται ως το διατεταγμένο ζεύγος συνόλων (V, E) , όπου V είναι ένα μη κενό σύνολο στοιχείων, και E ένα σύνολο μη διατεταγμένων ζευγών του V . Τα στοιχεία του μη κενού συνόλου V καλούνται κόμβοι ή κορυφές, και τα στοιχεία του συνόλου E καλούνται ακμές.
- Αν $e = \{v_1, v_2\}$ μια ακμή ενός γράφου G , οι κορυφές v_1 και v_2 λέγονται άκρα της ακμής και καλούνται μεταξύ τους γειτονικές (adjacent).
- Ο αριθμός $|V|$ των κορυφών ενός γράφου $G(V, E)$ καλείται τάξη του G .
- Ο αριθμός των ακμών του G που προσπίπτουν σε μία κορυφή v , ονομάζεται βαθμός της κορυφής αυτής.
- Σε έναν γράφο G , κάθε πεπερασμένη ακολουθία κορυφών και ακμών (εναλλάξ) η οποία αρχίζει και τελειώνει με κορυφή, και στην οποία κάθε ακμή προσπίπτει στην προηγούμενη και στην επόμενη κορυφή, λέγεται δρόμος (walk). Αν σε ένα δρόμο, κάθε ακμή εμφανίζεται μόνο μία φορά, ο δρόμος αυτός αποκαλείται trail, ενώ αν κάθε κορυφή και ακμή εμφανίζεται μόνο μία φορά, ο δρόμος αποκαλείται path.

- Ένας γράφος $G=(V,E)$, 2 κορυφές του i, j θεωρούνται συνδεδεμένες, αν υπάρχει στον G τουλάχιστον ένα μονοπάτι ij . Ο ίδιος ο γράφος είναι συνεκτικός αν για κάθε ζεύγος κορυφών του υπάρχει ένα τουλάχιστον ζεύγος που τις συνδέει.
- Δέντρο είναι ένας συνεκτικός γράφος χωρίς κύκλους

(Záchos et al, 2015)

Το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου (Cable and Trench Problem)

Πρόκειται για ένα πρόβλημα που αποτελεί συνδυασμό των προβλημάτων συντομότερης διαδρομής σε δέντρο διαδρομών, και του ελάχιστου δενδροειδούς (Minimum Spanning Tree problem). (Wadha, 2000)

A) Το πρόβλημα του ελάχιστου δενδροειδούς (Minimum Spanning Tree problem)

Το δενδροειδές είναι ένα δέντρο, δηλαδή ένας συνδεδεμένος άκυκλος γράφος που έρχεται σε επαφή με όλους τους κόμβους ενός μη κατευθυνόμενου γράφου. Το ελάχιστο δενδροειδές είναι το δενδροειδές με το ελάχιστο δυνατό κόστος, δηλαδή από όλα τα δέντρα διέρχονται από όλους τους κόμβους του μη κατευθυνόμενου γράφου, επιλέγεται αυτό στο οποίο $\min z = \sum(c_{ij})$, δεδομένου ενός μη κατευθυνόμενου γράφου $G=(N,A)$, με n κόμβους και m συνδέσμους-ακμές, και με κάθε ακμή να χαρακτηρίζεται από ένα κόστος c_{ij} . Αλγόριθμοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση αυτού του προβλήματος είναι:

- Ο αλγόριθμος Prim
- Ο αλγόριθμος Kruskal
- Ο αλγόριθμος Sollin

(Wadha, 2000)

B) Το πρόβλημα εύρεσης του συντομότερου μονοπατιού σε δένδρο διαδρομών

Σκοπός σε αυτό το πρόβλημα είναι να βρεθεί ένα συντομότερο μονοπάτι από έναν κόμβο έναρξης-πηγή, προς όλους τους υπόλοιπους, $(n-1)$ τον αριθμό, κόμβους. Υπάρχει πάντα κατευθυνόμενο δέντρο με ρίζα τον κόμβο έναρξης, το οποίο να έχει την ιδιότητα ότι το μοναδικό μονοπάτι από τον κόμβο έναρξης προς κάθε κόμβο, είναι το συντομότερο προς αυτόν τον κόμβο. Εφόσον έρχεται σε επαφή με όλους τους κόμβους του δικτύου, είναι ένα δενδροειδές. Για δεδομένο γράφο $G=(N,A)$ με δεδομένο κόμβο n_0 , πρόκειται για πρόβλημα που επιλύεται σε πολυωνυμικό χρόνο.

Αλγοριθμικά, το πρόβλημα αυτό μπορεί να προσεγγιστεί με μεθόδους label setting (σε κάθε επανάληψη τοποθετείται μία τιμή σε ένα σύνδεσμο ως μόνιμη), και label correcting (όλες οι τιμές στους συνδέσμους ως προσωρινές μέχρι το τελευταίο βήμα, όταν και γίνονται μόνιμες).

Παραδείγματα label setting αλγορίθμων είναι

- Ο αλγόριθμος Dijkstra
- Ο αλγόριθμος Dial

Ένας χαρακτηριστικός label correcting αλγόριθμος είναι ο αλγόριθμος Ford.

(Wadha, 2000)

3.1.2 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

Γενική ακολουθία βημάτων ενός γενετικού αλγορίθμου

Αναφέρονται τα βασικά βήματα τα οποία ακολουθεί, προκειμένου να καταλήξει σε μία βέλτιστη, με βάση τα κριτήρια που του έχουν τεθεί, λύση, ένας γενετικός αλγόριθμος. Τα συγκεκριμένα βήματα παρουσιάζουν μικρές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών γενετικών αλγορίθμων, ωστόσο τα βασικά τους στοιχεία είναι τα εξής:

Αρχικός πληθυσμός

Η συνάρτηση για την εύρεση του αρχικού πληθυσμού λαμβάνει υπόψη της τον αριθμό των γονιδίων, καθώς και τα ανώτατα και τα κατώτατα όρια αυτών, σαν εισόδους, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα άτομο του πληθυσμού. Μετέπειτα, δημιουργείται συνάρτηση για την εύρεση του πληθυσμού, η οποία έχει ως ορίσματα τον αριθμό των ατόμων, τον αριθμό των γονιδίων, και το ανώτατο και κατώτατο όριο αυτών. Με βάση τα παραπάνω, δημιουργείται ο αρχικός πληθυσμός (πρώτη γενιά).

Αξιολόγηση πληθυσμού-Επιλογή

Η συνάρτηση αξιολόγησης είναι μία αντικειμενική συνάρτηση που σκοπό έχει να «οδηγήσει» την προσομοίωση προς βέλτιστες λύσεις. Πιο αναλυτικά, κάθε λύση του γενετικού αλγορίθμου αναπαρίσταται συνήθως με μια σειρά αριθμών (χρωμόσωμα). Μετά από κάθε επανάληψη, το λογισμικό που εκτελεί τον γενετικό αλγόριθμο έχει προγραμματιστεί έτσι ώστε να διαγράφει τις χειρότερες λύσεις και να παράγει νέες, με βάση τις βέλτιστες ήδη υπάρχουσες. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται κάθε φορά βελτίωση του πληθυσμού σε σχέση με τον προηγούμενο.

(Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι συναρτήσεις αριστοποίησης είναι 2, και είναι εκείνες που ορίζονται από τον μελετητή).

Ουσιαστικά, η συνάρτηση επιλογής δέχεται ως όρισμα τον πληθυσμό των υποψηφίων λύσεων και τις αξιολογήσεις αυτών με βάση την/τις αντικειμενική/ες συνάρτηση/εις. Από αυτή την πλήρως ορισμένη γενιά, αφαιρούνται τα χειρότερα βάσει κριτηρίων άτομα, και προστίθενται νέα άτομα, με τη χρήση ελιτιστικού μηχανισμού, προκειμένου να μην χαθεί σε κανένα βήμα η βέλτιστη λύση.

Διασταύρωση

Αν εναπόκειται ελιτισμός στον γενετικό αλγόριθμο, η τιμή ελιτισμού δίνεται ως είσοδος της συνάρτησης ζευγαρώματος μαζί με τα άτομα. Παρατηρούνται 3 διαφορετικές μέθοδοι ζευγαρώματος:

- Βέλτιστη: σχηματίζονται ζευγάρια ανά 2, ξεκινώντας από το πιο υγιές άτομο του πληθυσμού και προχωρώντας σε φθίνουσα σειρά. Έτσι με αυτό τον τρόπο τοποθετούνται μαζί τα υγιέστερα μέλη του πληθυσμού, καθώς και τα λιγότερο υγιή επίσης μαζί.
- Τυχαία
- Ανισοβαρής τυχαία: γίνεται τυχαίο ζευγάρωμα ανά 2, με τα πιο υγιή μέλη να έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να επιλεγούν για ζευγάρωμα.

Μετάλλαξη

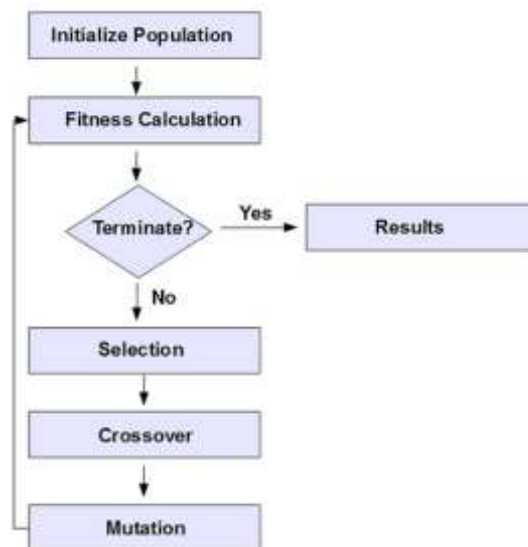
Τυχαίες μεταλλάξεις εμφανίζονται στα επιλεγμένα άτομα του πληθυσμού και στους απογόνους τους, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ποικιλία στην επόμενη γενιά. Αν ενυπάρχει ελιτισμός, τα «υγιέστερα» - καλύτερα άτομα δεν διέρχονται από την διαδικασία της τυχαίας μετάλλαξης, προκειμένου να μην χαθεί ολοκληρωτικά η βέλτιστη λύση.

Δημιουργία επόμενης γενιάς

Η επόμενη γενιά αποτελείται από άτομα καλύτερα κατά μέσο όρο από εκείνα που απαρτίζουν την προηγούμενη.

Κριτήρια τερματισμού

- 1) Αριστοποίηση συνάρτησης αξιολόγησης: γίνεται έλεγχος για το αν το υγιέστερο άτομο στην τελευταία δημιουργηθείσα γενιά πληροί τα κριτήρια που έχουν τεθεί.
- 2) Μέγιστη μέση τιμή συνάρτησης αξιολόγησης: σε περίπτωση που ενδιαφερόμαστε για κάποιο σύνολο λύσεων.
- 3) Μέγιστος αριθμός γενεών: Τίθεται συγκεκριμένος περιορισμός στον αριθμό των επαναλήψεων του γενετικού αλγορίθμου.



Εικόνα 3.2: Γενικό διάγραμμα ροής ενός γενετικού αλγορίθμου

Non dominated Sorting Genetic Algorithm (Μη κυριαρχούμενος ταξινομητικός γενετικός αλγόριθμος) – NSGA-II

Ο μη-κυριαρχούμενος ταξινομητικός γενετικός αλγόριθμος αρχικά προτάθηκε στην πλήρη του μορφή από τους Srinivas και Deb το 1994, με την συντομογραφία NSGA, και αργότερα βελτιώθηκε από τους Deb et al. (2000)

Με δεδομένο ένα πληθυσμό μεγέθους N , κάθε λύση πρέπει να συγκρίνεται με κάθε άλλη λύση του πληθυσμού προκειμένου να βρεθεί το αν είναι ή όχι κυριαρχούμενη, και με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται μέτωπα μη-κυριαρχούμενων λύσεων.

Στην εξελιγμένη αυτή μορφή μοντελοποίησης του γενετικού αλγορίθμου, χρησιμοποιούνται 2 επιπρόσθετες οντότητες για κάθε λύση I , τον αριθμό των λύσεων n_i που κυριαρχούν επί της λύσης I , και το σύνολο S_i που περιλαμβάνει τις λύσεις επί των οποίων κυριαρχεί η I , ενώ σε μία λίστα ($F1$) αποθηκεύονται οι λύσεις για τις οποίες ισχύει $n_i=0$, εκείνες δηλαδή επί των οποίων δεν κυριαρχεί καμία λύση. Αυτές αποτελούν κάθε στιγμή το τρέχον μέτωπο. Στη συνέχεια μία επαναληπτική διαδικασία εύρεσης των μετώπων μη-κυριαρχούμενων μεταξύ τους λύσεων τρέχει για κάθε ένα από τα (στην χειρίστη περίπτωση) N μέτωπα. (Deb et al, 2000)

Η ίδια μελέτη χρησιμοποιεί την ποσότητα $i_{distance}$ ως την μέση τιμή της απόστασης μεταξύ των 2 σημείων που βρίσκονται στις αντίθετες πλευρές κατά μήκος της νοητής παράλληλης καθενός εκ των αντικειμενικών συναρτήσεων. Η απόσταση αυτή είναι εκτιμήτρια του μέγιστου κυβοειδούς που περικλείει το σημείο I και δεν περιλαμβάνει άλλα σημεία του πληθυσμού λύσεων, και ονομάζεται crowding distance.

Αν υποθεθεί ότι κάθε άτομο του πληθυσμού έχει ως οντότητες το μέτωπο μη κυριαρχίας του (i_{rank}) και την crowding distance του ($i_{distance}$), μεταξύ 2 λύσεων που βρίσκονται σε διαφορετικά , θα προτιμάται εκείνη με το χαμηλότερο i μέτωπο, ενώ ειδάλως, αν και οι δυο λύσεις βρίσκονται στο ίδιο μέτωπο, προτιμάται εκείνη που βρίσκεται πιο μακριά από γειτονικά της σημεία (μεγαλύτερη crowding distance).

Σε ό,τι αφορά την βασική επαναληπτική διαδικασία, σε πρώτο στάδιο παράγεται ένας πληθυσμός P_u , ταξινομημένος με βάση τα κριτήρια μη κυριαρχίας, και με κάθε λύση του να χαρακτηρίζεται από μία τιμή fitness ίση με τον αριθμό του μετώπου στο οποίο βρίσκεται. Η δυαδική επιλογή τύπου tournament, η διασταύρωση και η μετάλλαξη είναι οι 3 μηχανισμοί που παράγουν τον πληθυσμό-παιδί Q_u μεγέθους N κάθε φορά. Σχηματίζεται ο πληθυσμός $R_t = P_t \cup Q_t$, μεγέθους $2N$, και ταξινομείται με βάση την μη κυριαρχία, ενώ ο επόμενος πληθυσμός-πατέρας $P_{(t+1)}$ σχηματίζεται προσθέτοντας τις λύσεις από το πρώτο μέτωπο μέχρις ότου ξεπεραστεί ο αριθμός N . Οι λύσεις του τελευταίως σχηματισμένου μετώπου ταξινομούνται με βάση τον Crowding Comparison Operator που περιγράφεται παραπάνω, και επιλέγονται οι πρώτες N . Τέλος, με επιλογή, διασταύρωση και μετάλλαξη, κατά σειρά, σχηματίζεται και ο πληθυσμός-παιδί $Q_{(t+1)}$. (Deb et al, 2000)

Πρόκειται για έναν από τους πιο δημοφιλείς αλγορίθμους όσον αφορά την επίλυση προβλημάτων πολύ-αντικειμενικού προγραμματισμού. Έχει 3 βασικά χαρακτηριστικά που τον καθιστούν καλύτερο από άλλους ανταγωνιστικούς για την υλοποίηση των ίδιων διαδικασιών:

- Πολύ γρήγορη διαδικασία εκτίμησης απόστασης συνωστισμού
- Πολύ γρήγορη ταξινόμηση των μη-κυριαρχούμενων λύσεων
- Απλός συγκριτικός τελεστής συνωστισμού

(Deb et al, 2000)

3.1.3: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Οι Wu et al, σε έρευνα που διεξήγαγαν το 2005, προσπάθησαν να ασχοληθούν με ένα διακριτό πρόβλημα σχεδιαστικού δικτύου ισορροπίας. Σε αυτό το πρόβλημα, στόχος είναι η ανάπτυξη ενός αναλυτικού μοντέλου που θα βοηθήσει στην χωροθέτηση

πεζοδρόμων σε ένα πολυτροπικό δίκτυο μεταφοράς. Στοιχεία από το εν λόγω μοντέλο έχουν βάση και στην παρούσα εργασία, της οποίας στόχος είναι η κατάλληλη τοποθέτηση γεωγραφικών περιφράξεων σε συγκεκριμένα διακριτά οδικά τμήματα – συνδέσμους. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβλητή σχεδιασμού στην μελέτη των παραπάνω, μπορεί να έχει τιμές 0, 1 ή 2, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της, και με αυτό τον τρόπο μοντελοποιείται το δίκτυο.

Για επίτευξη αριστοποίησης, θα πρέπει να παραχθεί και να επιλυθεί ένα μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού. Τα μοντέλα αυτά αποτελούνται από μία ή περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις, που μεγιστοποιούνται ή/και ελαχιστοποιούνται ανάλογα με τις τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού, και από ένα σύνολο περιορισμών σε αυτές τις συναρτήσεις. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις ορίζονται από τον στόχο της βελτιστοποίησης, και οι περιορισμοί από φυσικά ή άλλα στοιχεία του προβλήματος. Στην συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποιείται από μαθηματικής άποψης το μοντέλο της πολύ-αντικειμενικής και συγκεκριμένα δι-αντικειμενικής βελτιστοποίησης.

Στην αρχική συνθήκη, το μεγαλύτερο μέρος των οδών του δικτύου είναι υποψήφιες προς φραγή, και συνεπώς ο σκοπός είναι να βρεθεί το σύνολο εκείνων των οδών στις οποίες αν γίνει απαγόρευση κυκλοφορίας των πατινιών, το συνολικό δίκτυο θα επηρεαστεί σε μικρότερο βαθμό αρνητικά, με βάση τα κριτήρια ασφαλείας που έχουν τεθεί για αυτές.

Από ένα σύνολο συνδέσμων, στην διαδικασία βελτιστοποίησης εισάγονται εκείνοι που δεν απορρίπτονται από τους αρχικούς περιορισμούς του προβλήματος. Η διαδικασία βελτιστοποίησης διαμορφώνεται ως ένα μη γραμμικό πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού με Boolean μορφή των μεταβλητών απόφασης, (0 ή 1), με την χρήση του αλγόριθμου εύρεσης συντομότερης διαδρομής και ανάθεσης φόρτου μέσω της μεθόδου «όλα ή τίποτα».

Η μαθηματική διατύπωση του μοντέλου έχει τα εξής στοιχεία:

Αντικειμενική συνάρτηση - Μεταβλητές απόφασης - Περιορισμοί

Οι μεταβλητές απόφασης, των οποίων οι τιμές θα χρησιμοποιηθούν στις αντικειμενικές συναρτήσεις, είναι οι εξής:

- Συνολικό μήκος των οδών που αποκόπτονται από το δίκτυο (σε m).
- Συνολικό κόστος για την διάνυση του δικτύου (σε οχηματοώρες).

Πρόκειται για πολύ-κριτηριακή βελτιστοποίηση με 2 αντικρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις, και συνεπώς πρέπει αφενός να ελαχιστοποιηθεί το κόστος και αφετέρου να μεγιστοποιηθεί το συνολικό μήκος οδών που αποκόπτονται από το δίκτυο.

$$\max \sum_{i=1}^m (l_i * u_i)$$

(σχέση 3.1)

Και:

$$\min \sum_{i=1}^a (v_i * t_i)$$

(σχέση 3.2)

Τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται παραπάνω ορίζονται ως εξής:

A: αριθμός συνδέσμων του δικτύου

M: αριθμός συνδέσμων του δικτύου που εισάγονται στην βελτιστοποίηση

l_i : μήκος συνδέσμου i (m)

u_i : μεταβλητή απόφασης για τον σύνδεσμο i

t_i : ο χρόνος διάνυσης ενός συνδέσμου i χωρίς ποινή για τους φραγμένους συνδέσμους

t'_i : ο χρόνος διάνυσης ενός συνδέσμου i με ποινή για τους φραγμένους συνδέσμους

R: το σύνολο των κόμβων προέλευσης

S: το σύνολο των κόμβων προορισμού

V: το σύνολο των κόμβων του δικτύου

D_{rs} : η ζήτηση μεταξύ κόμβου προέλευσης r και κόμβου προορισμού s

f^k_{rs} : ο φόρτος της διαδρομής k

$t_{0,i}$: ο χρόνος ελεύθερης ροής στο σύνδεσμο i

v_i : ο φόρτος που χρησιμοποιεί το σύνδεσμο i

x_i : ο αριθμός των μονοπατιών που χρησιμοποιούν τον σύνδεσμο i

d_i : μεταβλητή απόφασης για το αν ο σύνδεσμος i συμμετέχει στην συντομότερη διαδρομή

Όπου για τις μεταβλητές απόφασης:

$$u_i = 1, \text{ αν ο σύνδεσμος περιφραχτεί}$$

$$u_i = 0, \text{ αν δεν περιφραχτεί}$$

(σχέση 3.3)

Και:

$$d_i = 1, \text{ αν ο σύνδεσμος } i \text{ συμμετέχει στην συντομότερη διαδρομή}$$

$$d_i = 0, \text{ αν δεν συμμετέχει}$$

(σχέση 3.4)

Επιπλέον

$$t'_i = t_i, \text{ αν ο σύνδεσμος δεν περιφραχτεί}$$

$$t'_i = 100000000, \text{ αν ο σύνδεσμος περιφραχτεί}$$

(σχέση 3.5)

Υπό τον εξής περιορισμό:

$$\min \sum_{i=1}^a (x_i * t'_i)$$

(σχέση 3.6)

Πρόκειται για την μαθηματική διατύπωση της ελαχιστοποίησης του δέντρου συντομότερων μονοπατιών. Θα πρέπει, επομένως, να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος διάνυσης των συνδέσμων. Ο περιορισμός αυτός υπόκειται σε υπό-περιορισμούς:

$$\sum_{i=1}^v x_{i1} - \sum_{i=1}^v x_{1i} = -(V - 1)$$

(σχέση 3.7)

$$\sum_{i=1}^v x_{ij} - \sum_{i=1}^v x_{ji} = 1$$

(σχέση 3.8)

Όπου, $j=[2,3,\dots,V]$, δηλαδή όλοι οι κόμβοι του δικτύου εκτός της αφετηρίας. Οι υπό-περιορισμοί που αναπτύχθηκαν, δηλώνουν ότι από την εκάστοτε αφετηρία-source, πρέπει να φεύγουν $V-1$ μονοπάτια, ενώ από καθέναν από τους υπόλοιπους κόμβους, θα πρέπει να φεύγει 1 μονοπάτι περισσότερο από τα μονοπάτια που εισέρχονται.

Ένας επιπλέον περιορισμός που τίθεται είναι:

$$\sum_{k=1}^K f_k^{rs} = D_{rs}$$

(σχέση 3.9)

Ο παραπάνω υποχρεώνει τον αλγόριθμο να χρησιμοποιήσει και να αναθέσει σε κάποια διαδρομή του δικτύου φόρτους, μέχρις ότου ικανοποιήσει όλο τον φόρτο.

$$v_i = \sum_{rs} \sum_{k=1}^K (f_k^{rs} * \delta_i)$$

(σχέση 3.10)

Ο εν λόγω περιορισμός αναθέτει όλη την ζήτηση της διαδρομής k μεταξύ r και s , στον φόρτο του συνδέσμου a , με την προϋπόθεση ότι ο a ανήκει σε αυτήν. Πρόκειται για την ανάθεση «όλα ή τίποτα».

$$f_k^{rs} \geq 0$$

(σχέση 3.11)

Ο τελευταίος περιορισμός εξασφαλίζει την μη αρνητικότητα των φόρτων που ανατίθενται, σε κάθε σύνδεσμο κάθε διαδρομής.

Το πρώτο βήμα προς την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, είναι ο καθορισμός αρχικών παραμέτρων και κριτηρίου τερματισμού. (στην περίπτωση μας, το κριτήριο τερματισμού είναι συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων του γενετικού αλγορίθμου).

Δεύτερο βήμα είναι η εισαγωγή μίας τυχαίας αρχικής λύσης με πιθανές τιμές για κάθε μεταβλητή απόφασης, τις τιμές 0 ή 1. Με βήμα 1, και με δεδομένες τις αντικειμενικές συναρτήσεις, εκτελούνται επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου NSGA-II στο λογισμικό xl Optimizer.

Το βήμα 2, κατά το οποίο, μέσω του γενετικού αλγορίθμου, υπολογίζονται τα ζεύγη τιμών για τις 2 αντικειμενικές συναρτήσεις, επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού, το οποίο στην περίπτωση του NSGA-II είναι ένας αριθμός επαναλήψεων. Δεν μπορεί να είναι σύγκριση με κάποια τιμή, καθώς σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου αυτού, παράγονται περισσότερες της μίας λύσεις που είναι μεταξύ τους μη κυριαρχούμενες, και επομένως είναι αδύνατο να συγκριθούν με τις αντίστοιχες λύσεις της προηγούμενης επανάληψης, καθώς δεν είναι απαραίτητο ότι σε 2 διαδοχικές επαναλήψεις έχει προκύψει ο ίδιος αριθμός μη κυριαρχούμενων βέλτιστων λύσεων.

Τυπικά, ο χρόνος διαδρομής των συνδέσμων δίνεται, για αστικά οδικά δίκτυα, από την σχέση:

$$t_i = t_i^0 [1 + 0.15(v_i/c_i)^4]$$

(σχέση 3.12)

Πρόκειται για τυποποιημένη σχέση από το Bureau of Public Roads – Federal Highway Administration.

t_i : ο χρόνος διαδρομής με φόρτο v_i

v_i : ο φόρτος σε οχήματα/ώρα

c_i : η χωρητικότητα σε οχήματα/ώρα

t_i^0 : ο χρόνος διάνυσης υπό συνθήκες ελεύθερης ροής

Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι με δεδομένο πως δεν υπάρχει άλλη σχέση για τα μέσα μικροκινητικότητας, όπως τα πατίνια, θα θεωρηθεί ότι ισχύει η παραπάνω. Ωστόσο, δεν μπορεί να οριστεί χωρητικότητα συνδέσμου σε πατίνια για ένα μέσο όπως το ηλεκτροκίνητο πατίνι, λόγω του μεγέθους του. Δεν έχουν παρατηρηθεί στοιχεία συνωστισμού πατινιών ή φαινόμενα δημιουργίας ουρών, παρά την αυξανόμενη χρήση τους, και δεν είναι πιθανό να παρατηρηθούν τέτοια φαινόμενα στο άμεσο μέλλον.

Συνεπώς το πηλίκο v_i/c_i , υπό αυτό το πρίσμα, μπορεί να υποτεθεί αμελητέο, ήτοι

$$\lim_{c_i \rightarrow +\infty} \frac{v_i}{c_i} = 0$$

Και άρα, η σχέση 3.12 για την περίπτωση μας γίνεται

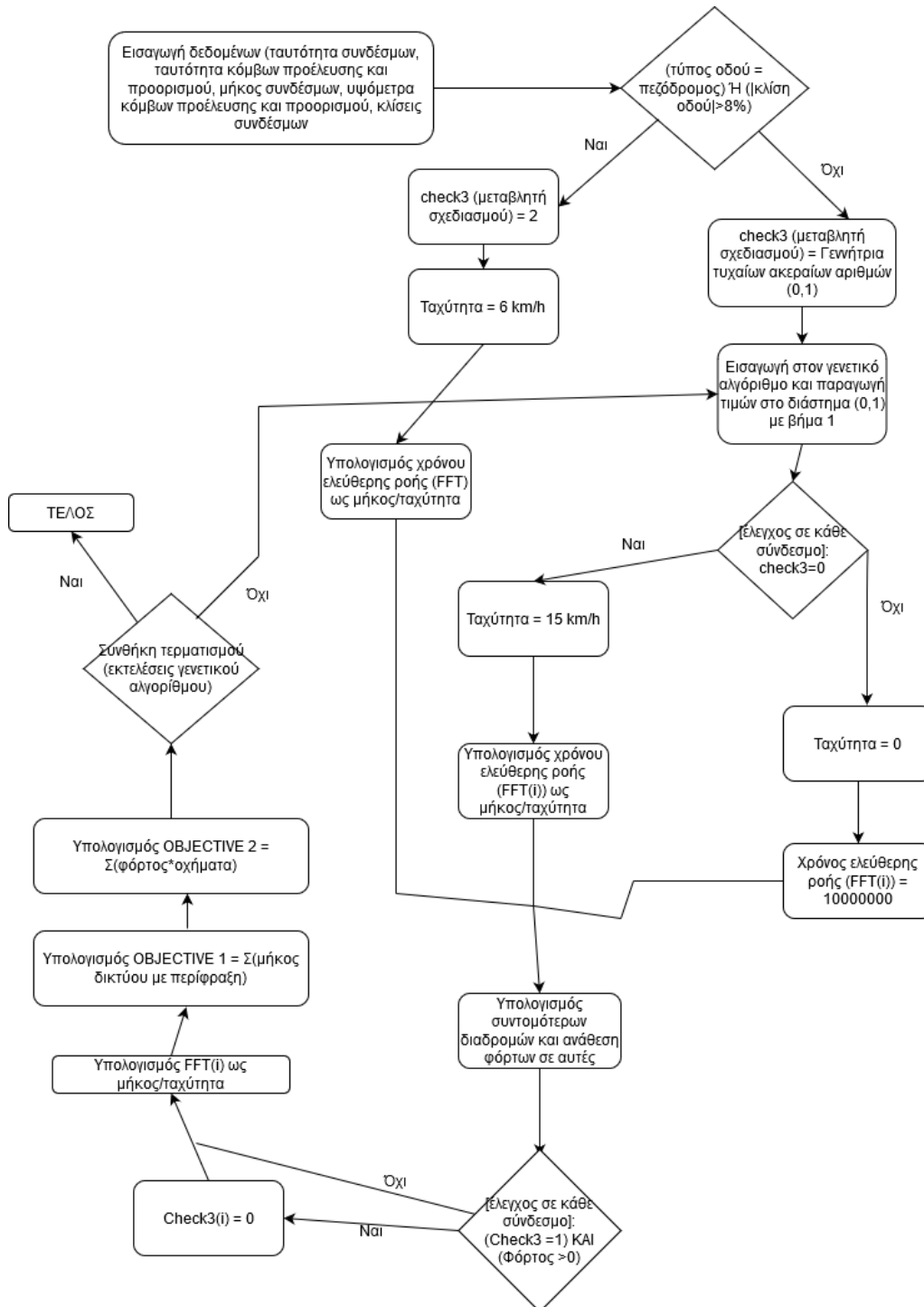
$$t_i = t_i^0$$

(σχέση 3.13)

Όπου t_i είναι ο χρόνος που υπολογίζεται και δεν απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία.

3.2: ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μοντέλο που παρουσιάζεται έχει ως σκοπό να προσδιορίσει τα βέλτιστα, με βάση όλα τα προαναφερθέντα κριτήρια, τμήματα τα οποία θα υποστούν γεωγραφική περιφραξη (geofencing), με δεδομένα κάποια τμήματα οδικού δικτύου στα οποία θα επιτρέπεται η περιορισμένη κίνηση των ηλεκτροκίνητων πατινιών, και με γνώμονα τις αντικρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις που αναφέρθηκαν στο κεφ. 3.1. Ακολουθεί διάγραμμα ροής για την πορεία των διαδικασιών:



Διάγραμμα 3.1: διάγραμμα ροής (flow chart) της μοντελοποίησης κι επίλυσης του προβλήματος

3.2.1: ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ - ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Παραδοχές - προϋποθέσεις

Η περίπτωση μελέτης του μοντέλου που αναπτύσσεται, είναι σε κάθε περίπτωση ένα τυχαίο αστικό οδικό δίκτυο, στο οποίο είναι επιθυμητή η αποκοπή κάποιων συνδέσμων από την κυκλοφορία των ηλεκτροκίνητων πατινιών. Ένα τέτοιο δίκτυο διαθέτει συνδέσμους διπλής κατεύθυνσης, με γνωστό μήκος και γνωστό (υπολογιζόμενο) χρόνο ελεύθερης ροής. Επιπλέον, δεδομένα θεωρούνται και τα στοιχεία ζήτησης.

Παραδοχές οι οποίες υιοθετήθηκαν και είναι σημαντικό να αναφερθούν σε αυτό το σημείο είναι οι εξής:

- Μεταξύ κάθε 2 κόμβων, έστω i και j , που συνδέονται στο υπαρκτό δίκτυο, υπάρχουν 2 σύνδεσμοι, τόσο ο $i \rightarrow j$, όσο και ο $j \rightarrow i$. Επομένως για τις 244 οδούς του δικτύου θεωρούνται 2 σύνδεσμοι σε κάθε μία, και άρα συνολικά 488 σύνδεσμοι.
- Σε οποιαδήποτε αναφορά και υπολογισμό, η κλίση ($slope[i]$ στο Microsoft Excel) αναφέρεται στην μέση κλίση ευθύγραμμου τμήματος μεταξύ 2 κόμβων.
- Σε οποιαδήποτε αναφορά και υπολογισμό, η ταχύτητα ($velocity[i]$ στο Microsoft Excel) αναφέρεται στην μέση ταχύτητα στην περίπτωση ελεύθερης κίνησης, και εξαναγκασμένης σταθερής στην περίπτωση μερικής γεωγραφικής περίφραξης.

Σε ό,τι αφορά την παραγωγή των στοιχείων ζήτησης, εκείνη έγινε με βάση την περιοχή μελέτης. Έχοντας ορίσει το αστικό δίκτυο ως έναν κατευθυνόμενο γράφο, και με βάση γενικά στοιχεία όπως πυκνότητα χρήσεων διάφορων της κατοικίας στην περιοχή μελέτης, τοποθετήθηκαν κάποια αρχικά στοιχεία ζήτησης στο δίκτυο. Για την ακρίβεια ορίστηκαν 12 ζεύγη κόμβων, που για κάποια συγκεκριμένη ώρα της ημέρας, θεωρήθηκε ότι παρουσιάζουν συγκεκριμένη ζήτηση. Οι περισσότερες εκ των προελεύσεων είναι περιοχές αμιγούς κατοικίας σε ό,τι αφορά την χρήση γης, και οι περισσότεροι εκ των προορισμών είναι πλησίον του κέντρου γειτονιάς. Με τον τρόπο αυτό θεωρείται καλύτερη η προσέγγιση, καθώς μπορεί να συμπεριλαμβάνει τόσο κάποιον που επιθυμεί να χρησιμοποιήσει το πατίνι για να κινηθεί από την κατοικία του στον χώρο εργασίας του, όσο και (σε μικρότερο βαθμό) κάποιον που, την ίδια στιγμή, θέλει να κινηθεί από άλλες περιοχές προς το κέντρο της περιοχής μελέτης. Γίνεται έτσι μια προσπάθεια συμπερίληψης και των διαμπερών μετακινήσεων. Με δεδομένο ότι δεν κατέστη δυνατή η συλλογή δεδομένων για την κατάρτιση πίνακα Προέλευσης-Προορισμού, και με δεδομένο ότι δίνεται στην παρούσα εργασία μεγαλύτερη έμφαση στην αλγοριθμική μελέτη του θέματος, και όχι τόσο στην ρεαλιστικότητα της μελέτης περίπτωσης καθ' εαυτής, είναι προφανές ότι τα στοιχεία ζήτησης επηρεάζουν τον αλγόριθμο, ωστόσο όχι την εκτέλεση του ή τα μαθηματικά αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτόν.

Λόγω της έλλειψης στοιχείων με χωρική αναφορά στα ατυχήματα που σχετίζονται με ηλεκτροκίνητα πατίνια στα αστικά δίκτυα, η ποσοτικοποίηση των στοιχείων ατυχημάτων και την χρήση αντίστοιχων περιορισμών, είναι δύσκολη. Αναμένεται μέσω των περιορισμών που τίθενται, να μειωθούν εμμέσως οι πιθανότητες ατυχημάτων στο δίκτυο. Όσον αφορά στην σοβαρότητα των ατυχημάτων, σημαντικό μέγεθος που

επηρεάζει την σοβαρότητα της σύγκρουσης είναι η ορμή. Η ορμή δίνεται ως το γινόμενο $\vec{p} = m\vec{u}$, και συνεπώς, με δεδομένες τις μάζες οχημάτων, πεζών και πατινιών, σκοπός είναι η μείωση της μέσης ταχύτητας στο δίκτυο, και άρα, προσαρμοσμένοι στον σκοπό της παρούσας εργασίας, η μείωση της ταχύτητας των πατινιών (από 15 km/h σε 6 km/h), έστω και σε ένα μικρό αριθμό συνδέσμων θα έχει μακροπρόθεσμα θετικές συνέπειες στα τροχαία ατυχήματα. Γενικότερα, αναμενόμενο είναι να γίνει προσπάθεια αποφυγής της διέλευσης των πατινιών από κύριες αρτηρίες κατά το δυνατόν, καθώς σε εκείνες οι μέσες ταχύτητες των οχημάτων είναι αρκετά υψηλές. Το τελευταίο δεν εξετάζεται κατά την μελέτη του βασικού σεναρίου, όμως εξετάζεται στην μελέτη ανάλυσης ευαισθησίας, όπου γίνεται η διαπίστωση της ευκολίας (ή όχι) της αποφυγής των κύριων αρτηριών.

Στην έρευνα των Hollingsworth et al (2019), μελετήθηκε η συνεισφορά των e-scooters στην κλιματική αλλαγή και την ρύπανση. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν οι μελετητές, είναι ότι τα e-scooter είναι μία πολύ καλή λύση για τις last-mile διαδρομές, και έχουν μικρότερη αρνητική συνεισφορά στο περιβάλλον από άλλα μέσα, όχι όμως μηδαμινή. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι πρέπει να γίνεται βέλτιστη χρήση τους, με καλές πρακτικές να είναι η βελτίωση του συστήματος juicing των εταιρειών και η κεντρική διαχείριση τους προκειμένου να μειώνονται τα χιλιόμετρα που διανύονται για την παραλαβή, φόρτιση και επανατοποθέτηση τους στο δίκτυο. Σε αποτέλεσμα των παραπάνω, η προσπάθεια μείωσης των οχηματοωρών που διανύουν τα πατίνια στο δίκτυο, σημαίνει μείωση των «περιττών» μετακινήσεων τους, και επομένως διευκόλυνση των διαδικασιών rebalancing και juicing. Επομένως, έμμεσα στην αντικειμενική συνάρτηση που αφορά ελαχιστοποίηση των οχηματοωρών, καλύπτεται ο περιβαλλοντικός παράγοντας, ελλείπει και περισσοτέρων δεδομένων για τους κόμβους του δικτύου.

Τέλος, άλλα στοιχεία, όπως τα στοιχεία θορύβου δεν κρίνεται σκόπιμο να ληφθούν υπόψη, με δεδομένο ότι τα πατίνια εξ ορισμού έχουν δημιουργηθεί ως ένα μέσο εντελώς αθόρυβο. Δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποια πλήρης έρευνα που να πιστοποιεί και να αναλύει την συνεισφορά των πατινιών στην ηχορύπανση των αστικών δικτύων, τουλάχιστον σε μετρήσιμα επίπεδα στα πλαίσια μελέτης.

Αρχικοποίηση (initialization)

Σε ό,τι αφορά, αρχικά, τους πεζοδρόμους, θα πρέπει να αναφερθεί η κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται. Στο λογιστικό φύλλο Excel θα θεωρείται ως κατηγορία οδού η στήλη TYPE1[i] του πίνακα στο λογιστικό φύλλο, ως εξής:

TYPE1[i]= 2, αρτηρία

TYPE1[i]= 3, συλλεκτήρια οδός

TYPE1[i]= 4, τοπική οδός

TYPE1[i]= 5, πεζόδρομος

Οι όροι «αρτηρία», «συλλεκτήρια οδός» και «τοπική οδός» είναι κατηγορίες που προκύπτουν από την θεωρητικού επιπέδου λειτουργική κατάταξη των οδών, ενώ οι «πεζόδρομοι» είναι ξεχωριστή κατηγορία οδών, που στα αρχικά δεδομένα

κωδικοποιούνται με την τιμή 5. Συνεπώς, έστω N ο αριθμός των συνδέσμων του δικτύου, προκειμένου να αποδοθεί τιμή στα κελιά της στήλης «περιορισμού ταχύτητας λόγω κατηγορίας οδού», $Type\ check[i]$, πραγματοποιείται ο εξής υπολογισμός:

For $I = 1$ to N

If $TYPE1[i] = 5$ then

$Type\ check[i] = 2$

Else

$Type\ check[i] = 0$

End if

Να σημειωθεί ότι “ $type\ check[i]$ ” είναι η κωδικοποίηση του ελέγχου που αποδίδει τιμές στην στήλη ελέγχου του τύπου της οδού, στο λογιστικό φύλλο του Microsoft Excel.

Σε γενική μορφή, το παραπάνω γράφεται ως:

αν $type_i = 5, type_check_i = 2$

αλλιώς, $type_check_i = 0$

(σχέση 3.14)

Το παραπάνω τμήμα ψευδοκώδικα εκτελείται πριν την έναρξη της βελτιστοποίησης και χρησιμοποιείται για να αποδώσει τιμές στους συνδέσμους που εξαιρούνται της βελτιστοποίησης, ήτοι τους πεζοδρόμους που θα έχουν εξαρχής επιτρεπτή πρόσβαση αλλά με μειωμένη ταχύτητα, προσαρμοσμένη στην ταχύτητα βαδίσματος. Στους υπόλοιπους συνδέσμους κατά την αρχικοποίηση αποδίδεται τιμή 0, δηλαδή ελεύθερη κίνηση.

Κατ’ αντιστοιχία με τους συνδέσμους που έχουν κωδικοποιηθεί ως πεζόδρομοι, μερικός περιορισμός ανατίθεται και στους συνδέσμους των οποίων η μέση κλίση υπολογίζεται μεγαλύτερη του 8%, ποσοστό το οποίο θεωρείται σημαντική κλίση, που κάποια e-scooter δυσκολεύονται να φέρουν εις πέρας χωρίς αρκετή σωματική υποβοήθηση από τον αναβάτη. Αν N ο αριθμός των συνδέσμων, πραγματοποιείται ο εξής υπολογισμός στο λογιστικό φύλλο του Excel:

For $I = 1$ to N

If $abs(slope[i]) \geq 0.08$ then

$slope\ check[i] = 2$

Else

$slope\ check[i] = 0$

End if

Ή, σε γενικότερη μορφή,

αν $abs(slope_i) \geq 0.08, slope_check_i = 2$

$$\text{αλλιώς, } slope_{check_i} = 0$$

(σχέση 3.15)

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συνάρτηση `abs()` αποδίδει την απόλυτη τιμή του περιεχομένου της παρένθεσης, ενώ η στήλη 'slope[i]' είναι η υπολογισμένη μέση κλίση του συνδέσμου `i`, και `slope check[i]` ο αντίστοιχος έλεγχος. Και σε αυτή την περίπτωση, η εκτέλεση γίνεται πριν την έναρξη της βελτιστοποίησης εξαιρώντας από αυτή τους συνδέσμους των οποίων η κλίση δεν βρίσκεται στο διάστημα τιμών `[-0.08, 0.08]`, οι οποίοι θα έχουν εξ αρχής επιτρεπτή πρόσβαση αλλά με ταχύτητα βαδίσματος. Στους υπόλοιπους συνδέσμους κατά την αρχικοποίηση αποδίδεται τιμή 0, δηλαδή ελεύθερη κίνηση.

Ο τελικός έλεγχος, και η εξίσωση που αποδίδει τιμές προς εισαγωγή κάθε φορά στον γενετικό αλγόριθμο, είναι η παρακάτω:

For I = 1 to N

If type check[i] = 2 OR slope check[i] = 2 then

CHECK3[i] = 2

Else

CHECK3[i] = 0

Σε μια γενική μορφή, το παραπάνω γράφεται:

$$\text{αν } type_{check_i} = 2, u_i = 2$$

$$\text{αν } slope_{check_i} = 2, u_i = 2$$

$$\text{αλλιώς, } u_i = 0$$

(σχέση 3.16)

Όπου `ui` στην σχέση αυτή, ταυτίζεται με το `check3[i]` του φύλλου Excel.

Οι σύνδεσμοι με τιμή 0, δηλαδή οι σύνδεσμοι που δεν είναι ούτε (σύμφωνα πάντα με την κωδικοποίηση των αρχικών δεδομένων) οδοί ήπιας κυκλοφορίας/πεζόδρομοι, ούτε η κλίση τους έχει υπολογιστεί μεγαλύτερη του 8%, είναι εκείνοι που θα τεθούν στον γενετικό αλγόριθμο, που καλείται μετέπειτα. Στην αρχικοποίηση του δικτύου είναι ελεύθεροι προς κίνηση (`ui=0`), στην συνέχεια όμως, σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, θα δέχονται τυχαίες τιμές 0 ή 1, με στόχο την τελική αριστοποίηση των κριτηρίων που έχουν τεθεί στις αντικειμενικές συναρτήσεις.

Η αρχική ανάθεση ταχύτητας βαδίσματος στους συνδέσμους, αν `N` είναι ο αριθμός τους, `CHECK3[i]` ο τελικός έλεγχος και `velocity[i]` η ταχύτητα σε km/h, πραγματοποιείται ο εξής υπολογισμός:

For I = 1 to N

If CHECK3[i] = 2 then

Velocity[i] = 6

Else

velocity[i] = 15

End if

Τέλος, η αρχική συνθήκη ανάθεσης τιμών στον χρόνο ελεύθερης ροής, βασίζεται στην θεμελιώδη εξίσωση της κινηματικής:

$$v = \frac{s}{t}$$

(σχέση 3.17)

Η οποία λύνεται ως προς t:

$$t = \frac{s}{v}$$

(σχέση 3.18)

Με δεδομένο ότι v είναι η μέση ταχύτητα διάνυσης του συνδέσμου (όπως έχει αναφερθεί πιο πάνω), s η απόσταση και t ο χρόνος.

Έτσι, με βάση τον παραπάνω τύπο,

FOR I =1 TO N

FFT[i] = length[i]/(velocity[i]/3,6)

Η διαίρεση με τον αριθμό 3,6 πραγματοποιείται καθώς η ταχύτητα είθισται να δίνεται σε km/h ως ακέραιη τιμή, αλλά επειδή οι μετρήσεις των μηκών έχουν πραγματοποιηθεί με μονάδα μέτρησης το μέτρο, πρέπει να γίνει η αντίστοιχη μετατροπή μονάδων.

Συνοψίζοντας, κατά τις αρχικές συνθήκες, οι σύνδεσμοι στους οποίους έχει ανατεθεί τιμή $u_i=2$, αποκτούν αντίστοιχα μειωμένες ταχύτητες και αντίστοιχα αυξημένους χρόνους διάνυσης, ενώ οι υπόλοιποι χαρακτηρίζονται από $u_i=0$ και επομένως τους μικρότερους δυνατούς χρόνους διάνυσης (και τις αντίστοιχες ταχύτητες).

3.2.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να γίνει αναφορά στους βασικούς αλγορίθμους που σειριακά εφαρμόζονται προκειμένου να πραγματοποιηθεί η επίλυση του προβλήματος. Για τους αλγόριθμους συντομότερης διαδρομής του Dijkstra, και την ανάθεση φόρτου με την μέθοδο «όλα ή τίποτα», στο Παράρτημα παρατίθεται ο κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Python που εκτελεί αυτές τις εργασίες.

Ο αλγόριθμος συντομότερης διαδρομής του Dijkstra

Ο Ολλανδός μαθηματικός και επιστήμονας πληροφορικής Edsger Dijkstra, το 1959, ανέπτυξε και δημοσίευσε έναν αλγόριθμο για την εύρεση συντομότερης διαδρομής από έναν κόμβο έναρξης σε έναν κόμβο τερματισμού, σε ένα γράφο με βάρη. Ο εν λόγω αλγόριθμος, που έχει μείνει γνωστός με το όνομα του, δημιουργεί ένα δέντρο συντομότερων διαδρομών από τον κόμβο έναρξης (πηγή) προς όλους τους υπόλοιπους

κόμβους του γράφου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε κατευθυνόμενους όσο και σε μη κατευθυνόμενους γράφους. Βασικός περιορισμός του μοντέλου είναι τα βάρη των ακμών να μην έχουν αρνητικές τιμές. Το τελικό αποτέλεσμα μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου, είναι ένα δέντρο συντομότερων διαδρομών από ένα συγκεκριμένο κόμβο (πηγή), μέσω της δημιουργίας ενός συνόλου κόμβων που απέχουν την ελάχιστη απόσταση από αυτήν. Ο γράφος αποτελείται από κόμβους, που συμβολίζονται με v ή u , και συνδέσμους, καθένας από τους οποίους συνδέει μεταξύ τους 2 κόμβους, και συμβολίζεται με (u,v) , ενώ με $w(u,v)$ συμβολίζεται το βάρος του συγκεκριμένου συνδέσμου. (Aby et al, 'Dijkstra's Shortest Path Algorithm')

Σε επίπεδο μοντελοποίησης του αλγορίθμου με συγκεκριμένα μεγέθη, αρχικά, γίνεται αρίθμηση των κορυφών του γράφου, δίνοντας στην πηγή τον αριθμό 1. V είναι το σύνολο των κορυφών. Επιπλέον ορίζονται τα εξής:

- μία λίστα από κόστη, τα οποία μπορεί να είναι αποστάσεις, χρόνοι ή άλλη μονάδα μέτρησης, ανάλογα με το προς επίλυση πρόβλημα. Έστω ότι η λίστα ονομάζεται $dist$, με σημείο έναρξης την πηγή και σημείο τερματισμού κάθε φορά καθέναν από τους υπόλοιπους κόμβους του γράφου. Οι αρχικές τιμές είναι $dist(s) = 0$ για την πηγή, και για κάθε κόμβο v , $dist(v) = +\infty$.
- Μία ουρά, έστω Q , όλων των κόμβων του γράφου, η οποία στην αρχή περιλαμβάνει όλους τους κόμβους εκτός της πηγής, και στο τέλος είναι άδεια.
- Ένα σύνολο, έστω S , το οποίο στην αρχική συνθήκη είναι κενό, και προσδιορίζει τους κόμβους που έχει επισκεφθεί, και επομένως εξετάσει, ο αλγόριθμος. Στο τέλος της εκτέλεσης το σύνολο S θα περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου.

(Aby et al, 'Dijkstra's Shortest Path Algorithm')

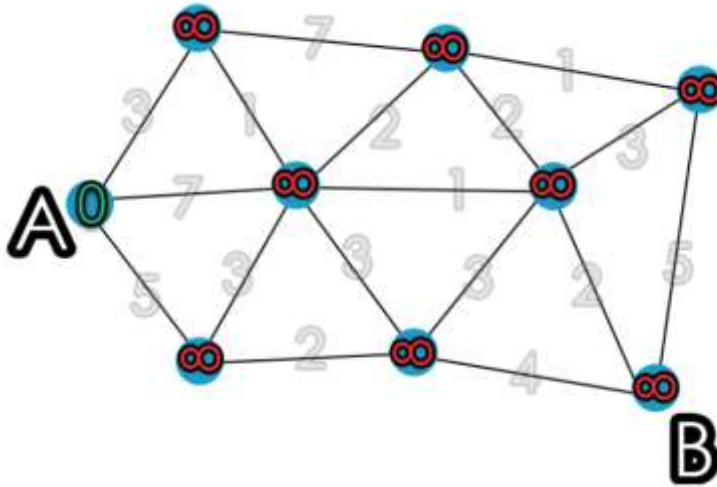
Τα βασικά βήματα του αλγορίθμου, είναι:

- 1) Όσο η ουρά Q δεν είναι κενή, αφάιρεσε από αυτήν τον κόμβο v , ο οποίος έχει τη μικρότερη απόσταση $dist(v)$, και δεν βρίσκεται στο σύνολο S , δηλαδή δεν έχει ελεγχθεί ακόμα. Στην αρχή θα επιλεγεί, προφανώς, η πηγή s , η οποία απέχει από τον εαυτό της απόσταση ίση με $dist(s)=0$.
- 2) Πρόσθεσε τον κόμβο v στο σύνολο S , καθώς πλέον έχει ελεγχθεί
- 3) Για κάθε κόμβο v , ακολούθησε την εξής διαδικασία για να ανανεώσεις τις τιμές των αποστάσεων $dist(u)$ κάθε κόμβου που συνδέεται με τον v :
Έλεγχξε αν $dist(v)+w(u,v)<dist(u)$, δηλαδή αν βρέθηκε μικρότερη ελάχιστη απόσταση για τον κόμβο u , και αν ναι, ενημέρωσε την τιμή με την νέα, μικρότερη. (Αν όχι, δεν αλλάζει η τιμή της απόστασης).

(Aby et al, 'Dijkstra's Shortest Path Algorithm')

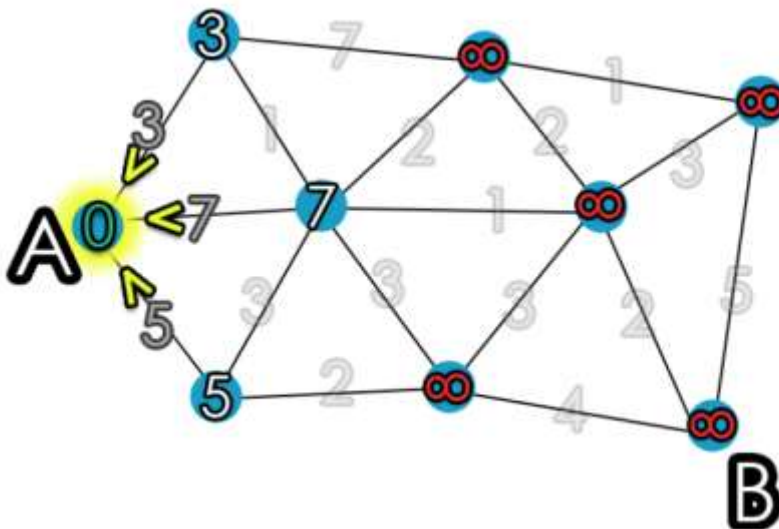
Όταν θα έχει αδειάσει το σύνολο S , όταν δηλαδή θα έχει γίνει επίσκεψη σε όλους τους κόμβους, θα έχει υπολογιστεί το δέντρο συντομότερων μονοπατιών από την πηγή s προς οποιοδήποτε κόμβο του δικτύου. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί, θεωρώντας ως πηγή κάθε φορά διαφορετικό κόμβο, επομένως αν εξεταστούν όλοι οι κόμβοι ενός δικτύου ως πηγές, θα έχουν υπολογιστεί όλες οι πιθανές συντομότερες διαδρομές. (Aby et al, 'Dijkstra's Shortest Path Algorithm')

Οι παρακάτω εικόνες (3.3 έως 3.6) δείχνουν με ανάγλυφο τρόπο την εφαρμογή βήμα προς βήμα του αλγορίθμου σε έναν γράφο.

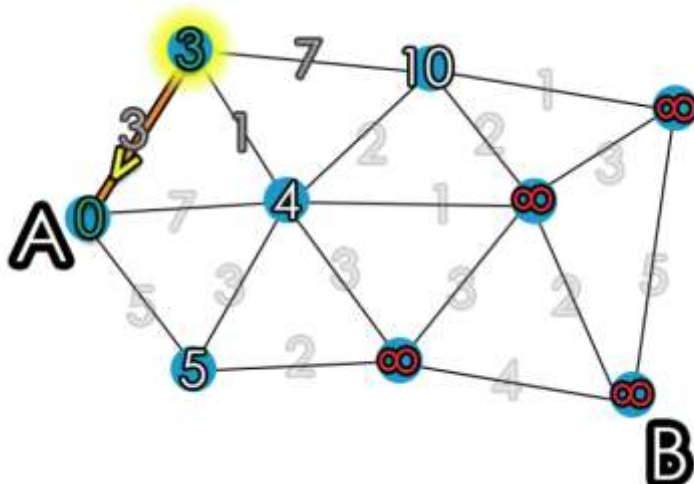


Εικόνα 3.3: Αλγόριθμος Dijkstra (1)

Οι τιμές στις ακμές του γράφου είναι οι γεωγραφικές αποστάσεις μεταξύ των κόμβων, ενώ οι τιμές 0 και ∞ στους κόμβους έχουν αποδοθεί όπως ορίζει η αρχικοποίηση του αλγορίθμου Dijkstra. Ο κόμβος-πηγή είναι ο A.



Εικόνα 3.4: Αλγόριθμος Dijkstra (2)



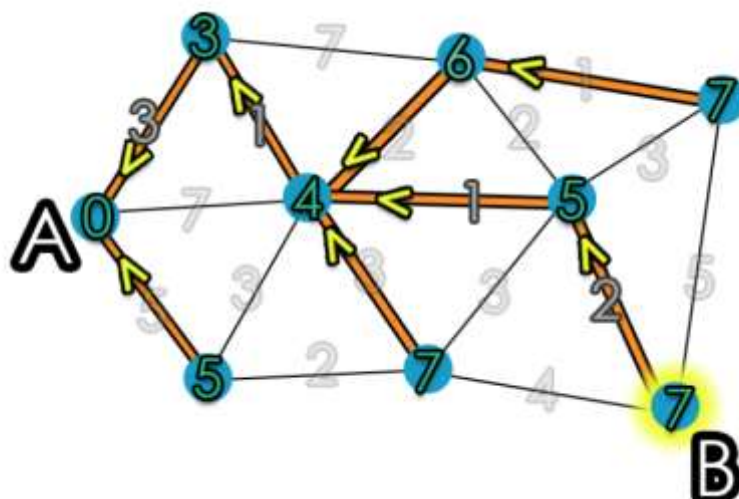
Εικόνα 3.5: Αλγόριθμος Dijkstra (3)

Έχοντας το σημείο A ως αφετηρία, συγκρίνονται οι τιμές 3, 7 και 5, δηλαδή οι αποστάσεις των 3 σημείων που συνδέονται άμεσα με το A, και επιλέγεται η μικρότερη από αυτές. Εφόσον $3 < 5 < 7$, ο κόμβος που απέχει 3 από το A επιλέγεται για να αποτελέσει τον δεύτερο κόμβο του μονοπατιού. Επιπλέον, ο κόμβος αυτός πλέον σημειώνεται με μόνιμη τιμή «3».

Στη συνέχεια ο αλγόριθμος βρίσκεται πλέον στον κόμβο «3», και συγκρίνει τις τιμές 1 και 7. Εφόσον $1 < 7$, θα επιλεγεί ο κόμβος που απέχει απόσταση 1 από τον κόμβο «3», και θα ενταχθεί κι αυτός στο συντομότερο μονοπάτι. Η απόσταση προστίθεται κάθε φορά στην ήδη υπάρχουσα, καθώς η μέτρηση γίνεται από την πηγή, επομένως $3+1=4$ και άρα ο κόμβος αυτός αποκτά μόνιμη τιμή «4», και θα είναι η επόμενη αφετηρία σύγκρισης.

Κατά πλήρως αντίστοιχο τρόπο, το σημείο αυτό συνδέεται με 4 κόμβους που δεν έχουν ελεγχθεί ως τώρα, και απέχει από αυτούς αποστάσεις 2, 1, 3 και 3. Η τιμή 1 είναι η μικρότερη από αυτές ($1 < 2 < 3 = 3$), και επομένως ο κόμβος που απέχει από τον «4» απόσταση 1 θα συμπεριληφθεί στο συντομότερο μονοπάτι και θα πάρει την τιμή «5», εφόσον $4+1=5$ είναι η απόσταση του από την πηγή.

Η διαδικασία αυτή θα συνεχιστεί μέχρις ότου ελεγχθούν όλοι οι κόμβοι με τον ίδιο τρόπο, και θα βρεθεί το δέντρο συντομότερων διαδρομών από την πηγή A προς το υπόλοιπο δίκτυο.



Εικόνα 3.6: Αλγόριθμος Dijkstra (4)

Ανάθεση φόρτων «όλα ή τίποτα»

Στην βασική της μορφή, η ανάθεση «όλα ή τίποτα» αναφέρεται και σαν «ανάθεση 0-1», εφόσον αν ένας σύνδεσμος αποτελεί μέρος της συντομότερης διαδρομής, ανατίθεται σε αυτόν όλος ο φόρτος που επιδιώκει να διασχίσει την διαδρομή, ενώ αν όχι, του ανατίθεται μηδενικός φόρτος. Έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1) Δεν λαμβάνει υπόψη του την επίδραση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι ο χρόνος διάνυσης σε όλα τα μονοπάτια είναι σταθερός και δεν μεταβάλλεται με την ύπαρξη φόρτου στον εκάστοτε σύνδεσμο
- 2) Θεωρεί ότι όλοι οι οδηγοί στο ίδιο ζεύγος OD (Προέλευσης-προορισμού) επιλέγουν την ίδια διαδρομή, αφού την θεωρούν ως συντομότερη.

Συνεπώς, το μόνο που χρειάζεται για την απλή «όλα ή τίποτα» ανάθεση φόρτου, είναι η χρήση ενός αλγορίθμου εύρεσης συντομότερης διαδρομής, όπως ο αλγόριθμος του Dijkstra που περιγράφεται παραπάνω, και η μετέπειτα ανάθεση των φόρτων όλων των ζευγών OD στο αντίστοιχο συντομότερο μονοπάτι. Ουσιαστικά, για κάθε OD υπολογίζεται από τον αλγόριθμο Dijkstra το συντομότερο μονοπάτι για το συγκεκριμένο ζεύγος Προέλευσης-Προορισμού, και ανατίθεται σε αυτό όλη η ζήτηση.

(Hui, 2014)

3.2.3: ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΕΥΡΕΣΗ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΠΡΟΣ ΠΕΡΙΦΡΑΞΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΕΚΤΕΛΕΣΗ

Αφού τεθούν οι τιμές αρχικοποίησης, σειρά έχει η εκτέλεση της βελτιστοποίησης. Αρχικά, για τους συνδέσμους που δεν έχουν αποκτήσει από την διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω, τιμές ελέγχου ίσες με 2, εισάγονται τυχαίες τιμές μέσω μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών, κατά την πρώτη επανάληψη. Η συγκεκριμένη γεννήτρια επιλέγεται να γεννά τυχαίους ακεραίους αριθμούς στο διάστημα 0, 1, δηλαδή μόνο

τιμές 0 ή 1. Επομένως, πλέον, για κάθε σύνδεσμο του δικτύου υπάρχει μία τιμή 1, 0 ή 2. Οι σύνδεσμοι με τιμές 1 ή 0 είναι εκείνοι που τίθενται προς βελτιστοποίηση, ενώ εκείνοι με τιμές 2 είναι σταθεροί στα στοιχεία τους καθ' όλη τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας. Δεν είναι ποτέ υποψήφιοι προς καθολική περιφραξη ούτε επιτρέπεται να αφεθούν χωρίς περιφραξη.

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των ταχυτήτων, που θα οδηγήσει στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης 1. Πιο αναλυτικά, με δεδομένες τις τιμές 0, 1 ή 2, συμβαίνει το εξής:

$$velocity_i = 15, \text{ αν } u_i = 0$$

$$velocity_i = 0, \text{ αν } u_i = 1$$

$$velocity_i = 6, \text{ αν } u_i = 2$$

(σχέση 3.19)

Και με τις ταχύτητες υπολογισμένες για κάθε σύνδεσμο του δικτύου, μπορεί απευθείας να υπολογιστεί ο χρόνος ελεύθερης ροής για κάθε σύνδεσμο (που εξαρτάται από την τιμή ελέγχου του):

$$t'_i = \frac{l_i}{v_i}, \text{ αν } (u_i = 0) \text{ ή } (u_i = 2)$$

$$t'_i = 10000000, \text{ αν } u_i = 1$$

(σχέση 3.20)

Η τιμή 10000000 δίνεται στους συνδέσμους που έχουν επιλεγεί προς αποκλεισμό στην παρούσα επανάληψη. Πρακτικά, αν προσπαθήσει κανείς να χρησιμοποιήσει την θεμελιώδη εξίσωση της κινηματικής, με δεδομένη την μηδενική ταχύτητα, προκύπτει κλάσμα που στα υπολογιστικά εργαλεία όπως το Microsoft Excel, ή οι γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιούνται, δεν μπορεί να υπολογιστεί, εμφανίζοντας μηνύματα λάθους. Μαθηματικά, ωστόσο, ένα κλάσμα του οποίου ο παρονομαστής είναι 0, τείνει στο άπειρο. Επομένως επιλέγεται να δοθεί μία πολύ μεγάλη τιμή, η οποία είναι υπερ-πολλαπλάσια των αντίστοιχων τιμών που προκύπτουν από την διαίρεση μήκους προς ταχύτητα.

Μετά την εκτέλεση όλων των παραπάνω βημάτων, σε κάθε σύνδεσμο έχει ανατεθεί μία τιμή u_i και μία τιμή t'_i . Επόμενο βήμα είναι να κληθεί ο κώδικας που έχει συνταχθεί σε γλώσσα Python, και αναθέτει τους φόρτους στις συντομότερες διαδρομές μέσω της μεθόδου ανάθεσης «όλα ή τίποτα».

Ο αλγόριθμος Dijkstra, για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής, χρησιμοποιεί ως κόστος κάθε συνδέσμου τον χρόνο διάνυσης του. Συνεπώς, για το τρέχον δίκτυο υπάρχουν όλα τα στοιχεία που οδηγούν στην εύρεση των συντομότερων μονοπατιών, από κάθε κόμβο προς κάθε κόμβο. Τα τμήματα που αποτελούν τα συντομότερα μονοπάτια βρίσκονται, αποθηκεύονται, και σε αυτά ανατίθενται οι φόρτοι του δικτύου, αν προκύπτει τέτοια ανάγκη.

Ωστόσο, παρόλο που χρησιμοποιείται πλασματικά μεγάλος χρόνος ροής για τους συνδέσμους που δεν επιλέγονται, υπάρχει πιθανότητα να επιλεγούν σε αρχικό επίπεδο, καθώς παρά την μεγάλη τιμή τους, συνεχίζουν να αποτελούν μέρος της συντομότερης διαδρομής. Προκειμένου να διορθωθεί αυτός ο παράγοντας, εκτός από τις τιμές t'_i , έχουν αποθηκευτεί οι τιμές t_i , οι οποίες δίνουν τον χρόνο διάνυσης με γνώμονα μόνο την ταχύτητα. Πρόκειται ουσιαστικά για τις τιμές των συνδέσμων, αν δεν υπήρχε το σενάριο της πλήρους περιφραξής τους.

$$t_i = \frac{l_i}{v_i}, \text{ για κάθε } i \text{ του δικτύου}$$

(σχέση 3.21)

Με δεδομένο ότι κάποιος σύνδεσμος, παρά το μεγάλο κόστος που προσθέτει στο δίκτυο, επιλέγεται, συνάγεται το συμπέρασμα ότι είναι απαραίτητος για το δίκτυο και επομένως, παρά την αρχική απαγόρευση, δεν έχει νόημα η περιφραξη του. Συνεπώς, αρχικά, του ανατίθεται η τιμή t'_i αντί της t_i , δηλαδή του ανατίθεται ο χρόνος διάνυσης που θα είχε αν δεν επιλεγεί προς περιφραξη, και ταυτόχρονα, αίρεται η περιφραξη του και πλέον θεωρείται ελεύθερος προς χρήση ($u_i=0$), κατ' εξαίρεση.

Με άλλα λόγια:

$$(t'_i = t_i) \text{ και } (u_i = 0) \text{ αν } t_i = 100000000 \text{ και } f_i^{rs} > 0$$

(σχέση 3.22)

Με αυτά τα στοιχεία, υπολογίζεται το τελικό άθροισμα των περιφραγμένων συνδέσμων

$$\sum_{i=1}^m l_i * u_i$$

Όπως αναφέρεται και στο κεφ. 3.1, για τους συνδέσμους που εισάγονται στην βελτιστοποίηση (m τον αριθμό), και το κόστος του δικτύου με τους διορθωμένους χρόνους t_i .

$$\sum_{i=1}^a v_i * t_i$$

Για όλους τους συνδέσμους του δικτύου, καθώς είναι πιθανό να έχουν ανατεθεί φόρτοι και σε συνδέσμους που δεν έχουν εισαχθεί στην βελτιστοποίηση.

Η διαδικασία που περιγράφεται στο παρόν υποκεφάλαιο ως αυτό το σημείο, επαναλαμβάνεται για έναν αριθμό επαναλήψεων του γενετικού αλγορίθμου που επιλέγεται από τον μελετητή ως κατάλληλος για εξαγωγή συμπερασμάτων. Η μόνη διαφορά από την 2^η επανάληψη κι έπειτα, είναι ότι οι τιμές 0,1 δεν παράγονται τυχαία, αλλά μέσω του γενετικού αλγορίθμου. Κι ο γενετικός αλγόριθμος ωστόσο χρησιμοποιεί γεννήτρια τυχαίων αριθμών, και συγκεκριμένα την Mersenne Twister. Σε κάθε εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου δι-κριτηριακής βελτιστοποίησης, παράγονται λύσεις που έχουν σκοπό την ικανοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων που έχουν τεθεί.

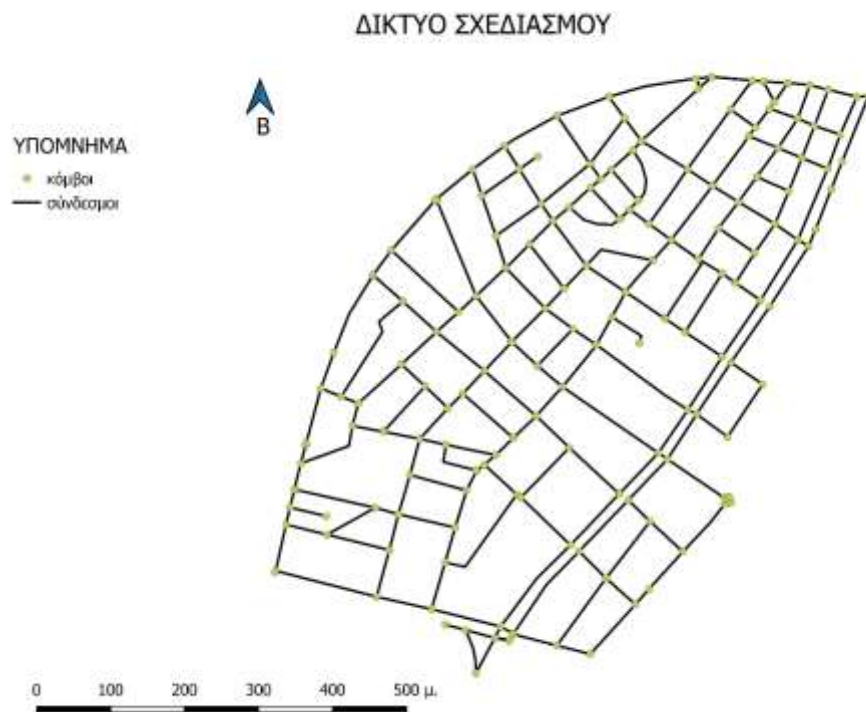
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογή του μοντέλου και ανάλυση των αποτελεσμάτων

4.1: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – CASE STUDY

Στο παράδειγμα με το οποίο έγινε η προσπάθεια μοντελοποίησης, λήφθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία για το αστικό οδικό δίκτυο της Αθήνας, και συγκεκριμένα για την περιοχή των Αμπελοκήπων. Το αστικό δίκτυο περιλαμβάνει 244 οδούς διπλής κατεύθυνσης, συνεπώς 488 συνδέσμους.

4.1.1: ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΥΤΩΝ ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ (Q)GIS

Η ψηφιοποίηση, η αποκοπή από τα αρχικά δεδομένα, ο συνδυασμός των διαφορετικών κατηγοριών δεδομένων, και η εν τέλει μοντελοποίηση τους σε γραφική μορφή, εκπονήθηκαν στο πρόγραμμα QGIS, ένα λογισμικό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, ανοιχτού κώδικα. Στο εν λόγω λογισμικό χρησιμοποιούνται, ψηφιοποιούνται και αναλύονται δεδομένα διανυσματικής (vector) μορφής, ψηφιδωτής (raster) μορφής, και άλλα. Διαχειρίζεται γεωγραφικές βάσεις δεδομένων, επιτρέπει στον χρήστη να τις επεξεργαστεί, να δημιουργήσει δικές του, να προχωρήσει σε χαρτογραφικές απεικονίσεις και σύνθεση χαρτών. Το αρχικό οδικό δίκτυο αναφοράς, πριν την οποιαδήποτε παρέμβαση, είναι το εξής:



Χάρτης 4.1: αστικό οδικό δίκτυο σχεδιασμού

Έπειτα από την συλλογή στοιχείων, σειρά είχε η επεξεργασία αυτών, χρησιμοποιώντας λειτουργίες του λογισμικού QGIS. Προκειμένου από τα αρχικά δεδομένα, για όλο τον δήμο Αθηναίων, να οδηγηθούμε, για λόγους εκπαιδευτικούς, στα όρια μιας γειτονιάς

όπως οι Αμπελόκηποι, χρησιμοποιήθηκαν πολλές φορές εργαλεία γεωμετρικής φύσεως, τα οποία εφαρμόζονται σε διανυσματικά αρχεία, όπως ήταν στην περίπτωση της εργασίας οι σύνδεσμοι του δικτύου, με τα αντίστοιχα στοιχεία τους. Μέσω της αποκοπής, της τομής, της αφαίρεσης και άλλων γεωμετρικών εργαλείων, από την βάση δεδομένων που περιλάμβανε οδούς όλου του Δήμου Αθηναίων, το τελικό δίκτυο αποτελείται από 244 οδούς.

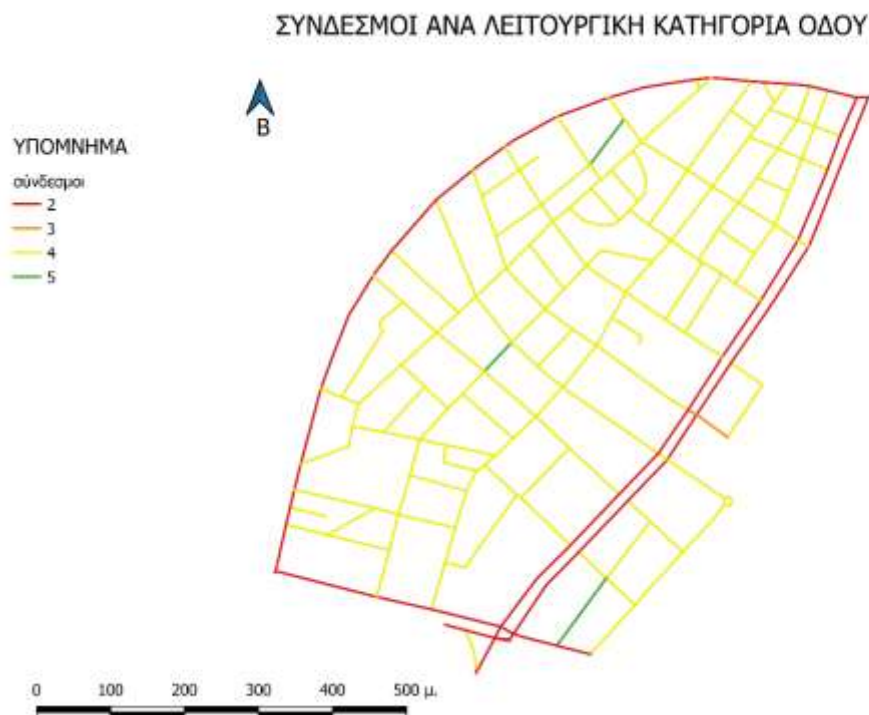
Εν συνεχεία, και προκειμένου να αναγνωριστούν ως ξεχωριστή οντότητα οι κόμβοι, χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία τομής, εγγύτητας και άλλα, ενώ για να γίνει εφικτή η αντιστοίχιση των συνδέσμων με τους κόμβους αρχής και πέρατος τους, έγινε χρήση εργαλείων βάσεων δεδομένων και συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η χωρική ένωση (spatial join). Πρόκειται για διαδικασία που εκτελείται σε λογισμικά GIS, και εναποθέτει δεδομένα από τον πίνακα ιδιοτήτων ενός διανυσματικού επιπέδου, σε ένα άλλο, συγκρίνοντας τις χωρικές τιμές τους, δηλαδή τις συντεταγμένες τους. Η χωρική ένωση μπορεί να είναι είτε της μορφής «ένα προς ένα» (η τελική χωρική βάση δεδομένων θα έχει ίδιο αριθμό γραμμών με την αρχική), είτε «ένα προς πολλά» (δεν γίνεται καμία ομαδοποίηση σε κοντινά δεδομένα, χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχει περιορισμός).

Σε ό,τι αφορά τα υψόμετρα και τις κλίσεις, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα αρχικά δεδομένα δεν περιείχαν στοιχεία τέτοιου τύπου. Συνεπώς, χρησιμοποιήθηκε ένα ψηφιδωτό αρχείο, με στοιχεία υψομέτρου για κάθε εικονοστοιχείο του, και με βάση αυτό, έγινε εφικτή η ανάθεση τιμών υψομέτρου σε κάθε κόμβο του δικτύου. Για να συμβεί αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής από το αντίστοιχο πρόσθετο (add-in) του λογισμικού. Έχοντας τα υψόμετρα, και γνωρίζοντας τα μήκη των συνδέσμων, υπολογίστηκε η μέση κλίση για κάθε σύνδεσμο. Στο χάρτη που ακολουθεί απεικονίζεται το οδικό δίκτυο της περιοχής μελέτης ταξινομημένο με βάση την μέση κλίση κάθε συνδέσμου. Το βασικό όριο για μερική φραγή συνδέσμων τίθεται στο 8 τοις εκατό, δηλαδή στους συνδέσμους με κόκκινο χρώμα, ενώ σε μία εκ των περιπτώσεων της ανάλυσης ευαισθησίας το όριο αυτό τίθεται χαμηλότερα, στην τάξη του 6 τοις εκατό και επομένως στους συνδέσμους που απεικονίζονται με κόκκινο και κίτρινο χρώμα. Ο χάρτης επομένως που παρατίθεται βοηθά τον μελετητή να έχει μια αρχική εικόνα των περιορισμών του δικτύου και των συνδέσμων που δεν εισέρχονται στην βελτιστοποίηση, και θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στα συμπεράσματα της εργασίας, συνδυαστικά με τους παραγόμενους χάρτες λύσεων.



Χάρτης 4.2: οι σύνδεσμοι του δικτύου ταξινομημένοι ανά κλίση (ποσοστιαία). Με κίτρινο και κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι οδοί με κλίση άνω του 6% και άνω του 8% αντίστοιχα.

Μία επιπλέον σημαντική ταξινόμηση πραγματοποιείται και σε σχέση με τον λειτουργικό τύπο κάθε συνδέσμου. Οι (λειτουργικές) κατηγορίες οδών αναφέρονται στο κεφάλαιο 3 παραπάνω, και όπως γίνεται εμφανές από την εικόνα, η μεγαλύτερη πλειοψηφία των οδών στην περιοχή είναι κατηγορίας 4, λογίζονται ως τοπικές οδοί δηλαδή, ενώ μόλις ένας σύνδεσμος έχει καταγραφεί στα αρχικά δεδομένα ως συλλεκτήρια οδός. Συχνά δεν είναι ξεκάθαρη η πρακτική ταξινόμηση μεταξύ συλλεκτηρίων και τοπικών οδών, ειδικά αν δεν υπάρχουν στοιχεία φόρτου οχημάτων, κι έτσι πολλές πηγές δεδομένων τείνουν να αναφέρουν ορισμένες συλλεκτήριες οδούς ως τοπικές. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα εργασία δεν διαδραματίζει ρόλο η συγκεκριμένη αμφιβολία που υπάρχει στα αρχικά δεδομένα, αφού σε κάθε ένα από τα πειράματα που εκτελούνται, οι οδοί κατηγορίας 3 και 4 (συλλεκτήριες και τοπικές), έχουν την ίδια αντιμετώπιση από τον αλγόριθμο και είναι εξίσου πιθανό να επιλεγούν βάσει τύπου οδού. Η επιλογή τους σε κάθε πιθανή λύση έγκειται στην κλίση, το μήκος, την ζήτηση που αναμένεται να έχουν, και το πλήθος των εναλλακτικών που υπάρχουν έναντι αυτών στο δίκτυο. Στον παρακάτω χάρτη φαίνονται οι οδοί ταξινομημένες ως προς την λειτουργική κατηγορία τους. Ο συγκεκριμένος χάρτης είναι σημαντικός για την ανάλυση του δικτύου καθώς, αφενός, σε όλες τις εκτελέσεις του πειράματος, οι πεζόδρομοι (κατηγορία 5 και πράσινο χρώμα στον χάρτη) έχουν περιορισμό ταχυτήτων και μερική γεωγραφική περίφραξη, και αφετέρου, σε μία εκ των περιπτώσεων μελέτης της ανάλυσης ευαισθησίας του αλγορίθμου, οι σύνδεσμοι κατηγορίας 2 δέχονται ποινή υπο-τριπλασιασμού της ταχύτητας τους, η οποία λειτουργεί σαν εικονική γεωγραφική περίφραξη, με το σκεπτικό της μείωσης της πιθανότητας επιλογής τους.



Χάρτης 4.3: Οι σύνδεσμοι του δικτύου ταξινομημένοι ανά κατηγορία οδού. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι κεντρικές αρτηρίες και με πράσινο οι πεζόδρομοι.

Με όλα τα παραπάνω δεδομένα, δημιουργήθηκε ο αρχικός χάρτης που παρατίθεται παραπάνω, και από τους πίνακες ιδιοτήτων (attribute tables) των διανυσματικών στοιχείων του λογισμικού QGIS γίνεται μετάβαση σε λογιστικά φύλλα του Microsoft Excel, όπου πραγματοποιείται η συνέχεια της επεξεργασίας.

4.1.2: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ MICROSOFT EXCEL

Έπειτα από την εισαγωγή των στοιχείων, και την κατάλληλη επεξεργασία τους, προστίθενται τα αρχικά κριτήρια εικονικής φραγής, που αναλύθηκαν παραπάνω. Οι σύνδεσμοι που ικανοποιούν τα κριτήρια κλίσης και τύπου οδού, εξάγονται από το μοντέλο, καθώς τίθεται σε αυτούς μερική φραγή (δεν θεωρούνται φραγμένοι, αλλά τα πατίνια κινούνται σε αυτούς με μικρότερη ταχύτητα). Ο στόχος που τίθεται είναι να επιλεγούν οι σύνδεσμοι εκείνοι των οποίων η ζήτηση μπορεί να μηδενιστεί, με τα πατίνια να μπορούν να δρομολογηθούν στην αμέσως επόμενη συντομότερη διαδρομή, με βάση, αφενός, το μήκος αυτών να είναι το μεγαλύτερο δυνατό, για λόγους ασφαλείας, και αφετέρου, οι οχηματοώρες διάνυσης του δικτύου να είναι κατά το δυνατόν οι ελάχιστες.

4.1.3: ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΟΥ MICROSOFT EXCEL ΜΕ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ΤΗΣ PYTHON

Για τον υπολογισμό κάθε φορά του συνολικού κόστους του δικτύου, που είναι η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση, που αντικρούει την πρώτη, υλοποιείται ο αλγόριθμος Dijkstra, που υπολογίζει για δεδομένο δίκτυο την συντομότερη διαδρομή,

και αναθέτει τους φόρτους στις συντομότερες διαδρομές με τη χρήση του αλγορίθμου ανάθεσης «όλα ή τίποτα». Τα παραπάνω αναπαρίστανται στον επεξεργαστή PyCharm της γλώσσας προγραμματισμού Python. Πρόκειται για γλώσσα προγραμματισμού, υψηλού επιπέδου και γενικής χρήσης, η οποία το έτος 1989 έκανε επίσημα την εμφάνιση της σε ευρέως διαδεδομένα προβλήματα, καθώς χρησιμοποιήθηκε από τον Guido van Rossum. Το βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι είναι πολύ υψηλού επιπέδου, με κατανοητό τρόπο δόμησης και διάταξης, και επομένως μπορεί να γραφεί και να υποστεί επεξεργασία από κάποιον που δεν γνωρίζει εις βάθος την λειτουργία ενός υπολογιστή, ενώ μπορεί αντιστοίχως να γίνει εύκολα κατανοητή από κάποιον που δεν γνωρίζει σε βάθος προγραμματιστικές τεχνικές. Είναι συντομότερη από άλλες ανταγωνιστικές της γλώσσες προγραμματισμού, όπως η C, η C++ και η Java. Στο παράρτημα της συγκεκριμένης εργασίας, παρατίθεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε και γράφτηκε σε αυτή τη γλώσσα. (Wikipedia, 'Python programming language')

4.1.4: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ XL OPTIMIZER

Τα στοιχεία που αναλύθηκαν στις παραπάνω παραγράφους, εισάγονται με κατάλληλο τρόπο στο πρόσθετο XL optimizer, το οποίο λειτουργεί ως πρόσθετο στο Microsoft Excel. Το πρόσθετο αυτό πρόγραμμα, προκειμένου να προχωρήσει σε βελτιστοποίηση, ζητά τα ακόλουθα στοιχεία:

Objectives (αντικειμενικές συναρτήσεις): Σ(περιφραγμένου μήκους), με παράμετρο MAXIMIZE και Σ(φόρτος*χρόνος διάνυσης), με παράμετρο MINIMIZE.

Variables (μεταβλητές σχεδιασμού): οι τιμές του ελέγχου check3, ήτοι 0, 1, ή 2, για μη φραγή, ολική φραγή και μερική φραγή αντίστοιχα. Στο μοντέλο τίθενται μόνο οι σύνδεσμοι που δεν έχουν αρχική τιμή «2», καθώς δεν επιθυμούμε να αλλάξει η ντετερμινιστική απόφαση που αφορά τον περιορισμό της ταχύτητας τους.

Constraints (περιορισμοί): δεν τίθεται κάποιος μη ντετερμινιστικός περιορισμός, στο αρχικό τουλάχιστον σενάριο. Οι ντετερμινιστικού τύπου περιορισμοί έχουν εφαρμοστεί πριν την βελτιστοποίηση, και συνεπώς επηρεάζουν το αρχικό δίκτυο ή στοιχεία αυτού, δεν προσθέτουν μαθηματικό περιορισμό στον γενετικό αλγόριθμο.

Scenario (σενάριο): επιλέχθηκε ο αλγόριθμος πολύ-κριτηριακής βελτιστοποίησης, NSGA-III, με τη χρήση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών Mersenne Twister. Εδώ καθορίζεται επιπλέον το ότι πρώτο βήμα αποτελούν οι πράξεις στο λογιστικό φύλλο του Microsoft Excel, έχοντας δοθεί τιμές στις μεταβλητές σχεδιασμού, και στην συνέχεια, με βάση αυτές τις τιμές, γίνεται επανακαθορισμός των χρόνων διάνυσης και επομένως επανακαθορισμός του συνολικού κόστους του δικτύου.

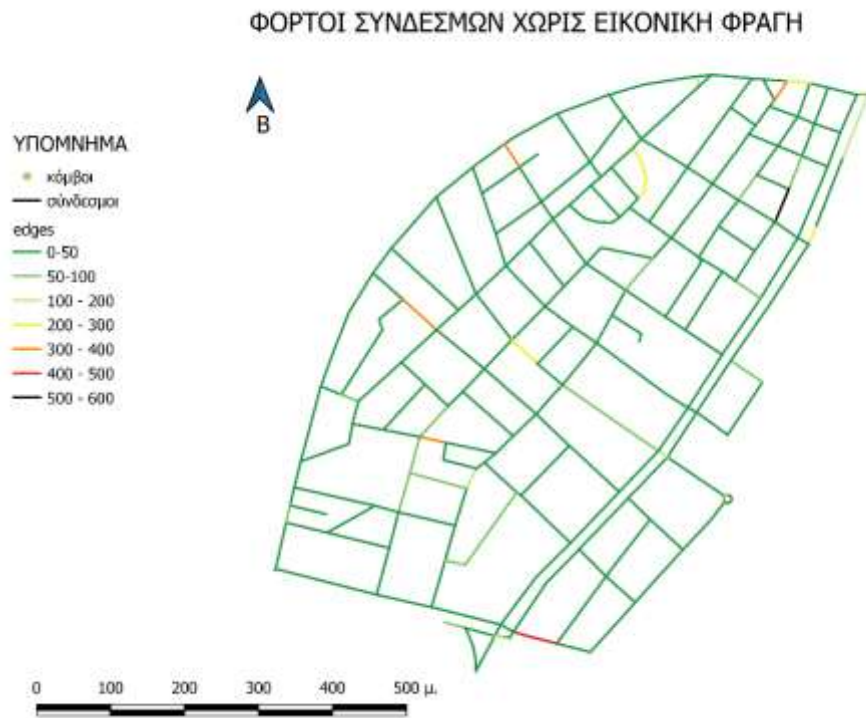
Execution (εκτέλεση): καθορίζονται τα βήματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Στο πρώτο στάδιο εκτελείται ο υπολογισμός στο λογιστικό φύλλο του Excel, που αναθέτει τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση που αφορά το μήκος των φραγμένων συνδέσμων. Αμέσως μετά καλείται η μακροεντολή, που συντάχθηκε σε γλώσσα Visual Basic (VBA) στον επεξεργαστή μακροεντολών στο Excel, η οποία με τη σειρά της καλεί τον

κώδικα και αναθέτει συγκεκριμένη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση που αφορά το κόστος δικτύου. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε επανάληψη του γενετικού αλγορίθμου, και δίνει διαφορετικά ζεύγη τιμών (objective1, objective2) κάθε φορά.

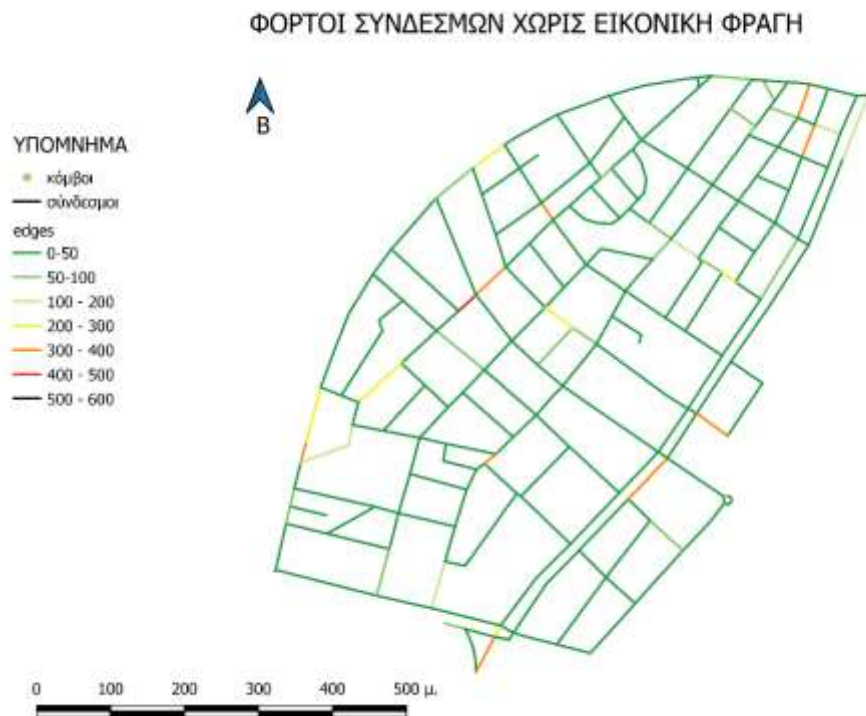
4.2: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.2.1: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΧΩΡΙΣ ΦΡΑΓΜΕΝΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ

Με βάση τα δεδομένα ζήτησης που παράχθηκαν, που ανταποκρίνονται σε στοιχεία ζήτησης της περιοχής στην οποία εφαρμόστηκε το μοντέλο, επιλέχθηκε αρχικά η εκτέλεση μόνο του κώδικα. Το δίκτυο δεν δέχεται κανέναν περιορισμό σε αρχικό επίπεδο και κανένας σύνδεσμος του δεν δέχεται περίφραξη. Υλοποιείται ο αλγόριθμος Dijkstra σε συνδυασμό με την ανάθεση φόρτου στους συνδέσμους που ανήκουν στις συντομότερες διαδρομές. Σε αυτή την περίπτωση, μελετάται μόνο η αντικειμενική συνάρτηση που αφορά την ελαχιστοποίηση κόστους δικτύου (objective2), με δεδομένη τιμή 0 στην objective 1, εάν δηλαδή δεν απαγορευτεί η κυκλοφορία σε κανένα σύνδεσμο του δικτύου, παρά μόνο ντετερμινιστικά θεωρηθεί μειωμένη ταχύτητα (μερική περίφραξη, όπως έχει οριστεί πιο πάνω) σε συγκεκριμένους συνδέσμους. Η συγκεκριμένη εκτέλεση βρίσκει τους συνδέσμους που οδηγούν το δίκτυο σε ελάχιστο κόστος υπό μορφή οχηματοωρών, με δεδομένα μειωμένη ταχύτητα σε συγκεκριμένους συνδέσμους, ο αριθμός των οποίων δεν αλλάζει δυναμικά. Επειδή η πολύ-αντικειμενική βελτιστοποίηση (βλέπε κεφάλαιο 4.2.2) εκτελείται για λόγους αποφυγής μεγάλης υπολογιστικής πολυπλοκότητας σε 452 από τους 486 συνδέσμους του δικτύου, οι 36 «περιορισμένοι» θεωρούνται δεδομένοι και στην αρχική εκτέλεση.



Χάρτης 4.4: με μαύρο, κόκκινο και πορτοκαλί κατά σειρά χρώμα οι σύνδεσμοι από τους οποίους διέρχεται ο περισσότερος φόρτος ηλεκτροκίνητων πατινιών, στην αρχική περίπτωση όπου δεν υπάρχουν πλήρως φραγμένοι σύνδεσμοι στο δίκτυο.



Χάρτης 4.5: με μαύρο, κόκκινο και πορτοκαλί κατά σειρά χρώμα οι σύνδεσμοι από τους οποίους διέρχεται ο περισσότερος φόρτος ηλεκτροκίνητων πατινιών, στην αρχική περίπτωση όπου δεν υπάρχουν πλήρως φραγμένοι σύνδεσμοι στο δίκτυο.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με δεδομένη την τιμή 0 για την αντικειμενική συνάρτηση 1, και με δεδομένη ζήτηση, είναι μοναδική η λύση του προβλήματος και η κατανομή της ζήτησης της είναι αυτή που δείχνεται στους παραπάνω χάρτες. Είναι προφανές ότι όλοι οι σύνδεσμοι είναι ελεύθεροι και στις 2 κατευθύνσεις τους, ενώ και εκείνοι που είναι περιορισμένοι στην ταχύτητα τους, επιτρέπουν την πρόσβαση χωρίς περιορισμού. Συνεπώς, κάθε σημείο του δικτύου μπορεί να προσεγγιστεί. Η τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση 2 είναι 39,8 οχηματοώρες, και είναι η βέλτιστη δυνατή που θα συναντήσει κανείς για το συγκεκριμένο δίκτυο, με το συγκεκριμένο αριθμό συνδέσμων και κόμβων, τα συγκεκριμένα μήκη, κλίσεις και τύπους οδών και τις συγκεκριμένες ζητήσεις.

Εξετάζοντας τους χάρτες 4.4 και 4.5, που δείχνουν την κατανομή των φόρτων, παρατηρούνται υψηλές τιμές ζήτησης (άνω των 300 πατινιών) σε συνδέσμους στο ΒΑ τμήμα της περιοχής μελέτης, κάτι το οποίο μπορεί να δικαιολογηθεί με δεδομένο ότι οι κόμβοι σε εκείνο το τμήμα της περιοχής παρουσιάζουν αυξημένη ζήτηση και αποτελούν προορισμό αρκετών διαδρομών. Υπό την θεώρηση του πραγματικού δικτύου, πρόκειται για οδούς που οδηγούν κάποιον που θέλει να επισκεφθεί το κέντρο γειτονιάς της περιοχής των Αμπελοκήπων, προς την οδό Πανόρμου, επί της οποίας βρίσκονται πολλά καταστήματα, γραφεία, χώροι εστίασης, και άλλες χρήσεις πέρα από την κατοικία. Επιπρόσθετα, σημαντική ζήτηση παρατηρείται στο κεντρικό και δυτικό τμήμα της περιοχής, με τις οδούς που οδηγούν προς τα Β-ΒΑ να προτιμώνται από τα πατίνια. Το φαινόμενο είναι λογικό καθώς πράγματι είναι οι συντομότερες διαδρομές που θα μπορούσαν να ακολουθήσουν. Οι τιμές φόρτων που παρατηρούνται θα μπορούσε κανείς να πει ότι είναι οι «λογικές» με βάση την ζήτηση, και είναι οι οδοί που αναμένεται να είναι δύσκολο να περιφραχτούν κατά τα πειράματα βελτιστοποίησης που περιγράφονται παρακάτω.

4.2.2: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΦΡΑΓΜΕΝΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ

Ο βασικός σκοπός της βελτιστοποίησης που εξετάζεται σε αυτό το πείραμα, είναι η διάνυση ενός δικτύου με φραγμένους συνδέσμους, και η εξέταση των μεταβολών στις τιμές των διαφόρων μεγεθών εάν στις αρχικές συνθήκες έχουμε, με τυχαίο τρόπο, αποφασίσει να εισάγουμε σε τυχαίους συνδέσμους φραγή. Χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια τυχαίων ακεραίων αριθμών στο διάστημα $[0,1]$, επομένως χρησιμοποιώντας 0 ή 1 για κάθε έναν από τους 452 συνδέσμους που συμμετέχουν στη βελτιστοποίηση, παράγεται ένα μοντέλο μη βελτιστοποιημένο, με συγκεκριμένο φραγμένο μήκος και συγκεκριμένο κόστος σε οχηματοώρες δικτύου.

Στη συνέχεια, με χρήση του λογισμικού xl optimizer και επαναληπτικά, κλήση του κώδικα που προχωρά στην ανάθεση των φόρτων στις συντομότερες διαδρομές, αναμένονται αποτελέσματα βελτιωμένα ως προς τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, ήτοι, μειωμένο κόστος δικτύου σε οχηματοώρες, και αυξημένο μήκος φραγμένων συνδέσμων, σε μέτρα. Έπειτα από αρκετές επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου,

παράγεται ένα μέτωπο μη κυριαρχούμενων λύσεων Pareto, και αξιολογούνται οι ακραίες λύσεις αυτού.

Η τυχαία αρχική φραγή επιλέχθηκε προκειμένου να μπορεί να είναι εύληπτη η διαφορά, τόσο σε αριθμητικό επίπεδο (διαφορετικές τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων) όσο και σε πρακτικό επίπεδο (διαφορετικές διαδρομές προτιμώνται σε κάθε περίπτωση). Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας την αρχική τυχαία περίφραξη, το φραγμένο μήκος υπολογίζεται σε 9724 μέτρα, ενώ το κόστος του δικτύου ανέρχεται σε αυτή την περίπτωση σε 74,03 οχηματοώρες, συνεπώς πρόκειται για ένα κόστος υπερδιπλάσιο από αυτό της περίπτωσης του ελεύθερου δικτύου. Η τυχαία γένεση 0 και 1 για τους συνδέσμους που χρησιμοποιούνται και εκείνους που δεν χρησιμοποιούνται, δεν είναι βέλτιστη για καμία εκ των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων, καθώς η επιλογή δεν έχει γίνει με κάποιο κριτήριο αλλά εντελώς τυχαία, και συνεπώς, επειδή το πιθανότερο είναι οι συγκεκριμένοι σύνδεσμοι να μην είναι εκείνοι που πρέπει στο τέλος της βελτιστοποίησης να επιλεγούν, το κόστος δικτύου είναι σαφώς μεγαλύτερος από οποιοδήποτε κόστος υπολογιστεί στις επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου.

Η εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου (NSGA-II) οδηγεί στην δημιουργία αρκετών λύσεων, εκ των οποίων, με βάση τα βήματα του γενετικού αλγορίθμου, κι έπειτα από πολλαπλές επιλογές και μεταλλάξεις, εξάγονται διάφορα μέτωπα Pareto (1, 2, 3 κ.ο.κ.). Οι λύσεις του μετώπου 1 είναι καλύτερες από εκείνες του μετώπου 2 και εκείνες με τη σειρά τους καλύτερες από του μετώπου 3, με βάση την μη κυριαρχούμενη ταξινόμηση. Οι λύσεις που εντάσσονται στο ίδιο μέτωπο δεν μπορούν να ταξινομηθούν μεταξύ τους καθώς κάθε μία υπερτερεί της άλλης σε μία εκ των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων, αλλά υστερεί στην άλλη. (Mumford, 2013). Με την βοήθεια της γλώσσας Visual Basic (VBA), η οποία χρησιμοποιείται για την γραφή μακρό-εντολών, γράφεται ένας κώδικας μέσω του οποίου, από το σμήνος περίπου 200 παραγόμενων λύσεων από τις 50 επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου, επιλέγονται οι μη κυριαρχούμενες που ταυτόχρονα κυριαρχούν έναντι των υπολοίπων, και έτσι δημιουργείται ένα τελικό μέτωπο Pareto, και δεν προκύπτει μία μοναδική βέλτιστη λύση. Γίνεται, επομένως, έλεγχος μεταξύ κάθε ζεύγους σημείων, και 2 σημεία α και β θεωρούνται για το συγκεκριμένο πρόβλημα, μη κυριαρχούμενα μεταξύ τους, αν και μόνο αν:

$$objective1_{\alpha} < objective1_{\beta}$$

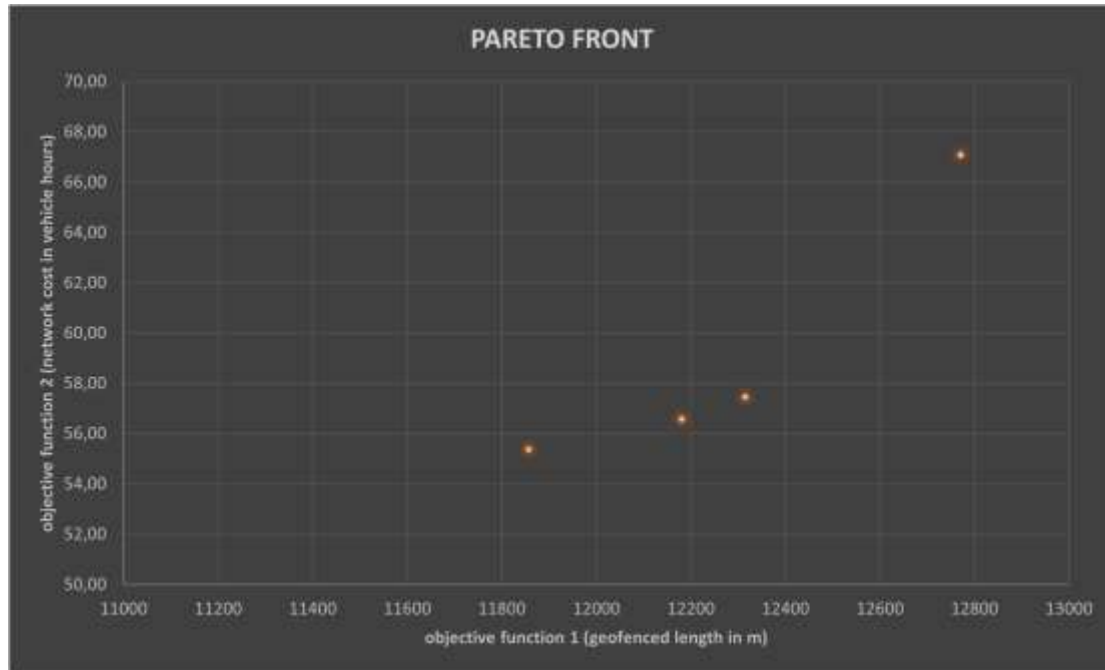
(σχέση 4.1)

ΚΑΙ

$$objective2_{\alpha} < objective2_{\beta}$$

(σχέση 4.2)

Για την βασική περίπτωση, χωρίς κάποιον επιπλέον, μη ντετερμινιστικό περιορισμό, το διάγραμμα που προκύπτει από τις λύσεις του επιπέδου 1, και μετά από 50 επαναλήψεις για πληθυσμό 20 ατόμων, είναι το εξής:



Διάγραμμα 4.1: το διάγραμμα με τις βέλτιστες λύσεις της πολύ-κριτηριακής βελτιστοποίησης, για 50 επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου

Στο διάγραμμα 4.1, τα 4 ζεύγη μη κυριαρχούμενων μεταξύ τους λύσεων μπορούν όλα να θεωρηθούν βέλτιστες λύσεις, ανάλογα με τον σκοπό που πρέπει κάθε φορά να ικανοποιηθεί.

Το μέτωπο Pareto έχει μορφή τέτοια που οι βέλτιστες λύσεις είναι οι κατά το δυνατόν απομακρυσμένες από τον άξονα 2 (μεγιστοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης 1), και ταυτόχρονα κατά το δυνατόν πιο κοντά στον άξονα 1 (ελαχιστοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης 2). Η μεγαλύτερη συσσώρευση λύσεων (τόσο του μετώπου όσο και γενικά, βέλτιστων σε κάθε επανάληψη) παρατηρείται στην περιοχή μεταξύ 12100 και 12400 για την αντικειμενική συνάρτηση 1, και 58 και 60 για την αντικειμενική συνάρτηση 2. Για την συγκεκριμένη περιοχή βρέθηκαν πολλές λύσεις, πολλές εκ των οποίων κρίθηκαν ως μεταξύ τους κυριαρχούμενες ή όχι, με ελάχιστες διαφορές, της τάξης των 5 μέτρων στην περίπτωση της αντικειμενικής συνάρτησης 1, και των 0,05 οχηματοωρών της αντικειμενικής συνάρτησης 2.

Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης 1	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης 2	Ποσοστό περιφραγμένου δικτύου ως προς το σύνολο	Αριθμός μη φραγμένων συνδέσμων	Αριθμός φραγμένων συνδέσμων	Επιβάρυνση σε οχηματοώρες σε σχέση με ελεύθερο δίκτυο
12493	63,96	46,3%	232	220	60,8%
11857	55,38	44%	261	191	39,2%

Πίνακας 4.1: στατιστικά στοιχεία ακραίων λύσεων μετώπου Pareto της βασικής περίπτωσης μελέτης

Οι βέλτιστες, επομένως, λύσεις, κινούνται σε ό,τι αφορά την αντικειμενική συνάρτηση 1, μεταξύ 11800 και 12500 μέτρων. Αυτή η διαφορά μπορεί επιπλέον να μεταφραστεί σε 29 περισσότερους συνδέσμους περιφραγμένους στην λύση εκ των δύο που δίνει έμφαση στην ασφάλεια. Ταυτόχρονα οι διαφορές μεταξύ των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης 2, είναι σημαντικές, αφού η μία αυξάνει το κόστος δικτύου 40% από την βέλτιστη, χωρίς φραγμούς λύση, και η άλλη το αυξάνει κατά 60%. Σε κάθε περίπτωση, το ποσοστό της τάξης του 45% φραγμένου δικτύου, σημαίνει ότι στο υπόλοιπο 55% οι φόρτοι να μπορούν να δρομολογηθούν και να οδηγήσουν σε εξυπηρέτηση των χρηστών.

Όσον αφορά τις 2 ακραίες λύσεις:

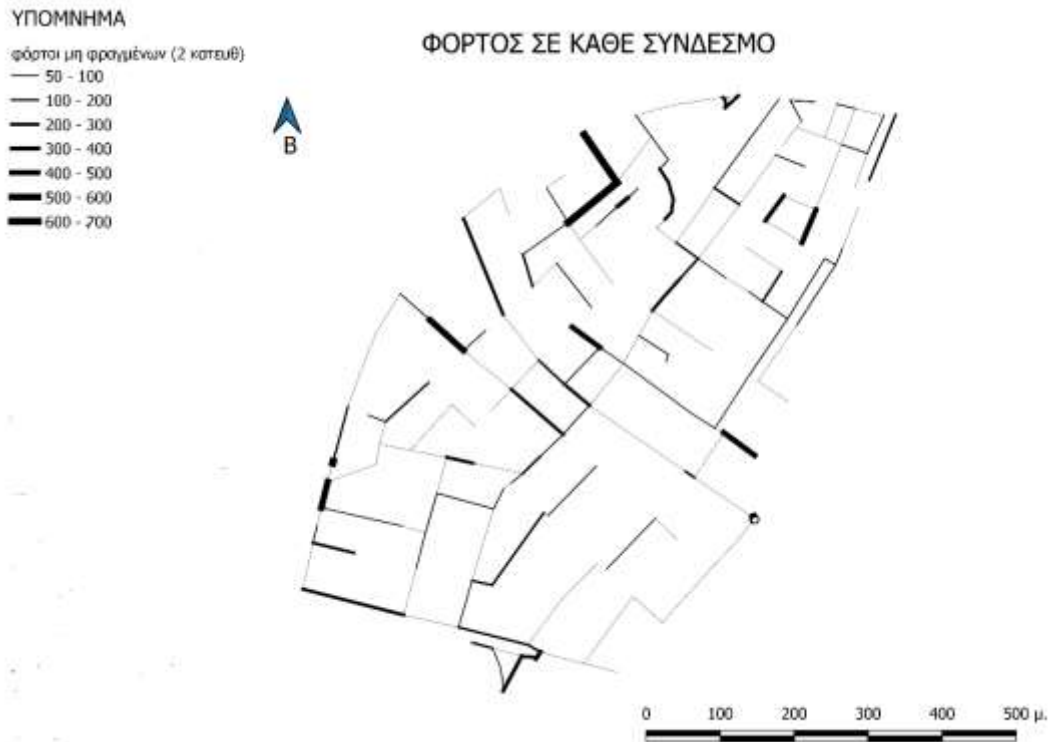
Minimum objective 2

Εκείνη για την οποία ελαχιστοποιείται το κόστος δικτύου, αλλά ταυτόχρονα ελαχιστοποιείται και το μήκος περίφραξης, είναι η [objective1, objective2] = [11857, 55,38], της οποίας η απεικόνιση των συνδέσμων, ανάλογα με τον τύπο φραγής, παρουσιάζεται παρακάτω:



Χάρτης 4.6: το δίκτυο όπως προκύπτει από την βέλτιστη περίπτωση για κόστος δικτύου

Οι αντίστοιχοι φόρτοι που διέρχονται από καθέναν από τους συνδέσμους του δικτύου, απεικονίζονται στον παρακάτω χάρτη, με αυξανόμενο πάχος γραμμής ανάλογα με τον φόρτο :

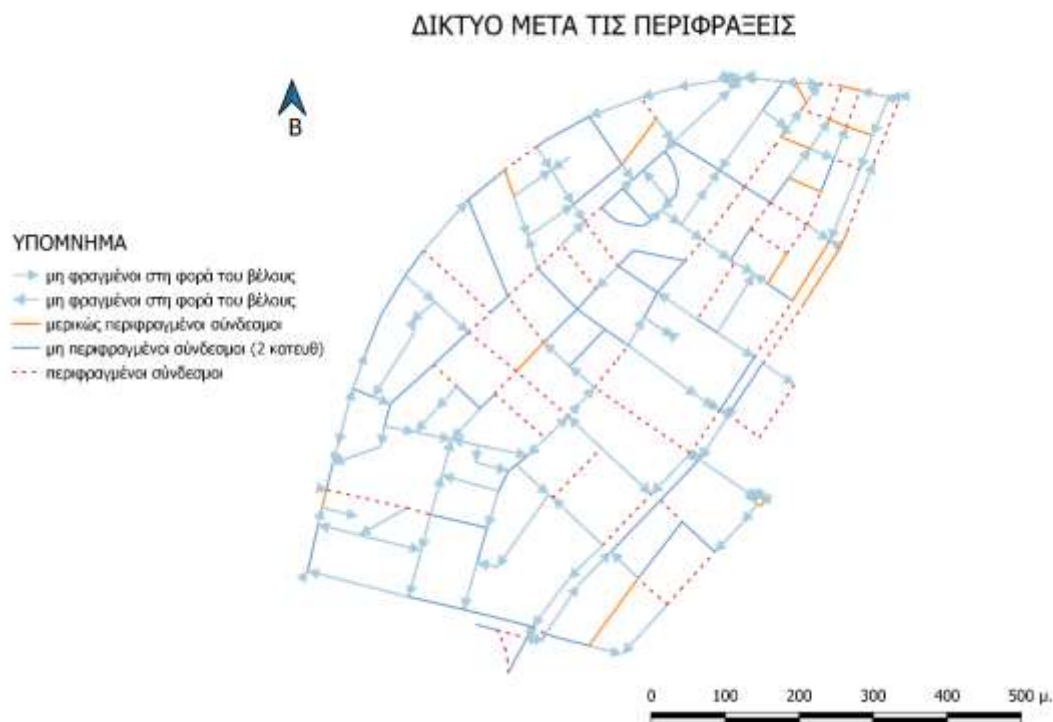


Χάρτης 4.7: οι φόρτοι του δικτύου όπως προκύπτουν σε όλους τους συνδέσμους για την συγκεκριμένη εκτέλεση του πειράματος.

Όπως δείχνει ο τελευταίος χάρτης, ο φόρτος έχει κατανεμηθεί επαρκώς στο δίκτυο, με ορισμένα όμως τμήματα του να είναι περισσότερο επιβαρυνμένα από άλλα. Το δυτικό και κυρίως ΒΔ τμήμα της περιοχής υφίσταται σημαντική επιβάρυνση, ιδιαίτερα σε οδούς που τείνουν προς τα άκρα του δικτύου. Σκοπός των οδών αυτών είναι να καθοδηγήσουν την ζήτηση προς την περιοχή με τις περισσότερες χρήσεις γης διάφορες της κατοικίας. Συνολικά, ο αριθμός των οδικών τμημάτων που υφίστανται πραγματικά σημαντική πίεση (άνω των 500 πατινιών) δεν ξεπερνά τους 10 συνδέσμους.

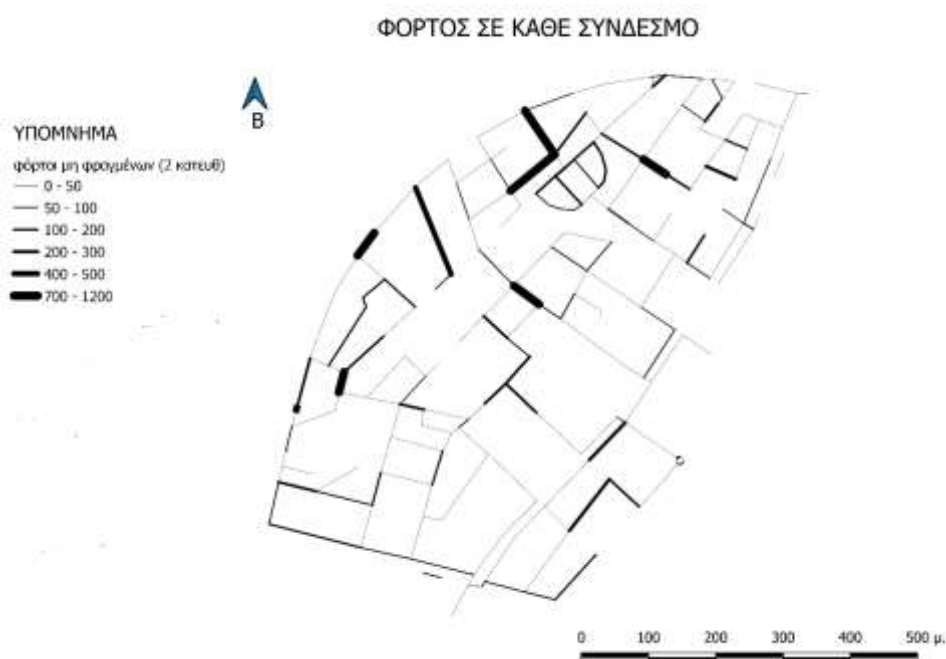
Maximum objective 1

Εκείνη για την οποία μεγιστοποιείται το μήκος των περιφραγμένων συνδέσμων (να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος υπολογίζει ως φραγμένο μήκος μόνο το μήκος των εντελώς περιφραγμένων και όχι των μερικώς περιφραγμένων συνδέσμων), αλλά ταυτόχρονα μεγιστοποιείται και το κόστος του δικτύου σε οχηματοώρες, είναι η [objective1, objective2] = [12771, 67,09], της οποίας η απεικόνιση των συνδέσμων, ανάλογα με τον τύπο φραγής, παρουσιάζεται παρακάτω:



Χάρτης 4.8: το δίκτυο όπως προκύπτει από την βέλτιστη περίπτωση για ασφάλεια πατινιών – μεγιστοποίηση φραγμένου μήκους

Οι αντίστοιχοι φόρτοι που διέρχονται από καθέναν από τους συνδέσμους του δικτύου, απεικονίζονται στον παρακάτω χάρτη, με αυξανόμενο πάχος γραμμής ανάλογα με τον φόρτο :



Χάρτης 4.9: οι φόρτοι του δικτύου όπως προκύπτουν σε όλους τους συνδέσμους για την συγκεκριμένη εκτέλεση του πειράματος.

Με βάση τον χάρτη των φόρτων, η κατανομή είναι καλή, αλλά με μεγαλύτερες διακυμάνσεις από την λύση που αναλύθηκε πιο πάνω. Το δυτικό, βόρειο αλλά και ΒΔ τμήμα της περιοχής υφίσταται σημαντική επιβάρυνση, η οποία παρατηρείται εντονότερη σε οδούς με διεύθυνση Α-Δ (Δ-Α) και ΒΔ-ΝΑ(ΝΑ-ΒΔ) κατά βάση. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, καθώς στην συγκεκριμένη υποπερίπτωση είναι πιο έντονη η ανάγκη χρησιμοποίησης των συντομότερων διαδρομών, ακόμα κι αν αυτό σημαίνει υπερφόρτωση ορισμένων συνδέσμων με μεγάλο αριθμό οχημάτων. Σκοπός εδώ είναι η μέγιστη περιφραξη, δίνοντας μικρότερη σημασία στο προκύπτον κόστος.

4.3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Η ανάλυση ευαισθησίας, είναι μία μέθοδος που προσδιορίζει την ευαισθησία της λύσης σε μεταβολές των παραμέτρων του μοντέλου. (Κολέτσος, Στογιάννης, 2017). Σε κάθε πρόβλημα με φύση βελτιστοποίησης θεωρείται σημαντικό να γίνονται αλλαγές σε παραμέτρους, τέτοιες που να διαφοροποιούν αρκετά το ίδιο το πρόβλημα. Είναι σημαντικό για τον μελετητή αλλά και για οποιονδήποτε θέλει να εξάγει κάποιο συμπέρασμα, το να γνωρίζει ποιες παράμετροι επηρεάζουν σημαντικότερα από άλλες τα αποτελέσματα, καθώς αυτό σημαίνει ότι σε εκείνες τις παραμέτρους πρέπει να δοθεί περισσότερη έμφαση κατά την εκτέλεση του πειράματος, όχι πια σε θεωρητικό, αλλά σε πρακτικό επίπεδο. Μερικά σενάρια που υλοποιούνται στο πλαίσιο τη ανάλυσης ευαισθησίας, είναι τα εξής:

4.3.1: ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΠΟΥ ΘΕΩΡΕΙΤΑΙ ΕΠΙΤΡΕΠΤΟ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΝΩΦΕΡΕΙΕΣ/ΚΑΤΩΦΕΡΕΙΕΣ

Η συγκεκριμένη μεταβολή επηρεάζει το αρχικό δίκτυο προς βελτιστοποίηση, καθώς πλέον οι σύνδεσμοι με κλίση στο διάστημα $[0.08, 0.10]$ θα μπορούν να έχουν κανονική κίνηση των πατινιών, και όχι με περιορισμένη ταχύτητα. Η σχέση, που εφαρμόζεται πριν την εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου, στο Microsoft Excel, είναι η εξής:

```
For I = 1 to N
    If abs(slope[i]) >= 0.10 then
        slope check[i] = 2
    Else
        slope check[i] = 0
    End if
```

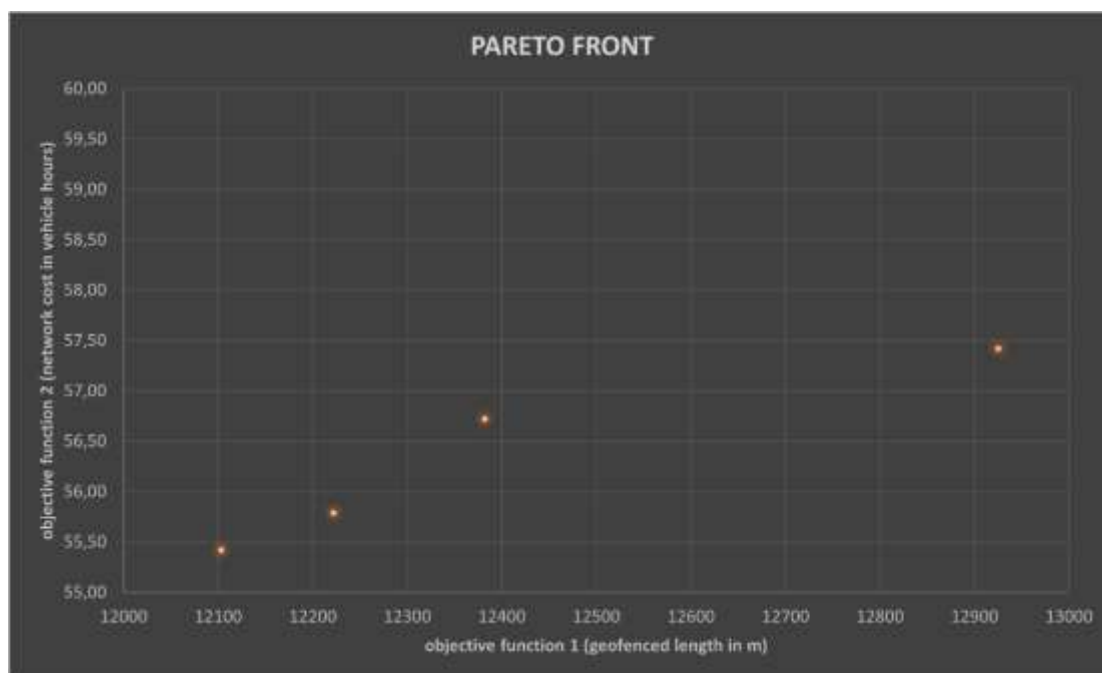
Με μαθηματική γενικευμένη μορφή αυτό γράφεται ως εξής:

$$\text{αν } \text{abs}(\text{slope}_i) \geq 0.1, \text{slope}_{\text{check}_i} = 2$$
$$\text{αλλιώς, } \text{slope}_{\text{check}_i} = 0$$

(σχέση 4.3)

Αυτό, πρακτικά, συνεπάγεται την εξής διαφορά:

Με το όριο κλίσης στο 8 τοις εκατό, οι σύνδεσμοι που δέχονται μερική φραγή είναι 36, ήτοι στο δίκτυο υλοποίησης του γενετικού αλγορίθμου βρίσκονται 452 από τους 488 του δικτύου. Εάν το όριο αυτό τοποθετηθεί στο 10%, οι σύνδεσμοι στο αρχικό προς βελτιστοποίηση δίκτυο είναι 476. Εκτελώντας τα σενάρια χωρίς άλλη αλλαγή παραμέτρων, τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά, καθώς κάποιες σημαντικές οδοί του δικτύου, με αξιόλογη ζήτηση, έχουν κλίσεις μεταξύ 8 και 10 τοις εκατό, και συνεπώς, μετά τις επαναλήψεις προτιμώνται από τον αλγόριθμο.



Διάγραμμα 4.2: το διάγραμμα με τις βέλτιστες λύσεις της πολύ-κριτηριακής βελτιστοποίησης, για 20 επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου, για το σενάριο ανάλυσης ευαισθησίας κατά το οποίο ο ντετερμινιστικός περιορισμός κλίσεων τίθεται στο 10% αντί του 8%.

Το μέτωπο Pareto έχει παρόμοια μορφή και σχήμα με αυτό του βασικού πειράματος, ωστόσο είναι πιο πεπλατυσμένο ως προς τον άξονα της αντικειμενικής συνάρτησης 1, και πιο συμπιεσμένο ως προς τον άξονα 2. Αρκετά μεγάλος αριθμός λύσεων, βέλτιστων για κάθε επανάληψη, παρατηρήθηκε στην περιοχή μεταξύ 12200 και 12400 για την αντικειμενική 1, και 56 έως 57 για την αντικειμενική 2.

Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης 1	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης 2	Ποσοστό περιφραγμένου δικτύου ως προς το σύνολο	Αριθμός μη φραγμένων συνδέσμων	Αριθμός φραγμένων συνδέσμων	Επιβάρυνση σε οχηματοώρες σε σχέση με ελεύθερο δίκτυο
12925	57,42	47,9%	266	212	44,2%
12122	55,49	44,9%	275	203	39,5%

Πίνακας 4.2: βασικά στατιστικά στοιχεία ακραίων λύσεων μετώπου Pareto της περίπτωσης μελέτης με όριο μερικής φραγής για κλίση το 10%

Με βάση τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι η διαφορά μεταξύ των δύο ακραίων λύσεων, στην περίπτωση αυτή, είναι αισθητά μικρότερη σε σχέση με το βασικό πείραμα. Το ποσοστό συνδέσμων που φράσσονται στο δίκτυο κυμαίνεται μεταξύ 45 και 48% για όλο το εύρος βέλτιστων λύσεων, και εν συγκρίσει με τα αντίστοιχα 44 και 46% του βασικού πειράματος, οι διαφορές είναι αμελητέες. Η παραμετροποίηση του περιορισμού της κλίσης στο 10% δεν επηρεάζει το μήκος των συνδέσμων που φράσσονται, βελτιώνοντας κατά ελάχιστο τα περιφραγμένα μήκη. Η σημαντική διαφορά, για την ακρίβεια, βελτίωση του μοντέλου, προκύπτει σε ό,τι αφορά το κόστος του δικτύου, το οποίο μειώνεται αισθητά. Ενώ στο βασικό πείραμα η επιβάρυνση σε σχέση με το ελεύθερο δίκτυο κυμαίνεται μεταξύ 40 και 60%, στην εν λόγω εκτέλεση τα ποσοστά περιορίζονται από 40 ως 44%. Συνεπώς, ακόμα και στην αρνητική για την ασφάλεια του μοντέλου λύση (12925, 57,42), το κόστος είναι κατά περίπου 6 οχηματοώρες πιο βέλτιστο, ενώ και το μήκος φραγής είναι αυξημένο κατά 500 μέτρα, επομένως κι αυτό πιο βελτιστοποιημένο από το βασικό πείραμα. Παρ' όλα αυτά, πρόκειται για ένα νέο μοντέλο με εξ' αρχής μειωμένη ασφάλεια σε σχέση με το αρχικό, καθώς πλέον σε αρκετούς συνδέσμους με κλίση μεταξύ 8 και 10% (ή μεταξύ -8 και -10%) έχει επιτραπεί η πλήρης κίνηση, για αυτό τον λόγο παρατηρούνται μειωμένες τιμές κόστους. Πολλοί από τους συνδέσμους με κλίσεις στα προαναφερθέντα διαστήματα τιμών, είναι σημαντικοί για το δίκτυο και με το να υπάρχει η δυνατότητα επιλογής τους, με δεδομένο ότι ένα εκ των ζητούμενων είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους, σε πολλές εκτελέσεις του γενετικού αλγορίθμου (και άρα, σε πολλές λύσεις) θα επιλεγούν.

Επομένως, με δεδομένο ότι η πιο «συντηρητική» απόφαση του περιορισμού ταχύτητας από το 8% δεν δίνει σημαντικά χειρότερα αποτελέσματα από την άνοδο του αριθμού αυτού στο 10%, θα μπορούσε κανείς να πει ότι είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί η συντηρητική προσέγγιση του 8%, που επιλέχθηκε στο βασικό πείραμα. η οποία οδηγεί σε πιο ασφαλή οδήγηση στο δίκτυο, που άλλωστε είναι ένα εκ των δύο ζητούμενων του προβλήματος.

Η αύξηση του αριθμού των μεταβλητών από 452 σε 476, δημιουργεί περισσότερη ελευθερία στον αλγόριθμο καθώς το δίκτυο είναι λιγότερο περιορισμένο εξ' αρχής.

Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται οι πραγματικά συντομότερες διαδρομές, και επομένως είναι λογικό οι περισσότερες λύσεις να είναι καλύτερες από τις αντίστοιχες της αρχικής περίπτωσης. Ωστόσο, το ότι οι λύσεις του δικτύου είναι βελτιωμένες σε σχέση με τις αρχικές, πρακτικά σημαίνει ότι δίνεται τιμή 0, δηλαδή δυνατότητα πλήρους χρήσης σε συνδέσμους με κλίσεις στο διάστημα [0.08, 0.10], και πρέπει να εξεταστεί από τον εκάστοτε φορέα το αν είναι θεμιτό κάτι τέτοιο, ειδικά αν τα δίκτυα στα οποία εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βρίσκονται σε λοφώδεις περιοχές όπως είναι και η Αθήνα. Η συχνή χρήση των ηλεκτροκίνητων πατινιών σε επικλινείς συνδέσμους, ειδικά με δεδομένο ότι πολλοί εξ' αυτών είναι βασικοί σύνδεσμοι είτε κεντρικές αρτηρίες είτε συλλεκτήριες οδοί, είναι ένα θέμα προς περαιτέρω μελέτη και προβληματισμό, και υπάρχουν αντενδείξεις ως προς την χρήση ενός όχι ιδιαίτερα ισχυρού μεταφορικού μέσου σε αυτές τις περιοχές, ακόμα και αν ο αλγόριθμος αντιλαμβάνεται αυτές τις διαδρομές ως συντομότερες (και με βάση την μαθηματική έννοια της απόστασης, ή ακόμα και της χρονο-απόστασης, είναι).

4.3.2: ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΠΟΥ ΘΕΩΡΕΙΤΑΙ ΕΠΙΤΡΕΠΤΟ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΑΝΩΦΕΡΕΙΕΣ-ΚΑΤΩΦΕΡΕΙΕΣ

Η μεταβολή αυτή, όπως και η παραπάνω, επίσης επηρεάζει το αρχικό δίκτυο που τίθεται προς βελτιστοποίηση, καθώς πλέον οι σύνδεσμοι με κλίση στο διάστημα [0.06, 0.08] θα δεχτούν περιορισμούς στην ταχύτητα κίνησης και επομένως θα έχουν σε κάθε επανάληψη του γενετικού αλγορίθμου, την ίδια τιμή ως προς τον χρόνο διάνυσης τους, που τους αποδόθηκε εξ αρχής, ενώ δεν θα υπολογίζονται στο φραγμένο μήκος αφού η κίνηση επιτρέπεται σε αυτούς και δεν επηρεάζουν την συνδεσιμότητα του δικτύου. Η σχέση, που εφαρμόζεται πριν την εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου, στο Microsoft Excel, είναι η εξής:

For I = 1 to N

If abs(slope[i]) >= 0.06 then

slope check[i] = 2

Else

slope check[i] = 1

End if

Σε γενικευμένη μορφή, αυτό γράφεται κι ως εξής:

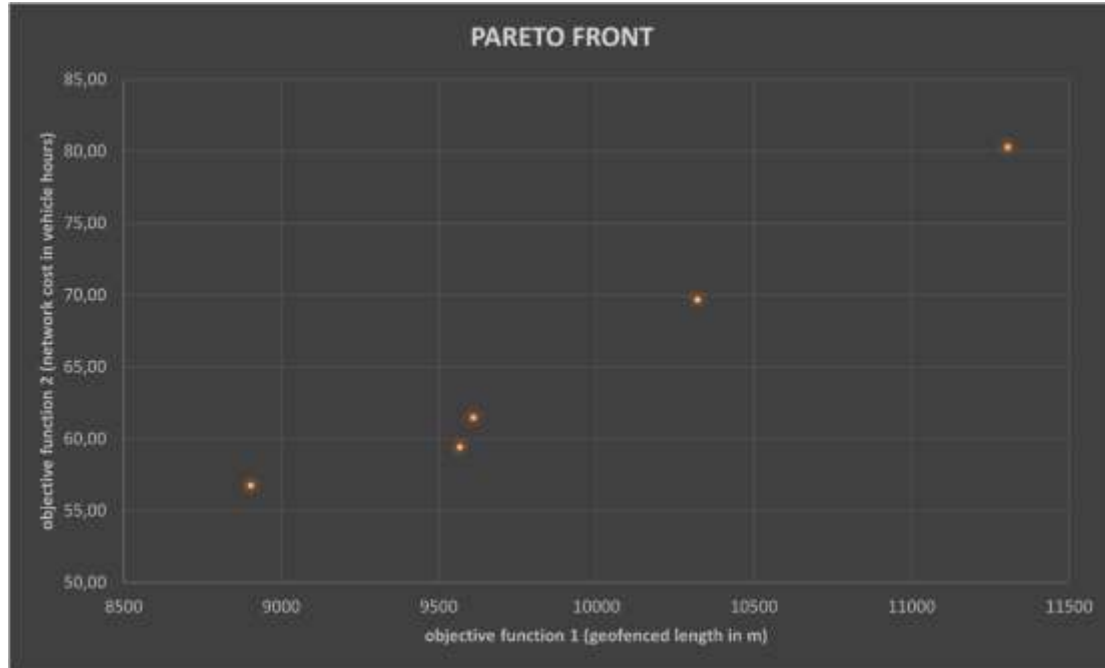
$$\text{αν } \text{abs}(\text{slope}_i) \geq 0.06, \text{slope}_{\text{check}_i} = 2$$

$$\text{αλλιώς, } \text{slope}_{\text{check}_i} = 0$$

(σχέση 4.4)

Με το όριο περιορισμού συναρτήσκει της κλίσης να τοποθετηθεί στο 6%, οι σύνδεσμοι που θα εισαχθούν στον γενετικό αλγόριθμο είναι 396 από τους αρχικούς 488. Ο έλεγχος

βοηθά προκειμένου να εξαχθεί συμπέρασμα ως προς το δίκτυο, το οποίο πλέον θα έχει αρκετά αυξημένο κόστος, καθώς οι οδοί με κλίσεις μεταξύ 6 και 8 τοις εκατό είναι αρκετές, ιδιαίτερα με δεδομένο ότι το σενάριο εφαρμόζεται στους Αμπελοκήπους στην Αθήνα, και μεγάλο μέρος της γειτονιάς αυτής έχει χτιστεί σε λόφους και επικλινείς περιοχές.



Διάγραμμα 4.3: το διάγραμμα με τις βέλτιστες λύσεις της πολύ-κριτηριακής βελτιστοποίησης, για 20 επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου, για το σενάριο ανάλυσης ευαισθησίας κατά το οποίο ο ντετερμινιστικός περιορισμός κλίσεων τίθεται στο 6% αντί του 8%.

Το μέτωπο Pareto που δημιουργείται είναι πλέον αρκετά πεπλατυσμένο, τόσο στον άξονα της αντικειμενικής συνάρτησης 1, όσο και σε αυτόν της αντικειμενικής συνάρτησης 2, με τις διαφορές τιμών μεταξύ ανώτερης και κατώτερης τιμής για κάθε μία από τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, να είναι σημαντικές, και αισθητά μεγαλύτερες από την βασική περίπτωση. Αρκετές λύσεις παράχθηκαν στην περιοχή μεταξύ 9000 και 9500 για την αντικειμενική 1, και μεταξύ 58-63 για την αντικειμενική 2.

Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης 1	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης 2	Ποσοστό περιφραγμένου δικτύου ως προς το σύνολο	Αριθμός μη φραγμένων συνδέσμων	Αριθμός φραγμένων συνδέσμων	Επιβάρυνση σε οχηματοώρες σε σχέση με ελεύθερο δίκτυο
11306	80,32	41,9%	163	233	101,7%
8903	56,77	33%	200	196	42,7%

Πίνακας 4.3: στατιστικά στοιχεία ακραίων λύσεων μετώπου Pareto της περίπτωσης μελέτης με όριο μερικής φραγής για κλίση το 6%

Σε αυτή την εκτέλεση, οι σύνδεσμοι που φράσσονται κυμαίνονται από 33 ως 42 τοις εκατό, ποσοστά τα οποία είναι σημαντικά χαμηλότερα από τα αντίστοιχα του βασικού πειράματος. Η βέλτιστη ως προς την αντικειμενική συνάρτηση 1 τιμή είναι της τάξης των 11300 μέτρων, την ώρα που στην βασική εκτέλεση η τιμή 11800 στην αντικειμενική συνάρτηση 1 δίνεται στην λύση που θεωρείται η βέλτιστη για την αντικειμενική συνάρτηση 2. Σε ό,τι αφορά το κόστος του δικτύου, κυμαίνεται μεταξύ 57 και 80 οχηματοωρών, και στην δεύτερη ιδιαίτερα περίπτωση, αυξάνει τις οχηματοώρες κατά 101% σε σχέση με το αρχικό, μη περιφραγμένο δίκτυο. Η περίπτωση της λύσης [8903, 56,77] δίνει μεν ένα κόστος λογικό για το δίκτυο, αλλά η ασφάλεια που παρέχει είναι αισθητά μικρότερη.

Συνολικά, το παραπάνω γράφημα με τα σημεία του μετώπου Pareto, αλλά και με την γενικότερη τάση των λύσεων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μείωση του ορίου της κλίσης επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα προς το χειρότερο. Το γεγονός ότι 92 σύνδεσμοι δεν εισάγονται στη βελτιστοποίηση μέσω του γενετικού αλγορίθμου, περιορίζει αφενός τους βαθμούς ελευθερίας του δικτύου και αφετέρου αυξάνει το κόστος του. Πρόκειται για μία άκρως συντηρητική προσέγγιση, η οποία με βάση τα στατιστικά φαίνεται ότι επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, πολύ περισσότερο από την αντίστοιχη αύξηση του ορίου από 8 σε 10%.

4.3.3: ΧΡΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ (ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ) ΠΟΙΝΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ 2 (ΚΥΡΙΕΣ ΑΡΤΗΡΙΕΣ)

Οι κεντρικές αρτηρίες είναι ιδιαίτερος σημαντικές για την κίνηση των οχημάτων, καθώς συχνότατα συνδέουν άμεσα γειτονιές ή/και κέντρα δραστηριοτήτων μεταξύ τους. Πρόκειται επομένως για οδούς που ιδιαίτερα στις ώρες αιχμής παρουσιάζουν ιδιαίτερη συμφόρηση. Για τα ηλεκτροκίνητα πατίνια δεν νοείται ο όρος συμφόρηση, λόγω του μεγέθους τους, λόγω του ότι δεν έχουν αποκλειστικό δικό τους δίκτυο κίνησης, αλλά και λόγω του ότι δεν γίνεται χρήση τους σε τέτοιο βαθμό που θα μπορούσε να οδηγήσει σε συμφόρηση, ακόμα και στις ώρες αιχμής (για τα δεδομένα του μέσου). Ωστόσο, με δεδομένο ότι κινούνται στο οδικό δίκτυο που είναι σχεδιασμένο για τα αυτοκίνητα, είναι εύλογο ότι τίθεται ζήτημα ασφάλειας της χρήσης

τους σε κεντρικές αρτηρίες. Αφενός, στις ώρες αιχμής, οι χρήστες αυτοκινήτων δεν είναι πιθανό να δώσουν προτεραιότητα σε ένα μικρό μεταφορικό μέσο, αυξάνοντας τον κίνδυνο να μην δουν έναν χρήστη ηλεκτροκίνητου πατινιού, άρα αυξάνοντας τον κίνδυνο ατυχήματος. Αφετέρου, στις ώρες κατά τις οποίες η στάθμη εξυπηρέτησης των οδικών τμημάτων είναι ικανοποιητική, τα οχήματα είναι πιθανό να αναπτύξουν σημαντικές ταχύτητες, πολλές φορές υψηλότερες από τα θεσπισμένα όρια κυκλοφορίας. Αυτό σημαίνει μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ της ταχύτητας του πατινιού και των αυτοκινήτων, και άρα δυσκολότερη διαδικασία πέδησης για τα αυτοκίνητα εφόσον αυτά μοιράζονται τον ίδιο οδικό χώρο με τα πατίνια. Επομένως σε κάθε περίπτωση, στους κεντρικούς οδικούς άξονες, είναι θετικό να μην κινούνται κατά κόρον τα πατίνια, ως ευάλωτα μέσα.

Ωστόσο, δεν είναι εύκολο να προταθεί και να υλοποιηθεί απαγόρευση κίνησης τους σε αυτούς τους άξονες, καθώς συχνά οι προορισμοί των χρηστών τους μπορεί να βρίσκονται επί αυτών των αρτηριών, άρα πρόκειται για συνδέσμους υψηλής ζήτησης. Μία λύση που προτείνεται είναι η χρήση ποινής μείωσης ταχύτητας για τους συνδέσμους αυτούς. Πρόκειται για έναν εικονικό περιορισμό, ουσιαστικά, που θα οδηγήσει τον αλγόριθμο στο να μην προτιμήσει αυτούς τους συνδέσμους, αφού θα αυξάνουν το κόστος του δικτύου σημαντικά, ενώ στόχος του αλγορίθμου είναι η διατήρηση του κόστους (σε οχηματοώρες) σε χαμηλά επίπεδα. Η ύπαρξη της εν λόγω ποινής θα επηρεάζει σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου τους ίδιους συνδέσμους, εκείνους δηλαδή των οποίων η κατηγορία είναι «κύρια αρτηρία», και κωδικοποιούνται με $TYPE1[i]=2$ στο Microsoft Excel. Σε αντίθεση όμως με την περίπτωση των συνδέσμων που ντετερμινιστικά δεν συμμετέχουν στην βελτιστοποίηση και αποκτούν μειωμένη ταχύτητα, εδώ πρόκειται για συνδέσμους οι οποίοι θα χρησιμοποιούνται και θα εξετάζονται από τον γενετικό αλγόριθμο, χωρίς φυσικά αυτό να σημαίνει ότι απαραίτητα θα προκρίνονται στους πληθυσμούς της επόμενης γενιάς του γενετικού αλγορίθμου. Ο σκοπός άλλωστε είναι να αποτρέπεται η χρήση τους, και αντί αυτών να προτιμώνται μονοπάτια με ίδιους κόμβους έναρξης και τερματισμού, πιθανότατα με περισσότερους συνδέσμους, αλλά με μικρότερο χρόνο διάνυσης με βάση το γεγονός ότι ο χρόνος διάνυσης των μη κεντρικών αρτηριών θα είναι πια υπο-τριπλάσιος από τις κεντρικές αρτηρίες (κάτι που σημαίνει ότι ο αλγόριθμος shortest path θα τα επιλέγει).

Η έκφραση που πλέον χρησιμοποιείται στο Microsoft Excel για την απόδοση ταχύτητας στους συνδέσμους, είναι η εξής:

For I = 1 to N

 If CHECK3[i] = 1 then

 If TYPE1[i] = 2 then

 velocity[i] = 5

 Else

 velocity[i] = 15

 End if

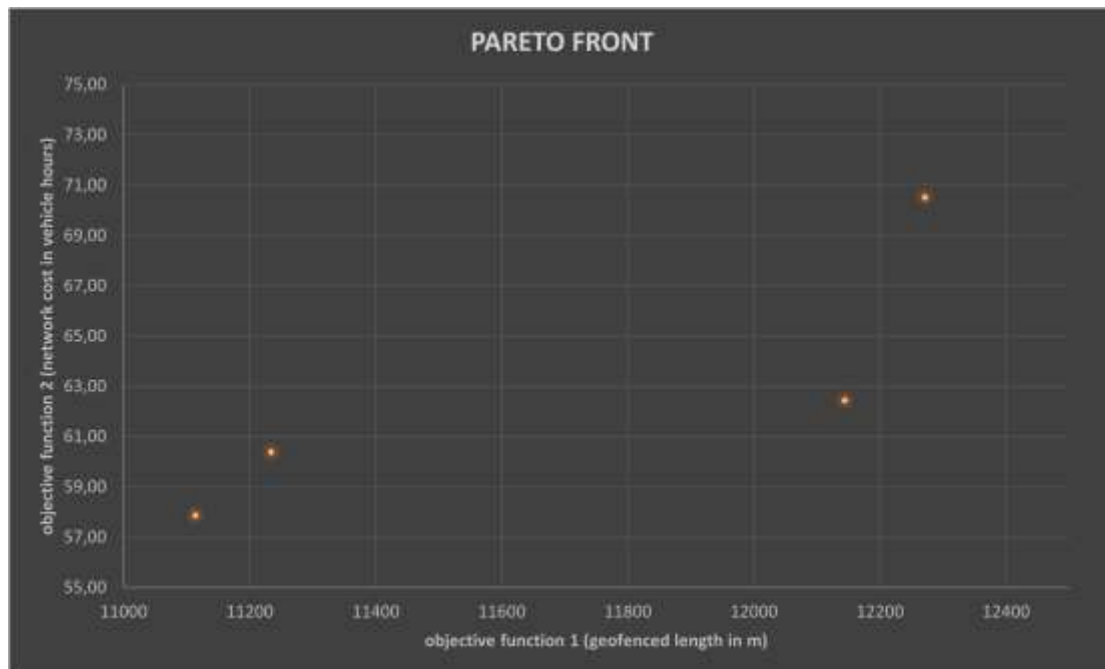
 Else

velocity[i] = 6

End if

(σχέση 4.5)

Το παραπάνω τμήμα ψευδοκώδικα αποδίδει ταχύτητα 5 km/h στα οδικά τμήματα που αποτελούν μέρος κύριας αρτηρίας, σύμφωνα με την κωδικοποίηση των αρχικών δεδομένων. Επομένως, αν μετά το πέρας του γενετικού αλγορίθμου, κατά την n-οστή εκτέλεση του, ένας σύνδεσμος έχει επιλεγεί προς ελεύθερη χρήση, αντί για την ταχύτητα των 15 km/h θα του ανατεθεί η υπό-τριπλάσια, και με αντιστρόφως ανάλογο τρόπο θα επηρεαστεί ο χρόνος διάνυσης του, θα τριπλασιαστεί. Με τον τρόπο αυτό, είναι πιο πιθανό στην επόμενη επανάληψη του κώδικα της συντομότερης διαδρομής, για το δίκτυο της (n+1)ης επανάληψης, να μην επιλεγεί ο συγκεκριμένος σύνδεσμος διότι θα υπάρχουν συντομότερες διαδρομές.



Διάγραμμα 4.4: το διάγραμμα με τις βέλτιστες λύσεις της πολύ-κριτηριακής βελτιστοποίησης, για 20 επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου, για το σενάριο ανάλυσης ευαισθησίας κατά το οποίο τίθεται ποινή ταχύτητας στους κεντρικούς συνδέσμους.

Το αναμενόμενο αποτέλεσμα της εκτέλεσης της συγκεκριμένης εκδοχής του πειράματος, είναι να οδηγήσει σε αποτελέσματα αισθητά χειρότερα από εκείνα του βασικού πειράματος. Αν αναλογιστεί κανείς ότι από τους 488 συνδέσμους του δικτύου, οι 122, με άλλα λόγια το 25% του δικτύου βάσει αριθμού συνδέσμων, είναι κατηγορίας «2», είναι εύλογο το συμπέρασμα ότι δεν είναι εύκολο για τον αλγόριθμο να μην επιλέξει τους συνδέσμους αυτούς, καθώς αφενός συγκεντρώνουν ζήτηση, και αφετέρου είναι πολλοί σε αριθμό. Το τελευταίο σημαίνει ότι υπάρχει σημαντική πιθανότητα ο αλγόριθμος εύρεσης συντομότερης διαδρομής του Dijkstra να φτάσει σε κόμβο για τον οποίο οι μη ελεγμένοι κόμβοι να συνδέονται με αυτόν μόνο μέσω συνδέσμων κατηγορίας 2. Σε μια τέτοια περίπτωση, χάνεται το πλεονέκτημα της

ποινής, εφόσον ένας από τους συνδέσμους αυτούς θα επιλεγεί βάσει της συντομότερης διαδρομής, αυξάνοντας τις οχηματοώρες.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μετώπου Pareto με εκείνα της βασικής λύσης, παρατηρεί κανείς ότι στον άξονα της αντικειμενικής συνάρτησης 1, οι βέλτιστες και μη κυριαρχούμενες μεταξύ τους λύσεις, κινούνται μεταξύ 11100 μ και 12300 μ, εν συγκρίσει με τα αντίστοιχα όρια των 11800 μ και 12800 μ της βασικής περίπτωσης. Στον άξονα της 2^{ης} αντικειμενικής συνάρτησης, οι λύσεις κυμαίνονται στο εύρος [58, 71] οχηματοώρες, ενώ κατ' αντιστοιχία, στο βασικό σενάριο τα όρια του διαστήματος είναι [55, 68].

Επομένως, και με δεδομένο ότι σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της 1^{ης} αντικειμενικής συνάρτησης, οι λύσεις του βασικού σεναρίου είναι καλύτερες, καθώς διαφέρουν κατά 700 μ (στο κάτω άκρο της τιμής obj1 του μετώπου) και 500 μ (στο άνω άκρο της τιμής obj1 του μετώπου). Σε ποσοστιαίες μονάδες, στο κάτω όριο η διαφορά κυμαίνεται στο 6,3% και στο άνω όριο στο 4%. Ταυτόχρονα, σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της 2^{ης} αντικειμενικής συνάρτησης, όπου κι εδώ η θέσπιση ποινών σε κεντρικούς συνδέσμους οδηγεί σε λύσεις κατά 3 περίπου οχηματοώρες αυξημένες τόσο στο άνω όσο και στο κάτω όριο του μετώπου. Ποσοστιαία, στο κάτω όριο η διαφορά αγγίζει το 5,4% και στο άνω όριο το 4,4%.

Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης 1	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης 2	Αριθμός συνδέσμων χωρίς περίφραξη («0»)	Αριθμός συνδέσμων με περίφραξη («1»)	Αριθμός κεντρικών αρτηριών χωρίς περίφραξη («0») παρά την ποινή	Ποσοστό κεντρικών αρτηριών χωρίς περίφραξη («0») παρά την ποινή
12271	70,52	193	259	50	40,9%
11114	57,87	223	229	58	47,5%

Πίνακας 4.4: στατιστικά στοιχεία ακραίων λύσεων μετώπου Pareto της περίπτωσης μελέτης με εικονική ποινή στις κεντρικές αρτηρίες.

Ένα άλλο στοιχείο που έχει αξία να μελετηθεί είναι το αν όντως η χρήση της συγκεκριμένης ποινής, οδήγησε τον αλγόριθμο στο να μην επιλέξει τους συνδέσμους κατηγορίας 2. Αναλύοντας τα στοιχεία από τις 2 ακραίες λύσεις του μετώπου Pareto, ανάγεται το συμπέρασμα ότι σχεδόν οι μισοί εκ των συνδέσμων με κωδικοποίηση τύπου οδού «2», δεν αποφεύγονται και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο, ακόμα και στις βέλτιστες λύσεις. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από το γεγονός ότι σε κάποιους κόμβους του δικτύου, όπως τους εξετάζει ο αλγόριθμος εύρεσης συντομότερων διαδρομών του Dijkstra, δεν υπάρχουν άλλες εναλλακτικές για συνέχιση του μονοπατιού, παρά μόνο από συνδέσμους τύπου 2. Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι οι σύνδεσμοι αυτοί αποτελούν το ¼ των συνολικών συνδέσμων του δικτύου, και επειδή αυτή είναι μία μέση τιμή, η κατανομή τους δεν είναι ομοιόμορφη στο δίκτυο. Για την ακρίβεια μπορεί κανείς να δει την κατανομή τους στον αντίστοιχο χάρτη 4.2,

στο κεφ. 4. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι ο χρόνος διάνυσης σε αυτούς τους συνδέσμους τριπλασιάζεται, κάτι το οποίο σημαίνει ότι, για να επιλεγεί κάποια εναλλακτική διαδρομή που θα αποφεύγει τους συνδέσμους κατηγορίας 2, θα πρέπει να αυξήσει το κόστος σε χρόνο όχι περισσότερο από 3 φορές σε σχέση με το κόστος που θα υπήρχε αν γινόταν χρήση του «προς αποφυγή» συνδέσμου. Πρακτικά δηλαδή, αν πρόκειται να αποφευχθεί ένας σύνδεσμος με FFT0, και η μόνη διαθέσιμη διαδρομή πρέπει να ακολουθήσει 4 συνδέσμους, με χρόνους FFT1, FF2, FF3, FF4 και $FF1+FF2+FF3+FF4 > FFT0$, θα καταλήξει ο αλγόριθμος να επιλέξει τελικά την διαδρομή με χρόνο FFT0 εφόσον είναι συντομότερη. Επιπλέον, οι οχηματοώρες λαμβάνουν υπόψη τον αριθμό οχημάτων στο δίκτυο. Αν χρησιμοποιηθεί η διαδρομή των 1,2,3,4 αντί του 0, θα ανατεθούν τετραπλάσια οχήματα στο δίκτυο, αφού x πατίνια θα ανατεθούν στον 1, επίσης x στον 2, x στον 3 και x στον 4, ενώ σε περίπτωση χρήσης του (λιγότερο σύντομου) συνδέσμου 0, θα ανατεθούν συνολικά x οχήματα στην διαδρομή. Η παραπάνω προσέγγιση είναι αρκετά απλή και δεν ισχύει σε σύνθετα δίκτυα, τα οποία έχουν υψηλή πολυπλοκότητα, αφού αν ακολουθηθεί η διαδρομή των 1,2,3,4 αυξάνονται και οι πιθανοί σύνδεσμοι, καθώς σε κάθε νέο κόμβο ο Dijkstra θα ελέγχει ποιος είναι ο συντομότερος επόμενος σύνδεσμος. Ωστόσο αναφέρεται προκειμένου να καταστεί σαφές για ποιον λόγο υπάρχουν σοβαρές αλγοριθμικές δυσκολίες στην μη επιλογή των συνδέσμων κατηγορίας 2, παρά την ποινή ταχύτητας σε αυτούς.

Οι παραπάνω αριθμοί έχουν σημασία η οποία εξαρτάται από το αποτέλεσμα προς επίτευξη. Αν αναλογιστεί κανείς ότι επιθυμούμε να αυξήσουμε αρκετά την ασφάλεια, η χρήση ποινής στους κεντρικούς συνδέσμους είναι μία σημαντική παράμετρος, και τα αποτελέσματα δεν είναι αποθαρρυντικά σε βαθμό που να μην μπορεί να προταθεί η χρήση της, παρόλο που σε ορισμένους εξ' αυτών δεν επιτυγχάνεται η αποσυμφόρηση. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα δεν μπορεί να βασιστεί σε πραγματικά περιστατικά, καθώς δεν έχουν, την περίοδο συγγραφής της συγκεκριμένης εργασίας, υπολογιστεί στατιστικά στοιχεία για τα αποτελέσματα από την χρήση πατινιών σε πόλεις στις οποίες έχουν τοποθετηθεί γεωγραφικές περιφράξεις στα δίκτυα τους, ώστε να μπορούν να γίνουν, έστω σε βασικό επίπεδο, συγκρίσεις με πόλεις που δεν έχουν αυτό τον περιορισμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Γενικά συμπεράσματα – προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

5.1: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είναι προφανές ότι, σε επίπεδο αστικών οδικών δικτύων, η απαγόρευση της κίνησης για ένα μέσο σχεδιασμένο για ελεύθερη κίνηση όπως το ηλεκτροκίνητο πατίνι, θα πρέπει να αποφεύγεται. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν και προτείνουν αποκοπές του 40% του δικτύου είναι ρεαλιστικά σε αλγοριθμικό επίπεδο. Συγκεκριμένα, καταδεικνύεται από την εφαρμογή της δι-κριτηριακής βελτιστοποίησης, ότι το δίκτυο μπορεί να βελτιστοποιηθεί είτε από πλευράς ασφαλείας, είτε από πλευράς κόστους, είτε μετρίως και από τις δύο πλευρές, αλλά ποτέ απόλυτα ικανοποιητικά και από τις δύο. Το πιλοτικής φύσεως μοντέλο που δημιουργήθηκε, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον μέσο χρήστη ηλεκτροκίνητου πατινιού, αλλά από κάποια εταιρεία κοινοχρησίας ή κάποιον άλλο αντίστοιχο φορέα. Μέχρι την στιγμή συγγραφής της παρούσας εργασίας, οι εν λόγω εταιρείες δεν δείχνουν ζωνφό ενδιαφέρον να λάβουν δραστικά μέτρα που αφορούν την ασφάλεια του μέσου. Συνεπώς, δεν θεωρείται πιθανό να επιδιώξουν να δουν το μέτωπο Pareto από την πλευρά της μεγιστοποίησης της ασφαλείας, αλλά από εκείνη της ελαχιστοποίησης κόστους. Ένα θετικό στοιχείο που προκύπτει από τα αποτελέσματα είναι ότι, ακόμα και στις λύσεις των μετώπων που ελαχιστοποιούν το κόστος, πραγματοποιείται αξιόλογη ποσοτικά περίφραξη του δικτύου, η οποία μπορεί να καλύψει την ζήτηση και να καταναίμει τον φόρτο σε κατάλληλους συνδέσμους, τέτοιους που να επιβαρύνουν κατά το ελάχιστο το δίκτυο.

Οι αναλύσεις ευαισθησίας καταδεικνύουν ότι ο αλγόριθμος είναι αρκετά ευαίσθητος στις αλλαγές που αφορούν μειώσεις του μεγέθους του δικτύου. Για ίδια στοιχεία ζήτησης, σε μικρότερο δίκτυο, που προσφέρει λιγότερους συνδυασμούς συνδέσμων, τα αποτελέσματα είναι σημαντικά χειρότερα, ενώ τα μέτωπα βέλτιστων λύσεων είναι σημαντικά πιο αναξιόπιστα, καθώς έχουν μεγαλύτερο εύρος μεταξύ καλύτερης λύσης για την αντικειμενική συνάρτηση (1) και καλύτερης λύσης για την αντικειμενική συνάρτηση (2).

Ένα ενθαρρυντικό στοιχείο που προκύπτει από την μελέτη, είναι τα αξιόλογα αποτελέσματα που παρέχει το μοντέλο με τον περιορισμό ταχύτητας στις βασικές οδικές αρτηρίες, το οποίο δίνει σε μικρό βαθμό χειρότερα αποτελέσματα από το βασικό πείραμα, και τείνει να περιορίσει την χρήση αυτών των οδών, που συμβάλλουν με αρνητικό τρόπο στην ασφάλεια του μέσου. Ωστόσο, δεν προκύπτει ιδιαίτερα μεγάλη ευελιξία του μοντέλου ως προς αυτή την παράμετρο, αφού παρά τον ισχυρό περιορισμό (υπό-τριπλασιασμός ταχύτητας), η επιλογή συνδέσμων αυτής της κατηγορίας συνεχίζει να είναι σημαντική.

Ένα στοιχείο προς προβληματισμό είναι η συνδεσιμότητα του δικτύου. Η έλλειψη μη ντετερμινιστικών περιορισμών οδηγεί, όπως αναφέρθηκε, σε μεγαλύτερη αποκοπή συνδέσμων, και κατ' επέκταση σε μείωση της συνοχής του δικτύου, σε περίπτωση που ο επίδοξος χρήστης επιθυμεί να πραγματοποιήσει διαμπερείς διαδρομές, οι οποίες

διέρχονται από την περιοχή μελέτης, και δεν έχουν την αφετηρία τους και τον τερματισμό τους σε αυτήν.

5.2: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σε ό,τι αφορά την υλικοτεχνική υποδομή, χρειάζεται να γίνει μία λεπτομερής καταγραφή των αποτελεσμάτων του μοντέλου, και συγκεκριμένα, των συνδέσμων που δέχονται φόρτο σε μεγάλο αριθμό βέλτιστων λύσεων. Οι σύνδεσμοι αυτοί, με βάση τα δεδομένα ζήτησης, κρίνονται κρίσιμοι για το δίκτυο, και μπορεί να αναχθεί το συμπέρασμα ότι σε γενικές γραμμές θα έχουν φόρτο. Επομένως, με την λεπτομερή καταγραφή τους, ειδικά αν έχουν πραγματοποιηθεί εξαιρετικά πολλές επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου, έχει νόημα να υπολογιστούν αθροιστικά οι φόρτοι έπειτα από όλες τις επαναλήψεις, να ταξινομηθούν με βάση τους φόρτους, και να μελετηθεί αν υπάρχει χρησιμότητα να τοποθετηθούν υποδομές, όπως ειδικές λωρίδες, αν το πλάτος και η διατομή της οδού το επιτρέπουν. Προϋπόθεση για κάτι τέτοιο είναι οι σύνδεσμοι αυτοί να είναι περισσότεροι από 4 ή 5 σε μονοπάτι, ώστε να έχει νόημα ο σχεδιασμός υποδομών.

Σε αλγοριθμικό επίπεδο, η χρήση μεγεθών συνδεσιμότητας δικτύου, και η τοποθέτηση αυτών ως περιορισμών στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, θα μπορούσε να δώσει πραγματικά βέλτιστα αποτελέσματα. Αυτό θα οδηγούσε στην αποφυγή ύπαρξης μεμονωμένων περιφραγμένων ή μεμονωμένων μη περιφραγμένων συνδέσμων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη ενός ή περισσότερων τέτοιων περιορισμών δεν έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως, καθώς είναι πιθανό να περιορίσει αισθητά το μήκος περιφραγής, και να αυξήσει αισθητά το κόστος.

Μία ακόμα πρόταση είναι η τροποποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος σε πρόβλημα με μία αντικειμενική συνάρτηση προς αριστοποίηση, και επίλυση του με μεθόδους ή άλλες γνωστές μεθόδους. Η λύση ενός τέτοιου τύπου προβλήματος θα μπορούσε να οδηγήσει σε μία μοναδική βέλτιστη λύση. Βασική προϋπόθεση όμως για κάτι τέτοιο είναι η ύπαρξη αρκετών δεδομένων, καθώς και η τυποποίηση με μαθηματικό τρόπο κάποιων στοιχείων που αφορούν την κίνηση των πατινιών, όπως οι συντελεστές ατυχημάτων CMF οι σχετικοί με τα ηλεκτροκίνητα πατίνια. Ένα άλλο μέγεθος του οποίου η ύπαρξη θα είχε αξία, είναι η χωρική ανάλυση των ατυχημάτων στα οποία εμπλέκονται πατίνια, σε συνάρτηση με την σοβαρότητα αυτών. Το στοιχείο αυτό θα αποτελούσε σημαντική βάση για περαιτέρω μελέτη και χάραξη δικτύου, με γνώμονα ότι η ασφάλεια κρίνεται ως μείζον ζήτημα που απασχολεί τους μελετητές των ηλεκτροκίνητων πατινιών. Η παρούσα εργασία βρίθκει από παραδοχές και από προσπάθειες μαθηματοποίησης μεγεθών που, προς ώρα, δεν αποδεικνύεται η μαθηματική τους υπόσταση. Αυτό δυσκολεύει την δημιουργία ενός μοντέλου με αρκετούς περιορισμούς, όπως θα ήταν ένα δι-επίπεδο πρόβλημα βελτιστοποίησης με μία αντικειμενική συνάρτηση.

Τέλος, ενδιαφέρον θα είχε, σε αλγοριθμικό επίπεδο εκ νέου, η προσθήκη της βελτιστοποίησης των διαδρομών των πατινιών καθ' εαυτών, τόσο εκείνων που πραγματοποιούνται από χρήστες, όσο κι εκείνων που πραγματοποιούνται από τους juicers που επαναφορτίζουν τα οχήματα κατά τις νυχτερινές ώρες. Η ξεχωριστή

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΠΑΤΙΝΙΩΝ ΜΕ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΕΡΙΦΡΑΞΗΣ

επίλυση του, ως πρόβλημα επανεξισορρόπησης δικτύου, ή η συμπερίληψη του ως περιορισμό σε ένα πρόβλημα όπως το εξεταζόμενο στην παρούσα εργασία, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Arellano, J.F., Fang, K., 2019. 'Sunday Drivers, or Too Fast and Too Furious?', *Transport Findings*, December 2019.
- Bloomberg, S.N.F., Rosenkrantz, O.C.M., Lippert, F., et al, 2019. 'Injury from electric scooters in Copenhagen: a retrospective Cohort study', *BMJ Open*, vol. 9, issue 12.
- Chen, Y. W., Cheng, C. Y., Li, S. F., & Yu, C. H, 2018. 'Location optimization for multiple types of charging stations for electric scooters', *Applied Soft Computing*, vol. 67, pp. 519-528
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., Meyarivan, T., 2000. 'A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II', In: Schoenauer M. et al. (eds), *Parallel Problem Solving from Nature, Lecture Notes in Computer Science*, vol 1917, pp. 849-858. Berlin: Springer International Publishing, 2000.
- Drezner, Z., Wesolowski, G.O., 2003. 'Network design: selection and design of links and facility location', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 37, issue 3, pp. 241-256
- Gössling, S, 2020. 'Integrating e-scooters in urban transportation: Problems, policies, and the prospect of system change.' *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol.79 (2020)
- Hui, C., 2014. 'Application Study of All-or-Nothing Assignment Method for Determination of Logistic Transport Route in Urban Planning', *Computer Modelling and New Technologies*, vol. 18, issue 12C, pp. 932-937.
- Hollingsworth J., Copeland B., Johnson J.X., 2019. 'Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters', *Environmental Research Letters*, vol. 14, issue 8.
- Hsu, C.C., Chen, D.R., Ding, H.Y., 2009. 'An efficient algorithm for the Shortest Path Problem with Forbidden Paths', In: Hua A., Chang S.L. (eds), *Algorithms and Architectures for Parallel Processing, ICA3PP, 2009. Lecture notes in Computer Science*, vol. 5574, pp. 638-650. Berlin: Springer International Publishing, 2009.
- Kastenbauer, L., Konig, R., Lay, J., Wizemann, L., Schmiel, F., Zirn, O., 2017. 'Adaptive speed limit for last mile vehicles on public walkways', In: *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 176, 2017, Ricci, S., Brebbia, C.A. (eds), *Urban Transport XXIII*, WIT Press, Southampton, Boston, pp. 295-306.
- Kobayashi L.M., Williams E., Brown C.V., et al, 2019. 'The e-merging e-pidemic of e-scooters', *Trauma Surgery & Acute Care Open*, vol. 4, issue 1.
- Moran, Marcel E., B. Laa, and G. Emberger. "Six scooter operators, six maps: Spatial coverage and regulation of micromobility in Vienna, Austria." *Case Studies on Transport Policy*, 2020.

- Mumford L. Christine, 2013. 'New Heuristic and Evolutionary Operations for the Multi-Objective Urban Transit Routing Problem', *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Cancun, Mexico, June 20-23, 2013
- Namiri N.K., Lui H., Tangney T., Allen I.E., Cohen A.J., Breyer B.N., 2020. 'Electric scooter Injuries and Hospital Admissions in the United States, 2014-2018'. *JAMA surgery*, vol. 155, issue 4, pp. 357-359.
- Reclus, F., Drouard, K., 2009. 'Geofencing for fleet & freight management', *2009 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications*, (ITST), pp. 353-356, Lille, France, 2009
- Rodriguez, G. S., Deva, B., 2014. 'Geofencing 2.0: Taking Location-based Notifications to the next level', *UbiComp '14: Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp. 921-932. September 13-17, 2014.
- Sanford T., McCulloch C.E., Callcut R.A., Carroll P.R., Breyer B.N., 2015. 'Bicycle Trauma Injuries and Hospital Admissions in the United States, 1998-2013', *JAMA*, vol. 314, issue 9, pp. 947-949.
- Shaheen, S., Cohen, A., 2019. 'Shared Micromobility Policy Toolkit: Docked and Dockless Bike and Scooter sharing', *California Digital Library*, April 2019.
- Srinivas, N., Deb, K., 1994. 'Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms', *Evolutional Computation*, vol. 2, issue 3.
- Villeneuve, D., Desaulniers, G., 2004. 'The shortest path problem with forbidden paths', *European Journal of Operational Research*, vol. 165, pp. 97-107.
- Wadha, S., 2000. 'Analysis of a network design problem', *Theses and Dissertations, Lehigh Preserve*, 2000.
- Wang, Y.W., 2007. 'An optimal location choice model for recreation-oriented scooter recharge stations', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 12, issue 3, pp.231-237.
- Wu Z.X., Lam W.H.K., Chan K.S., 2005. 'Multi-modal network design: selection of pedestrianization location', *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 6, pp. 2275-2290.
- Yang, H., Qingyu, Ma, Zhenyu, W., Qing, C., Kun, X., and Di, Y., 2020. 'Safety of micro-mobility: analysis of E-Scooter crashes by mining news reports.', *Accident Analysis & Prevention*, vol.143 (2020)
- Yusoff, Y., Salihin, N.M., Mohd, Z.A., 2011. 'Overview of NSGA-II for Optimizing Machining Process Parameters', *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 3978-3983.
- Zhang, Y., Lin, D., Mi, Z., 2019. 'Electric fence planning for Dockless bike-sharing Services', *Journal of Cleaner Production*, vol. 206, pp. 383-393, January 2019.

Zuniga-Garcia, N., Ruiz Juri, N., Perrine, K.A., Machemehl, R.B., 2020. 'E-scooters in urban infrastructure: understanding sidewalk, bikelane, and roadway usage from trajectory data', *Transportation Research Record Journal*, July 2020.

Αντωνίου, Κ., Σπυροπούλου, Ι., 'Αρχές κυκλοφοριακής τεχνικής και προσομοίωσης', *Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών*, Αθήνα, 2015.

Γαβανάς, Ν., Παπαϊωάννου, Π., Πατσιαβά-Λατινοπούλου, Μ., Πολίτης, Ι., 'Αστικά δίκτυα μεταφορών και διαχείριση κινητικότητας', *Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών*, Αθήνα, 2015.

Ζάχος, Ε., Παγουρτζής, Α., Σουλίου, Θ., 'Θεμελίωση επιστήμης υπολογιστών: θεωρία και εφαρμογές', *Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών*, Αθήνα, 2015.

Κολέτσος, Ιωάννης, 2006. 'Εισαγωγή στην επιχειρησιακή έρευνα: γραμμικός προγραμματισμός', *Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Αθήνα, 2006.

Κολέτσος, Ι., Στογιάννης, Δ., 'Εισαγωγή στην Επιχειρησιακή Έρευνα', *Συμεών*, Αθήνα, 2017.

Κεπαπτσόγλου, Κωνσταντίνος, 2015. 'Λήψη αποφάσεων με πολλούς στόχους', *Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Αθήνα, 2015.

Φραντζεσκάκης, Ι., Γκόλιας, Ι., Πατσιαβά-Λατινοπούλου, Μ., 'Κυκλοφοριακή τεχνική', *Παπασωτηρίου*, Αθήνα, 2009.

ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

- ‘Grade (slope)’, Wikipedia, available from [https://en.wikipedia.org/wiki/Grade_\(slope\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Grade_(slope))
- ‘Pareto efficiency’, Wikipedia, available from https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_efficiency
- ‘Multi-objective optimization’, Wikipedia, available from https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-objective_optimization
- ‘Multiple-criteria decision analysis’, Wikipedia, available from https://en.wikipedia.org/wiki/Multiple-criteria_decision_analysis
- ‘Penalty method’, Wikipedia, available from https://en.wikipedia.org/wiki/Penalty_method
- ‘Geo-fence’, Wikipedia, available from <https://en.wikipedia.org/wiki/Geo-fence>
- ‘Python (programming language)’, Wikipedia, available from [https://en.wikipedia.org/wiki/Python_\(programming_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Python_(programming_language))
- ‘The Micro-Mobility Revolution’, Regina Clewlow, July 24, 2018, available from <https://medium.com/populus-ai/the-micro-mobility-revolution-95e396db3754>
- ‘What is GEO-FENCE? What does GEO-FENCE mean? GEO-FENCE meaning, definition & explanation’, The Audiopedia, March 7, 2018, available from <https://www.youtube.com/watch?v=X9n1YrjL7M8>
- ‘Geofencing: Applications, Benefits, and Challenges [Geofencing Technology]’, 30 September, 2019, available from <https://pigeon.srisys.com/blog/geofencing-applications-benefits-and-challenges>
- ‘Electric scooter: Origins, History and Evolution’, December 19, 2018, available from www.madcharge.com/electric-scooter-origins-history-and-evolution/
- ‘Electric Scooter in Brussels’, Brussels Mobility, Brussels Regional Public Service. Available from <https://mobilite-mobiliteit.brussels/en/electric-scooters-in-brussels>
- ‘The Motorized Scooter Boom That Hit a century before Dockless scooters’, Jackie Mansky, April 18, 2019, available from www.smithsonianmag.com/history/motorized-scooter-boom-hit-century-dockless-scooters-180971989
- ‘How Malta’s proposed e-scooter laws compare with rules in other countries’, Claudia Scavuzzo, September 2, 2019. Available from <https://timesofmalta.com/articles/view/how-maltas-new-e-scooter-laws-compare-with-other-countries.731902>
- ‘Lime debuts Sidewalk Detection as their Latest Innovation to Improve Scooters for all’, Lime Tech, January 28, 2020. Available from <https://www.li.me/second-street/lime-debuts-sidewalk-detection-latest-innovation-to-improve-scooters-for-all>

‘Spain scrambles to regulate boom in electric scooters’. Eva Saiz, July 2, 2019.

Available from

https://english.elpais.com/elpais/2019/07/02/inenglish/1562054551_381964.html

‘Can Electric Scooters Go Uphill?’, Mario Poljak, available from

www.electricscooterreport.com/can-electric-scooters-go-uphill/

‘Do Electric Scooters Go Uphill?’, available from <https://escooterrider.com/do-electric-scooters-go-uphill/>

‘Are Electric Scooters Awesome or Terrible? A look at the pros and cons’, Ott Jogi, August 20, 2018. Available from <https://www.entrepreneur.com/article/318486>

‘Germany braces for e-scooter boom’, Grace Dobush January 24, 2019. Available from <https://www.handelsblatt.com/english/companies/shared-mobility-germany-braces-for-e-scooter-boom/23900282.html?ticket=ST-4238484-r5tIfaXWToOa0k5cqkW5-ap4>

‘Δοκιμάσαμε τα ηλεκτρικά πατίνια Lime που ήρθαν προς ενοικίαση και στην Ελλάδα: όσα πρέπει να γνωρίζετε’, Δημήτρης Σκιάννης, 18 Δεκεμβρίου 2018, available from www.digitallife.gr/dokimasame-ta-ilektrika-patinia-lime-pou-irthan-pros-enoikiasi-kai-stin-ellada-osa-prepei-na-gnorizete-32312

‘Υπουργείο Μεταφορών: Μελετά νομοθετικές ρυθμίσεις για τα ηλεκτρικά πατίνια’, Κώστας Ντελέζος, 13 Μαΐου 2019. Available from <https://www.tovima.gr/2019/05/13/society/ypourgeio-metaforon-meleta-nomothetikes-rythmiseis-gia-ta-ilektrika-patinia/>

‘Αποσύρονται τα πατίνια της Lime από το Ηράκλειο Κρήτης’, Δημήτρης Σκιάννης, 18 Οκτωβρίου 2019. Available from <https://www.digitallife.gr/aposyrontai-ta-patinia-tis-lime-apo-to-irakleio-kritis-74188>

‘Τι να γίνει με τα πατίνια της Αθήνας; -Τι ισχύει στην Ευρώπη και ποιοι λένε οριστικό «όχι»’, Lifo Newsroom, 29 Μαρτίου 2019. Available from <https://m.lifo.gr/now/greece/231836/gkalop-ti-na-ginei-me-ta-patinia-tis-athinas-ti-isxyei-stin-eyropi-kai-poioi-lene-oristikoxi>

‘Ηλεκτρικά πατίνια: Η γερμανική Βουλή ψήφισε’, Σταύρος Χάλλας, 21 Μαΐου 2019. <https://www.motori.gr/newsarticle/news/ilektrika-patinia-i-germaniki-voyli-psifise>

‘Ηλεκτρικά πατίνια: Αλλαγές στην Αθήνα-Μείωση ταχύτητας και δωρεάν κράνη’, 2 Απριλίου 2019. Available from https://www.typosthes.gr/oikonomia/180432_ilektrika-patinia-allages-stin-athina-meiosi-tahytitas-kai-dorean-krani

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Επισυνάπτεται ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος καταμερισμού κυκλοφορίας στα συντομότερα μονοπάτια αστικού δικτύου, σε κατάσταση ισορροπίας χρηστών, ο οποίος δέχεται ως συνάρτηση τον αλγόριθμο εύρεσης συντομότερης διαδρομής του Dijkstra.

```
import csv
import math
import numpy as np
import heapq
import copy
import sys
import xlwings as xw
from xlwings import Book, Range

#function for Dijkstra algorithm

def shortestPath(graph, start, end):
    queue = [(0, start, [])]
    seen = set()
    while True:
        (cost, v, path) = heapq.heappop(queue)
        if v not in seen:
            path = path + [v]
            seen.add(v)
            if v == end:
                return cost, path
        for (next, c) in graph[v].items():
            if next not in seen:
                heapq.heappush(queue, (cost + c, next, path))
```

```
#main function

#create dictionaries

#G has free flow travel time for each link

G = {}

wb = Book(r'C:\Users\alex1\Documents\new_python\thesis_fin.xlsx')
sht = wb.sheets['NODES']
origin_nodes = sht.range('B2:B163').value
origin_nodes = [int(i) for i in origin_nodes]
sht2 = wb.sheets['FREE FLOW TIME']
kost = sht2.range('A2:C489').value

for z in range(len(origin_nodes)):
    b = origin_nodes[z]
    G[b] = {}
    for y in range(len(kost)):
        if (kost[y][0] == b):
            G[b][kost[y][1]] = kost[y][2]

OD = {}
demand = wb.sheets['DEMAND'].range('A1:C12').value

for i in range(len(origin_nodes)):
    a=origin_nodes[i]
    OD[a]={}
    for j in range(len(demand)):
        if (demand[j][0]==a):
            OD[a][demand[j][1]]=demand[j][2]

flow=copy.deepcopy(G)
```

```
#INITIALIZE flow as 0
```

```
for node in flow:
```

```
    for (next,c) in flow[node].items():
```

```
        flow[node][next]=0
```

```
#initialize
```

```
for node in OD:
```

```
    for (next,c) in OD[node].items():
```

```
        SP=shortestPath(G,node,next)
```

```
        print ('Shortest Path as cost, [path] is:' + str(SP))
```

```
        dem=OD[node][next]
```

```
        print('Demand is:'+ str(dem))
```

```
    for node2 in SP[1]:
```

```
        print('current path node is:' + str(node2))
```

```
        if node2!=SP[1][-1]:
```

```
            try:
```

```
                flow[node2][SP[1][SP[1].index(node2) + 1]] += OD[node][next]
```

```
            except KeyError:
```

```
                print ("Error!")
```

```
#store total network cost and link flow for every iteration in lists
```

```
value = []
```

```
tt = []
```

```
for node in flow:
```

```
for (next, c) in flow[node].items():
```

```
    ff = G[node][next]
```

```
    x = flow[node][next]
```

```
#cost_sum=Σ(t*x) for all links
```

```
#flow_sum is sum of flows X before update
```

```
cost_sum = 0
```

```
flow_sum = 0
```

```
G_init={}
```

```
sht3 = wb.sheets['FFT_NO_FENCE']
```

```
kost_no_fence = sht3.range('A2:C489').value
```

```
for z in range(len(origin_nodes)):
```

```
    b = origin_nodes[z]
```

```
    G_init[b] = {}
```

```
    for y in range(len(kost_no_fence)):
```

```
        if (kost_no_fence[y][0] == b):
```

```
            G_init[b][kost_no_fence[y][1]] = kost_no_fence[y][2]
```

```
for node in flow:
```

```
    for (next, c) in flow[node].items():
```

```
        if (G[node][next]>50000) and (flow[node][next]>0):
```

```
            cost_sum = cost_sum + (G_init[node][next] / 3600) * flow[node][next]
```

```
        else:
```

```
            cost_sum = cost_sum + (G[node][next] / 3600) * flow[node][next]
```

```
        flow_sum = flow_sum + flow[node][next]
```



```
value.append(flow_sum)
print(flow_sum)
tt.append(cost_sum)
print("Σ[flow*free flow time] of network is")
print(cost_sum)
print("Vehicle Hours")

wb.sheets('EDGES').range('U3').value = tt

zitisi_new=wb.sheets('ZIT').range('A2:B489').value
for p in range(len(zitisi_new)):
    for k in range(len(zitisi_new[i])):
        zitisi_new[p][k]=int(zitisi_new[p][k])

metritis=2

for vima in origin_nodes:
    for vima2 in zitisi_new:
        if vima==vima2[0]:
            wb.sheets('FLOW_NEXT_ITER').range('A'+
str(metritis)).value=flow[vima][vima2[1]]
            #Range('Output','E'+ str(metritis)).table.value=GNEW[vima][vima2[1]]

#sum_veh=sum_veh+((GNEW[vima][vima2[1]]/3600)*(flow[vima][vima2[1]]))
            #Range('Output','F'+
str(metritis)).table.value=(GNEW[vima][vima2[1]])*(flow[vima][vima2[1]])
            metritis+=1
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Επισυνάπτεται το τμήμα κώδικα που γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού VBA, στις Μακροεντολές του Microsoft Excel. Μέσω του κώδικα αυτού, υπολογίζεται το μέτωπο Pareto από τις λύσεις που παράγει το λογισμικό xl Optimizer. Από τις βέλτιστες λύσεις (1^ο μέτωπο μη κυριαρχούμενων λύσεων) κάθε επανάληψης, μέσω του κώδικα, παράγονται οι συνολικά βέλτιστες λύσεις του πειράματος (για X επαναλήψεις). Ως μέθοδος ταξινόμησης λύσεων επιλέγεται η μέθοδος BubbleSort (τύπου φουσαλίδας)

```
Function BubbleSort(TempArray() As Variant, _
                    Optional Descending As Boolean = True)
    Dim NoSwaps As Boolean
    Dim Item As Long
    Dim Temp(0 To 1) As Variant
    Dim Col As Long
    Do
        NoSwaps = True
        For Item = LBound(TempArray) To UBound(TempArray) - 1
            If Descending Then ' Equivalent to the Reverse = True option in the Python
Sorted() code
                If TempArray(Item, 0) < TempArray(Item + 1, 0) Then
                    NoSwaps = False
                    For Col = 0 To 1
                        Temp(Col) = TempArray(Item, Col)
                        TempArray(Item, Col) = TempArray(Item + 1, Col)
                        TempArray(Item + 1, Col) = Temp(Col)
                    Next
                End If
            Else
                If TempArray(Item, 0) > TempArray(Item + 1, 0) Then
                    NoSwaps = False
                    For Col = 0 To 1
                        Temp(Col) = TempArray(Item, Col)
                        TempArray(Item, Col) = TempArray(Item + 1, Col)
```

```
TempArray(Item + 1, Col) = Temp(Col)
Next
End If
End If
Next
Loop While Not NoSwaps
BubbleSort = TempArray
End Function
```

```
Function FindPareto(Xs As Variant, _
    Ys As Variant, _
    Optional maxX As Boolean = True, _
    Optional maxY As Boolean = True)
```

```
Dim myArray() As Variant
Dim myParetoFrontier() As Variant
Dim i, k As Long
ReDim myArray(UBound(Xs) - 1, 1)
For i = 0 To UBound(Xs) - 1
    myArray(i, 0) = Xs(i + 1, 1)
    myArray(i, 1) = Ys(i + 1, 1)
Next
' Sort the array on the X values, stating if you want large Xs on the Pareto front
myArray = BubbleSort(myArray, maxX)
' Start the Pareto frontier with the first value in the sorted list
ReDim myParetoFrontier(1, 0)
k = 0
myParetoFrontier(0, k) = myArray(0, 0)
```

```
myParetoFrontier(1, k) = myArray(0, 1)
k = k + 1
' Loop through the sorted list
For i = 1 To UBound(Xs) - 1
    If maxY Then ' Pull out the largest values for Y
        If myArray(i, 1) >= myParetoFrontier(UBound(myParetoFrontier), k - 1) Then
            ReDim Preserve myParetoFrontier(1, k)
            myParetoFrontier(0, k) = myArray(i, 0)
            myParetoFrontier(1, k) = myArray(i, 1)
            k = k + 1
        End If
    Else ' Pull out the smallest values for Y
        If myArray(i, 1) <= myParetoFrontier(UBound(myParetoFrontier), k - 1) Then
            ReDim Preserve myParetoFrontier(1, k)
            myParetoFrontier(0, k) = myArray(i, 0)
            myParetoFrontier(1, k) = myArray(i, 1)
            k = k + 1
        End If
    End If
Next i
FindPareto = myParetoFrontier
End Function
```

```
Sub Test()
Dim Xs As Variant
Dim Ys As Variant
Dim i As Integer
Dim myPareto() As Variant
Xs = Sheets("Pareto0").Range("H2:H111")
```

```
Ys = Sheets("Pareto0").Range("I2:I111")
```

```
Sheets("Pareto0").Range("J2:K111").ClearContents
```

' Change the options here if you want to prefer smaller values for X and/or larger values for Y

```
myPareto = Application.WorksheetFunction.Transpose(FindPareto(Xs, Ys, maxX = False, maxY = True))
```

```
For i = 1 To UBound(myPareto)
```

```
    Sheets("Pareto0").Cells(i, 3).Value = myPareto(i, 1)
```

```
    Sheets("Pareto0").Cells(i, 4).Value = myPareto(i, 2)
```

```
    Debug.Print myPareto(i, 1) & ", " & myPareto(i, 2)
```

```
Next
```

```
End Sub
```

