

Ανάπτυξη μοντέλων βελτιστοποίησης διαδρομής για route planners: η περίπτωση του i-Mobi Volos

Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια:

Σοφία Χαραλαμπίδου

Επιβλέπουσα:

Ευτυχία Ναθαναήλ

Βόλος, 2015

Περίληψη

Η ανάπτυξη μοντέλων βελτιστοποίησης διαδρομών και η επιλογή κατάλληλων αλγορίθμων, συνιστά ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα των σύγχρονων επιστημών και αφορά ένα πλήθος εφαρμογών δρομολόγησης και σχεδιασμού δικτύων. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην επεξεργασία και αναπαράσταση βέλτιστων διαδρομών σε οδικά δίκτυα. Κύριος στόχος της είναι η ανάπτυξη και επιλογή κατάλληλων μοντέλων βελτιστοποίησης διαδρομών για το σχεδιασμό μιας ολοκληρωμένης εφαρμογής δρομολόγησης στο Πολεοδομικό Συγκρότημα του Βόλου (i-Mobi Volos). Για τον προσδιορισμό του αλγορίθμου εισαγωγής στο i-Mobi Volos απαραίτητη προϋπόθεση ήταν η βιβλιογραφική ανασκόπηση και η διερεύνηση αντίστοιχων καλών πρακτικών σε διεθνές και εθνικό επίπεδο. Τα δεδομένα αυτά σε συγκερασμό με την αναλυτική λειτουργία του i-Mobi Volos παρουσιάζονται στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Λέξεις κλειδιά: Αλγόριθμοι, εφαρμογές δρομολόγησης, βελτιστοποίηση διαδρομής, i-Mobi Volos

Summary

The development of route optimization models and the selection of appropriate algorithms, is one of the fundamental problems of modern science and involves a great range of route planners. This thesis focuses on the processing and representation of optimal routes on road networks. Its main objective is the development and selection of suitable route optimization models for planning an integrated route planner in the Urban Area of Volos (i-Mobi Volos). The selection of the appropriate algorithm for i-Mobi Volos was based on literature review and investigation of international and national state-of-the-art route planners. The survey data combined with the analytical function of i-Mobi Volos describe the core framework of this thesis.

Keywords: Algorithms, route planners, route optimization, i-Mobi Volos

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Στόχος και αντικείμενο της εργασίας	8
1.2 Διάρθρωση εργασίας	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ	12
2.1 Ιστορική αναδρομή	12
2.2 Θεωρία των γράφων	13
2.3 Προβλήματα θεωρίας δικτύων	15
2.3.1 Πρόβλημα συντομότερης διαδρομής (Shortest Path Problem)	15
2.3.2 Πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή (Traveling Salesman Problem)	17
2.3.3 Πρόβλημα δρομολόγησης στόλου οχημάτων (Vehicle Routing Problem)	19
2.4 Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων	21
2.4.1 Ακριβείς αλγόριθμοι	21
2.4.2 Ευρετικοί αλγόριθμοι	21
2.4.3 Μεθευρετικοί αλγόριθμοι	22
2.5 Αλγόριθμοι εύρεσης συντομότερης διαδρομής	22
2.5.1 Αλγόριθμος του Dijkstra	22
2.5.2 Αλγόριθμος του Bellman Ford	25
2.5.3 Αλγόριθμος Floyd Warshall	27
2.5.4 Αλγόριθμος A*	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ	33
3.1 Γενικά για τη δρομολόγηση	33
3.2 Στατική δρομολόγηση	34
3.3 Αντιδραστική δρομολόγηση	35
3.4 Προληπτική δρομολόγηση	36
3.5 Οι αρχές ισορροπίας του Wardrop	36
3.6 Μοντέλα δρομολόγησης	37
3.6.1 Συνάρτηση απόδοσης ακμής	37
3.6.2 Βέλτιστη για το χρήστη δρομολόγηση	39
3.6.3 Βέλτιστη για το σύστημα δρομολόγηση	40
3.6.4 Βέλτιστη για το σύστημα υπό περιορισμούς δρομολόγηση	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: State -of-the- art εφαρμογές δρομολόγησης	43
4.1 Λειτουργική ανάλυση καινοτόμων εφαρμογών δρομολόγησης	43
4.2 Σύγκριση καινοτόμων εφαρμογών δρομολόγησης	58

4.3 Επιπρόσθετες εφαρμογές δρομολόγησης με μη δημοσιοποίηση της λειτουργικής τους δομής.....	61
4.4 Δρομολόγηση με Μέσα Μαζικής Μεταφοράς	64
4.4.1 Υπολογισμός βέλτιστης διαδρομής σε δίκτυο Μέσων Μαζικής Μεταφοράς.....	64
4.4.2 Εφαρμογές δρομολόγησης σε δίκτυο Μέσων Μαζικής Μεταφοράς.....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ i-Mobi Volos.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	78
6.1 Βασικές αρχές συστήματος	78
6.2 Λειτουργικές προδιαγραφές συστήματος	78
6.2.1 Υπηρεσίες πληροφόρησης μετακινούμενου	79
6.2.2 Εισαγωγή χαρακτηριστικών μετακίνησης.....	79
6.2.3 Υπηρεσίες εύρεσης βέλτιστης διαδρομής	80
6.2.4 Έρευνα αναγκών μετακίνησης και αξιολόγησης του i-Mobi Volos	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	82
7.1 Μοντέλο εκτίμησης συντομότερης διαδρομής	82
7.2 Μοντέλο εκτίμησης κόστους διαδρομής	83
7.3 Μοντέλο εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ i-Mobi Volos....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ i-Mobi Volos	88
9.1 1ο Βήμα «Αναχώρηση από – Άφιξη σε»	90
9.2 2ο Βήμα «Επιλογές μετακίνησης».....	92
9.3 3ο Βήμα «Οι διαδρομές μου».....	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑΣ i-Mobi Volos.....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ i-Mobi Volos ΚΑΙ ΕΠΟΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ.....	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Μεθοδολογία υλοποίησης του i-Mobi Volos	77
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα ροής των λειτουργιών του i-Mobi Volos.....	89
Διάγραμμα 3: Κανάλι επικοινωνίας μεταξύ πελάτη, διακομιστή και αποτελεσμάτων αλγόριθμου	97

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Οι Επτά Γέφυρες του Koenigsberg.....	12
Εικόνα 2: Προσανατολισμένο δίκτυο	13
Εικόνα 3: Μη προσανατολισμένο δίκτυο	13
Εικόνα 4: Μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος πλανόδιου πωλητή.....	18
Εικόνα 5: Οι χώροι αναζήτησης στον αλγόριθμο Dijkstra (αριστερά) και A* (δεξιά).....	32
Εικόνα 6: Χαρακτηριστική μορφή συναρτήσεων απόδοσης ακμής	38
Εικόνα 7: Περιορισμός του συνόλου των μονοπατιών	42
Εικόνα 8: Το διάγραμμα ροής της εφαρμογής	45
Εικόνα 9: Διάγραμμα ροής των διαδικασιών της εφαρμογής	47
Εικόνα 10: Ο τύπος Haversine.....	48
Εικόνα 11: Γραπτές οδηγίες δρομολόγησης	49
Εικόνα 12: Γραφική αναπαράσταση των οδηγιών	49
Εικόνα 13: Εισαγωγή των χαρακτηριστικών της μετακίνησης	52
Εικόνα 14: Αποτελέσματα δρομολόγησης OpenRouteService στο ΠΣΒ.....	53
Εικόνα 15: Αντιστοιχία οδηγιών δρομολόγησης και απεικόνισης στο χάρτη στην εφαρμογή OpenRouteService	53
Εικόνα 16: Αποτελέσματα δρομολόγησης της εφαρμογής «cyclevancouver»	56
Εικόνα 17: Διαφορές συγχρονισμένων (a) και μη συγχρονισμένων συστημάτων (b)	58
Εικόνα 18: Δρομολόγηση με την εφαρμογή Google Maps	62
Εικόνα 19: Δρομολόγηση με την εφαρμογή Tom Tom.....	63
Εικόνα 20: Δρομολόγηση με την εφαρμογή Via Michelin.....	64
Εικόνα 21: Δημιουργία δικτύου MMM.....	66
Εικόνα 22: Επιλογή των στάσεων εξυπηρέτησης των σημείων προέλευσης / προορισμού	67
Εικόνα 23: Δρομολόγηση με την εφαρμογή Google Transit.....	71
Εικόνα 24: Εφαρμογή OneBusAway σε συσκευή iphone.....	72
Εικόνα 25: Εφαρμογή Transportation in Athens.....	74
Εικόνα 26: Μοντέλο εκτίμησης συντομότερης διαδρομής	82
Εικόνα 27: Μοντέλο εκτίμησης κόστους διαδρομής	83
Εικόνα 28: Μοντέλο εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων	84
Εικόνα 29: 1 ^ο βήμα του σχεδιασμού μετακίνησης στο i-Mobi Volos	90
Εικόνα 30: Επιλογή σημείου αναχώρησης στο 1 ^ο βήμα σχεδιασμού της μετακίνησης.....	92
Εικόνα 31: 2 ^ο βήμα του σχεδιασμού μετακίνησης στο i-Mobi Volos	93
Εικόνα 32: 3 ^ο βήμα του σχεδιασμού μετακίνησης στο i-Mobi Volos	95
Εικόνα 33: Επιπρόσθετες εντολές στο κύριο μενού εντολών	96

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση μεταξύ του αλγόριθμου Dijkstra και Bellman Ford.....	27
Πίνακας 2: Συγκριτική παρουσίαση καινοτόμων εφαρμογών δρομολόγησης.....	59
Πίνακας 3: Κριτήρια επιλογής Dijkstra για τη δρομολόγηση στο i-Mobi Volos.....	87

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1: Κατευθυνόμενος γράφος με 3 κόμβους I, j, k.....	28
Σχήμα 2: Πίνακες D_0 και S_0 κατά το τρέξιμο του αλγόριθμου Floyd	28
Σχήμα 3: Πίνακας D_{k-1} του βήματος k του αλγόριθμου Floyd	29

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους ανθρώπους που με στήριξαν και αποτέλεσαν την κινητήριο δύναμη για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής.

Αρχικά, την καθηγήτρια μου κα Ευτυχία Ναθαναήλ, για την υποστήριξη της ιδέας, την καθοδήγηση, τη συμπαράσταση και την εμπιστοσύνη που μου έχει δείξει τα τελευταία τρία χρόνια της ακαδημαϊκής μου πορείας. Χωρίς την αμέριστη βοήθειά της δεν θα είχε ολοκληρωθεί αυτή η προσπάθεια.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω το συνάδερφό μου Ορέστη Μεικόπουλο με τον οποίο συνεργάστηκα για την ανάπτυξη της πλατφόρμας i-Mobi Volos καθώς και το φίλο μου Νίκο Μέλλιο για την υπομονή, την κατανόηση και τη στήριξή του.

Ωστόσο, τίποτα δε θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς την καταλυτική συμβολή της οικογένειάς μου και ειδικότερα του πατέρα μου Ελευθέριου Χαραλαμπίδη και της μητέρας μου Στέλλας Μπαμπούλη στους οποίους και αφιερώνω την εργασία αυτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα εύρεσης της συντομότερης διαδρομής (shortest path problem) σε δίκτυα οδικά, σιδηροδρομικά, δίκτυα κοινής ωφέλειας, δίκτυα τηλεπικοινωνιών κ.λπ., συνιστά ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα των σύγχρονων επιστημών και αφορά ένα πλήθος εφαρμογών πλοήγησης και σχεδιασμού δικτύων.

Η συμβολή της θεωρίας των γράφων όσον αφορά την επίλυση προβλημάτων σε δίκτυα είναι σημαντική, καθώς η δομή ενός γράφου είναι κατάλληλη για τη μοντελοποίηση των δικτύων, των αντικειμένων τους και των συνδέσεων που υφίστανται μεταξύ των αντικειμένων αυτών.

Το πρόβλημα εύρεσης συντομότερης διαδρομής εκφράζεται κατά περίπτωση με ορισμένες διαφοροποιήσεις και ανάλογα με την περίπτωση, έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι προσαρμοσμένοι στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Όσο μεγαλύτερο είναι ένα δίκτυο και όσο πιο πολύπλοκη καθίσταται η δομή του τόσο αυξάνεται και ο βαθμός δυσκολίας που υπεισέρχεται κατά τις διαδικασίες επίλυσής του. Ως εκ τούτου, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε δικτύου και το βαθμό πολυπλοκότητάς τους έχουν αναπτυχθεί και οι κατάλληλοι αλγόριθμοι για τον υπολογισμό των βέλτιστων διαδρομών. Αρκετά όμως προβλήματα που αφορούν την επίλυση δικτύων που αναπαρίστανται διαγραμματικά ως γράφοι, παραμένουν ακόμη άλυτα είτε λόγω του τεράστιου υπολογιστικού χρόνου που η επίλυσή τους προϋποθέτει είτε λόγω περιορισμών μνήμης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, έχουν προταθεί διάφορες ad hoc προσεγγίσεις για την επίλυση αυτού του είδους των προβλημάτων, όπως για παράδειγμα το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή, αλλά η εξαγωγή μιας γενικής μεθοδολογίας που θα καθιστά δυνατή την επίλυση αποτελεί αντικείμενο περαιτέρω έρευνας και μελέτης.

Η ανάπτυξη εφαρμογών δρομολόγησης, στις οποίες υπεισέρχεται συνήθως το ζήτημα εύρεσης συντομότερων διαδρομών σε δίκτυα, συνιστά έναν ραγδαία αναπτυσσόμενο κλάδο που άπτεται του ενδιαφέροντος πολλών επιστημών όπως των συγκοινωνιολόγων, μηχανολόγων και ηλεκτρολόγων μηχανικών. Στόχος, των εφαρμογών δρομολόγησης είναι ο υπολογισμός και η παρουσίαση βέλτιστης διαδρομής στους χρήστες των εκάστοτε δικτύων λαμβάνοντας υπόψη τις προτιμήσεις των χρηστών. Οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών και οι

απαιτήσεις για την εξαγωγή αποτελεσμάτων ακριβείας, καθιστούν απαραίτητη τη διαρκή αναβάθμιση και βελτίωση των υπηρεσιών αυτών μέσα από την εισαγωγή καινοτόμων μεθόδων, εργαλείων και τεχνικών δρομολόγησης.

Η διαχείριση των χωρικών δεδομένων, η μοντελοποίησή τους, η χαρτογραφική αναπαράστασή τους και η επεξεργασία τους μέσα από την εφαρμογή αντίστοιχων αλγόριθμων δρομολόγησης συνιστούν μερικές από τις βασικότερες παραμέτρους που υπεισέρχονται στις διαδικασίες σχεδιασμού εφαρμογών δρομολόγησης. Η αποτελεσματική διαχείριση και ενσωμάτωση των παραπάνω παραμέτρων σε ολοκληρωμένες εφαρμογές δρομολόγησης απαιτεί συνήθως τη συνδυασμένη χρήση υπολογιστικών εργαλείων, όπως τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), γνωστά ευρέως και ως G.I.S. Geographic Information Systems, τα προγράμματα μοντελοποίησης και προσομοίωσης των δικτύων, οι διαδικτυακές χαρτογραφικές υπηρεσίες κ.λπ., προκειμένου να καταστεί δυνατή η πολυδιάστατη διαχείριση των δεδομένων που αφορούν τα στοιχεία και τα χαρακτηριστικά του κάθε δικτύου.

Οι εφαρμογές πλοήγησης προσφέρουν στους χρήστες τη δυνατότητα εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής μέσω της οποίας είναι δυνατή η μετάβασή τους από το σημείο προέλευσης στο σημείο προορισμού, της χρονικής διάρκειας που απαιτείται για τη συγκεκριμένη μετάβαση και της διανυόμενης απόστασης. Συνιστούν τεχνολογίες αιχμής οι οποίες βελτιώνονται διαρκώς προκειμένου να ανταποκρίνονται πλήρως στις αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών, μέσα από το σχεδιασμό νέων βελτιωμένων αλγόριθμων και την εισαγωγή καινοτόμων μεθόδων και τεχνικών διαχείρισης χωρικών δεδομένων και δικτύων.

1.1 Στόχος και αντικείμενο της εργασίας

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην επεξεργασία και αναπαράσταση βέλτιστων διαδρομών σε οδικά δίκτυα. Κύριος στόχος της είναι η επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου για το σχεδιασμό μίας ολοκληρωμένης εφαρμογής δρομολόγησης στο Πολεοδομικό Συγκρότημα του Βόλου (ΠΣΒ). Μέσα από την εφαρμογή αυτή θα παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη-μετακινούμενο να αναζητήσει τη βέλτιστη διαδρομή από το σημείο αναχώρησης μέχρι το σημείο προορισμού που θα επιλέξει, με βάση ένα από τα τρία κριτήρια βελτιστοποίησης: απόσταση (συντομότερη διαδρομή),

κόστος (οικονομικότερη διαδρομή) και ρύποι (περιβαλλοντικά φιλική διαδρομή). Αυτό εκφράζεται ως:

Για περιοχή μελέτης με δεδομένο το οδικό δίκτυο, όπου αρχικά έχουν υπολογιστεί τα βάρη ακμών του δικτύου (α) απόσταση, β) κόστος και γ) εκπεμπόμενοι ρύποι ανά κατηγορία μεταφορικού μέσου), να προσδιοριστεί ο κατάλληλος αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος εύρεσης συντομότερης διαδρομής από οποιονδήποτε κόμβο αφετηρίας προς οποιονδήποτε κόμβο προορισμού του δικτύου, βελτιστοποιώντας ένα από τα τρία βάρη ακμών.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε δώδεκα διακριτά κεφάλαια όπως αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή. Αφορά το παρόν κεφάλαιο, όπου παρουσιάζεται ο στόχος και το αντικείμενο της εργασίας καθώς και η αδρομερής περιγραφή των κεφαλαίων από τα οποία αποτελείται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρία δικτύων. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εισαγωγή στο θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίχτηκε η παρούσα διπλωματική. Αρχικά, παρατίθεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή της θεωρίας των δικτύων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η συμβολή των γράφων στη μοντελοποίηση και αναπαράσταση των δικτύων, τα βασικότερα προβλήματα της θεωρίας δικτύων και οι κατηγορίες αλγορίθμων που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση αυτών των προβλημάτων. Στο τέλος του 2^{ου} κεφαλαίου παρατίθενται οι βασικότεροι αλγόριθμοι εύρεσης συντομότερης διαδρομής, η μελέτη και σύγκριση των οποίων, αποτέλεσε τη βάση για την επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου για την πλατφόρμα πληροφόρησης μετακινούμενων i-Mobi Volos.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Δρομολόγηση. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εισαγωγή στη δρομολόγηση, στις κατηγορίες που υπάρχουν και στα μοντέλα δρομολόγησης που έχουν αναπτυχθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: State -of-the- art. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται καλές πρακτικές εφαρμογών δρομολόγησης που έχουν αναπτυχθεί σε διεθνές και εθνικό επίπεδο. Αρχικά, παρουσιάζονται ορισμένες καινοτόμες εφαρμογές δρομολόγησης των οποίων

είναι γνωστή η λειτουργική τους δομή. Στη συνέχεια, παρατίθενται η συγκριτική ανάλυση αυτών των εφαρμογών, καταδεικνύοντας τα κοινά χαρακτηριστικά και τις διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Έπειτα, παρουσιάζονται ορισμένες επιπρόσθετες, ευρέως γνωστές εφαρμογές δρομολόγησης, των οποίων όμως τα δεδομένα ανάλυσης και η λειτουργική τους δομή είναι μη δημοσιοποιήσιμα. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στη δρομολόγηση με Μέσα Μαζικής Μεταφοράς και σε ορισμένες εφαρμογές δρομολόγησης που αφορούν την αποκλειστική τους χρήση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μεθοδολογία υλοποίησης του i-Mobi Volos. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αδρομερώς το μεθοδολογικό πλαίσιο και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την ανάπτυξη και υλοποίηση του i-Mobi Volos.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αρχιτεκτονική του συστήματος. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές αρχές που θα πρέπει να πληρούνται από το i-Mobi Volos και οι συγκεκριμένες λειτουργίες που εκτελούνται, ώστε να εξυπηρετούνται οι ανάγκες των χρηστών για τις μετακινήσεις τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Ανάπτυξη μοντέλων. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αναλυτικά τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση των παραπάνω λειτουργιών και περιγράφονται τα δεδομένα εισαγωγής και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από κάθε ένα από αυτά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Προσδιορισμός αλγορίθμου δρομολόγησης για το i-Mobi Volos. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στο βασικό αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε από το i-Mobi Volos για την επίλυση του προβλήματος εύρεσης συντομότερης διαδρομής, ενώ παράλληλα αιτιολογούνται αναλυτικά τα κριτήρια που οδήγησαν στην επιλογή του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Σενάριο εφαρμογής i-Mobi Volos. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθεί ο χρήστης για τον σχεδιασμό της μετακίνησης και τη λήψη των απαραίτητων οδηγιών για τη μετάβαση από το σημείο αναχώρησης στο σημείο άφιξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: Υλοποίηση ιστοσελίδας i-Mobi Volos. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την ανάπτυξη του i-Mobi Volos και παρουσιάζεται η ιστοσελίδα στην οποία φιλοξενείται η εφαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: Δοκιμαστική λειτουργία i-Mobi Volos και επόμενα βήματα. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το στάδιο της δοκιμαστικής λειτουργίας του i-Mobi Volos και

τα επόμενα βήματα που πρόκειται να υλοποιηθούν σε βραχυπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα στο πλαίσιο της περαιτέρω ανάπτυξής του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12: Συμπεράσματα. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία ανακεφαλαίωση των βασικότερων στοιχείων που υπεισέρχονται στην ανάπτυξη μοντέλων βελτιστοποίησης διαδρομής για route planners, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που απορρέουν σχετικά με την επιλογή του εκάστοτε κατάλληλου αλγόριθμου.

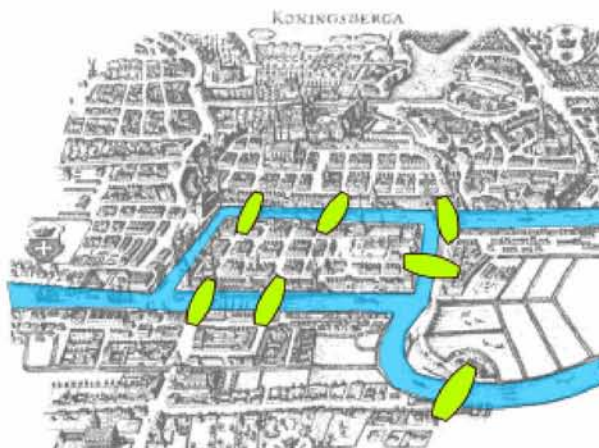
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η θεωρία των δικτύων είναι μία επιστημονική περιοχή που βρίσκεται στο μεταίχμιο μεταξύ διαφόρων ερευνητικών αντικειμένων όπως τα εφαρμοσμένα μαθηματικά, η επιστήμη των υπολογιστών, οι επιστήμες του μηχανικού, της διοίκησης και της επιχειρησιακής έρευνας (Κωνσταντόπουλος, 2008).

Οι βάσεις της θεωρίας των δικτύων τέθηκαν από την επιστήμη των διακριτών μαθηματικών στο πρώτο μισό περίπου του 18ου αιώνα. Η διαχρονική εξέλιξη και ανάπτυξη του συγκεκριμένου πεδίου των μαθηματικών κατέστησε το γράφο μια δομή, η οποία υιοθετείται πλέον από διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους καθώς είναι κατάλληλη για την αναπαράσταση πάσης φύσεως δικτύων και συστημάτων τα στοιχεία των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με σχέσεις αλληλεπίδρασης. Η πρώτη ιστορικά δημοσιευμένη, επιστημονική εργασία που σήμανε την απαρχή της μελέτης των γράφων και των προβλημάτων η αναπαράσταση των οποίων υλοποιείται με τη βοήθεια γράφων, ήταν αυτή που δημοσιεύτηκε το 1736 από τον Leonhard Euler και αφορούσε ένα χωρικό πρόβλημα που εντοπιζόταν στην πόλη Königsberg της Πρωσίας (σημερινή επαρχία Kalinigrad στη Ρωσία). Η πόλη του Königsberg περιστοιχιζόταν από

Εικόνα 1: Οι Επτά Γέφυρες του Königsberg



Πηγή: *Alexanderson, 2006*

ποτάμια ύδατα και συνδεόταν με την υπόλοιπη ενδοχώρα μέσω επτά γεφυρών. Το πρόβλημα τέθηκε ως εξής: «Είναι δυνατό κάποιος να διασχίσει και τις επτά γέφυρες της πόλης επιστρέφοντας στο ίδιο ακριβώς σημείο από το οποίο ξεκίνησε τη

διαδρομή του περνώντας από κάθε γέφυρα το πολύ μια φορά;» (Alexanderson, 2006).

Η διατύπωση του προβλήματος παραπέμπει σε παρόμοια προβλήματα που τίθενται σήμερα και αφορούν δίκτυα και την επίλυση προβλημάτων που εντοπίζονται σε αυτά, όπως για παράδειγμα η εύρεση της συντομότερης διαδρομής μεταξύ δύο σημείων ενός δικτύου, το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή, το πρόβλημα δρομολόγησης στόλου οχημάτων κ.ά.

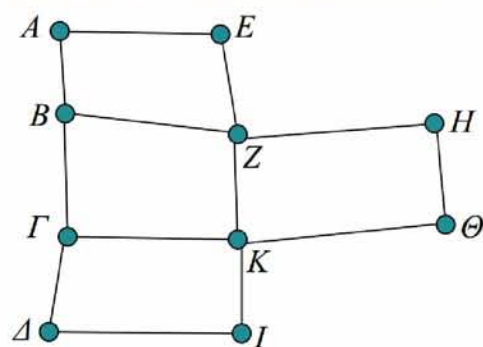
2.2 Θεωρία των γράφων

Το αντικείμενο της θεωρίας γράφων είναι η μελέτη των γράφων, μαθηματικών δομών, που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση και την αναπαράσταση των σχέσεων που υφίστανται μεταξύ ζευγών αντικειμένων. Σύμφωνα με τον ορισμό ένα **δίκτυο** (ή γράφημα) είναι ένα (πεπερασμένο) σύνολο κόμβων (σημείων ή κορυφών) και κλάδων (πλευρών ή ακμών) $G = \{V, A\}$, όπου V είναι το σύνολο των κόμβων και A το σύνολο των κλάδων. Ο κλάδος που συνδέει τους κόμβους i και j συμβολίζεται απλά (i, j) .

Στα συγκοινωνιακά δίκτυα, οι πόλεις, σταθμοί, στάσεις, διασταυρώσεις ή λιμάνι αποτελούν τους κόμβους του γραφήματος. Οι δρόμοι, αεροδιάδρομοι, γραμμές πλοίων, τρένων κ.τ.λ. αποτελούν τις ακμές του γραφήματος. Οι τιμές στις ακμές εκφράζουν απόσταση, χρόνο ταξιδιού, κόστος μετακίνησης, ρύπους κ.α.

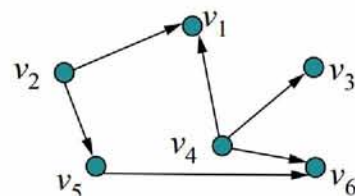
Αν κάθε κλάδος έχει μία συγκεκριμένη διεύθυνση, τότε το δίκτυο ονομάζεται **προσανατολισμένο (directed ή oriented)**, σε αντίθετη περίπτωση ονομάζεται **μη προσανατολισμένο (undirected)**. Αν κάποιοι κλάδοι έχουν διεύθυνση και κάποιοι όχι, τότε το δίκτυο ονομάζεται **μεικτό (mixed)**. Για την αναπαράσταση

Εικόνα 3: Μη προσανατολισμένο δίκτυο



Πηγή: Βούρος, 2001

Εικόνα 2: Προσανατολισμένο δίκτυο



Πηγή: Βούρος, 2001

των οδικών δικτύων χρησιμοποιούνται κατευθυνόμενοι προσανατολισμένοι γράφοι (Jensen, 2000).

Ένας κλάδος με διεύθυνση (i,j) οδηγεί από τον κόμβο i στον κόμβο j . Δύο κόμβοι που συνδέονται με ένα κλάδο καθώς και δύο κλάδοι που συνδέονται με έναν κόμβο ονομάζονται **γειτονικοί**. Ο **βαθμός** ενός κόμβου σε ένα μη προσανατολισμένο δίκτυο είναι ο αριθμός των κλάδων των οποίων μία κορυφή είναι αυτός ο κόμβος. Σε ένα προσανατολισμένο δίκτυο, ορίζεται αντίστοιχα ο βαθμός για τον αριθμό των κλάδων που καταλήγουν σε αυτό τον κόμβο (indegree) και ο βαθμός για τον αριθμό των κλάδων που απομακρύνονται από αυτό τον κόμβο (outdegree).

Ένα **μονοπάτι** (ή αλυσίδα) σε ένα μη προσανατολισμένο δίκτυο είναι μία αλληλουχία γειτονικών κλάδων και κόμβων. Σε ένα προσανατολισμένο δίκτυο, τα μονοπάτια έχουν και αυτά διεύθυνση. Ένα μονοπάτι μπορεί να παρασταθεί σαν μία αλληλουχία γειτονικών κόμβων (π.χ. $S = \{a, b, c, \dots, i, j, k\}$) ή γειτονικών κλάδων (π.χ. $S = \{(a, b), (b, c), \dots, (i, a), (j, k)\}$). Ένα μονοπάτι είναι απλό αν κάθε κλάδος εμφανίζεται το πολύ μία φορά στην αλληλουχία και βασικό αν κάθε κόμβος εμφανίζεται το πολύ μία φορά στην αλληλουχία.

Κύκλος (ή κύκλωμα) είναι ένα μονοπάτι του οποίου ο αρχικός και ο τελικός κόμβος συμπίπτουν. Μία πολύ σημαντική έννοια είναι η **συνεκτικότητα** του δικτύου. Ένας κόμβος i συνδέεται με τον κόμβο j αν υπάρχει μονοπάτι που να οδηγεί από το σημείο i στο σημείο j . Ένα μη προσανατολισμένο δίκτυο είναι συνεκτικό αν υπάρχει μονοπάτι για κάθε ζεύγος κόμβων του δικτύου. Ένα προσανατολισμένο δίκτυο είναι συνεκτικό αν το αντίστοιχο μη προσανατολισμένο δίκτυο είναι συνεκτικό. Αυτό σημαίνει ότι σε ένα συνεκτικό προσανατολισμένο δίκτυο μπορεί να μην υπάρχει μονοπάτι που να οδηγεί από κάποιο κόμβο i σε κάποιο κόμβο j . Όταν υπάρχει μονοπάτι που να οδηγεί από κάθε κόμβο i σε κάθε άλλο κόμβο j σε ένα προσανατολισμένο δίκτυο, τότε αυτό ονομάζεται **ισχυρά συνεκτικό** (Harary, 1969).

Ένα **υποδίκτυο** $G' = (V', A')$ ενός δικτύου $G = (V, A)$ είναι ένα δίκτυο τέτοιο ώστε $V' \subset V$ και $A' \subset A$. Το σύνολο A' μπορεί να περιέχει μόνο κλάδους μεταξύ σημείων του V' . Ένα δέντρο είναι ένα συνεκτικό γράφημα χωρίς κύκλους. Έτσι, ένα δέντρο σε ένα δίκτυο με n κόμβους περιέχει ακριβώς $n-1$ κλάδους. Επίσης, κάθε ζεύγος κόμβων ενός δέντρου συνδέεται μέσω ενός μοναδικού μονοπατιού. Ένα δέντρο κάλυψης

(spanning tree) ενός δικτύου G είναι ένα δέντρο που περιέχει όλους τους κόμβους του G .

Σε ένα πρόβλημα δικτύου ορίζονται κάποια χαρακτηριστικά για κάθε κόμβο και κλάδο. Συνήθως υπάρχει κάποιο μέγεθος για κάθε κλάδο του δικτύου το οποίο μπορεί να παριστάνει απόσταση, χρόνο, χωρητικότητα, ροή κτλ. Το μήκος ενός μονοπατιού μεταξύ δύο σημείων του G ισούται προφανώς με το άθροισμα των αποστάσεων όλων των κλάδων στο συγκεκριμένο μονοπάτι. Ο συμβολισμός $d(i, j)$ χρησιμοποιείται συνήθως για να υποδηλώσει την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των κόμβων i και j (Harary, 1969).

2.3 Προβλήματα θεωρίας δικτύων

Τα κυριότερα προβλήματα που εκφράζονται με τη θεωρία γραφημάτων και αναλύονται στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής είναι τα ακόλουθα:

- α) Πρόβλημα συντομότερης διαδρομής (Shortest Path Problem)
- β) Πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή (Traveling Salesman Problem)
- γ) Πρόβλημα δρομολόγησης στόλου οχημάτων (Vehicle Routing Problem)

Η επίλυση των προβλημάτων αυτών επιτυγχάνεται είτε με την εφαρμογή ειδικών αλγορίθμων είτε με την κλασική μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού, αφού προηγουμένως έχουν διατυπωθεί με κατάλληλο τρόπο.

2.3.1 Πρόβλημα συντομότερης διαδρομής (Shortest Path Problem)

Το πρόβλημα εύρεσης της συντομότερης διαδρομής αφορά στην εύρεση μιας διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων u και v ενός γράφου όπου το κόστος της διαδρομής, η οποία περιλαμβάνει το σύνολο των ενδιάμεσων ακμών που συνδέουν τους δύο κόμβους, ελαχιστοποιείται σε σύγκριση με το κόστος όλων των εναλλακτικών διαδρομών μέσω των οποίων είναι δυνατή η μετάβαση από τον κόμβο u στον κόμβο v . Το κόστος μιας διαδρομής μπορεί να αναφέρεται είτε στην απόσταση μεταξύ των κόμβων αφετηρίας και προορισμού, είτε στο χρόνο μετάβασης από τον έναν κόμβο στον άλλο, είτε στο αντίτιμο που κάποιος οδηγός θα πρέπει να πληρώσει σε σταθμούς διοδίων όταν ο γράφος προσομοιώνει οδικά δίκτυα, είτε σε οποιαδήποτε άλλη παράμετρο υπεισέρχεται στο πλαίσιο ανάλυσης της εκάστοτε εφαρμογής (Zeng, 2014).

Στη μαθηματική του έκφραση το πρόβλημα εύρεσης συντομότερης διαδρομής σε γράφο διατυπώνεται ως εξής Έστω ο σταθμισμένος γράφος $G (V, E)$ όπου V το σύνολο των κόμβων του γράφου, E το σύνολο των ακμών του γράφου και $w : E \rightarrow R$ η συνάρτηση βάρους του γράφου. Το πρόβλημα που τίθεται, αφορά στην εύρεση του συντομότερου μονοπατιού μέσω του οποίου συνδέονται οι κόμβοι u και v του γράφου. Το βάρος ενός μονοπατιού $p = v_0, v_1, \dots, v_k$ ισούται με το άθροισμα των βαρών των ακμών που συνθέτουν αυτό το μονοπάτι. Είναι δηλαδή ίσο με (Cormen, 2001):

$$w(p) = \sum_{i=1}^k w(v_{i-1}, v_i)$$

Το συντομότερο μονοπάτι $\delta (u, v)$ μεταξύ δύο κόμβων u και v είναι αυτό που ελαχιστοποιεί το βάρος διάνυσης της συγκεκριμένης διαδρομής και ικανοποιεί τις συνθήκες που φαίνονται στη σχέση που ακολουθεί. Η πρώτη σχέση ισχύει όταν υφίσταται μονοπάτι που συνδέει τους δύο κόμβους, ενώ η δεύτερη στην αντίθετη περίπτωση:

$$\delta(u, v) = \begin{cases} \min \{w(p) : u \xrightarrow{p} v\} \\ \infty \end{cases}$$

Ανάλογα με την περίπτωση που κάθε φορά εξετάζεται, διακρίνονται τέσσερις υποπεριπτώσεις του προβλήματος εύρεσης συντομότερης διαδρομής οι οποίες διατυπώνονται ως εξής:

- Το πρόβλημα εύρεσης συντομότερης διαδρομής μεταξύ ενός κόμβου αφετηρίας και ενός κόμβου προορισμού σε ένα γράφο (single - pair shortest path problem),
- Το πρόβλημα εύρεσης συντομότερης διαδρομής μεταξύ ενός κόμβου αφετηρίας και όλων των υπόλοιπων κόμβων του γράφου (single - source shortest path problem),
- Το πρόβλημα εύρεσης συντομότερης διαδρομής μεταξύ ενός κόμβου προορισμού και των υπόλοιπων κόμβων του γράφου (single - destination shortest path problem),
- Το πρόβλημα εύρεσης συντομότερης διαδρομής μεταξύ του συνόλου των ζευγών κόμβων που περιλαμβάνει ο γράφος (all - pairs shortest path problem).

Στην περίπτωση των μη σταθμισμένων γράφων, οι ακμές των οποίων θεωρούνται ισότιμες, η συντομότερη διαδρομή μεταξύ δύο κόμβων ορίζεται ως η διαδρομή εκείνη που περιλαμβάνει το μικρότερο πλήθος ακμών (Lopez, 2015).

2.3.2 Πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή (Traveling Salesman Problem)

Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 1930 και αποτελεί βασικό αντικείμενο μελέτης και ανάλυσης για πολλά ακόμα προβλήματα βελτιστοποίησης.

Το πρόβλημα είναι το εξής: Ένας πωλητής πρέπει να επισκεφθεί κάποια σημεία (πόλεις) και να γυρίσει στο αρχικό σημείο (από εκεί που ξεκίνησε). Κάθε πόλη πρέπει να την επισκεφθεί μόνο μία φορά. Ο πωλητής θα πρέπει να χρησιμοποιήσει τον πιο γρήγορο δρόμο (με το μικρότερο κόστος). Το κόστος υπολογίζεται ως διανυόμενη απόσταση (σε χιλιόμετρα) ή ο χρόνος για να διανυθεί αυτή η απόσταση.

Οι ρίζες του προβλήματος βρίσκονται στο «Hamilton's Icosian Game» το οποίο ήταν ένα ψυχαγωγικό παζλ βασιζόμενο στην εύρεση ενός «Hamiltonian» κύκλου. Οι George Dantzig, Ray Fulkerson και Selmer Johnson (1954) ήταν οι πρώτοι που έλυσαν ένα πρόβλημα με 49 πόλεις. Οι Applegate, Bixby, Chvatal Cook και Helsgaun (2004) βρήκαν τη βέλτιστη διαδρομή επίσκεψης για 24.978 πόλεις στη Σουηδία (περίπου 72.500 χιλιόμετρα). Το προηγούμενο ρεκόρ ήταν από τους Applegate, Bixby, Chvatal και Cook (2001) με 15.112 πόλεις στη Γερμανία (Kolomvos, 2014).

Η μαθηματική διατύπωση είναι η εξής: Έστω ένας γράφος $G(V,A)$ ο οποίος περιέχει:

$V = \{0,1,2,\dots,v\}$: το σύνολο των κόμβων

A : το σύνολο των ακμών που ενώνουν τους κόμβους του συνόλου v μεταξύ τους

x_{ij} : Λαμβάνει την τιμή 1 αν η ακμή $(i,j) \in A$ συμμετέχει στην τελική λύση, αλλιώς λαμβάνει την τιμή 0 (μεταβλητή απόφασης)

d_{ij} : το κόστος μετάβασης από τον κόμβο i στον κόμβο j

u_i : η θέση του κόμβου i στο δρομολόγιο

Ζητείται η διαδρομή με το ελάχιστο συνολικό κόστος που θα διανύσει ο πωλητής για να επισκεφθεί όλες τις πόλεις ακριβώς μία φορά και να επιστρέψει στην πόλη αφετηρία (Applegate, 2007).

Εικόνα 4: Μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος πλανόδιου πωλητή

$\min \sum_{(i,j) \in A} d_{ij} x_{ij}$	
$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1,$	$j \in V \setminus \{0\}$
$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1,$	$i \in V \setminus \{v\}$
$u_i - u_j + v \cdot x_{ij} \leq (v - 1)$	$i, j \in V$
$x_{ij} \in \{0,1\},$	$i, j \in V$
$1 \leq u_i \leq n - 1$	$i \in V \setminus \{0\}, u_0 = 1$

Πηγή: Applegate, 2007

Παρόλο που η διατύπωσή του φαίνεται απλή, παραμένει ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα στην Επιχειρησιακή Έρευνα. Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή ανήκει στην κατηγορία NP-Hard (Nondeterministic Polynomial Time Hard), δηλαδή δεν υπάρχει αλγόριθμος, ο οποίος να επιλύει το πρόβλημα σε πολυωνυμικό χρόνο, σε χρόνο εξαρτώμενο πολυωνυμικά από το πλήθος των πόλεων, που περιέχει ως δεδομένο το πρόβλημα. Επομένως, όταν αυξάνονται οι πόλεις, ο απαιτούμενος χρόνος μεγαλώνει εκθετικά.

Παρότι, όμως, το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή παρουσιάζει μεγάλη δυσκολία ως προς τον υπολογισμό και την πολυπλοκότητά του, ένας μεγάλος αριθμός ευρετικών αλγορίθμων έχει προταθεί, παρουσιάζοντας λύσεις και για την περίπτωση όπου υπάρχουν αρκετές πόλεις ως δεδομένο του προβλήματος.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι και αλγόριθμοι για εύρεση ακριβούς λύσης. Η πιο απλή αλγοριθμικά στην υλοποίηση είναι η τεχνική του brute-force search με την οποία δοκιμάζονται όλες τις δυνατές διαδρομές (permutations). Η πολυπλοκότητα αυτού είναι της τάξης $O(n!)$. Ένας άλλος αλγόριθμος ακριβούς αναζήτησης μπορεί να υλοποιηθεί με Δυναμικό Προγραμματισμό (Dynamic Programming), ο οποίος επιλύει το πρόβλημα με πολυπλοκότητα της τάξης $O(n^2 2^n)$. Επίσης, έχουν βρεθεί αλγόριθμοι, που επιλύουν το πρόβλημα με πολυπλοκότητα της τάξης $O(2^n)$ βασισμένοι στο inclusion-exclusion principle. Τέλος, για τους ακριβείς αλγορίθμους δεν έχει βρεθεί αν υπάρχει αλγόριθμος με πολυπλοκότητα μικρότερη από $O(2^n)$ (Kolomvos, 2014).

2.3.3 Πρόβλημα δρομολόγησης στόλου οχημάτων (Vehicle Routing Problem)

Το πρόβλημα δρομολόγησης στόλου οχημάτων, όπως και το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή, αποτελεί ένα από τα πλέον σημαντικά προβλήματα της συνδυαστικής βελτιστοποίησης και εντάσσεται στην κατηγορία των προβλημάτων του ακέραιου προγραμματισμού. Τα προβλήματα αυτά αποτελούν, συνήθως, ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού, στα οποία, όμως, οι μεταβλητές λαμβάνουν τιμές από ένα σύνολο ακεραίων αριθμών. Η βασική παρατήρηση για τον ακέραιο προγραμματισμό έγκειται στο ότι διάφορα προβλήματά του παρουσιάζουν πολυπλοκότητα τύπου NP, δηλαδή δεν έχει βρεθεί λύση γι' αυτά, που να τα επιλύει σε πολυωνυμικό χρόνο.

Το πρόβλημα της δρομολόγησης στόλου οχημάτων (VPR) αφορά στη διαχείριση των διαδικασιών παραλαβής και διανομής. Επιλύει δύσκολα προβλήματα, ειδικά αυτά των μικρών αποστάσεων (sort distance). Η βασική λογική του προβλήματος έγκειται στο πως ο διαθέσιμος στόλος οχημάτων (πόροι) μπορεί να χρησιμοποιηθεί βέλτιστα έτσι ώστε να ικανοποιήσει μια δεδομένη ζήτηση (demand) με βάση συγκεκριμένες επιχειρησιακές απαιτήσεις (Caric, 2008).

Συνολικά, υπάρχουν διάφορες παραλλαγές του βασικού προβλήματος:

- ✓ Η χωρητικότητα των οχημάτων (Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP)
- ✓ Η απόσταση που μπορεί να διανυθεί (Distance Constrained Vehicle Routing Problem, DCVRP)
- ✓ Η χωρητικότητα οχημάτων και η χρήση πολλαπλών αποθηκών (Multi - Depot Vehicle Routing Problem, MDCVRP)
- ✓ Η ανομοιογένεια της χωρητικότητας των οχημάτων (Heterogeneous Capacitated Vehicle Routing Problem, HCVRP)
- ✓ Η χωρητικότητα των οχημάτων και το χρονικό πλαίσιο της επίσκεψης των πελατών - χρονικά παράθυρα (Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows, CVRPTW)
- ✓ Η χωρητικότητα των οχημάτων και οι παραλαβές (Capacitated Vehicle Routing Problem with Backhauls, CVRPB)
- ✓ Η χωρητικότητα των οχημάτων, οι παραλαβές και η διανομή προϊόντων (Capacitated Vehicle Routing Problem with Pick up & Delivery, CVRPD).

- ✓ Η χωρητικότητα των οχημάτων με δυνατότητα εξυπηρέτησης πελατών σε πολλαπλές χρονικές περιόδους (Multi-Period Capacitated Vehicle Routing Problem, MPCVRPD).

Η θεωρητική έρευνα και οι πρακτικές εφαρμογές στο πεδίο δρομολόγησης οχημάτων ξεκίνησαν το 1959 με το «πρόβλημα αποστολής φορτηγών» (truck dispatching problem), το οποίο παρουσιάστηκε από τους Dantzig και Ramser.

Σκοπός του VPR είναι η σχεδίαση της διαδρομής, η οποία να επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση του κόστους. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας ως δεδομένα ένα σύνολο κόμβων που αντιπροσωπεύουν πελάτες, έναν κόμβο που αντιπροσωπεύει μία αποθήκη, τα κόστη μεταφοράς όλων των συνδυασμών κόμβων και μία τιμή για κάθε κόμβο πελάτη, που αντιπροσωπεύει τη ζήτηση σε προϊόντα του κάθε πελάτη, το πρόβλημα είναι να βρεθούν οι διαδρομές που ελαχιστοποιούν το κόστος (άθροισμα των κοστών μεταφοράς) και να καλύπτουν τη ζήτηση των πελατών, περνώντας από κάθε πελάτη ακριβώς μία φορά. Μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι γενίκευση του TSP, επειδή η διαδρομή που κατασκευάζεται για κάθε επιστροφή του φορτηγού στην αποθήκη (cycle) αποτελεί στην πράξη ένα TSP πρόβλημα.

Το πρόβλημα δρομολόγησης στόλου οχημάτων αποτελεί ένα από τα πιο δύσκολα προς επίλυση προβλήματα και η δυσκολία του αυξάνει εκθετικά όσο μεγαλώνει ο αριθμός των πελατών (Karoonsoontawong, 2015).

Η μελέτη ενός τέτοιου προβλήματος είναι σημαντική, αφού απαραίτητο ζήτημα αποτελεί η εξοικονόμηση χρόνου, κυρίως για τη μεταφορά αγαθών και υπηρεσιών. Οι μεταφορείς έχουν να αντιμετωπίσουν από τη μία τις πιέσεις για τη μείωση του κόστους μεταφοράς, από την άλλη την αύξηση του κόστους λόγω διαφόρων παραγόντων, με κυριότερο την αύξηση των τιμών των καυσίμων. Οι νέες αντιλήψεις για την αποθεματοποίηση, οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των πελατών και προϊόντα με μικρό κύκλο ζωής, απαιτούν από τους μεταφορείς να προγραμματίζουν τις διαδρομές τους με τρόπο ώστε να επιτυγχάνουν όσο το δυνατόν την πλέον βέλτιστη διαδρομή. Έτσι μπορούν και συμβουλεύονται διάφορα συστήματα για αυτόν τον σκοπό, όπως: τα Υπολογιστικά Συστήματα Βέλτιστης Δρομολόγησης (Computerized Vehicle Routing System), όπου μέσα από έναν μεγάλο αριθμό ζητούμενων διαδρομών, τις οποίες επεξεργάζονται, βρίσκουν τον

πλέον αποδοτικό τρόπο υλοποίησης, υπολογίζοντας τον χρόνο και το καύσιμο που απαιτείται (Caric, 2008).

2.4 Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων

Οι βασικότερες κατηγορίες αλγορίθμων που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση των προβλημάτων δρομολόγησης της θεωρίας δικτύων είναι οι: ακριβείς, ευρετικοί και μεθευρετικοί. Δοθέντος ενός προβλήματος, ένας αλγόριθμος είναι μία καλά προσδιορισμένη διαδικασία που παρέχει ακριβείς οδηγίες σύμφωνα με τις οποίες τα δεδομένα του προβλήματος μετασχηματίζονται και συνδυάζονται για να προκύψει η λύση του (Xhafa, 2008).

2.4.1 Ακριβείς αλγόριθμοι

Οι ακριβείς αλγόριθμοι προσδιορίζουν τη βέλτιστη λύση ενός προβλήματος ελέγχοντας όλες τις πιθανές λύσεις του. Συνήθως επιλύουν προβλήματα περιορισμένων διαστάσεων και μικρής πολυπλοκότητας, ενώ σε διαφορετικές περιπτώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε απαγορευτικούς για τη χρήση τους χρόνους. Έστω ένα πρόβλημα με k στοιχεία τότε υπάρχουν $k!$ διαφορετικές τοποθετήσεις των στοιχείων που θα πρέπει να εξεταστούν και να αξιολογηθούν για να προκύψει η βέλτιστη λύση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο αλγόριθμος διακλάδωσης και αποκοπής (branch and cut). Στην ουσία πρόκειται για έναν αλγόριθμο διακλάδωσης και φραγής (branch and bound) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού καθώς χρησιμοποιεί τη μέθοδο simplex (Xhafa, 2008).

2.4.2 Ευρετικοί αλγόριθμοι

Οι ευρετικοί αλγόριθμοι έρχονται να καλύψουν το μειονέκτημα του μεγάλου χρόνου επίλυσης των ακριβών αλγορίθμων, θυσιάζοντας, όμως, την απόλυτη βελτιστοποίηση. Αυτοί οι αλγόριθμοι επιδιώκουν να βρουν μία προσέγγιση του βέλτιστου μέσα σε λογικά μικρό χρονικό διάστημα. Μία λύση αυτής της κατηγορίας αλγορίθμων, για να γίνει αποδεκτή, πρέπει να ικανοποιεί κάποια κριτήρια, όπως η ποιότητα της λύσης (απόκλιση από τη βέλτιστη), η ευκολία απόκτησής της και η λογική στην οποία στηρίζονται οι κανόνες που οδηγούν στη λύση. Κατηγορίες ευρετικών αλγορίθμων είναι οι εποικοδομητικές μέθοδοι (Constructive Methods) και ο αλγόριθμος δύο φάσεων (2-Phase Algorithm) (Xhafa, 2008).

2.4.3 Μεθευρετικοί αλγόριθμοι

Οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι, όπως και οι ευρετικοί, είναι μέθοδοι επίλυσης και δίνουν προσεγγίσεις στη βέλτιστη λύση. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους είναι: Προσδιοριστική Ανόπτηση (Deterministic Annealing), Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing), Περιορισμένη Αναζήτηση (Tabu Search), Γενετικοί και Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Genetic and Evolutionary Algorithms), Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization), Προγραμματισμός με περιορισμούς (Constraint Programming) κ.α. Τα χαρακτηριστικά των μεθευρετικών αλγορίθμων είναι τα εξής: Μοντελοποιούν ένα φαινόμενο που υπάρχει στη φύση, μπορούν να μεταφερθούν εύκολα σε παράλληλη μορφή και είναι προσαρμοστικοί αλγόριθμοι (Xhafa, 2008).

2.5 Αλγόριθμοι εύρεσης συντομότερης διαδρομής

2.5.1 Αλγόριθμος του Dijkstra

Ο αλγόριθμος Dijkstra είναι ένας από τους πιο αντιπροσωπευτικούς αλγορίθμους της κατηγορίας ‘ακριβείς αλγόριθμοι’ ο οποίος επιλύει το πρόβλημα εύρεσης συντομότερης διαδρομής από έναν κόμβο αφετηρίας προς έναν ή περισσότερους κόμβους προορισμού (single - source shortest path problem) σε ένα σταθμισμένο κατευθυνόμενο γράφο $G (V, E)$ όπου όλα τα βάρη των ακμών είναι θετικά, δηλαδή αν $w (u, v) \geq 0$ για κάθε ακμή (u, v) που ανήκει στο σύνολο των ακμών E του γράφου (Nha, 2012).

Ο υπολογισμός του αλγόριθμου ξεκινά από ένα κόμβο i προς έναν αμέσως επόμενο κόμβο j , χρησιμοποιώντας μια ειδική διαδικασία τοποθέτησης ετικετών. Αν u_i είναι η συντομότερη απόσταση από τον κόμβο αφετηρίας 1 στο κόμβο i , και $d_{ij} (>=0)$ το μήκος του τόξου (i,j) , τότε η ετικέτα για τον κόμβο j συμβολίζεται ως:

$$[u_j, i] = [u_i + d_{ij}, i], d_{ij} \geq 0$$

Οι ετικέτες των κόμβων στον αλγόριθμο του Dijkstra είναι δύο ειδών: προσωρινές και μόνιμες. Μία προσωρινή ετικέτα μπορεί να αντικατασταθεί από μία άλλη ετικέτα αν έχει βρεθεί η συντομότερη διαδρομή για τον ίδιο κόμβο. Στο σημείο που καθίσταται φανερό πως δεν υπάρχει καλύτερη διαδρομή, τότε η προσωρινή ετικέτα αλλάζει σε μόνιμη. Τα βήματα του αλγόριθμου συνοψίζονται ως εξής:

Βήμα 0: Ονόμασε τον κόμβο αφετηρίας (κόμβος 1) με την προσωρινή ετικέτα $[0, -]$.
 Όρισε $i=1$.

Βήμα i :

α) Υπολόγισε τις προσωρινές ετικέτες $[u_i + d_{ij}, i]$ για κάθε κόμβο j , ο οποίος μπορεί να προσεγγιστεί από τον κόμβο i , υπό την προϋπόθεση ότι δεν έχει σημειωθεί ως μόνιμος. Αν ο κόμβος j έχει σημειωθεί με $[u_j, k]$ μέσα από έναν άλλο κόμβο k και αν $u_i + d_{ij} < u_j$, αντικατέστησε $[u_j, k]$ με $[u_i + d_{ij}, i]$.

β) Αν όλοι οι κόμβοι έχουν μόνιμες ετικέτες, σταμάτησε. Αλλιώς, επέλεξε την ετικέτα $[u_r, s]$ με την μικρότερη απόσταση ($=u_r$) από όλες τις προσωρινές ετικέτες (σπάσε αυθαίρετα τους δεσμούς). Όρισε $i=r$ και επανέλαβε το βήμα i (Taha, 1997).

Στη συνέχεια, δίνεται ο ψευδοκώδικας του αλγόριθμου Dijkstra.

DIJKSTRA (G, j, s)

```

1 for each vertex  $v \in V[G]$ 
2   do  $d[v] \leftarrow \infty$ 
3      $p[v] \leftarrow \text{NIL}$ 
4  $d[s] \leftarrow 0$ 
5  $s \leftarrow 0$ 
6  $Q \leftarrow V[G]$ 
7 while  $Q \neq \emptyset$ 
8 do  $u \leftarrow \text{EXTRACT-MIN}(Q)$ 
9  $S \leftarrow S \cup \{u\}$ 
10 for each vertex  $j \in \text{Adj}[u]$  do
11 if  $d[j] > d[u] + w(u, j)$  then
12 begin
13  $d[j] \leftarrow d[u] + w(u, j)$ 
14  $P[j] \leftarrow u$ 
15 end

```

Στις πρώτες γραμμές 1-3 του ψευδοκώδικα, γίνεται η αρχικοποίηση των μεταβλητών. Η γραμμή 5 αρχικοποιεί το S ως το κενό σύνολο, ενώ η 6 αρχικοποιεί την ουρά προτεραιότητας Q , έτσι ώστε να περιέχονται όλες οι ακμές στο $V-S=V-$

$O=V$. Στις γραμμές 7- 13 εκτελείται ένας βρόχος while μέσα στον οποίο γίνονται τα εξής :

Εξάγεται από την ουρά προτεραιότητας Q , (επομένως από το σύνολο $V-S$), ακμή u με ελάχιστη προσωρινή ετικέτα βάρους και εισάγεται στο σύνολο S . Πρώτη, εξάγεται από το V και εισάγεται στο S , η ακμή-αφετηρία s . Για κάθε ακμή-διάδοχο j της u , ελέγχεται αν περνώντας από την ακμή u επιτυγχάνεται μείωση της τιμής της ετικέτας της j , δηλαδή αν η βέλτιστη διαδρομή προς την j είναι μέσο της u . Αν συμβαίνει κάτι τέτοιο, ενημερώνεται ανάλογα η ετικέτα βάρους της j καθώς και η γονική ακμή της στο δέντρο βέλτιστων διαδρομών.

Παρατηρείται ότι μετά τη γραμμή 6 δεν γίνεται εισαγωγή κορυφών στην Q , ενώ σε κάθε εκτέλεση του βρόχου while εξάγεται μία ακμή από την Q και εισάγεται στο S . Επομένως, ο βρόχος while επαναλαμβάνεται ακριβώς V φορές, έτσι η ετικέτα βάρους ελέγχεται και εφόσον χρειαστεί ενημερώνονται τόσο αυτή όσο και η γονική.

Το γεγονός αυτό αποτελεί το βασικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου αυτού έναντι των άλλων αλγορίθμων βέλτιστων διαδρομών λόγω του ότι σχετίζεται άμεσα με τον 'κανόνα' βάσει του οποίου ο αλγόριθμος Dijkstra επιλέγει ακμές και κόμβους. Έτσι, ο αλγόριθμος Dijkstra, καθώς κατασκευάζει το δέντρο, μία μόνο ακμή αποκτά 'μόνιμη ετικέτα' τη φορά σε κάθε επανάληψη του βρόχου while. Όταν όμως μία ακμή αποκτήσει 'μόνιμη ετικέτα', το συντομότερο μονοπάτι από την ακμή-αφετηρία s προς αυτήν δεν επιδέχεται αλλαγές γιατί είναι γνωστό (Nha, 2012).

Έστω n ο συνολικός αριθμός των κόμβων και s ο συνολικός αριθμός των συνδέσμων σε ένα οδικό δίκτυο. Η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου Dijkstra είναι $O(n^2 + s) = O(n^2)$, δηλαδή τετραγωνική. Στον αρχικό αλγόριθμο οι κόμβοι του συνόλου $V-S$ δεν είναι ταξινομημένοι. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως για να βρεθεί ο κόμβος με το ελάχιστο βάρος πρέπει να ελεγχθούν τα βάρη όλων των κόμβων σε κάθε επανάληψη, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρονοβόρο. Μία βελτίωση του αρχικού αλγορίθμου Dijkstra θα ήταν η αποθήκευση των κόμβων σε μία δομή δεδομένων με τέτοιο τρόπο ώστε οι κόμβοι να είναι ταξινομημένοι με αύξουσα διάταξη των βαρών τους. Ο αρχικός χρόνος μπορεί επομένως να μειωθεί με την οργάνωση των κόμβων σε μια ουρά προτεραιότητας με μία δυαδική σωρό. Η πολυπλοκότητα αυτού του αλγορίθμου είναι $O((n + s)\log n)$ ή $O(s\log n)$ στην περίπτωση που όλοι οι κόμβοι είναι προσβάσιμοι από την αφετηρία. Μια άλλη τροποποίηση είναι να εφαρμοστεί μία

σειρά προτεραιότητας με σωρό Fibonacci. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η πολυπλοκότητα αυτής της έκδοσης του αλγόριθμου Dijkstra να γίνει $O(n \log n + s) = O(n \log n)$. Συνεπώς, η καλύτερη χρήση δομών δεδομένων μειώνει την τετραγωνική πολυπλοκότητα του αλγόριθμου Dijkstra σε λογαριθμική (Nha, 2012 and Bast, 2014).

2.5.2 Αλγόριθμος του Bellman Ford

Ο αλγόριθμος Bellman Ford λύνει το πρόβλημα single source shortest path πρόβλημα, στην περίπτωση που τα βάρη των ακμών μπορούν να είναι αρνητικά. Έστω κατευθυνόμενος γράφος $G = (V, E)$, με αφετηρία s και συνάρτηση βάρους $w: E \rightarrow \mathbb{R}$. Ο αλγόριθμος Bellman Ford επιστρέφει μία λογική τιμή που δείχνει αν υπάρχει ή όχι κύκλος αρνητικού βάρους που να είναι προσβάσιμος από την αφετηρία s . Αν υπάρχει τέτοιος κύκλος, η λογική τιμή που επιστρέφει ο αλγόριθμος είναι FALSE, υποδεικνύοντας έτσι ότι δεν υπάρχει λύση. Αντίθετα, αν δεν υπάρχει τέτοιος κύκλος, ο αλγόριθμος επιστρέφει την τιμή TRUE και κατασκευάζει το δέντρο συντομότερων μονοπατιών (Tewari, 2014).

Ο Bellman Ford χρησιμοποιεί τη μέθοδο απόδοσης ετικέτας. Μειώνει προοδευτικά την προσωρινή ετικέτα $d[u]$ της ακμής u , που αντιπροσωπεύει το βάρος συντομότερου μονοπατιού από την αφετηρία s προς κάθε ακμή $u \in V$, μέχρις ότου επιτευχθεί το βάρος του απόλυτα βέλτιστου μονοπατιού $\delta(s, u)$. Ωστόσο, σε αντίθεση με τον αλγόριθμο του Dijkstra, κάθε ακμή εξετάζεται $|V| - 1$ φορές και επομένως στη γενική περίπτωση κάθε ακμή σαρώνεται περισσότερες από μία φορές. Συνεπώς, το δένδρο που κατασκευάζει ο αλγόριθμος Bellman Ford είναι δένδρο βέλτιστων μονοπατιών μόνο όταν τελειώσει το τρέξιμο του αλγορίθμου και η ετικέτα που αντιστοιχεί σε μία ακμή είναι η «μόνιμη» ετικέτα της κατά τον τερματισμό του αλγορίθμου. Επομένως, ο προσδιορισμός του βέλτιστου μονοπατιού από μία ακμή-αφετηρία προς μία ακμή προορισμό γίνεται μόνο με τον τερματισμό του αλγορίθμου Bellman Ford και όχι μόλις η ακμή-προορισμός σαρωθεί για πρώτη φορά, όπως συμβαίνει στον αλγόριθμο του Dijkstra.

Στη συνέχεια ακολουθεί περιγραφή του αλγόριθμου Bellman Ford με τη μορφή ψευδοκώδικα.

1 for each vertex $u \in V [G]$

```

2   do d [v] <-- ∞
3       p [v] <--NIL
4 d [s] <-- 0
5 for i <-- 1 to |V [G]| - 1
6   do for each edge (u, v) ∈ E [G]
7       do if d [v] > d [u] + w (u, v) then
8           begin
11              d [v] <-- d [u] + w(u, v)
12              p [v] <-- u
13           end
9 for each edge (u, v) ∈ E [G]
10 do if d [v] > d [u] + w (u, v) then
11     return FALSE
12 return TRUE

```

Στις γραμμές 1-4, ο αλγόριθμος εκτελεί τις κατάλληλες αρχικοποιήσεις για την τιμή d της ακμής- αφετηρίας και τις τιμές των d , p των άλλων κορυφών . Ακολουθεί ένα for-loop στις γραμμές 5-8 που επαναλαμβάνεται $|V|-1$ φορές . Σε καθεμία απ' αυτές τις επαναλήψεις συμβαίνουν τα εξής:

Εξετάζονται όλες οι ακμές του γράφου και ελέγχεται αν μπορεί να μειωθεί η προσωρινή ετικέτα που αντιστοιχεί στην ακμή - ουρά κάθε ακμής . Αν κάτι τέτοιο συμβαίνει, ενημερώνεται η προσωρινή ετικέτα της ακμής - ουράς με τη νέα τιμή και αλλάζει κατάλληλα ο γονέας της στο υπό κατασκευή δένδρο συντομότερων μονοπατιών.

Στις γραμμές 9-10 ελέγχεται για κάθε ακμή αν ισχύει η εξής σχέση : $d[v] > d[u] + w(u, v)$. Αν ισχύει, μπορεί να αποδειχθεί ότι ο γράφος περιέχει κύκλο αρνητικού βάρους που είναι προσβάσιμος από την ακμή - αφετηρία, οπότε και ο αλγόριθμος επιστρέφει την τιμή FALSE. Διαφορετικά, φθάνουμε στην γραμμή 11, οπότε ο αλγόριθμος επιστρέφει TRUE, έχοντας κατασκευάσει το δένδρο συντομότερων μονοπατιών (Sedgewick, 2014).

Ο χρόνος «τρεξίματος» του αλγόριθμου Bellman Ford είναι $O(|V| * |E|)$, όπου $|V|$ και $|E|$ το σύνολο των κόμβων και των ακμών αντίστοιχα (Bast, 2014).

Σύμφωνα με τις μελέτες του Shivani και Singh (2013) ο αλγόριθμος Dijkstra παρέχει καλύτερα αποτελέσματα από τον Bellman Ford. Συγκρίνοντας τους δύο αλγόριθμους σε ένα δίκτυο VANET στο λογισμικό πακέτο Matlab οι ερευνητές συμπέραναν τα εξής:

Πίνακας 1: Σύγκριση μεταξύ του αλγόριθμου Dijkstra και Bellman Ford

Παράμετρος	Dijkstra	Bellman Ford
Γενικά έξοδα	Λιγότερα	Περισσότερα
Επεκτασιμότητα	Περισσότερη	Λιγότερη
Ποιότητα βέλτιστης διαδρομής	Καλύτερη	Λιγότερο καλή
Αρνητικά βάρη	Όχι	Ναι
Καθυστερήσεις	Λιγότερες	Περισσότερες

Πηγή: Shivani, 2013

Ο αλγόριθμος Dijkstra έχει λιγότερα γενικά έξοδα σε σχέση με τον Bellman Ford, όπου γενικά έξοδα νοούνται οι επιπλέον υπολογισμοί που εκτελούνται για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Ο Dijkstra έχει μεγαλύτερη επεκτασιμότητα από τον Bellman Ford. Η επεκτασιμότητα αντανακλά τη μείωση της επίδοσης του αλγορίθμου όταν το μέγεθος του οδικού δικτύου αυξάνεται. Σχετικά με την ποιότητα της βέλτιστης λύσης, ο αλγόριθμος Dijkstra δίνει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τον Bellman Ford. Επομένως, η δρομολόγηση που παράγει ο Dijkstra είναι πιο κοντά στη βέλτιστη διαδρομή. Ο Dijkstra αφορά δίκτυα με μη αρνητικά κόστη ακμών, ενώ ο Bellman Ford λειτουργεί και σε δίκτυα με αρνητικά κόστη ακμών. Τέλος, αναφορικά με τις καθυστερήσεις ο Dijkstra απαιτεί λιγότερο χρόνο σε σχέση με τον αλγόριθμο Bellman Ford για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής.

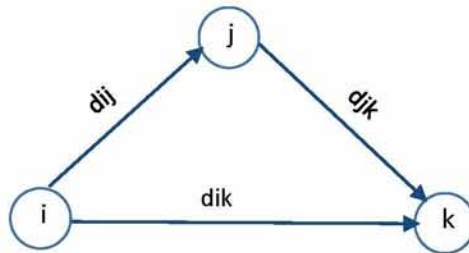
2.5.3 Αλγόριθμος Floyd Warshall

Ο αλγόριθμος Floyd είναι πιο γενικός από τον αλγόριθμο Dijkstra επειδή καθορίζει τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ οποιονδήποτε δύο κόμβων στο δίκτυο. Ο αλγόριθμος αναπαριστά ένα n – κόμβων δίκτυο σαν ένα τετραγωνικό πίνακα με n σειρές και n στήλες. Η εγγραφή (i, j) στον πίνακα δίνει την απόσταση d_{ij} , από τον κόμβο i στον κόμβο j , η οποία είναι πεπερασμένη αν ο κόμβος i συνδέεται απευθείας με τον κόμβο j , ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι μη πεπερασμένη (Taha, 1997).

Η βασική ιδέα του αλγόριθμου Floyd είναι απλή. Δοθέντων τριών κόμβων i , j και k (σχήμα 1) με τις συνδεόμενες αποστάσεις να απεικονίζονται στις 3 ακμές, είναι συντομότερο να προσεγγιστεί ο κόμβος k από τον i μέσω του j αν:

$$d_{ij} + d_{jk} < d_{ik}$$

Σχήμα 1: Κατευθυνόμενος γράφος με 3 κόμβους i, j, k



Πηγή: Taha, 1997

Σε αυτήν την περίπτωση είναι προτιμότερο να αντικατασταθεί η άμεση διαδρομή από τον $i \rightarrow k$ με την έμμεση διαδρομή $i \rightarrow j \rightarrow k$. Αυτή η τριπλή λειτουργία ανταλλαγής εφαρμόζεται συστηματικά στο δίκτυο χρησιμοποιώντας τα ακόλουθα βήματα.

Βήμα 0: Καθόρισε τον αρχικό πίνακα D_0 και τον επόμενο πίνακα S_0 όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2. Τα διαγώνια στοιχεία σημειώνονται με (-) για να δείξουν ότι είναι μπλοκαρισμένα. Όρισε $k=1$.

Σχήμα 2: Πίνακες D_0 και S_0 κατά το τρέξιμο του αλγόριθμου Floyd

$D_0 = i$	-	d_{12}	...	d_{ij}	...	d_{in}
	d_{21}	-	...	d_{2j}	...	d_{2n}

	d_{i1}	d_{i2}	...	d_{ij}	...	d_{in}

	d_{n1}	d_{n2}	...	d_{nj}	...	-

$S_0 = 1$

-	2	...	j		n
1	-	...	j		n
...
1	2		j		n
...
1	2		j		-

Πηγή: Taha, 1997

Γενικό βήμα k: Καθόρισε την σειρά k και τη στήλη k σαν σειρά περιστροφής και στήλη περιστροφής. Εφάρμοσε την τριπλή λειτουργία σε κάθε στοιχείο d_{ij} στον πίνακα D_{k-1} για όλα τα i και j. Αν η συνθήκη:

$$d_{ik} + d_{kj} < d_{ij} \quad (i \neq k, j \neq k \text{ και } i \neq j)$$

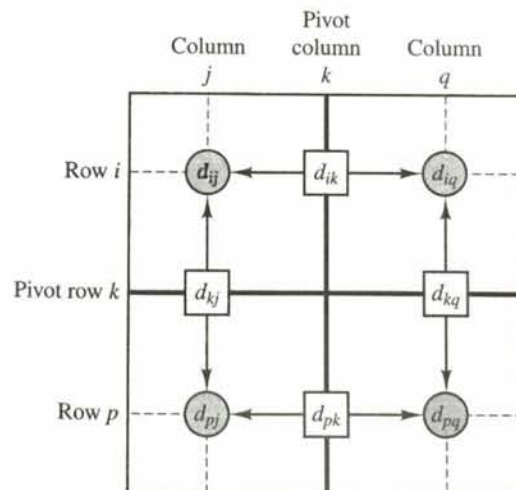
ικανοποιείται, κάνε τις ακόλουθες αλλαγές:

α) Δημιούργησε τον πίνακα D_k αντικαθιστώντας το d_{ij} στον D_{k-1} με $d_{ik} + d_{kj}$

β) Δημιούργησε τον S_k αντικαθιστώντας το s_{ij} στον S_{k-1} με k. Όρισε $k = k+1$ και επανέλαβε το βήμα k.

Το βήμα k του αλγόριθμου μπορεί να εξηγηθεί πιο εύκολα με την αναπαράσταση του D_{k-1} όπως φαίνεται στο σχήμα 3.

Σχήμα 3: Πίνακας D_{k-1} του βήματος k του αλγόριθμου Floyd



Πηγή: Taha, 1997

Σε αυτό η σειρά k και η στήλη k καθορίζουν την τρέχουσα σειρά περιστροφής και την στήλη περιστροφής αντίστοιχα. Η σειρά i αναπαριστά οποιαδήποτε από τις σειρές $1, 2, \dots, k-1$ και η σειρά p αναπαριστά οποιαδήποτε από τις στήλες $k+1, k+2, \dots, n$. Η τριπλή λειτουργία μπορεί να εφαρμοστεί ως εξής: Αν το άθροισμα των στοιχείων στην σειρά περιστροφής και στη στήλη περιστροφής (απεικονίζονται με τετράγωνα στο σχήμα 3) είναι μικρότερο από το αντίστοιχο στοιχείο τομής (απεικονίζονται με κύκλους στο σχήμα 3), τότε είναι προτιμότερο να αντικατασταθεί η απόσταση των στοιχείων τομής με το άθροισμα των αποστάσεων περιστροφής.

Μετά από n , βήματα μπορεί να καθοριστεί η συντομότερη διαδρομή μεταξύ των κόμβων i και j από τους πίνακες D_n και S_n , χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους κανόνες.

1. Από τον πίνακα D_n , το d_{ij} δίνει τη συντομότερη απόσταση μεταξύ των κόμβων i και j .
2. Από τον πίνακα S_n , μπορεί να καθοριστεί ο ενδιάμεσος κόμβος $k = s_{ij}$, που παράγει τη διαδρομή $i \rightarrow k \rightarrow j$. Αν $s_{ik}=k$ και $s_{kj}=j$, σταματά η διαδικασία καθώς όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι της διαδρομής έχουν βρεθεί. Σε αντίθετη περίπτωση επαναλαμβάνεται η διαδικασία μεταξύ των κόμβων i και k και των κόμβων k και j (Taha, 1997).

2.5.4 Αλγόριθμος A^*

Ο αλγόριθμος A^* εφαρμόζεται για την επίλυση προβλημάτων εύρεσης συντομότερης διαδρομής από έναν κόμβο αφετηρίας προς έναν κόμβο προορισμού (single - pair shortest path problem). Η λογική βάσει της οποίας δομείται, είναι παρόμοια με αυτή του αλγόριθμου Dijkstra. Σε αντίθεση όμως με τον Dijkstra, ο αλγόριθμος A^* χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μεγάλων γράφων όπου η πολυπλοκότητα του αλγόριθμου του Dijkstra καθίσταται απαγορευτική. Ο αλγόριθμος A^* αξιοποιεί τις τεχνικές της τεχνητής νοημοσύνης, προκειμένου να αυξηθεί η ταχύτητα αναζήτησης στους γράφους μέσα από την εφαρμογή ευρετικών κανόνων (heuristics).

Αρχικά, εκτιμάται το κόστος μετάβασης από τον κόμβο αφετηρίας στον κόμβο προορισμού. Πρόκειται για μια ενδεικτική και όχι για μια ακριβή εκτίμηση. Στη συνέχεια, υπολογίζονται αναδρομικά τα κόστη μετάβασης στους γειτονικούς

κόμβους του αρχικού κόμβου και αποκλείονται εξ αρχής μονοπάτια που έχουν μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με αυτό που είχε αρχικά εκτιμηθεί (AlShawi, 2012).

Αναλυτικότερα, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια συνάρτηση $f(u, d)$ εκτίμησης του κόστους μετάβασης από τον κόμβο αφετηρίας στον κόμβο προορισμού προκειμένου να εκτιμηθεί ένα αρχικό κόστος, στη βάση του οποίου πρόκειται να ελεγχθούν τα κόστη των μονοπατιών που ανακαλύπτονται στη συνέχεια. Ο ψευδοκώδικας του αλγόριθμου A^* που παρουσιάζεται ακολούθως, προκύπτει από τον ψευδοκώδικα του αλγόριθμου του Dijkstra και εμφανίζεται διαφοροποιημένος αφενός ως προς τη συνάρτηση $f(u, d)$ που χρησιμοποιείται για την αρχική εκτίμηση του κόστους και αφετέρου ως προς τους ευρετικούς κανόνες που υπεισέρχονται κατά τη διαδικασία εύρεσης του συντομότερου μονοπατιού.

```

1 procedure D i j k s t r a (G (V, E), v, d, f);
2 {
3     var: integer;
4     foreach u in V do {C (v, u) = inf; C (v, v) = 0; path (v, u): =null}
5     frontierSet: = [v]; exploredSet: =emptySet;
6     while not_empty (frontierSet) do
7         {select w from frontierSet with minimum (C (v, w) + f (w, d));
8         frontierSet: = frontierSet - [w]; exploredSet: = exploredSet + [w];
9         if (u = d) then terminate
10        else {fetch (w.adjacencyList);
11            foreach < u, C (w, u) > in w.adjacencyList
12            if C (v, u) > C (v, w) + C (w, u) then
13            {
14                C (v, u):= C (v, w) + C (w, u);
15                path (v, u):= path (v, w) + (w, u);
16                if u ∈ frontierSet U exploredSet then
17                    frontierSet := frontierSet + [u];
18            }
19        }
20    }
21 }
```

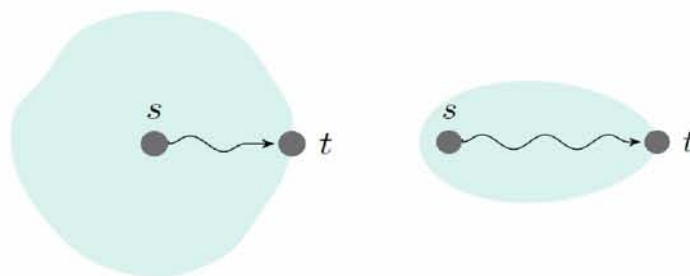
Η διαδικασία αναζήτησης του αλγόριθμου A^* ολοκληρώνεται μετά την επανάληψη εκείνη του βρόχου `while` όπου προσπελαύνεται ο κόμβος u ως ο κόμβος προορισμού της διαδρομής με το μικρότερο κόστος και εισάγεται στο σύνολο των επισκεφθέντων κόμβων `frontierSet` με το μικρότερο συσσωρευμένο κόστος. Όσο μικρότερο είναι το πλήθος των ακμών που συνθέτουν το συντομότερο μονοπάτι από τον κόμβο εκκίνησης στον κόμβο προορισμού, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος που απαιτείται για το τρέξιμο του αλγόριθμου. Ο αλγόριθμος δεν είναι απαραίτητο να επισκεφθεί το σύνολο των κόμβων του γράφου προκειμένου να ανακαλύψει τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ των κόμβων αφετηρίας και προορισμού, καθώς πολλοί από αυτούς ανήκουν σε μονοπάτια τα οποία έχουν ήδη αποκλειστεί, πριν αυτοί οι κόμβοι προσπελαθούν λόγω υψηλού κόστους (Lerner, 2009).

Η πολυπλοκότητα του αλγόριθμου A^* εξαρτάται από τους ευρετικούς κανόνες που χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση. Έτσι, εάν η συνάρτηση εκτίμησης που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος είναι η $f(x)$ τότε η πολυπλοκότητα του αλγόριθμου ορίζεται ως εξής:

$$|f(x) - f^*(x)| = O(\log f^*(x))$$

Όπου f^* είναι ο βέλτιστος ευρετικός κανόνας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής σε ένα γράφο. Εάν η επιλεγμένη συνάρτηση εκτίμησης ικανοποιεί μια συγκεκριμένη συνθήκη, ο αλγόριθμος A^* εγγυάται ότι θα βρει μία βέλτιστη διαδρομή, εάν αυτή υπάρχει, ενώ η αναζήτηση θα πραγματοποιηθεί σε λιγότερο χώρο από τον αλγόριθμο Dijkstra. Για να καταστεί κατανοητή αυτή η εξοικονόμηση χώρου, χρησιμοποιείται ένας κύκλος για να παρασταθεί ο χώρος στον οποίο γίνεται η αναζήτηση και μία έλλειψη για τον αντίστοιχο χώρο στον αλγόριθμο A^* όπως φαίνεται στην εικόνα 5 (Bast, 2014).

Εικόνα 5: Οι χώροι αναζήτησης στον αλγόριθμο Dijkstra (αριστερά) και A^* (δεξιά)



Πηγή: Bast, 2014

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ

3.1 Γενικά για τη δρομολόγηση

Εξ ορισμού, η δρομολόγηση είναι μία διαδικασία που αφορά όλα τα δίκτυα. Η ιδέα εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής είναι κοινή σε όλα τα δίκτυα και οι αρχές σχεδίασης παρόμοιες.

Ορισμένες βασικές εφαρμογές της δρομολόγησης επάνω σε σύγχρονες τεχνολογίες είναι τα Δίκτυα Υπολογιστών (Computer Networks), το Παγκόσμιο Σύστημα Θεσιθεσίας (Global Positioning System-GPS), η Πλοήγηση (Navigation), και η Διαχείριση Στόλου Οχημάτων (Fleet Management).

Από τα δίκτυα των υπολογιστών, όμως, μέχρι τη διαχείριση οχημάτων σε οδικά δίκτυα, είναι απαραίτητη η κατάστρωση και σχεδίαση της βέλτιστης διαδρομής επάνω σε έναν γράφο, του οποίου οι ακμές χαρακτηρίζονται από κόστη. Για τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος δρομολόγησης, το φυσικό δίκτυο μεταφοράς περιγράφεται μέσω ενός γραφήματος, του οποίου οι κόμβοι αντιστοιχούν σε τοποθεσίες και οι κλάδοι αντιστοιχούν σε τμήματα δρόμων (Medhi, 2007).

Η εύρεση αυτών των βέλτιστων διαδρομών, δηλαδή η διαδρομή που οδηγεί από έναν κόμβο σε έναν άλλον με το ελάχιστο δυνατό κόστος, αντιμετωπίζει αρκετά προβλήματα. Η βέλτιστη διαδρομή από άποψη κόστους για κάθε πρόβλημα ορίζεται διαφορετικά μέσω ορισμένων κριτηρίων, που προκύπτουν από τη φύση και τον ορισμό του κάθε εξεταζόμενου προβλήματος, όπως οι χρονικές καθυστερήσεις, οι χιλιομετρικές αποστάσεις, η κυκλοφοριακή συμφόρηση, το κόστος σε χρήμα, οι εκπεμπόμενοι ρύποι ή και συνδυασμός κριτηρίων ανάλογα με την εκάστοτε υπό μελέτη περίπτωση.

Ο αντικειμενικός σκοπός του προβλήματος είναι η εύρεση της βέλτιστης διαδρομής, δηλαδή η διαδρομή που οδηγεί από έναν κόμβο σε έναν άλλο και με το ελάχιστο κόστος (Medhi, 2007).

Ένα σύστημα παραγωγής προτάσεων για τη δρομολόγηση οχημάτων (route planner), δηλαδή για την πρόταση της διαδρομής που θα ακολουθήσει το όχημα πρέπει να επιτελεί όλες ή μερικές από τις παρακάτω λειτουργίες:

- ✓ απόκτηση, αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων σχετικά με το οδικό δίκτυο, τις ροές κίνησης και την κατάσταση στην περιοχή όπου γίνεται η πλοήγηση
- ✓ συλλογή δεδομένων πραγματικού χρόνου σχετικά με την κίνηση, τις συνθήκες που επικρατούν και τους παράγοντες που την επηρεάζουν
- ✓ επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων για την εύρεση της διαδρομής που θα ακολουθήσει το όχημα
- ✓ παρουσίαση της πληροφορίας δρομολόγησης στους χρήστες του συστήματος
- ✓ μετάδοση δεδομένων και πληροφορίας για την πλοήγηση ανάμεσα στα διάφορα τμήματα του συστήματος.

Κάθε μια από αυτές τις λειτουργίες μπορεί να προσεγγιστεί με διάφορους τρόπους. Μια ποικιλία τεχνολογικών επιλογών είναι διαθέσιμη για κάθε προσέγγιση και οι μεμονωμένες επιλογές μπορούν να συνδυαστούν με πολλούς τρόπους για να σχηματίσουν ένα μεγάλο εύρος από συστήματα υλικού και λογισμικού για τη δρομολόγηση οχημάτων. Χρησιμοποιώντας τον τύπο των δεδομένων ως βάση για την ταξινόμηση, τα συστήματα δρομολόγησης διακρίνονται σε αυτά που βασίζονται σε στατικά και σε αυτά που βασίζονται σε δυναμικά δεδομένα. Στη δεύτερη κατηγορία μπορεί να γίνει περαιτέρω διάκριση σε αντιδραστικά (reactive) και προληπτικά (anticipatory) (Jahn, 2005).

3.2 Στατική δρομολόγηση

Η στατική δρομολόγηση αναφέρεται στην καθοδήγηση που είναι ανεξάρτητη από τις συγκεκριμένες συνθήκες κίνησης που επικρατούν στην περιοχή δρομολόγησης. Στην περίπτωση του οδικού δικτύου, συνήθως πρόκειται για μία βάση δεδομένων με γενικές συνθήκες κίνησης, χωρίς να υπάρχει πληροφορία για την κίνηση σε πραγματικό χρόνο (real time data). Παραδείγματα στατικής δρομολόγησης είναι οι οδηγίες από σημείο σε σημείο που βασίζονται σε μία μέση κατάσταση της κίνησης ή οδηγίες για σημεία ενδιαφέροντος και κατευθύνσεις για την επίσκεψή τους. Αυτός ο τύπος δρομολόγησης είναι ιδιαίτερα χρήσιμος σε χρήστες του οδικού δικτύου που δεν είναι εξοικειωμένοι με την περιοχή στην οποία βρίσκονται. Τα συστήματα αυτής της κατηγορίας παρέχουν πληροφόρηση περιορίζοντας τις καθυστερήσεις κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, ωστόσο επειδή δεν

χρησιμοποιεί πραγματικά δεδομένα κίνησης, έχει περιορισμένες δυνατότητες να επηρεάσει την κυκλοφοριακή κατάσταση με ελεγχόμενο τρόπο (Prasanna, 2010).

3.3 Αντιδραστική δρομολόγηση

Η αντιδραστική δρομολόγηση βασίζεται σε δεδομένα σχετικά με τις συνθήκες στο δίκτυο που επικρατούσαν την ώρα ή περίπου την ώρα που η διαδρομή υπολογιζόταν. Αυτές οι συνθήκες ονομάζονται χρονική στιγμή. Το εξ' ορισμού χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας είναι πως τα μηνύματα καθοδήγησης αντανακλούν τις στιγμιαίες συνθήκες που ένας οδηγός θα αντιμετώπιζε ακολουθώντας τη διαδρομή στο δίκτυο, ενώ δεν γίνεται καμιά προσπάθεια να προβλεφθούν οι μελλοντικές συνθήκες.

Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων είναι ότι εφόσον δε χρειάζεται να πραγματοποιούν προβλέψεις, μπορούν να αντιδρούν γρήγορα σε αλλαγές της κυκλοφοριακής κατάστασης του δικτύου. Ένα πιθανό μειονέκτημα είναι ότι οι συνθήκες στο δίκτυο μπορεί να αλλάξουν σημαντικά κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού με απόρροια να μην ισχύει η πρόβλεψη για το χρόνο άφιξης στον προορισμό με βάση την προτεινόμενη διαδρομή. Η καθοδήγηση που βασίζεται σε στιγμιαία δεδομένα μπορεί να ταυτιστεί με την καθοδήγηση που βασίζεται σε πραγματικές συνθήκες που συναντά ο οδηγός όταν ικανοποιούνται τα παρακάτω:

- ✓ Οι συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο δεν αλλάζουν σημαντικά κατά τη διάρκεια του ταξιδιού.
- ✓ Ο χρόνος ταξιδιού είναι μικρός σε σχέση με τη χρονική κλίμακα στην οποία συμβαίνουν αλλαγές στις κυκλοφοριακές συνθήκες.
- ✓ Το οδικό δίκτυο προσφέρει πολλές δυνατότητες εναλλαγής διαδρομών (πολλές διασταυρώσεις) και οι οδηγοί δέχονται συχνά μηνύματα για αλλαγή της πορείας τους.

Τα αντιδραστικά συστήματα δρομολόγησης διακρίνονται σε συστήματα περιορισμένης πληροφόρησης, όπου υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα κίνησης για ένα τμήμα του οδικού δικτύου και σε συστήματα πλήρους πληροφόρησης, που επεξεργάζονται δεδομένα κίνησης για ολόκληρο το δίκτυο (Prasanna, 2010).

3.4 Προληπτική δρομολόγηση

Στην προληπτική δρομολόγηση η πληροφορία που δέχονται οι οδηγοί από το σύστημα βασίζεται στις κυκλοφοριακές συνθήκες που προβλέπεται ότι θα αντιμετωπίσουν κατά τη διάρκεια του ταξιδιού τους. Είναι προφανές ότι η προληπτική δρομολόγηση βασίζεται σε προβλέψεις για τις μελλοντικές τιμές των μεταβλητών του δικτύου. Οι προβλέψεις αυτές είναι αποτέλεσμα συνδυασμού μετρήσεων πραγματικού χρόνου για την κίνηση και ιστορικών δεδομένων. Αυτές οι πηγές δεδομένων αποτελούν την είσοδο ενός μοντέλου προβλέψεων.

Το πρόβλημα των συστημάτων προληπτικής δρομολόγησης είναι το εξής: όταν οι οδηγοί δέχονται προτάσεις που βασίζονται σε προβλέψεις η αντίδρασή τους θα επηρεάσει τις μελλοντικές κυκλοφοριακές συνθήκες. Όταν ο αριθμός των οχημάτων που είναι εξοπλισμένα με κάποιο τέτοιο σύστημα είναι μικρός οι μεταβολές είναι αμελητέες και μπορούν να αγνοηθούν. Όταν, όμως, ένα σημαντικό ποσοστό οδηγών χρησιμοποιούν συστήματα προληπτικής δρομολόγησης, τα μοντέλα πρόβλεψης πρέπει να λάβουν υπόψη και την επίπτωση που θα έχει η δρομολόγηση των οχημάτων στις διάφορες διαδρομές στις κυκλοφοριακές συνθήκες (Prasanna, 2010).

3.5 Οι αρχές ισορροπίας του Wardrop

Έστω ένας γράφος που αναπαριστά το οδικό δίκτυο μιας περιοχής, οι αντίστοιχες συναρτήσεις απόδοσης των ακμών και ο πίνακας O-D. Το βασικό πρόβλημα στην πιο απλοποιημένη μορφή του είναι η εύρεση των ροών κίνησης και των χρόνων ταξιδιού στις ακμές του γράφου. Το πρόβλημα είναι γνωστό ως κατανομή της κίνησης (traffic assignment) καθώς το ζητούμενο είναι η κατανομή του πίνακα O-D στο δίκτυο. Για την επίλυση του προβλήματος απαιτείται ο καθορισμός κάποιου κανόνα σύμφωνα με τον οποίο οι οδηγοί επιλέγουν μια διαδρομή. Το 1952 ο Άγγλος συγκοινωνιολόγος Wardrop ανέπτυξε δύο αρχές ισορροπίας που περιγράφουν δύο κανόνες επιλογής διαδρομής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του προβλήματος. Σύμφωνα με την πρώτη αρχή ισορροπίας του Wardrop οι χρόνοι ταξιδιού σε όλες τις διαδρομές που χρησιμοποιούνται είναι ίσοι και μικρότεροι από το χρόνο που θα συναντούσε ένα μόνο όχημα σε οποιαδήποτε μη χρησιμοποιούμενη διαδρομή. Η αρχή αυτή υποδηλώνει ότι κανένας οδηγός δεν μπορεί να βελτιώσει το χρόνο ταξιδιού του εάν αλλάξει διαδρομή. Οι ροές κίνησης που ικανοποιούν αυτή

την αρχή ονομάζονται ροές ισορροπίας χρήστη (UE – User Equilibrium). Μια παραλλαγή είναι η στοχαστική ισορροπία χρήστη (Stochastic User Equilibrium) όπου θεωρείται ότι κανένας οδηγός δεν έχει πλήρη γνώση της κατάστασης του δικτύου και δε θεωρεί ότι μπορεί να βελτιώσει το χρόνο ταξιδιού του αλλάζοντας διαδρομή.

Σύμφωνα με τη δεύτερη αρχή ισορροπίας του Wardrop στην κατάσταση ισορροπίας ο μέσος χρόνος ταξιδιού ελαχιστοποιείται. Η αρχή υποδηλώνει ότι οι οδηγοί συμπεριφέρονται συνεργατικά και επιλέγουν κάποια διαδρομή που εξασφαλίζει την αποτελεσματική χρήση ολόκληρου του συστήματος. Οι ροές κίνησης που ικανοποιούν τη δεύτερη αρχή του Wardrop λέγονται βέλτιστες για το σύστημα ροές (SO – System Optimal) (Ortuzar, 2011).

3.6 Μοντέλα δρομολόγησης

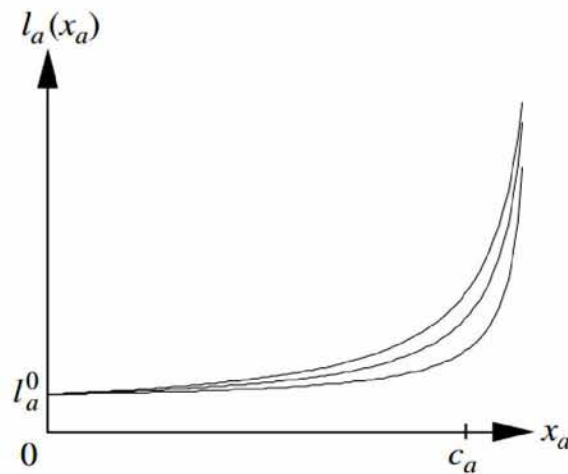
Οι αρχές του Wardrop χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την επίλυση του προβλήματος κατανομής της κίνησης. Προέκυψαν έτσι τρία μοντέλα (βέλτιστο για το χρήστη, βέλτιστο για το σύστημα και βέλτιστο για το σύστημα υπό περιορισμούς), οι βασικές αρχές των οποίων μπορούν να εφαρμοστούν στα συστήματα πλοήγησης οχημάτων για την εύρεση της διαδρομής που θα προταθεί στους οδηγούς που τα χρησιμοποιούν. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα μοντέλα για τη δρομολόγηση ενός οχήματος, δηλαδή για την πρόταση που θα παράγει το σύστημα πλοήγησης σε έναν οδηγό που ζητάει καθοδήγηση. Ως δρομολόγηση θεωρείται η περίπτωση της αντιδραστικής δρομολόγησης. Όπως συμβαίνει και για την επίλυση του προβλήματος κατανομής της κίνησης, για την εύρεση της προτεινόμενης διαδρομής θεωρείται ότι η κατάσταση του δικτύου ως προς την κυκλοφοριακή ροή παραμένει αμετάβλητη κατά το διάστημα της ανάλυσης. Για την ενσωμάτωση των αλλαγών που λαμβάνουν χώρα στην κυκλοφοριακή κατάσταση στο δίκτυο, μπορούν σε τακτά χρονικά διαστήματα να στέλνονται ενημερωμένα δεδομένα σχετικά με την κίνηση στις ακμές. Ανάμεσα σε δύο ενημερώσεις, όμως, η κατάσταση του δικτύου θεωρείται πως δε μεταβάλλεται (Jahn, 2005).

3.6.1 Συνάρτηση απόδοσης ακμής

Η εμπέδηση ταξιδιού (ή επίπεδο ποιότητας) που σχετίζεται με τις ακμές που αναπαριστούν ένα οδικό δίκτυο μπορεί να περιλαμβάνει πολλά στοιχεία, όπως ο

χρόνος ταξιδιού, η ασφάλεια, το κόστος ταξιδιού, η σταθερότητα της κυκλοφοριακής ροής κ.α. Το πρωτεύων στοιχείο της εμπέδησης είναι ο χρόνος ταξιδιού και συχνά χρησιμοποιείται ως το μόνο μέτρο για την εμπέδηση της ακμής. Μελέτες έχουν δείξει ότι πρόκειται για τον παράγοντα που σχετίζεται περισσότερο με την κυκλοφοριακή ροή. Επίσης, όλα τα άλλα στοιχεία εμπέδησης σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με το χρόνο ταξιδιού και εμφανίζουν τις ίδιες τάσεις. Επιπλέον, ο χρόνος ταξιδιού μπορεί να μετρηθεί ευκολότερα από κάθε άλλη παράμετρο. Στα συστήματα μεταφοράς η εμπέδηση είναι μια συνάρτηση που δείχνει τη χρησιμοποίηση αυτών των συστημάτων. Εξ' αιτίας της συμφόρησης ο χρόνος ταξιδιού στους δρόμους μιας πόλης είναι μια αύξουσα συνάρτηση της κυκλοφοριακής ροής. Συνεπώς, μια συνάρτηση απόδοσης και όχι ένα σταθερό μέτρο του χρόνου ταξιδιού πρέπει να αντιστοιχηθεί σε κάθε ακμή του οδικού δικτύου. Η συνάρτηση απόδοσης συσχετίζει το χρόνο ταξιδιού σε κάθε ακμή με την κυκλοφοριακή ροή που διασχίζει την ακμή (Jahn, 2005).

Εικόνα 6: Χαρακτηριστική μορφή συναρτήσεων απόδοσης ακμής



Πηγή: Jahn, 2005

Για τις συναρτήσεις απόδοσης υπάρχει η απαίτηση να μην είναι φθίνουσες, να είναι παραγωγίσιμες και το γινόμενο $l_a(x_a)x_a$ να είναι κυρτό. Οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιούνται από τις συναρτήσεις απόδοσης που συνήθως χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν τις επιπτώσεις της συμφόρησης. Η συμπεριφορά των συναρτήσεων που έχουν τη μορφή που φαίνεται στην παραπάνω εικόνα είναι η εξής: όταν δεν υπάρχει καθόλου κίνηση στην ακμή ο χρόνος διάσχισης είναι ο ελάχιστος, στη συνέχεια αυξάνεται με αργούς ρυθμούς μέχρι το σημείο μέγιστης πρακτικής κυκλοφοριακής ικανότητας c_a του δρόμου, πέρα από το οποίο αυξάνεται

πολύ γρήγορα. Ο οργανισμός U.S. Bureau of Public Roads έχει προτείνει μια συνάρτηση που μοντελοποιεί με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια τη σχέση ανάμεσα στην κίνηση μιας ακμής και το χρόνο ταξιδιού σε αυτήν:

$$I_{\alpha}(x_{\alpha}) := I_{\alpha}^0 (1 + \alpha(x_{\alpha}/c_{\alpha})^{\beta})$$

όπου $I_{\alpha}^0 > 0$ ο χρόνος ταξιδιού στην ακμή όταν δεν υπάρχει κυκλοφοριακή ροή, x_{α} η κυκλοφοριακή ροή της ακμής και c_{α} η μέγιστη πρακτική κυκλοφοριακή ικανότητα σε οχήματα ανά μονάδα χρόνου (συνήθως ανά ώρα) και $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$ ρυθμιστικοί παράμετροι. Για δρόμους μέσα σε πόλεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές $\alpha=0.15$ και $\beta=4$ (Bureau of Public Roads, 1964).

3.6.2 Βέλτιστη για το χρήστη δρομολόγηση

Το μοντέλο της βέλτιστης για το χρήστη δρομολόγησης (User Optimal) ακολουθείται σχεδόν από όλα τα συστήματα πλοήγησης οχημάτων. Βασίζεται στο ότι οι οδηγοί κινούνται στις συντομότερες διαδρομές για να φτάσουν στον προορισμό τους και γι' αυτό δεν υπάρχει λόγος να αλλάξουν διαδρομή (1^η αρχή του Wardrop).

Σε αυτήν την περίπτωση οι οδηγοί επιλέγουν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο εκείνη τη διαδρομή που ελαχιστοποιεί το χρόνο ταξιδιού του οχήματός τους. Αν θεωρηθεί ότι ο μέσος χρόνος ταξιδιού σε κάθε ακμή δίνεται από τη συνάρτηση του U.S. Bureau of Public Roads που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ο χρόνος ταξιδιού ενός οχήματος που κινείται σε ένα μονοπάτι P είναι το άθροισμα $\sum I_{\alpha}(x_{\alpha})$ για όλες τις ακμές που ανήκουν στο μονοπάτι. Εφόσον, ένα σύστημα πλοήγησης που ακολουθεί αυτό το μοντέλο στοχεύει στην εύρεση του μονοπατιού που ελαχιστοποιεί αυτήν την ποσότητα, αρκεί να λύσει το πρόβλημα του συντομότερου μονοπατιού θεωρώντας ως κόστος ακμής την ποσότητα $I_{\alpha}(x_{\alpha})$ για την εύρεση την προτεινόμενης διαδρομής.

Το μοντέλο παρότι δεν παρέχει καμία εγγύηση ότι θα βελτιώσει την κυκλοφοριακή κατάσταση στο δίκτυο θεωρείται το πιο δίκαιο για τους οδηγούς, από τη στιγμή που όλοι ακολουθούν τη συντομότερη δυνατή διαδρομή για να φτάσουν στον προορισμό τους (Kameda, 2011).

3.6.3 Βέλτιστη για το σύστημα δρομολόγηση

Το μοντέλο της βέλτιστης για το σύστημα δρομολόγησης (System Optimal) βασίζεται στη 2^η αρχή ισορροπίας του Wardrop, σύμφωνα με την οποία η επιλογή των διαδρομών γίνεται με τρόπο που βελτιστοποιεί τη χρήση του δικτύου. Σκοπός του μοντέλου είναι η μείωση του χρόνου ταξιδιού συνολικά στο σύστημα, δηλαδή η βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών μέσω της αύξησης της χωρητικότητας του συστήματος.

Ένα σύστημα πλοήγησης που ακολουθεί αυτό το μοντέλο έχει ως στόχο την επιλογή της διαδρομής που ελαχιστοποιεί την επίπτωση (αύξηση) στο συνολικό χρόνο μετακίνησης στο δίκτυο, που είναι αντιπροσωπευτικός της συνολικής κίνησης από τη δρομολόγηση του οχήματος. Η ζυγισμένη ποσότητα $\Sigma I_{\alpha}(x_{\alpha})$ για όλες τις ακμές του δικτύου, είναι ενδεικτική του συνολικού χρόνου ταξιδιού στο σύστημα (Mertsching, 2009).

Η συνάρτηση απόδοσης του U.S. Bureau of Public Roads υπονοεί ότι ο χρόνος ταξιδιού σε μία ακμή επηρεάζεται μόνο από τη ροή κυκλοφορίας της ακμής και όχι από τις ροές γειτονικών ακμών. Έτσι, κατά τη δρομολόγηση ενός οχήματος θεωρείται ότι επηρεάζονται μόνο οι κυκλοφοριακές ροές στο μονοπάτι που ακολουθείται. Η επίπτωση της προσθήκης ενός επιπλέον αυτοκινήτου στο συνολικό χρόνο ταξιδιού μιας ακμής δίνεται από την παράγωγο $[I_{\alpha}(x_{\alpha})x_{\alpha}]'$. Το ανάπτυγμα της παραγώγου $I_{\alpha}(x_{\alpha}) + [I_{\alpha}(x_{\alpha})]'x_{\alpha}$ δείχνει ότι η αύξηση στο χρόνο ταξιδιού μιας ακμής από ένα επιπλέον όχημα προέρχεται από το χρόνο ταξιδιού του επιπλέον οχήματος συν την αύξηση στο χρόνο ταξιδιού των υπόλοιπων οχημάτων.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως ένα σύστημα πλοήγησης που ακολουθεί αυτό το μοντέλο πρέπει να προτείνει το μονοπάτι που ελαχιστοποιεί το άθροισμα $\Sigma [I_{\alpha}(x_{\alpha})x_{\alpha}]'$ για όλες τις ακμές που ανήκουν στο μονοπάτι, δηλαδή του μονοπατιού στο οποίο η προσθήκη του οχήματος θα έχει τη μικρότερη επίπτωση στο συνολικό χρόνο ταξιδιού (εφόσον επηρεάζονται μόνο οι ροές των ακμών του μονοπατιού). Πρέπει, επομένως, να λύσει το πρόβλημα του συντομότερου μονοπατιού με κόστος ακμής το οριακό κόστος $[I_{\alpha}(x_{\alpha})x_{\alpha}]'$.

Η βέλτιστη για το σύστημα δρομολόγηση, παρότι έχει ευεργετικές επιπτώσεις για την κίνηση που επικρατεί σε ένα οδικό δίκτυο, δε χρησιμοποιείται στην πράξη. Είναι μη ρεαλιστικό να ζητείται από κάποιους οδηγούς να ταξιδεύουν περισσότερο ή

ακόμα και πολύ περισσότερο από το βέλτιστο για αυτούς, για την εξυπηρέτηση του κοινού συμφέροντος. Το πιο πιθανό είναι οι οδηγοί να αγνοήσουν τις προτάσεις του συστήματος και να ακολουθήσουν τις διαδρομές που αντιλαμβάνονται ως συντομότερες (Mertsching, 2009).

3.6.4 Βέλτιστη για το σύστημα υπό περιορισμούς δρομολόγηση

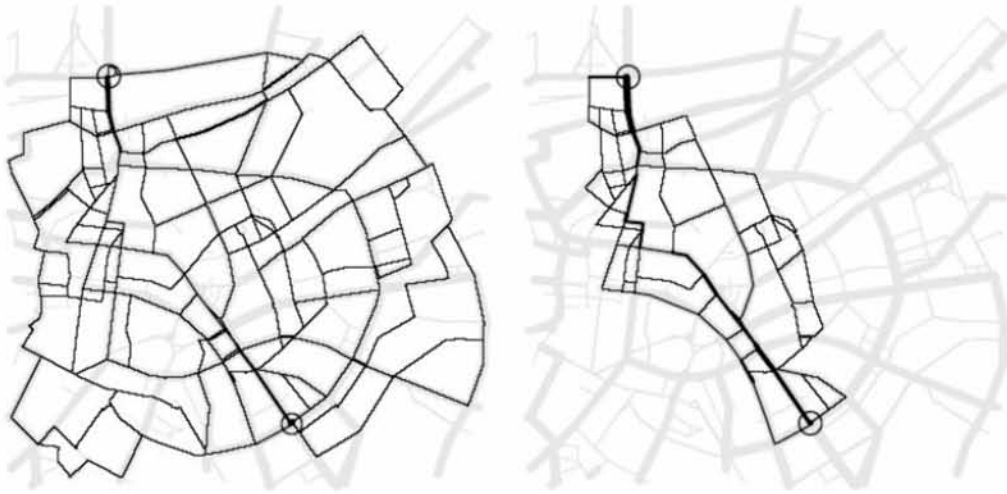
Η βέλτιστη για το σύστημα υπό περιορισμούς δρομολόγηση (Constrained System Optimal) αποτελεί ένα συνδυασμό των δύο προαναφερόμενων μοντέλων.

Στόχος του μοντέλου όπως και στην περίπτωση της βέλτιστης για το σύστημα δρομολόγησης, είναι η επιλογή του μονοπατιού που ελαχιστοποιεί το άθροισμα $\sum [l_{\alpha}(x_{\alpha})x_{\alpha}]'$ για όλες τις ακμές που ανήκουν στο μονοπάτι, δηλαδή του μονοπατιού στο οποίο η προσθήκη οχήματος θα έχει τη μικρότερη επίπτωση στο συνολικό χρόνο ταξιδιού στο δίκτυο. Για να αποφευχθεί όμως κάποιος οδηγοί να ταξιδεύουν περισσότερο από ότι στην περίπτωση της βέλτιστης για το χρήστη δρομολόγησης, τίθεται επιπλέον ο περιορισμός ο χρόνος στο προτεινόμενο μονοπάτι να μην είναι μεγαλύτερος από το χρόνο ταξιδιού του βέλτιστου για το χρήστη μονοπατιού περισσότερο από ένα προκαθορισμένο ποσοστό. Προκύπτει έτσι ένας παράγοντας ανοχής φ που σχετίζεται άμεσα με την αδικία του συστήματος. Για παράδειγμα, αν το ποσοστό είναι 10% ο παράγοντας φ έχει τιμή 1.10. Επομένως, από το σύνολο των μονοπατιών που συνδέουν την αφετηρία με τον προορισμό μόνο ένα υποσύνολο ικανοποιεί τον περιορισμό $T_P \leq \varphi T_{U0}$ και μπορεί να προταθεί από ένα σύστημα πλοήγησης (Jahn, 2005).

Από το υποσύνολο των μονοπατιών που ικανοποιούν τον περιορισμό επιλέγεται στη συνέχεια το μονοπάτι με την ελάχιστη τιμή του αθροίσματος $\sum [l_{\alpha}(x_{\alpha})x_{\alpha}]'$. Για την εύρεση της διαδρομής που προτείνει το μοντέλο πρέπει να επιλυθεί το

πρόβλημα του συντομότερου μονοπατιού με έναν περιορισμό, με κόστος ακμής $[l_\alpha(x_\alpha)x_\alpha]'$, βάρος ακμής $l_\alpha(x_\alpha)$ και μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος μονοπατιού φT_{Uo} .

Εικόνα 7: Περιορισμός του συνόλου των μονοπατιών



Πηγή: Qureshi, 2013

Ως κριτήριο για τον περιορισμό του συνόλου των δυνατών μονοπατιών θα μπορούσε για μεγαλύτερη απλότητα να χρησιμοποιηθεί το μήκος των ακμών ή ο χρόνος διάσχισης σε συνθήκες μηδενικής κίνησης (οι δύο ποσότητες σχετίζονται στενά), ώστε να μην απαιτείται πρώτα η επίλυση του βέλτιστου για το χρήστη προβλήματος. Πειράματα όμως, έδειξαν ότι σε αυτή την περίπτωση για μικρές τιμές του παράγοντα φ , ο συνολικός χρόνος ταξιδιού στο σύστημα είναι μεγαλύτερος από ότι στο βέλτιστο για το χρήστη μοντέλο. Επομένως, για λύσεις υψηλής ποιότητας πρέπει να χρησιμοποιείται ως κριτήριο ο χρόνος ταξιδιού στο βέλτιστο για το χρήστη μονοπάτι, που εξαρτάται και από τις ροές κυκλοφορίας και συνεπώς αποτελεί μία ένδειξη των μονοπατιών που πρέπει να επιλεγούν. Επιπλέον, το βέλτιστο για το χρήστη μονοπάτι είναι μια πιθανή λύση του προβλήματος και επομένως για κάθε $\varphi \geq 1$ ισχύει $C(\text{CSO}) \leq C(\text{UO})$ που εγγυάται ότι η λύση του βέλτιστου για το σύστημα υπό περιορισμούς προβλήματος δεν είναι ποτέ χειρότερη από τη λύση του βέλτιστου για το χρήστη προβλήματος, όσον αφορά το συνολικό χρόνο ταξιδιού στο σύστημα (Jahn, 2005).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: State -of-the- art εφαρμογές δρομολόγησης

4.1 Λειτουργική ανάλυση καινοτόμων εφαρμογών δρομολόγησης

Την τελευταία δεκαετία υπάρχει πληθώρα εφαρμογών δρομολόγησης σχεδιασμού μετακινήσεων. Ένα σύστημα δρομολόγησης, στην απλούστερη μορφή του, προτείνει τη βέλτιστη, ως προς την απόσταση, διαδρομή ανάμεσα σε δυο γεωγραφικά σημεία. Στο παρελθόν τα συστήματα δρομολόγησης παρείχαν γενικές μόνο πληροφορίες και ήταν χρήσιμα μόνο σε επίπεδο στρατηγικού σχεδιασμού και όχι στην καθημερινή πρακτική και δραστηριοποίηση των φορέων μεταφοράς. Σήμερα οι σύγχρονες εφαρμογές δρομολόγησης έχουν εμπλουτιστεί με πληθώρα λειτουργιών και διασυνδέονται με λεπτομερή Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών - GIS (Geographical Information Systems) για τη δημιουργία αναλυτικών διαδρομών υψηλής ακρίβειας σε ελάχιστο χρόνο.

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται αντιπροσωπευτικά, αναλυτικά παραδείγματα εφαρμογών δρομολόγησης (route planners), οι αλγόριθμοι και τα δεδομένα που χρησιμοποιούν (στατικά δεδομένα ή δεδομένα σε πραγματικό χρόνο), ενώ περιγράφεται η γενικότερη λειτουργική τους δομή.

- ❖ Εφαρμογή εύρεσης συντομότερης διαδρομής για στελέχη επιχειρήσεων με τη χρήση του αλγόριθμου Dijkstra σε συσκευή Android

Ο Makone το 2012 ανέπτυξε μία εφαρμογή που απευθύνεται κυρίως σε στελέχη επιχειρήσεων για την εύρεση συντομότερης διαδρομής, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Dijkstra. Ο Dijkstra θεωρείται ο πιο γρήγορος αλγόριθμος εύρεσης συντομότερης διαδρομής επιλύοντας το single-source shortest-path πρόβλημα στην περίπτωση που όλα τα βάρη των ακμών του δικτύου είναι μη αρνητικά. Ο αλγόριθμος αυτός όταν χρησιμοποιείται σε συσκευές Android και υποστηρίζεται από το κατάλληλο GUI μπορεί να δημιουργήσει μία απλή αλλά παράλληλα ισχυρή εφαρμογή, χρήσιμη για στελέχη επιχειρήσεων, τουρίστες ακόμη και για τους ίδιους τους κατοίκους μιας πόλης.

Η εφαρμογή δοκιμάστηκε πιλοτικά στη συσκευή κινητής τηλεφωνίας Samsung GALAXY Fit. GT-S5670, η οποία χρησιμοποιεί λογισμικό Android. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι στατικά ενώ η βελτιστοποίηση της διαδρομής λαμβάνει

υπόψη μόνο τον παράγοντα της απόστασης. Η εφαρμογή χρησιμοποιεί την αγγλική γλώσσα, ενώ η συντομότερη διαδρομή αναφέρεται σε μετακίνηση με αυτοκίνητο.

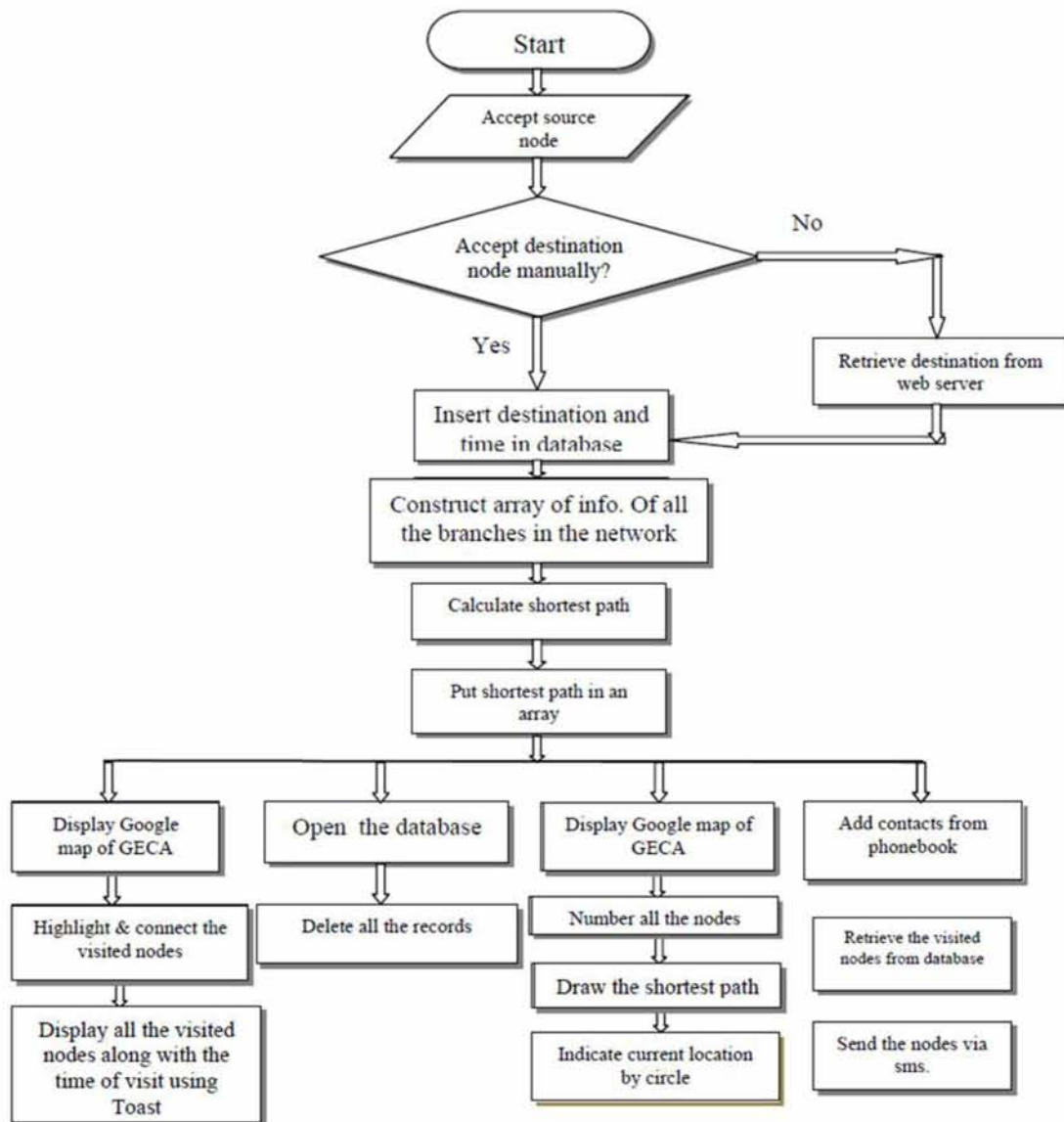
Αρχικός σκοπός ήταν η χρήση της εφαρμογής από στελέχη επιχειρήσεων σε ένα μικρό δίκτυο αποτελούμενο από 24 κόμβους. Ως μελλοντικός όμως στόχος τέθηκε η επέκταση του δικτύου και η κάλυψη ευρύτερης γεωγραφικά περιοχής καθώς και η χρήση της εφαρμογής από περισσότερους μετακινούμενους.

Η λειτουργική διαδικασία είναι η ακόλουθη:

- Αρχικά ο χρήστης εισάγει το όνομά του σε ένα παράθυρο εισόδου (login name).
- Στη συνέχεια επιλέγει τον κόμβο προέλευσης και τον κόμβο προορισμού στα πλαίσια κειμένου που του εμφανίζονται (editTexts).
- Οι επιλεχθέντες κόμβοι αποθηκεύονται σε μία βάση SQLite για μελλοντική χρήση.
- Μία αμφίδρομη διάταξη δημιουργείται βάσει της οποίας θα υπολογιστεί ο αλγόριθμος Dijkstra. Κάθε γραμμή σε αυτή τη διάταξη αντιστοιχεί σε κάθε ένα από τους κλάδους του δικτύου. Η πρώτη στήλη αποτελείται από όλους τους κόμβους προέλευσης με τη δεύτερη να περιλαμβάνει κόμβους πιθανών προορισμών. Στην τρίτη στήλη καταγράφονται οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων προέλευσης και των κόμβων προορισμού.
- Η προκύπτουσα συντομότερη διαδρομή αποθηκεύεται σε έναν πίνακα.
- Ο χάρτης της Google (Google Maps) εμφανίζει την τρέχουσα θέση της συσκευής. Όλοι οι κόμβοι της γεωγραφικής περιοχής αριθμούνται με τη χρήση του `canvas.drawText` και η συντομότερη διαδρομή σχεδιάζεται μέσω του `canvas.drawPath`. Όλοι οι επισκέψιμοι κόμβοι μπορούν να προβληθούν στο Google Maps και μπορούν να σταλούν μέσω SMS στο χρήστη με την προσθήκη των στοιχείων επικοινωνίας του.

Η εικόνα 8 παρουσιάζει το διάγραμμα ροής της εφαρμογής, από την εισαγωγή των στοιχείων του χρήστη μέχρι τη λήψη της συντομότερης διαδρομής καθώς και των δυνατοτήτων που αυτή περιλαμβάνει.

Εικόνα 8: Το διάγραμμα ροής της εφαρμογής



Πηγή: Makone, 2012

- ❖ Εφαρμογή εύρεσης συντομότερης διαδρομής με τη χρήση του αλγόριθμου Dijkstra και του τύπου Haversine

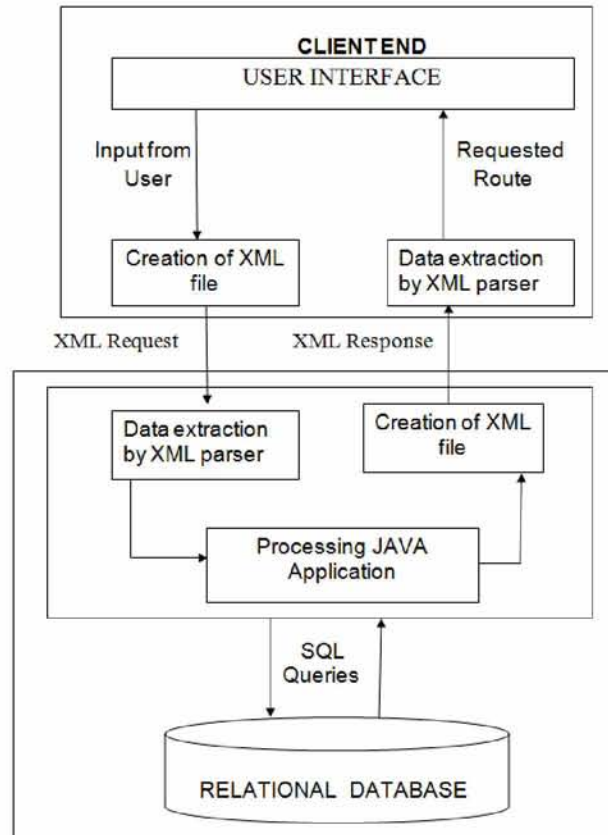
Οι Ingole και Nichat το 2013 προσπαθώντας να βελτιώσουν τη δρομολόγηση στην πόλη της Ινδίας όπου παρατηρείται έλλειψη κοινού προτύπου για την ονομασία των οδών και οι μετακινούμενοι δυσκολεύονται να βρουν ακόμη και τα τοπόσημα της πόλης, πρότειναν μία εφαρμογή δρομολόγησης για τις μετακινήσεις με αυτοκίνητο, η οποία χρησιμοποιεί τον τύπο Haversine για τον υπολογισμό της μικρότερης απόστασης μεταξύ δύο οποιονδήποτε σημείων στο σφαιρικό σώμα κάνοντας χρήση του γεωγραφικού μήκους και πλάτους, ενώ στη συνέχεια αυτές οι

αποστάσεις τροφοδοτούν τον αλγόριθμο Dijkstra για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής.

Η εφαρμογή χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική πελάτη-διακομιστή (client-server). Η επικοινωνία μεταξύ τους γίνεται μέσω της χρήσης XML αρχείων για ευελιξία. Ο πελάτης χρησιμοποιεί περιβάλλον εργασίας χρήστη (user interface) από όπου τα δεδομένα λαμβάνονται με τη μορφή XML για μετέπειτα επεξεργασία. Ο διακομιστής αποτελείται από μια εφαρμογή επεξεργασίας Java και την αντίστοιχη βάση δεδομένων. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται από την εφαρμογή επεξεργασίας είναι μια σχεσιακή βάση δεδομένων που περιέχει όλη την πληροφορία για την πόλη. Αρχικά ο χρήστης επιλέγει πάνω στο χάρτη την προέλευση και τον επιθυμητό προορισμό χρησιμοποιώντας τις διασταυρώσεις της πόλης ή σημαντικά τοπόσημα. Η εφαρμογή επεξεργασίας μετά την ανάλυση του αιτήματος του πελάτη, υπολογίζει τη διαδρομή μεταξύ της προέλευσης και του προορισμού με όλες τις απαραίτητες λεπτομέρειες γεωγραφικού πλάτους / μήκους για το Google Maps και τη στέλνει με τη μορφή XML αρχείου πίσω στον πελάτη. Ο πελάτης λαμβάνει τις οδηγίες με τη μορφή κειμένου στο περιβάλλον εργασίας του χρήστη και με τη μορφή γραφικής απεικόνισης στο υπόβαθρο της Google. Η εφαρμογή λειτουργεί αποκλειστικά στην αγγλική γλώσσα, ενώ τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι στατικά. Ως κριτήριο βελτιστοποίησης της δρομολόγησης χρησιμοποιείται μόνο η απόσταση (Ingole, 2013).

Η εικόνα 9 απεικονίζει το διάγραμμα ροής των διαδικασιών της εφαρμογής.

Εικόνα 9: Διάγραμμα ροής των διαδικασιών της εφαρμογής



Πηγή: Ingole, 2013

Για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Dijkstra όπως αυτός αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.5.1. Για την εύρεση των αποστάσεων μεταξύ της προέλευσης και του προορισμού η εφαρμογή χρησιμοποιεί την εξίσωση Haversine, η οποία βασίζεται στον υπολογισμό των αποστάσεων μεγάλου κύκλου (great circle distances). Η απόσταση μεγάλου κύκλου λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρική πραγματικότητα της σφαιρικής γης και προσφέρει μια εναλλακτική λύση για την ευρέως διαδεδομένη αντίληψη ότι η διαδρομή πάνω από το νερό μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη χρήση της Ευκλείδειας απόστασης. Η ανάγκη για γεωμετρική παρουσίαση της σφαιρικής γης καθίσταται όλο και πιο μεγάλη αν συμπεριληφθεί ο αυξανόμενος αριθμός διασταυρώσεων σε μία πόλη. Επομένως, ο τύπος Haversine (εικόνα 10) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ δύο σημείων στην επιφάνεια της Γης τα οποία ορίζονται μέσω του γεωγραφικού μήκους και πλάτους.

Εικόνα 10: Ο τύπος Haversine

$$d = 2r \sin^{-1} \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\psi_2 - \psi_1}{2} \right)} \right)$$

Πηγή: Ingole, 2013

όπου:

- ✓ d η απόσταση μεταξύ δύο σημείων
- ✓ ψ, ϕ το γεωγραφικό μήκος και πλάτος αντίστοιχα
- ✓ r η ακτίνα της Γης

Μετά τον υπολογισμό της συντομότερης διαδρομής με τη χρήση του αλγόριθμου Dijkstra, η εφαρμογή επεξεργασίας Java επεξεργάζεται τα δεδομένα και τα μετατρέπει σε μορφή αρχείου XML για την παροχή της δρομολόγησης στο περιβάλλον εργασίας του χρήστη. Η ζητούμενη διαδρομή δίνεται στο χρήστη με τη μορφή διασταυρώσεων μεταξύ της προέλευσης και του προορισμού και των τοπόσημων που απαντώνται στην πορεία αυτής. Ως τοπόσημα νοούνται σημαντικά κτήρια, αγάλματα, δρόμοι, συγκροτήματα, μνημεία, ναοί κ.α. Η χρήση των τοπόσημων βοηθά σημαντικά τις μετακινήσεις ατόμων που δεν γνωρίζουν καλά την πόλη (Ingole, 2013).

Η εικόνα 11 και 12 παρουσιάζει τις γραπτές οδηγίες δρομολόγησης και την αντίστοιχη γραφική αναπαράσταση των οδηγιών.

Εικόνα 11: Γραπτές οδηγίες δρομολόγησης

Driving directions
from **Rajapeth Square**
to **Railway Station Square**

Head Towards **South-East**

Go from **Rajapeth Square**(Rajapeth Bus Stand) in Rajapeth to **Veg Market Square** (Railway Crossing) in Veg Market on Dastur Nagar Road

.....50 Mtrs.

Turn No. 1 LEFT

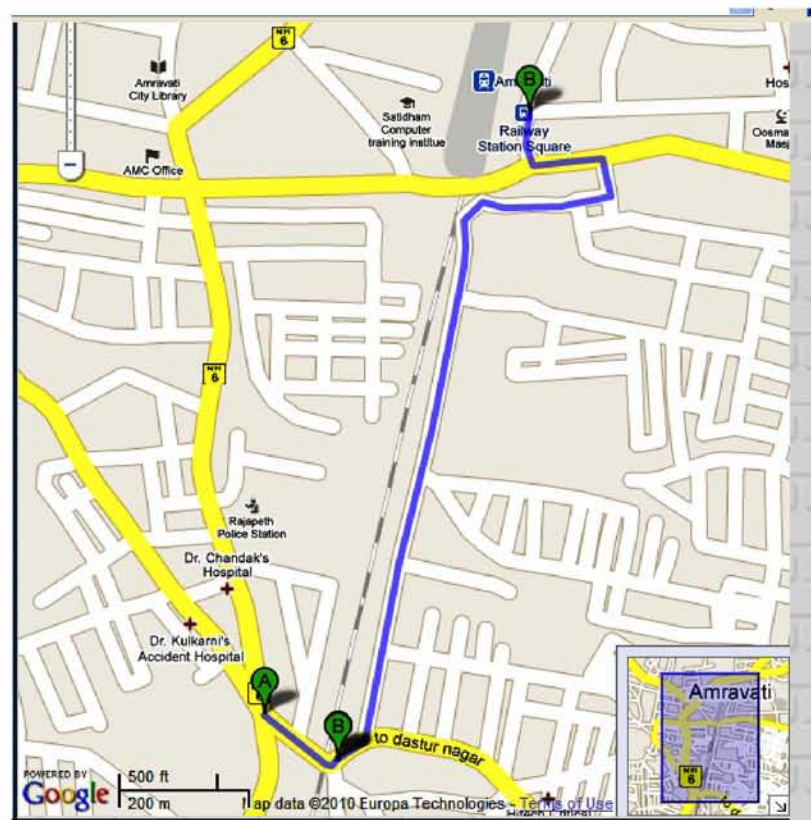
Go from **Veg Market Square**(Railway Crossing) in Veg Market to **Railway Station Square** (Amravati Railway Station) in Railway Station on Hamalpura Road

.....500 Mtrs.

TOTAL DISTANCE : 550.0 Mtrs

Πηγή: Ingole, 2013

Εικόνα 12: Γραφική αναπαράσταση των οδηγιών



Πηγή: Ingole, 2013

❖ Εφαρμογή «OpenRouteService.org» με τη χρήση του αλγόριθμου A*

Το OpenRouteService.org είναι μία ηλεκτρονική πλατφόρμα (website) για την εύρεση της διαδρομής μεταξύ δύο σημείων προέλευση – προορισμός παρέχοντας τη δυνατότητα εισαγωγής ενδιάμεσων σημείων (waypoints) και χρησιμοποιώντας δύο κριτήρια (απόσταση - συντομότερη διαδρομή και χρόνος – γρηγορότερη διαδρομή). Το OpenRouteService στηρίζεται σε ανοιχτά δεδομένα - OpenStreetMap data χρησιμοποιώντας χάρτες απεικόνισης όλου του κόσμου κατασκευασμένους από ομάδες χαρτογράφων. Το OpenStreetMap στηρίζεται σε αεροφωτογραφίες, συσκευές GPS, και τοπικούς χάρτες χαμηλής τεχνολογίας προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακρίβεια και η ενημερότητά του. Το OpenRouteService χρησιμοποιεί στατικά δεδομένα και παρέχει δρομολόγηση για ΙΧ οχήματα, ποδήλατα, φορτηγά, ενώ παράλληλα εξυπηρετεί την πεζή μετακίνηση (Pepping, 2009).

Πρόκειται για ένα έργο που αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο Heidelberg στη Γερμανία το 2008 και η ιδέα στηρίζεται στον Pascal Neis. Η εφαρμογή δρομολόγησης είναι διαθέσιμη μόνο στα αγγλικά, καλύπτοντας μία ευρεία γεωγραφικά περιοχή. Συγκεκριμένα δρομολόγηση παρέχεται για όλη την περιοχή της Ευρώπης, της Ασίας, της Αφρικής και της Αυστραλίας. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι ο ευρετικός αλγόριθμος A*. Εκτός από τον αρχικό κώδικα, κάθε πληροφορία σχετικά με την εφαρμογή είναι διαθέσιμη στην ιστοσελίδα της (<http://openrouteservice.org/contact.html#data>).

Μέχρι σήμερα, οι υπηρεσίες που έχουν εφαρμοστεί είναι οι εξής (Neis, 2007, OpenRouteService.org, 2015):

- Υπηρεσία καταλόγου (Directory Service), η οποία παρέχει πρόσβαση σε ένα online κατάλογο για την εύρεση μιας συγκεκριμένης ή πλησιέστερης περιοχής ή υπηρεσίας.
- Υπηρεσία χρησιμοποίησης της τοποθεσίας (Location Utility Service) η οποία βοηθά στην αποκωδικοποίηση μιας περιοχής, για παράδειγμα της διεύθυνσης και του ταχυδρομικού κώδικα σε σημείο με γεωγραφικές συντεταγμένες.
- Υπηρεσία δρομολόγησης (Route Service), η οποία καθορίζει την προτεινόμενη διαδρομή και τις πληροφορίες αυτής βάσει των κριτηρίων

εισαγωγής του χρήστη (συντομότερη ή γρηγορότερη διαδρομή για αυτοκίνητα, ποδήλατα, φορτηγά και πεζή μετακίνηση)

- Υπηρεσία ανάλυσης προσβασιμότητας (Accessibility Analysis Service) η οποία υπολογίζει ένα πολύγωνο αναπαριστώντας την περιοχή που είναι προσβάσιμη σε συγκεκριμένη χρονοαπόσταση, γύρω από ένα συγκεκριμένο σημείο που εισάγει ο χρήστης
- Υπηρεσία δρομολόγησης έκτακτης ανάγκης (Emergency Route Service), μέσω της οποίας ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει τις περιοχές εκείνες που δε θα συμπεριληφθούν στη δρομολόγηση (π.χ. δρόμοι με διόδους).

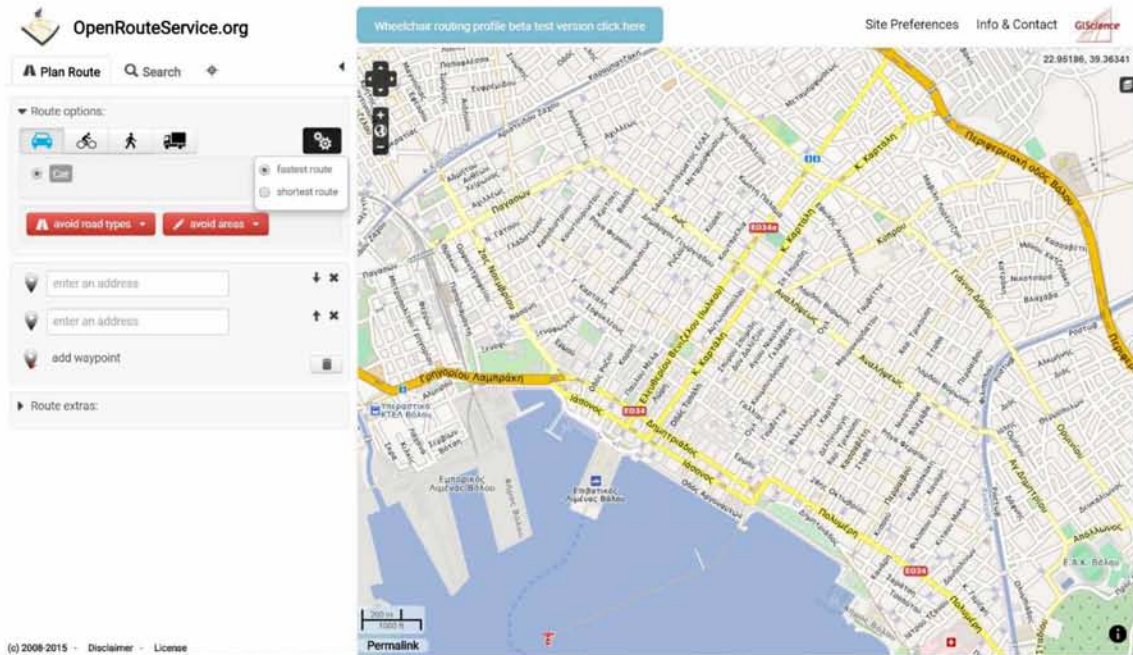
Η υπηρεσία δρομολόγησης παρέχει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται διάφορες παράμετροι καθορισμού του αποτελέσματος. Για παράδειγμα (OpenRouteService.org, 2015):

1. Περίληψη διαδρομής (RouteSummary), η οποία παρέχει πληροφορίες για την προτεινόμενη διαδρομή (συνολική απόσταση, απαιτούμενος χρόνος)
2. Γεωμετρία διαδρομής (RouteGeometry), η οποία περιέχει όλα τα ενδιάμεσα σημεία της προτεινόμενης διαδρομής.
3. Οδηγίες διαδρομής (RouteInstruction), δίνοντας πληροφορίες βήμα προς βήμα για την πορεία όλης της προτεινόμενης διαδρομής.
4. Χάρτες Διαδρομής (RouteMaps) στους οποίους απεικονίζεται η προτεινόμενη διαδρομή. Η εφαρμογή παρέχει δυνατότητα απεικόνισης της βέλτιστης διαδρομής σε διαφορετικούς χάρτες καθώς και προβολής του ανάγλυφου της περιοχής.

Για τον σχεδιασμό της μετακίνησης ο χρήστης πρέπει να δηλώσει τα χαρακτηριστικά της μετακίνησης. Αρχικά, επιλέγει το σημείο προέλευσης / προορισμού, είτε απευθείας πάνω στο χαρτογραφικό υπόβαθρο είτε με γραπτή εισαγωγή της διεύθυνσης, ενώ παράλληλα μπορεί να εισάγει και ενδιάμεσα σημεία (add waypoint) από τα οποία επιθυμεί να διέλθει. Στη συνέχεια καθορίζει το μέσο μετακίνησης (αυτοκίνητο, ποδήλατο, πεζή μετακίνηση και μετακίνηση με φορτηγό) και διαλέγει κριτήριο βελτιστοποίησης (γρηγορότερη ή συντομότερη διαδρομή). Πριν τον σχεδιασμό της μετακίνησης ο χρήστης δύναται επίσης να καθορίσει περιοχές πάνω στο χάρτη ή να επιλέξει κάποια συγκεκριμένη κατηγορία δρόμων

από μία δοθείσα λίστα τις οποίες θέλει να αποφύγει κατά τη δρομολόγησή του (εικόνα 13).

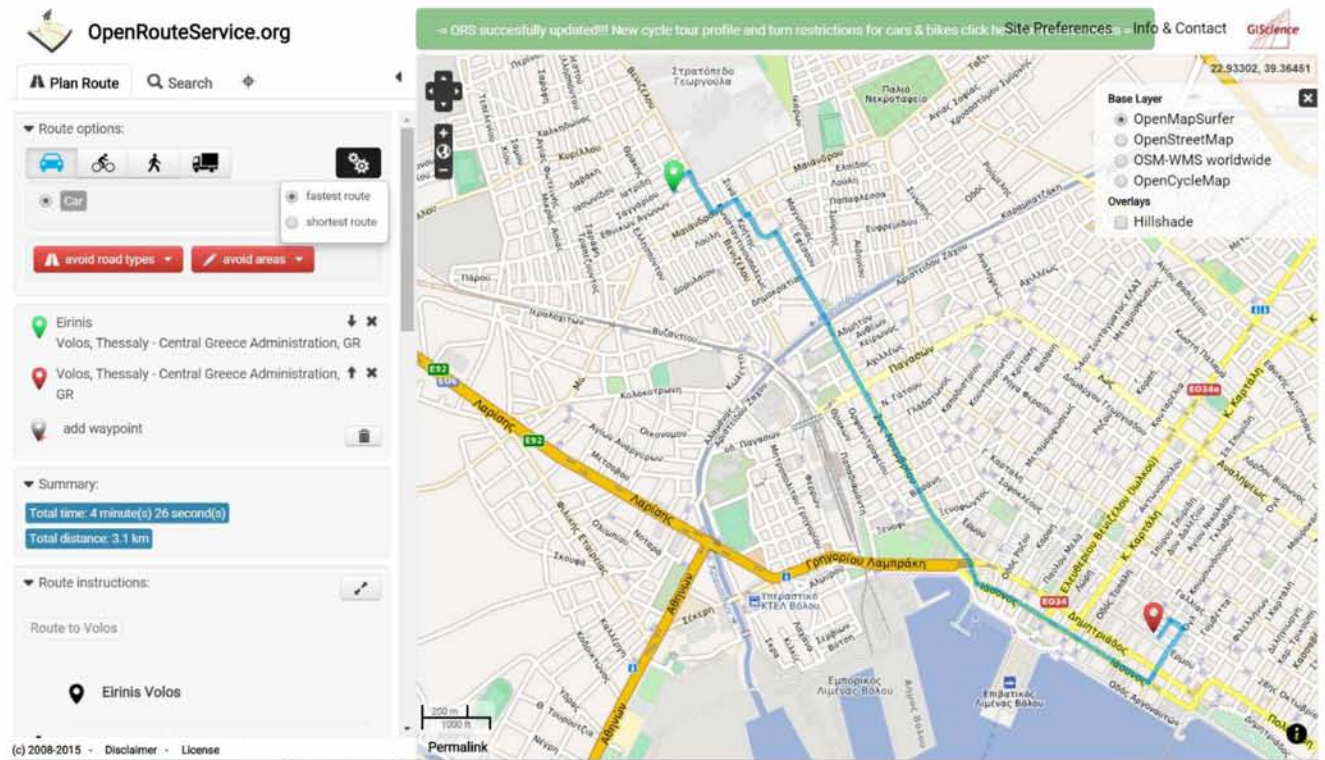
Εικόνα 13: Εισαγωγή των χαρακτηριστικών της μετακίνησης



Πηγή: *OpenRouteService.org*, 2015

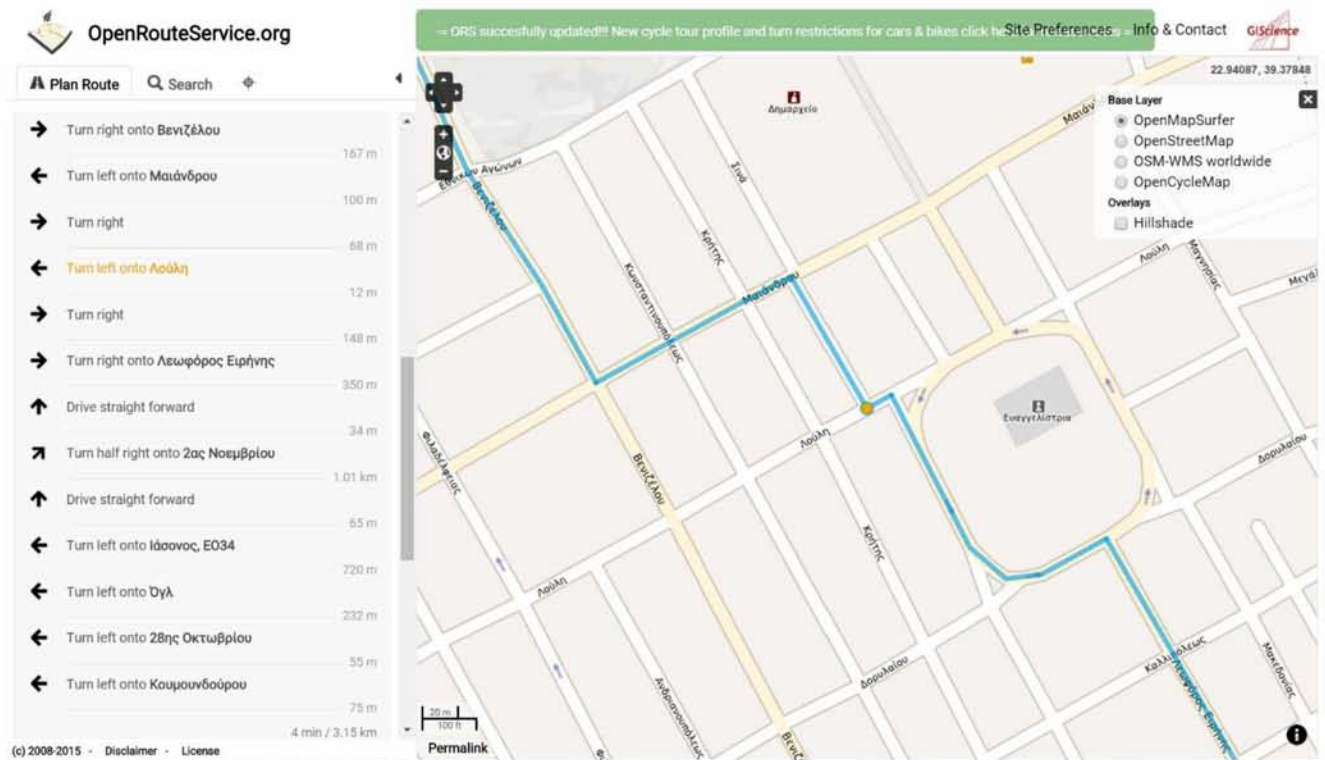
Στην εικόνα 14 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της δρομολόγησης μέσω του OpenRouteService, για εύρεση της γρηγορότερης διαδρομής με τη χρήση αυτοκινήτου, μεταξύ δύο σημείων στο Πολεοδομικό Συγκρότημα του Βόλου. Στο αριστερό πλαίσιο κειμένου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αλλάξει το κριτήριο βελτιστοποίησης της δρομολόγησης, την περιοχή προέλευσης και προορισμού, να προσθέσει ενδιάμεσα σημεία και περιορισμούς (avoid road types και avoid road areas). Οποιαδήποτε αλλαγή των παραπάνω στοιχείων εισόδου οδηγεί σε απευθείας αλλαγή της προτεινόμενης διαδρομής στο χάρτη. Τα σημεία προέλευσης προορισμού δύναται επίσης να τροποποιηθούν και απευθείας στο χαρτογραφικό υπόβαθρο μετακινώντας τα αντίστοιχα σύμβολα. Προκειμένου ο χρήστης να κατανοήσει καλύτερα τις παρεχόμενες οδηγίες, η επιλογή κάθε βήματος πληροφόρησης αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο σημείο στο χάρτη στο οποίο διενεργείται αυτόματη προβολή μεγέθυνσης (zoom in) (εικόνα 15).

Εικόνα 14: Αποτελέσματα δρομολόγησης OpenRouteService στο ΠΣΒ



Πηγή: OpenRouteService.org, 2015

Εικόνα 15: Αντιστοιχία οδηγιών δρομολόγησης και απεικόνισης στο χάρτη στην εφαρμογή OpenRouteService



Πηγή: OpenRouteService.org, 2015

❖ Εφαρμογή «cyclevancouver» για την προώθηση της ποδηλασίας στο Metro Vancouver στον Καναδά

Το 2010, οι Su, Winters, Nunes και Brauer, ανέπτυξαν μία εφαρμογή με την ονομασία «cyclevancouver», στοχεύοντας στη διευκόλυνση του σχεδιασμού και της οργάνωσης ποδηλατικών διαδρομών στο Metro Vancouver στον Καναδά και βοηθώντας παράλληλα τους συγκοινωνιολόγους στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των υφιστάμενων δικτύων ποδηλάτου.

Η εφαρμογή «cyclevancouver» ήρθε ως απάντηση της έρευνας που διεξήχθη σε 1402 ενήλικες ποδηλάτες στο Metro Vancouver, σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν τη χρήση του ποδηλάτου. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η διαθεσιμότητα μιας ηλεκτρονικής εφαρμογής για τη δρομολόγηση ποδηλάτου και η παροχή πληροφόρησης για τις διαθέσιμες ποδηλατικές διαδρομές από κάθε προέλευση σε κάθε προορισμό εντός της πόλης, είναι οι δύο σημαντικότεροι παράγοντες για την αύξηση χρήσης ποδηλάτου τόσο από τους περιστασιακούς όσο και από τους τακτικούς ποδηλάτες (Su, 2010).

Σε αντίθεση με τις γνωστές εφαρμογές δρομολόγησης “Google Maps” και “Google Transit” το «cyclevancouver» εκτός από τη συντομότερη διαδρομή, παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής με βάση το κριτήριο της κλίσης, της φυτοκάλυψης και των εκπεμπόμενων ρύπων.

→ Επιλογή διαδρομής με βάσει τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά

Η εφαρμογή περιλαμβάνει ως προεπιλογή μια μέγιστη κλίση ως περιορισμό της προτεινόμενης διαδρομής η οποία ορίζεται στο 10% σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Transportation Association of Canada, 1999). Η κλίση ενός τμήματος AB ορίζεται ως η άνοδος από το οριζόντιο επίπεδο:

$$M = \Delta y / \Delta x$$

Όπου Δx είναι η οριζόντια απόσταση του τμήματος AB και Δy η διαφορά της κλίσης μεταξύ της διασταύρωσης του A και B. Οδεύοντας από τη διασταύρωση A στη B, $\Delta y = E_B - E_A$ και από τη B στην A, $\Delta y = E_A - E_B$, όπου E_A και E_B είναι οι κλίσεις στις διασταυρώσεις A και B αντίστοιχα. Η κλίση του εδάφους είναι επομένως θετική στις ανηφόρες και αρνητική στις κατηφόρες. Οι κλίσεις όλων των διασταυρώσεων υπολογίστηκαν από ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (DEM) ανάλυσης 30μέτρων

το οποίο διατέθηκε από την Υπηρεσία Χωρικών Δεδομένων στο Markham, Ontario. Για την καλύτερη οπτικοποίηση της πληροφορίας, υπάρχει μία χρωματική διαβάθμιση των κλίσεων από 2% μέχρι 10%.

→ Επιλογή διαδρομής με την περισσότερη φυτοκάλυψη

Για την εύρεση διαδρομής με τη περισσότερη φυτοκάλυψη, κατασκευάστηκαν μοντέλα φυτοκάλυψης 4 κατηγοριών βλάστησης (δέντρα, πάρκα, δάσος, γρασίδι), με βάσει τους θεματικούς χάρτες από δορυφορικές λήψεις του Landsat που διατέθηκαν από το Γεωλογικό Ινστιτούτο των ΗΠΑ. Ειδικότερα υπολογίστηκε το ποσοστό φυτοκάλυψης της περιοχής εκατέρωθεν του οδικού δικτύου σε απόσταση 50 μέτρων.

→ Επιλογή διαδρομής με τους λιγότερους εκπεμπόμενους ρύπους

Στο Vancouver, η κύρια πηγή κυκλοφοριακής ρύπανσης σχετίζεται με τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και το διοξείδιο του αζώτου (NO₂). Για τον υπολογισμό των διαδρομών με τους λιγότερους ρύπους χρησιμοποιήθηκαν χαρτογραφικά υπόβαθρα με μέσα ετήσια επίπεδα NO₂ σε όλη την περιοχή μελέτης.

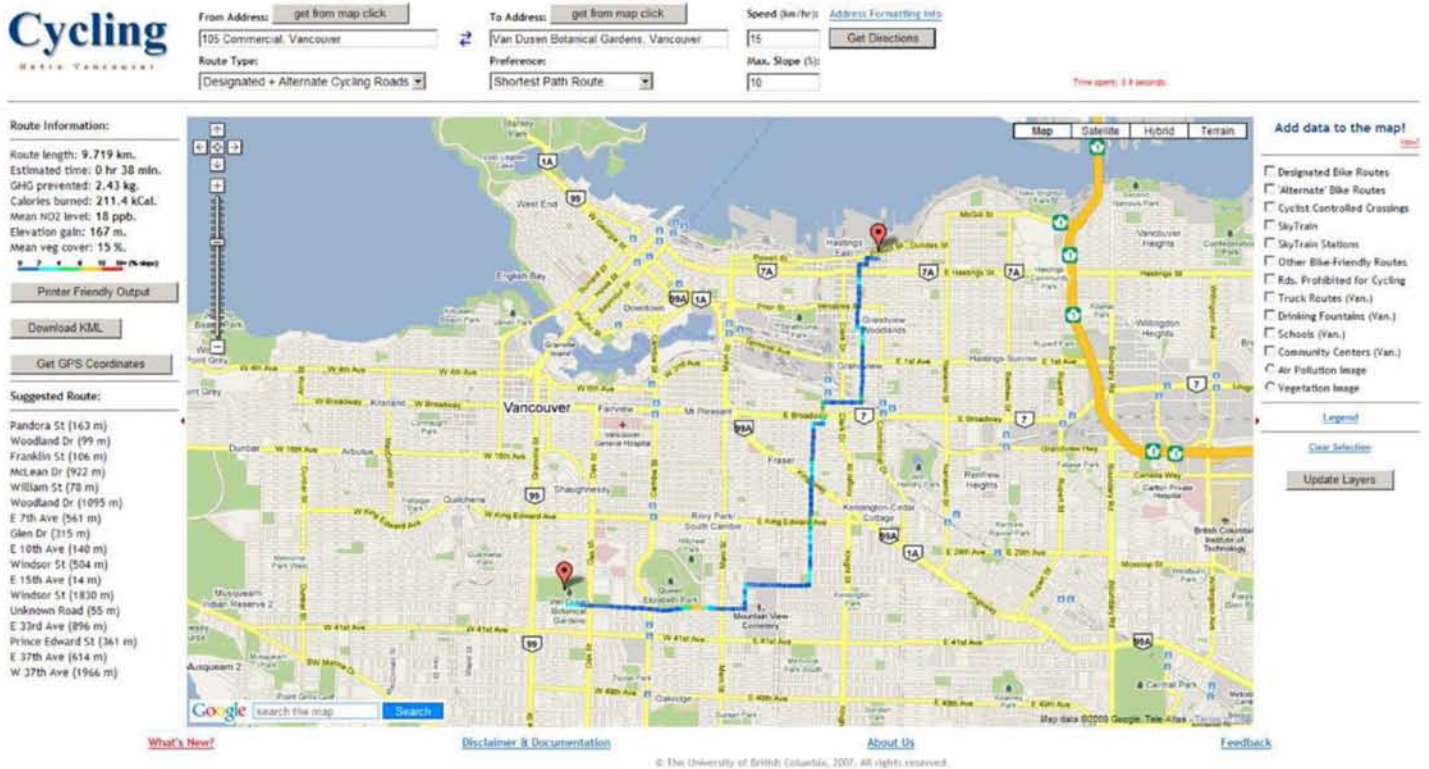
Το «cyclevancouver» χρησιμοποιεί ως υπόβαθρο τους χάρτες της Google (Google Maps), στηρίζεται σε στατικά δεδομένα και είναι διαθέσιμο μόνο στην αγγλική γλώσσα. Οι αρχές σχεδιασμού του περιβάλλοντος εργασίας (interface) ακολουθούν τις αρχές μιας γρήγορης, ασφαλούς, απλής και ελκυστικής εφαρμογής.

Ο χρήστης όπως φαίνεται και στην εικόνα 16, εισέρχεται στην εφαρμογή χωρίς να εισάγει τα προσωπικά του δεδομένα και επιλέγει την προέλευση και τον προορισμό της διαδρομής που θέλει να βελτιστοποιήσει. Η επιλογή προέλευσης – προορισμού γίνεται με έναν από τους εξής τρόπους:

- ✓ καταχωρώντας την ακριβή διεύθυνση
- ✓ εισάγοντας τη διασταύρωση των οδών (πχ. Broadway και Clark)
- ✓ εισάγοντας τα ονόματα γνωστών τοποθεσιών
- ✓ με δραστικό κλικ πάνω στο χάρτη

Αφού εισάγει την προέλευση και το προορισμό, επιλέγει μέση ταχύτητα κίνησης, κλίση εδάφους και ένα από τα κριτήρια βελτιστοποίησης όπως αυτά αναλύθηκαν παραπάνω.

Εικόνα 14: Αποτελέσματα δρομολόγησης της εφαρμογής «cyclenavcouver»



Πηγή: Su, 2010

Για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Dijkstra και ως βάρη χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές: κλίση, % φυτοκάλυψη, μέσα επίπεδα ρύπανσης (NO₂ σε Kg/m) και η απόσταση. Συγκριτικό πλεονέκτημα του «cyclenavcouver» σε σχέση με τις υπόλοιπες εφαρμογές δρομολόγησης είναι ότι υπολογίζει πέραν της απαιτούμενης διανυόμενης απόστασης, τον εκτιμώμενο χρόνο σύμφωνα με το κριτήριο επιλογής του χρήστη, τους εκπεμπόμενους ρύπους (πχ. διοξείδιο του άνθρακα - CO₂), τους ρύπους που αποφεύγονται σε σχέση με τη χρήση αυτοκινήτου, την κατανάλωση θερμίδων, μέσο επίπεδο μόλυνσης της ατμόσφαιρας, μέση κλίση διαδρομής και μέση φυτοκάλυψη (Su, 2010).

Αναφορικά με την εκτίμηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που αποτρέπονται με τη χρήση ποδηλάτου και των θερμίδων που καταναλώνονται, μετρήσεις καταδεικνύουν ότι οι εκπομπές CO₂ που αποτρέπονται υπολογίζονται σε 0.25 kg km⁻¹, δεδομένου ότι ένα τυπικό επιβατικό όχημα που έχει διανύσει 20.000 χιλιόμετρα εκπέμπει ετησίως 5 τόνους CO₂, ενώ οι θερμίδες που καταναλώνονται σύμφωνα με τον Lowe (1988) εκτιμώνται σε 35 cal ανά μίλι.

Ο χρήστης έχει επίσης τη δυνατότητα χαρτογραφικής απεικόνισης δύο τύπων διαδρομών ποδηλάτου: 1) επίσημα καθορισμένες διαδρομές και 2) εναλλακτικές

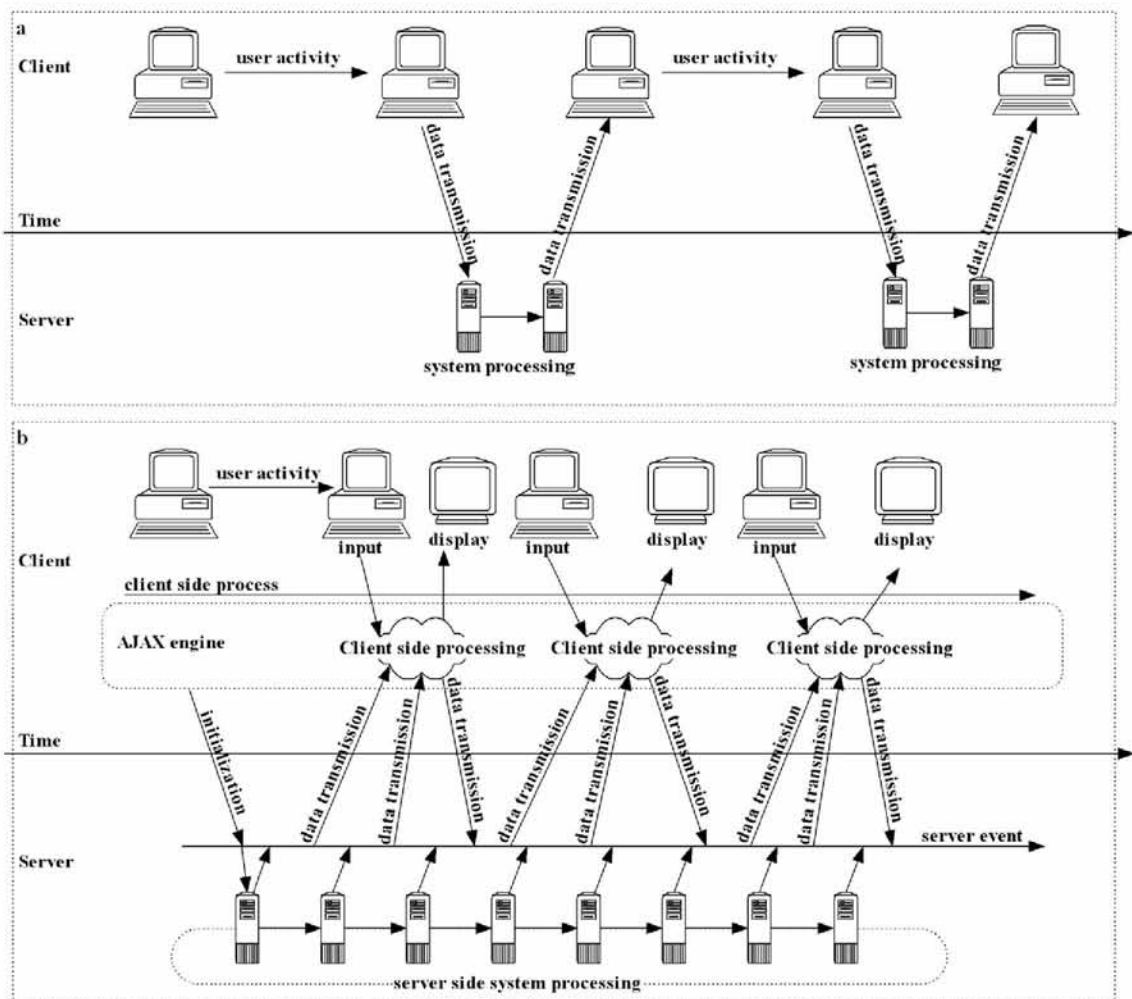
διαδρομές. Οι επίσημα καθορισμένες διαδρομές περιλαμβάνουν υποδομές καθορισμένες από την πόλη σύμφωνες με τις σχεδιαστικές οδηγίες, παρέχοντας άνεση και ασφάλεια στους ποδηλάτες (όπως σηματοδοτούμενες διαδρομές, με διαγραμμίσεις κ.α.). Οι εναλλακτικές διαδρομές είναι διαδρομές που έχουν προταθεί από τους ποδηλάτες και τους πολεοδόμους ως φιλικές προς τον ποδηλάτη, αλλά μπορεί να παρουσιάζουν ελλείψεις ως προς τις παροχές άνεσης και δεν είναι επίσημα σχεδιασμένες από την περιφερειακή αρχή μεταφορών (Translink) (Su, 2010).

Μία επιπλέον δυνατότητα που παρέχεται στο χρήστη είναι η οπτική αναπαράσταση σε χαρτογραφικά υπόβαθρα της Google Maps των περιοχών χωροθέτησης τερματικών σταθμών, σχολείων, δημοτικών κέντρων, διαδρομών που απαγορεύεται η διέλευση ποδηλάτων, διαδρομών διέλευσης φορτηγών και απεικόνιση χαρτών με τη φυτοκάλυψη και τα επίπεδα αέριας ρύπανσης στην περιοχή μελέτης (εικόνα 16).

Το «cyclevancouver» επιτρέπει στο χρήστη την εκτύπωση των οδηγιών δρομολόγησης και του συνοδευόμενου χαρτογραφικού υποβάθρου, τη λήψη αυτής της πληροφορίας με τη μορφή KML αρχείου καθώς και την εισαγωγή της σε GPS εφαρμογή για τη βέλτιστη δρομολόγηση και εξυπηρέτηση του μετακινούμενου.

Σε αντίθεση με τις άλλες εφαρμογές δρομολόγησης το «cyclevancouver» χρησιμοποιεί μη συγχρονισμένα συστήματα που επιτρέπουν τη γρηγορότερη παροχή της πληροφορίας στο χρήστη. Μία παραδοσιακή συγχρονισμένη διαδικτυακή εφαρμογή ενεργοποιεί μία αίτηση Hypertext Transfer Protocol (HTTP) στον web server. Ο web server στη συνέχεια επεξεργάζεται το αίτημα και επιστρέφει ένα HyperText Markup Language (HTML) στο χρήστη. Σε αντίθεση ένα μη συγχρονισμένο σύστημα μπορεί να παραδώσει στο χρήστη τα δεδομένα ανά πάσα στιγμή μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο (εικόνα 17).

Εικόνα 15: Διαφορές συγχρονισμένων (a) και μη συγχρονισμένων συστημάτων (b)



Πηγή: Su, 2010

4.2 Σύγκριση καινοτόμων εφαρμογών δρομολόγησης

Στο κεφάλαιο 4.1 αναλύθηκαν ενδεικτικά παραδείγματα εφαρμογών δρομολόγησης των οποίων η λειτουργική δομή και τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ήταν γνωστά μέσω της βιβλιογραφικής επισκόπησης. Ο πίνακας 2 απεικονίζει τη συγκριτική ανάλυση των τεσσάρων εφαρμογών δρομολόγησης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, συνοψίζοντας τις λειτουργίες τους και καταδεικνύοντας τα κοινά τους χαρακτηριστικά και τις διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Όπως παρατηρείται οι περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο Dijkstra για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής με το βάρος ακμής να διαφοροποιείται ανάλογα με το κριτήριο βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα στις εφαρμογές που ως κριτήριο βελτιστοποίησης είναι η απόσταση το βάρος της κάθε ακμής είναι η μεταβλητή της απόστασης, ενώ όταν το κριτήριο βελτιστοποίησης

είναι η εύρεση της περιβαλλοντικά φιλικής διαδρομής τότε το βάρος της κάθε ακμής υποδηλώνει τους εκπεμπόμενους ρύπους.

Πίνακας 2: Συγκριτική παρουσίαση καινοτόμων εφαρμογών δρομολόγησης

Όνομα	Αλγόριθμος	Επιλογή προέλευσης / προορισμού	Μέσο μετακίνησης	Πηγή δεδομένων	Γλώσσα	Δεδομένα	Κριτήρια βελτιστοποίησης	Προσωποποιημένη χρήση
1. Εφαρμογή εύρεσης συντομότερης διαδρομής με χρήσιμο αλγόριθμο Dijkstra σε συσκευή Android	Dijkstra	Εισαγωγή διευθύνσεων και επιλογή σημείων στο χάρτη	Αυτοκίνητο	Google maps	Αγγλικά	Στατικά	Απόσταση	Ναι
2. Εφαρμογή εύρεσης συντομότερης διαδρομής με χρήση του αλγόριθμου Dijkstra και του τύπου Haversine	Dijkstra	Επιλογή σημείων στο χάρτη	Αυτοκίνητο	Google maps	Αγγλικά	Στατικά	Απόσταση	Όχι
3. Εφαρμογή OpenRouteService.org	A*	Εισαγωγή διευθύνσεων και επιλογή σημείων στο χάρτη	Αυτοκίνητο, ποδήλατο, φορτηγό, περπάτημα	OpenStreetMap	Αγγλικά	Στατικά	Απόσταση, χρόνος	Όχι
4. Εφαρμογή cyclevancouver	Dijkstra	Εισαγωγή διευθύνσεων και επιλογή σημείων στο χάρτη	Ποδήλατο	Google maps	Αγγλικά	Στατικά	Απόσταση, κλίση, φυτοκάλυψη, εκπεμπόμενοι ρύποι	Όχι

Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

Η εφαρμογή OpenRouteService.org χρησιμοποιεί έναν άλλο ευρέως κοινό αλγόριθμο που ανήκει στην κατηγορία των ευρετικών αλγορίθμων, τον A*. Ο αλγόριθμος Dijkstra χρησιμοποιείται σε μικρά δίκτυα, ενώ σε περιπτώσεις μεγάλων δικτύων όπου η πολυπλοκότητα αυξάνεται προτιμάται η χρήση του A* προκειμένου να αυξηθεί η ταχύτητα αναζήτησης μέσα από την εφαρμογή ευρετικών κανόνων (AlShawi, 2012).

Για την επιλογή των σημείων προέλευσης / προορισμού οι περισσότερες εφαρμογές (1^η, 3^η, 4^η) παρέχουν τη δυνατότητα στο χρήστη της εισαγωγής διευθύνσεων και της επιλογής σημείων πάνω στο χάρτη. Ωστόσο, στη 2^η εφαρμογή, η επιλογή της προέλευσης και του προορισμού γίνεται απευθείας από το χάρτη, επιλύοντας το πρόβλημα της δρομολόγησης στην πόλη της Ινδίας όπου παρατηρείται έλλειψη κοινού προτύπου για την ονομασία των οδών και οι μετακινούμενοι δυσκολεύονται να προσανατολιστούν.

Στις εφαρμογές που επιλέχθηκαν να αναλυθούν παρατηρείται διαφοροποίηση των μέσων μετακίνησης, με την 1^η και 2^η εφαρμογή να παρέχουν δρομολόγηση μόνο για

το αυτοκίνητο, την 3^η εφαρμογή να καλύπτει μεγαλύτερο εύρος μεταφορικών μέσων (αυτοκίνητο, ποδήλατο, φορτηγό και περπάτημα) και την 4^η να αφορά αποκλειστικά τα ποδήλατα προωθώντας έναν πιο βιώσιμο τρόπο μετακίνησης.

Ως πηγή δεδομένων για την αναπαράσταση του χαρτογραφικού υποβάθρου στην 1^η, 2^η και 4^η εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν οι χάρτες της Google. Η 3^η εφαρμογή, η οποία στηρίζεται σε ανοιχτά δεδομένα, χρησιμοποιεί χάρτες απεικόνισης όλου του κόσμου κατασκευασμένους από αξιόπιστες ομάδες χαρτογράφων – OpenStreetMap.

Όλες οι εφαρμογές που αναλύθηκαν λειτουργούν στην αγγλική γλώσσα η οποία είναι η πιο διαδεδομένη και γνωστή σε παγκόσμια κλίμακα. Και οι τέσσερις εφαρμογές στηρίζονται σε στατικά δεδομένα, μην παρέχοντας δρομολόγηση για δεδομένα πραγματικού χρόνου (real time data). Το γεγονός αυτό διευκολύνει την κατασκευή των εφαρμογών, καθώς η συλλογή και ανάλυση των δεδομένων είναι πιο απλή αλλά αποκλείει τη διαχείριση ειδικών καταστάσεων στις οποίες η δρομολόγηση διαφοροποιείται από τις υπόλοιπες τυπικές ημέρες, όπως για παράδειγμα περιπτώσεις κυκλοφοριακών συμφορήσεων σε συγκεκριμένα οδικά τμήματα, ατυχήματα και άλλα συμβάντα.

Το πιο συνηθισμένο κριτήριο το οποίο λαμβάνεται υπόψη για τη δρομολόγηση είναι η απόσταση. Η 1^η και η 2^η εφαρμογή επιλύουν το πρόβλημα εύρεσης της συντομότερης διαδρομής χρησιμοποιώντας μόνο το κριτήριο της απόστασης. Η 3^η εφαρμογή εκτός από την συντομότερη διαδρομή παρέχει επίσης τη δυνατότητα εύρεσης της γρηγορότερης διαδρομής συμπεριλαμβάνοντας το κριτήριο του χρόνου. Η 4^η διαδρομή που αφορά μόνο τη μετακίνηση με ποδήλατο διαφοροποιείται από τις υπόλοιπες, ακολουθώντας μια διαφορετική προσέγγιση και προσπαθώντας να καλύψει τις ανάγκες του ποδηλάτη. Επομένως σαν κριτήρια βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται πέρα από την απόσταση, η κλίση, η φυτοκάλυψη και οι εκπεμπόμενοι ρύποι.

Τέλος, όσον αφορά την ανάγκη εισαγωγής προσωποποιημένων δεδομένων (όνομα χρήστη και κωδικός) για την πρόσβαση στην εφαρμογή, πέραν της 1^{ης} η οποία απευθύνεται αποκλειστικά σε στελέχη επιχειρήσεων οπότε είναι απαραίτητη η

χρήση ονόματος χρήστη και κωδικού για την είσοδο στην εφαρμογή, οι υπόλοιπες είναι άμεσα προσβάσιμες από τους μετακινούμενους.

4.3 Επιπρόσθετες εφαρμογές δρομολόγησης με μη δημοσιοποίηση της λειτουργικής τους δομής

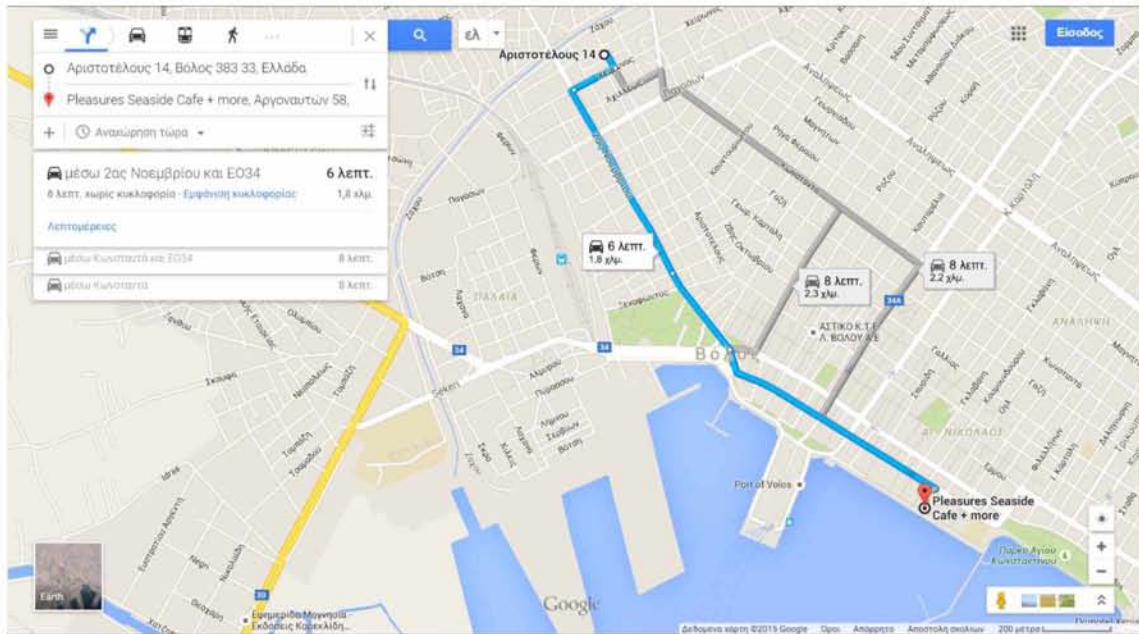
Πέραν των εφαρμογών που επιλέχθηκαν να αναλυθούν στο κεφάλαιο 4.1, υπάρχουν και άλλες εφαρμογές δρομολόγησης που είναι ιδιαίτερα γνωστές στο ευρύ κοινό λόγω της εύκολης και γρήγορης πρόσβασης και της αξιοπιστίας των πληροφοριών που παρέχουν. Ωστόσο, τόσο τα δεδομένα και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν όσο και η γενικότερη λειτουργική τους δομή είναι εμπιστευτική και δεν υπάρχει εκτενή αναφορά της αρχιτεκτονικής του συστήματος σε βιβλιογραφικές αναφορές και δημοσιεύσεις επιστημονικών περιοδικών.

❖ Google Maps

Η Google Maps είναι μία από τις πιο γνωστές διαδικτυακές υπηρεσίες χαρτογράφησης. Προσφέρει δορυφορικές εικόνες, χάρτες, χάρτες οδών (street maps) και πανοραμική θέα 360° των οδών (street view). Η εφαρμογή δρομολόγησης ξεκίνησε το Φεβρουάριο του 2005, κάνοντας χρήση της γλώσσας προγραμματισμού C++ και Javascript. Παρέχει δρομολόγηση για τις μετακινήσεις με τα πόδια, το αυτοκίνητο και σε ορισμένες περιοχές όπου έχουν συλλεχθεί δεδομένα παρέχει δρομολόγηση για το ποδήλατο και τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς (εικόνα 18). Η εισαγωγή των σημείων προέλευσης / προορισμού γίνεται με γραπτή εισαγωγή των διευθύνσεων ή επιλογή των σημείων πάνω στο χάρτη. Οι δορυφορικές εικόνες της Google Maps δεν ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο, αλλά οι όποιες κυκλοφοριακές και λοιπές αλλαγές ενσωματώνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα στην αρχική βάση δεδομένων. Η εφαρμογή λειτουργεί σε πολλές γλώσσες καλύπτοντας τις ανάγκες των χρηστών σε παγκόσμια κλίμακα. Η δρομολόγηση μέσω Google Maps παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη εύρεσης της συντομότερης απόστασης (ως κριτήριο βελτιστοποίησης λαμβάνεται η απόσταση) προσφέροντας σε πολλές περιπτώσεις από 2 έως 3 εναλλακτικές διαδρομές (εικόνα 18). Ο χρήστης μετακινώντας τα αρχικά σημεία προέλευσης και προορισμού που εισήγαγε στο χάρτη αλλά και τα ενδιάμεσα σημεία της προτεινόμενης διαδρομής,

έχει τη δυνατότητα λήψης νέας συντομότερης διαδρομής ανταποκρινόμενη στα εκάστοτε χαρακτηριστικά που δηλώνει (Pepping, 2009, Google Maps, 2015).

Εικόνα 16: Δρομολόγηση με την εφαρμογή Google Maps

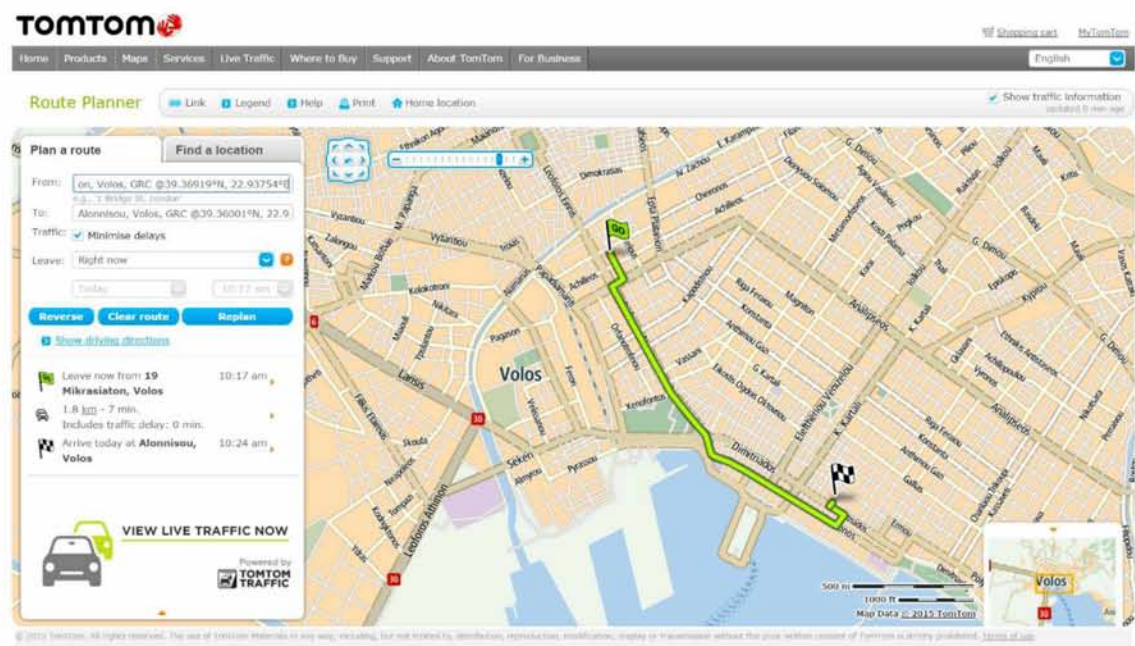


Πηγή: Google Maps, 2015

❖ Tom Tom

Η Tom Tom είναι μία ολλανδική εταιρεία διεθνούς εμβέλειας η οποία παράγει προϊόντα πλοήγησης και χαρτογράφησης. Ιδρύθηκε το 1991, έχει την έδρα της στο Άμστερνταμ και κατασκευάζει μεταξύ άλλων προϊόντα GPS, συστήματα διαχείρισης στόλου οχημάτων, συστήματα πλοήγησης καθώς και άλλα προϊόντα που βασίζονται στον εντοπισμό της τρέχουσας θέσης. Τα προϊόντα πλοήγησης που κατασκευάζει υπολογίζουν διαδρομές με αυτοκίνητο, ποδήλατο και περπάτημα. Χρησιμοποιούν δεδομένα πραγματικού χρόνου προειδοποιώντας για ατυχήματα, συμβάντα, επερχόμενες καιρικές επιδεινώσεις που θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια των μετακινούμενων, προτείνοντας εναλλακτικές διαδρομές. Ωστόσο, ο αλγόριθμος δρομολόγησης και η πηγή δεδομένων δεν είναι ανοιχτή για το κοινό. Το 2002 η Tom Tom δημοσίευσε μία ηλεκτρονική εφαρμογή δρομολόγησης για τις μετακινήσεις με το αυτοκίνητο σε παγκόσμια σχεδόν κλίμακα (εικόνα 19). Η εφαρμογή αυτή είναι απλή στη χρήση και διαθέσιμη σε 11 γλώσσες, αλλά αδυνατεί

Εικόνα 17: Δρομολόγηση με την εφαρμογή Tom Tom



Πηγή: Tom Tom, 2015

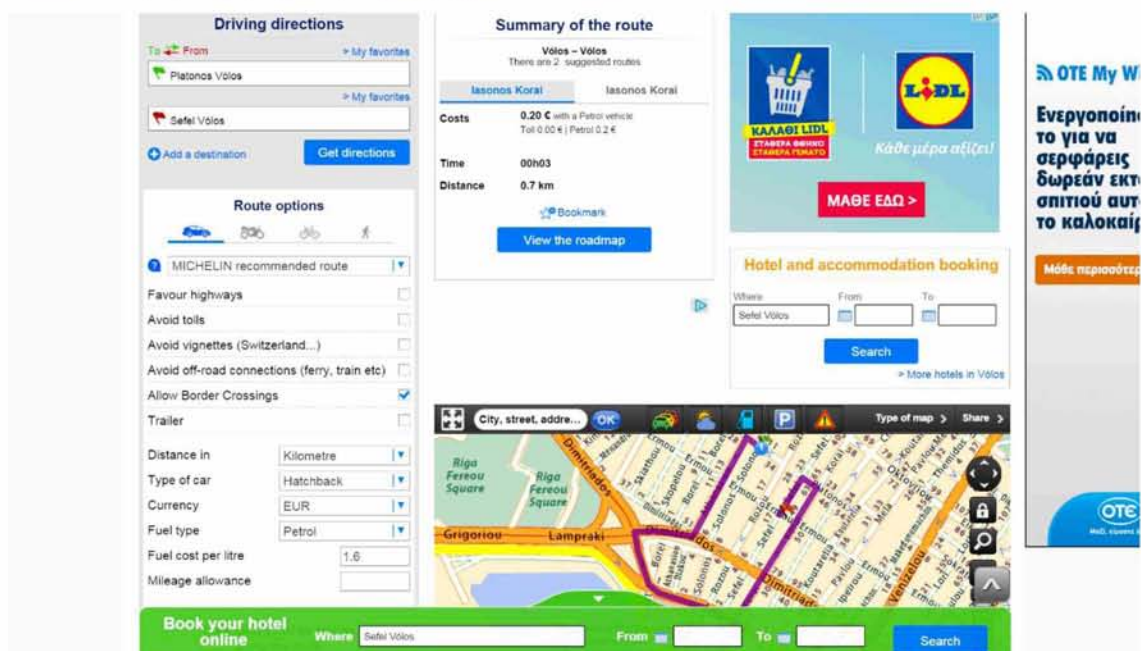
να παρέχει δρομολόγηση για το ποδήλατο, το περπάτημα και τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς (Pepping, 2009, Tom Tom, 2015).

❖ Via Michelin

Η Via Michelin είναι μια διαδικτυακή υπηρεσία δρομολόγησης χρησιμοποιώντας δικούς της χάρτες. Παρέχει δρομολόγηση για το αυτοκίνητο, τη μηχανή, το ποδήλατο και το περπάτημα (εικόνα 20). Χρησιμοποιεί δεδομένα πραγματικού χρόνου, ενώ ως κριτήριο βελτιστοποίησης λαμβάνεται υπόψη μόνο η απόσταση. Εκτός από την εισαγωγή των σημείων προέλευσης / προορισμού ο χρήστης μπορεί να προσθέσει ενδιάμεσα σημεία από τα οποία επιθυμεί να διέλθει. Παράλληλα, μπορεί να εισάγει επιπλέον χαρακτηριστικά της επιθυμητής μετακίνησής του, δηλώνοντας αυτοκινητοδρόμους από τους οποίους επιθυμεί να μεταβεί, διόδια τα οποία επιδιώκει να αποφύγει και συνδέσεις πέραν των οδικών (θαλάσσιες σιδηροδρομικές) τις οποίες επιθυμεί να συμπεριλάβει ή όχι στη διαδρομή του. Προκειμένου να καλυφθούν πλήρως οι ανάγκες των μετακινούμενων και κυρίως των τουριστών που δεν γνωρίζουν καλά την περιοχή προορισμού, η Via Michelin ενημερώνει τους χρήστες για τις τρέχουσες καιρικές συνθήκες, τους κυκλοφοριακούς φόρτους, τις θέσεις πρατηρίων καυσίμων, τους χώρους στάθμευσης και τα σημεία στα οποία κατασκευάζονται οδικά έργα. Ο χρήστης μπορεί επίσης να ενημερωθεί για τα τουριστικά καταλύματα της εκάστοτε

περιοχής, τους χώρους εστίασης και για άλλες τουριστικές υποδομές. Η δρομολόγηση παρέχεται τόσο με αναπαράσταση της προτεινόμενης διαδρομής πάνω στο χάρτη όσο και με γραπτές οδηγίες οι οποίες αναφέρουν μεταξύ άλλων τη συνολική, απόσταση, τον εκτιμώμενο χρόνο και το κόστος μετάβασης (εικόνα20). Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται και τα δεδομένα για τη δρομολόγηση είναι εμπιστευτικά και δεν διατίθενται πληροφορίες σε βιβλιογραφικές πηγές. Μειονέκτημα της εφαρμογής πλοήγησης θεωρείται η έλλειψη δεδομένων αναφορικά με τα δίκτυα ποδηλάτου, με απόρροια η προτεινόμενη ποδηλατική διαδρομή να είναι συχνά ανακριβής (Pepping, 2009, Via Michelin, 2015).

Εικόνα 18: Δρομολόγηση με την εφαρμογή Via Michelin



Πηγή: Via Michelin, 2015

4.4 Δρομολόγηση με Μέσα Μαζικής Μεταφοράς

4.4.1 Υπολογισμός βέλτιστης διαδρομής σε δίκτυο Μέσων Μαζικής Μεταφοράς

Τα δίκτυα των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς και η δρομολόγηση πάνω σε αυτά διαφοροποιείται από τα υπόλοιπα δίκτυα (οδικά, σιδηροδρομικά). Για να μοντελοποιηθεί σωστά ένα δίκτυο δημόσιων αστικών συγκοινωνιών πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα:

- ✓ Η πλησιέστερη διαδρομή δεν είναι πάντα η βέλτιστη. Οι μετακινούμενοι μπορούν να μεταβούν σε διαφορετικές στάσεις εντός μιας ανεκτής απόστασης βαδίσματος, περίπου 400μ. Η κοντινότερη στάση δεν παρέχει απαραίτητα πρόσβαση στην επιλογή της βέλτιστης διαδρομής, επομένως

είναι προτιμότερος ο έλεγχος όλων των διαδρομών εντός μιας καθορισμένης ακτίνας τόσο στο σημείο προέλευσης όσο και στο σημείο προορισμού (O' Sullivan, 2000).

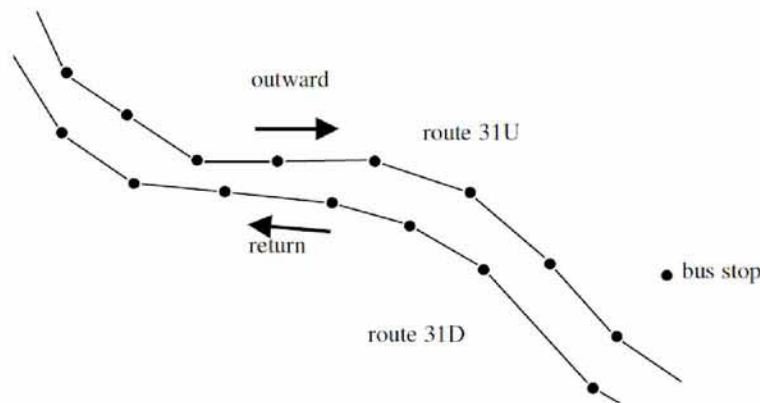
- ✓ Τα σημεία μετεπιβίβασης δεν βρίσκονται στο ίδιο σημείο και ο χρήστης συνήθως περπατάει για να μεταβεί από τη μία στάση στην άλλη. Ένα σημείο μετεπιβίβασης μπορεί να εξυπηρετεί δύο ή περισσότερες λεωφορειακές γραμμές. Η σωστή μοντελοποίηση του δικτύου των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς απαιτεί την αναπαράσταση των αντιδιαμετρικών στάσεων ως ξεχωριστά σημεία, ώστε να φαίνονται οι κατευθύνσεις των λεωφορειακών γραμμών και να μπορούν να υπολογιστούν οι χρόνοι μετεπιβίβασης (για παράδειγμα για τη λεωφορειακή γραμμή 31 η στάση μετάβασης μπορεί να απεικονιστεί ως κόμβος με ονομασία 31U (up) και η στάση επιστροφής, ως κόμβος με ονομασία 31D (down) (εικόνα 21) (Rainsford, 2002).
- ✓ Στα σημεία μετεπιβίβασης υπάρχουν διαφορετικοί χρόνοι αναμονής. Συνήθως υπάρχει μία ποινή χρόνου (time penalty) κατά τη μετεπιβίβαση από το ένα λεωφορείο στο άλλο. Μία λύση είναι ο υπολογισμός των χρόνων αναμονής μέσω των δρομολογίων. Εναλλακτικά συνήθως χρησιμοποιείται το μισό της συχνότητας της εκάστοτε λεωφορειακής γραμμής ως χρόνος αναμονής (Peng, 2000).
- ✓ Μέρος της διαδρομής μπορεί να εξυπηρετείται από διαφορετικά λεωφορεία. Σε αντίθεση με τα προβλήματα των άλλων δικτύων, η δρομολόγηση με τη χρήση δημόσιων μέσων μετακίνησης προσφέρει τη δυνατότητα διάσχισης ενός οδικού τμήματος με τη χρήση διαφορετικών λεωφορειακών γραμμών. Οι αλγόριθμοι «headway» επιλέγουν το πρώτο λεωφορείο που διέρχεται από τη στάση, αλλά όχι απαραίτητα το πιο γρήγορο (αυτό με τις λιγότερες μετεπιβιβάσεις και χρόνους αναμονής). Οι αλγόριθμοι που στηρίζονται στις πληροφορίες των δρομολογίων «timetable-based algorithms», μπορούν να υπολογίσουν ένα μοναδικό βέλτιστο αποτέλεσμα αλλά στερούνται απόδοσης χρόνου, καθώς οι υπολογισμοί είναι μακροσκελείς και υπάρχουν καθυστερήσεις στον υπολογισμό της βέλτιστης διαδρομής. Τέλος, υπάρχουν και υβριδικές λύσεις που χρησιμοποιούν στοιχεία και από τις δύο μεθόδους προσπαθώντας να υπολογίζουν μία βέλτιστη λύση αποφεύγοντας τις χρονικές καθυστερήσεις (Rainsford, 2002).

Μία από τις μεθόδους εύρεσης της συντομότερης διαδρομής σε δίκτυο Μέσων Μαζικής Μεταφοράς κάνοντας χρήση ενός υβριδικού αλγορίθμου είναι η ακόλουθη (Rainsford, 2002):

Δημιουργία δικτύου διαδρομών (Βήμα 1^ο)

Δημιουργία ενός τοπολογικού δικτύου των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς και μόνιμη αποθήκευσή του στη βάση δεδομένων (εικόνα 21).

Εικόνα 19: Δημιουργία δικτύου MMM



Πηγή: Rainsford, 2002

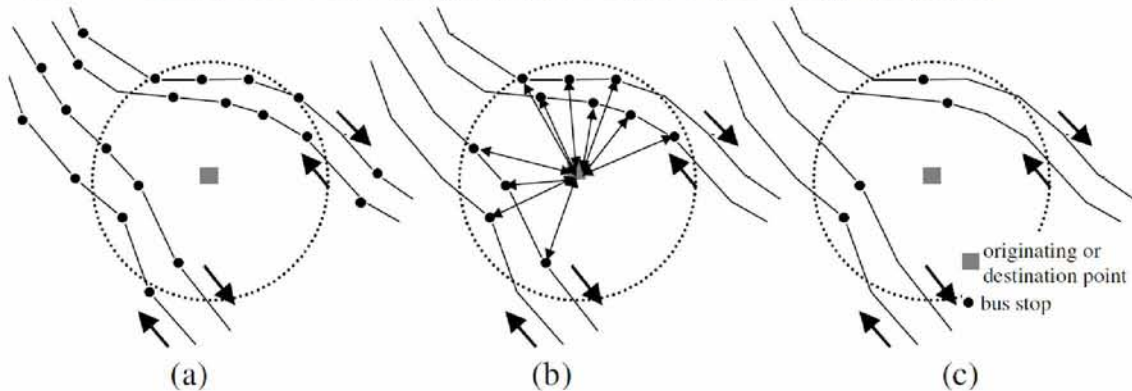
Κατασκευή τμημάτων που εξυπηρετούν δύο είδη μετακινήσεων (περπάτημα, MMM) (Βήμα 2^ο)

Για να συνδέονται τοπολογικά οι λεωφορειακές γραμμές που διασταυρώνονται, είναι απαραίτητη η κατασκευή εικονικών τμημάτων μεταξύ των κοντινών στάσεων έτσι ώστε να διενεργούνται οι μετεπιβιβάσεις οι οποίες γίνονται με περπάτημα. Αυτά τα τμήματα αποθηκεύονται μόνιμα στη βάση δεδομένων.

Επιλογή τελικών σημείων (Βήμα 3^ο)

Προσδιορισμός όλων των στάσεων γύρω από τα σημεία προέλευσης και προορισμού εντός μίας ακτίνας περίπου 300μ. (ανεκτή απόσταση περπατήματος από το χρήστη). Φιλτράρισμα αυτών των στάσεων ώστε να αφαιρεθούν εκείνες που εξυπηρετούν ίδια δρομολόγια (εικόνα 22).

Εικόνα 20: Επιλογή των στάσεων εξυπηρέτησης των σημείων προέλευσης / προορισμού



Προσδιορισμός όλων των στάσεων γύρω από το σημείο προέλευσης / προορισμού εντός μίας ακτίνας περίπου 300μ (α), σύγκριση των αποστάσεων από το σημείο προέλευσης / προορισμού στις εκατέρωθεν στάσεις εντός της ακτίνας (β) και αφαίρεση των στάσεων που εξυπηρετούν ίδια δρομολόγια (γ). Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση των δρομολογίων.

Πηγή: Rainsford, 2002

Εύρεση συντομότερων μονοπατιών (Βήμα 4^ο)

Εύρεση συντομότερων μονοπατιών μεταξύ των ζευγών προέλευσης προορισμού (με χρήση κάποιου από τους αλγορίθμους επίλυσης προβλημάτων συντομότερης διαδρομής, πχ. Dijkstra, Bellman Ford, A* ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη δικτύου).

Φιλτράρισμα διαδρομών (Βήμα 5^ο)

Οι υποψήφιες διαδρομές μειώνονται, αφαιρώντας εκείνες τις διαδρομές με σημαντικά περισσότερες στάσεις (20%) σε σχέση με το δρομολόγιο με το μικρότερο αριθμό στάσεων.

Δημιουργία βάσης δρομολογίων (Βήμα 6^ο)

Δημιουργία βάσης δεδομένων με τα δρομολόγια των λεωφορειακών γραμμών ώστε να είναι εφικτός ο υπολογισμός του απαιτούμενου χρόνου για τη διάσχιση οποιουδήποτε υποψήφιου τμήματος του δικτύου.

Υπολογισμός των χρόνων διαδρομής (Βήμα 7^ο)

Χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων με τα δρομολόγια υπολογίζεται η διάρκεια της διαδρομής, η ώρα άφιξης και οι συχνότητες.

Επιλογή διαδρομής (Βήμα 8^ο)

Οι γρηγορότερες και οι πιο συχνές διαδρομές συγκρίνονται και η καλύτερη διαδρομή στηρίζεται σε έναν κανόνα που κάνει την παραδοχή ότι μία διαδρομή με μεγαλύτερη συχνότητα δρομολογίων είναι προτιμότερη σε σχέση με μία άλλη που το λεωφορείο φτάνει νωρίτερα στη στάση αναμονής του χρήστη, προϋποθέτοντας όμως, ότι η διαφορά μεταξύ των χρόνων άφιξης των λεωφορείων στη στάση δεν είναι μεγάλη. Αναλυτικότερα ο κανόνας διατυπώνεται ως εξής: «Εάν το λεωφορείο με τη μεγαλύτερη συχνότητα φτάνει σε λιγότερο από 15 λεπτά μετά την άφιξη του πιο γρήγορου λεωφορείου ΚΑΙ η αναμονή του λεωφορείου με τη μεγαλύτερη συχνότητα είναι λιγότερη από τη μισή αναμονή του πιο γρήγορου λεωφορείου ΤΟΤΕ επέλεξε το πιο συχνό λεωφορείο ΑΛΛΙΩΣ επέλεξε το πιο γρήγορο.

4.4.2 Εφαρμογές δρομολόγησης σε δίκτυο Μέσων Μαζικής Μεταφοράς

Υπάρχει πληθώρα εφαρμογών δρομολόγησης για τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τρία ενδεικτικά παραδείγματα διεθνών και ελληνικών εφαρμογών για τη δρομολόγηση με δημόσιες αστικές συγκοινωνίες. Οι εφαρμογές αυτές είναι αντιπροσωπευτικές μιας σειράς άλλων παρόμοιων εφαρμογών και κάποιων καινοτόμων χαρακτηριστικών αυτών. Θεωρούνται καλές πρακτικές γιατί παρέχουν ένα σύνολο πληροφοριών στους χρήστες, λαμβάνουν υπόψη τους αρκετά κριτήρια ικανοποίησης των χρηστών, υποστηρίζουν μια μεγάλη βάση δεδομένων και συνεπώς παρέχουν περισσότερες πληροφορίες ενώ αναβαθμίζονται συνεχώς και επεκτείνονται.

❖ Google Transit

Το Google Transit είναι μία υπηρεσία δρομολόγησης με χρήση των αστικών συγκοινωνιών που προσφέρεται από τη Google σε συνδυασμό με τις υπηρεσίες χαρτών Google Maps.

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τα σημεία προέλευσης / προορισμού της επιθυμητής μετακίνησης και να του εμφανιστούν οδηγίες συνδυασμένης μετακίνησης με χρονική εκτίμηση και μέτρηση της απόστασης συνολικά και για κάθε ένα από τα μέσα που προτείνεται να χρησιμοποιηθούν.

Η Google Transit ξεκίνησε το Δεκέμβριο του 2005 καλύπτοντας αρχικά το δίκτυο δημοσίων συγκοινωνιών του Portland και Oregon στις ΗΠΑ ενώ σήμερα αριθμεί κάλυψη σε εκατοντάδες πόλεις σε όλο τον κόσμο. Τον Οκτώβριο του 2007 η Google Transit ενσωματώθηκε στους χάρτες της Google προσφέροντας το σχεδιασμό των μετακινήσεων πάνω στους χάρτες. Η κάλυψη στις ΗΠΑ και τον Καναδά είναι σχεδόν πλήρης ενώ σε ορισμένες περιοχές καλύπτονται μόνο τμηματικά κάποιες υπηρεσίες δημοσίων συγκοινωνιών. Πρόσφατα στη λίστα προστέθηκε και η ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης στην Ελλάδα (Κούρτης, 2012, European Commission 2013).

Η υπηρεσία προσφέρεται δωρεάν σε όλους τους πολίτες ανά τον κόσμο μέσα από το διαδίκτυο. Εκτός από την πρόσβαση μέσω διαδικτύου από το σπίτι για τον προγραμματισμό από πριν μιας μετακίνησης, είναι εφικτή και η οργάνωση του ταξιδιού μέσω της υπηρεσίας αυτής και σε πραγματικό χρόνο. Αυτό υποστηρίζεται με τη χρήση έξυπνων κινητών τηλεφώνων είτε μέσω πρόσβασης στο διαδίκτυο είτε μέσα από ειδικά σχεδιασμένες εφαρμογές που υποστηρίζουν την υπηρεσία. Στις συσκευές τύπου Android η εφαρμογή Google Transit είναι προ-εγκατεστημένη στα κινητά τηλέφωνα.

Η Google Transit στηρίζεται στο διεθνές πρότυπο των General Transit Feed Specifications - GTFS. Το GTFS αποτελεί ένα πρότυπο για την συγκέντρωση και δημοσίευση των δεδομένων των παρόχων αστικών συγκοινωνιών. Κάθε πάροχος που συγκεντρώνει και δημοσιοποιεί τα δεδομένα του με βάση αυτό το πρότυπο, επιτρέπει στη Google να χρησιμοποιήσει τους, ήδη υλοποιημένους, αλγόριθμους της και να προσφέρει υπηρεσίες δρομολόγησης στους χρήστες της.

Το GTFS οργανώνει τα δεδομένα με μια κοινή μορφή ώστε να εισαχθούν και να είναι εύκολα αναγνώσιμα από το σύστημα δρομολόγησης.

Μια συλλογή δεδομένων σε πρότυπο GTFS αποτελείται από μια σειρά από αρχεία κειμένου κάθε ένα από τα οποία μοντελοποιεί μια διαφορετική πληροφορία. Έτσι ένα ξεχωριστό αρχείο μοντελοποιεί τις στάσεις, άλλο τα δρομολόγια κ.ο.κ. (Transit IDEA Program, 2011).

Τα δεδομένα για το πρότυπο GTFS πρέπει να συμπεριλαμβάνουν:

- ✓ Τις διαδρομές των οχημάτων με δημόσια μέσα μεταφοράς

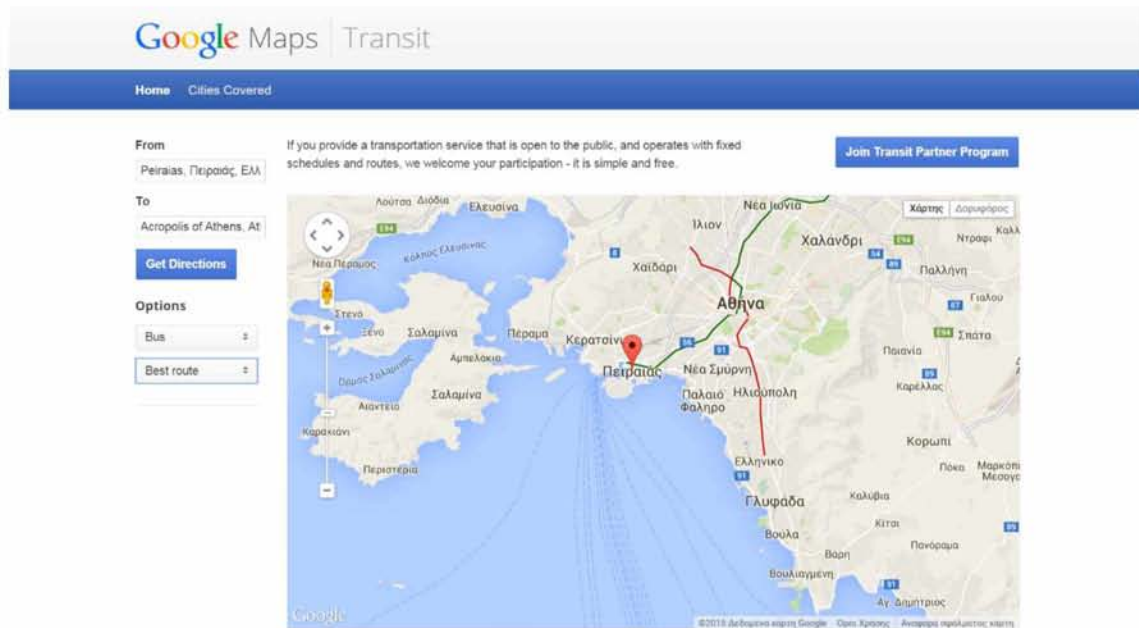
- ✓ Τις στάσεις από τις οποίες διέρχονται τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς
- ✓ Τα δρομολόγια
- ✓ Τους χρόνους των δρομολογίων
- ✓ Ημερομηνίες και ημέρες της εβδομάδας για τις οποίες λειτουργεί μια συγκεκριμένη υπηρεσία

Επιπρόσθετα μπορεί να περιλαμβάνουν κάποιες συμπληρωματικές πληροφορίες, όπως:

- ✓ Ημερομηνίες που εξαιρείται η λειτουργία κάποιων υπηρεσιών ή που τροποποιείται λόγω ειδικών συνθηκών
- ✓ Πληροφορίες για το κόστος των εισιτηρίων κάθε μέσου και κάθε διαδρομής
- ✓ Συμπληρωματικές οδηγίες σχετικά με την κοστολόγηση (π.χ. εισιτήρια 2 διαδρομών κλπ.)
- ✓ Οδηγίες για την απεικόνιση των διαδρομών σε χάρτη
- ✓ Συχνότητες δρομολογίων
- ✓ Κανόνες για τη δημιουργία συνδέσεων μεταξύ διαδρομών
- ✓ Δεδομένα για τη λίστα των δεδομένων που παρέχονται όπως ο εκδότης και η ημερομηνία έκδοσης κ.λπ.

Για τη δρομολόγηση μέσω της εφαρμογής Google Transit, αρχικά ο χρήστης επιλέγει τα σημεία προέλευσης / προορισμού, είτε με εισαγωγή διευθύνσεων ή σημείων ενδιαφέροντος, είτε με εύρεση της ακριβής του τοποθεσίας μέσω GPS συστήματος. Στη συνέχεια δηλώνει το επιθυμητό Μέσο Μαζικής Μεταφοράς από μία λίστα τεσσάρων επιλογών (λεωφορείο, μετρό, τρένο, τραμ) και διαλέγει κριτήριο βελτιστοποίησης (βέλτιστη διαδρομή, διαδρομή με τις λιγότερες μετεπιβιβάσεις, διαδρομή με το λιγότερο περπάτημα). Πατώντας το πλήκτρο «get directions» υπολογίζεται από την εφαρμογή η βέλτιστη επιλογή που ανταποκρίνεται στα χαρακτηριστικά εισαγωγής του χρήστη. Αφού γίνει ο υπολογισμός και, μέσω δικτύου, επιστρέψουν τα αποτελέσματα, ο χρήστης βλέπει μια λίστα με τις διαθέσιμες επιλογές. Επιλέγοντας μία από αυτές μπορεί να δει την αναλυτική περιγραφή της με κείμενο, αλλά και όλη τη λεπτομέρεια της διαδρομής στο χάρτη. Οι οδηγίες φυσικά περιλαμβάνουν, εκτός από τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς, και οδηγίες περπατήματος (Google Transit, 2015).

Εικόνα 21: Δρομολόγηση με την εφαρμογή Google Transit



Πηγή: Google Transit, 2015

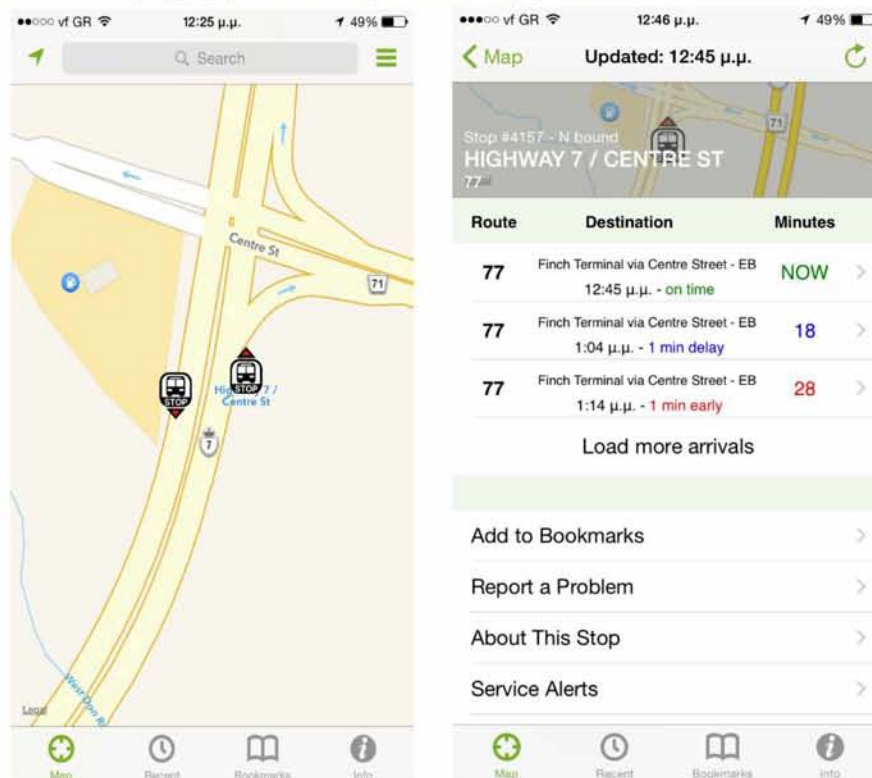
❖ OneBusAway

Το OneBusAway, αποτελεί μια ευρέως γνωστή εφαρμογή που αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο της Washington και παρέχει πληροφόρηση πραγματικού χρόνου για τις μετακινήσεις με Μέσα Μαζικής Μεταφοράς σε τέσσερις πόλεις της Αμερικής (Atlanta, Puget Sound, Tampa, York). Σε δοκιμαστικό στάδιο βρίσκονται κάποιες επιπρόσθετες περιοχές (Boston, Lappeenranta, Rogue Valley στο Oregon και Washington D.C.). Αυτή η εφαρμογή, χρησιμοποιεί το γεωγραφικό σημείο του χρήστη και του δείχνει την κοντινότερη στάση λεωφορείου μαζί με την αντίστοιχη πληροφόρηση, για δρομολόγια και αφίξεις λεωφορειακών γραμμών σε συνθήκες πραγματικού χρόνου (εικόνα 24). Δεν παρέχει δρομολόγηση βελτιστοποιώντας κάποιο κριτήριο όπως απόσταση, κόστος ή εκπεμπόμενους ρύπους, παρά μόνο ενημέρωση για τα δρομολόγια των λεωφορείων, τις στάσεις αυτών, συνδέσεις με άλλες λεωφορειακές γραμμές και τυχόν καθυστερήσεις ή ακυρώσεις. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν στάσεις λεωφορείου στην περιοχή όπου αναζητά ο χρήστης, παρέχεται η κατάλληλη ενημέρωση από την εφαρμογή καθώς και η οδηγία για μετάβαση σε πλησιέστερη γεωγραφικά περιοχή. Πάνω στο χαρτογραφικό υπόβαθρο του OneBusAway απεικονίζονται οι υφιστάμενες στάσεις καθώς και οι

κατευθύνσεις των λεωφορειακών γραμμών (εικόνα 24) (Ferris, 2009, OneBusAway, 2015).

Αυτή η πληροφόρηση που δίνεται αμέσως μετά την επιλογή της στάσης ενδιαφέροντος από το χρήστη και δηλώνεται πάνω στον χάρτη, αξιολογήθηκε σε έρευνα όπου το 93% των χρηστών δήλωσε ότι θα περπατούσαν σε μια διαφορετική στάση εάν το σύστημα πληροφόρησης της εφαρμογής τους το υποδείκνυε. Το ποσοστό αυτό είναι πολύ σημαντικό αν αναλογιστεί κανείς ότι το περπάτημα δεν αφορά την μετάβαση στον τελικό προορισμό αλλά ουσιαστικά πρόσθετη επιλογή μετακίνησης σε μια συνδυασμένη μετακίνηση. Η εφαρμογή OneBusAway που μελετήθηκε το 2009, επαναξιολογήθηκε μια τριετία αργότερα (2012) με στόχο την αξιολόγηση του πως η πληροφόρηση πραγματικού χρόνου συμβάντων μπορεί να ενδυναμώσει τους βιωσιμότερους τρόπους κινητικότητας. Στο πλαίσιο της νεότερης μελέτης εξετάστηκαν επιπρόσθετα οι επιπτώσεις των λαθεμένων προβλέψεων πραγματικού χρόνου στη συμπεριφορά των χρηστών. Η συγκριτική αξιολόγηση των δυο μελετών έδειξε ότι η ικανοποίηση των χρηστών από το σύστημα δημοσίων συγκοινωνιών αυξήθηκε καθώς και η αντίληψη της ασφάλειας από τις μετακινήσεις με Μέσα Μαζικής Μεταφοράς (Goose, 2013).

Εικόνα 22: Εφαρμογή OneBusAway σε συσκευή iPhone



Πηγή: OneBusAway, 2015

❖ Transportation in Athens

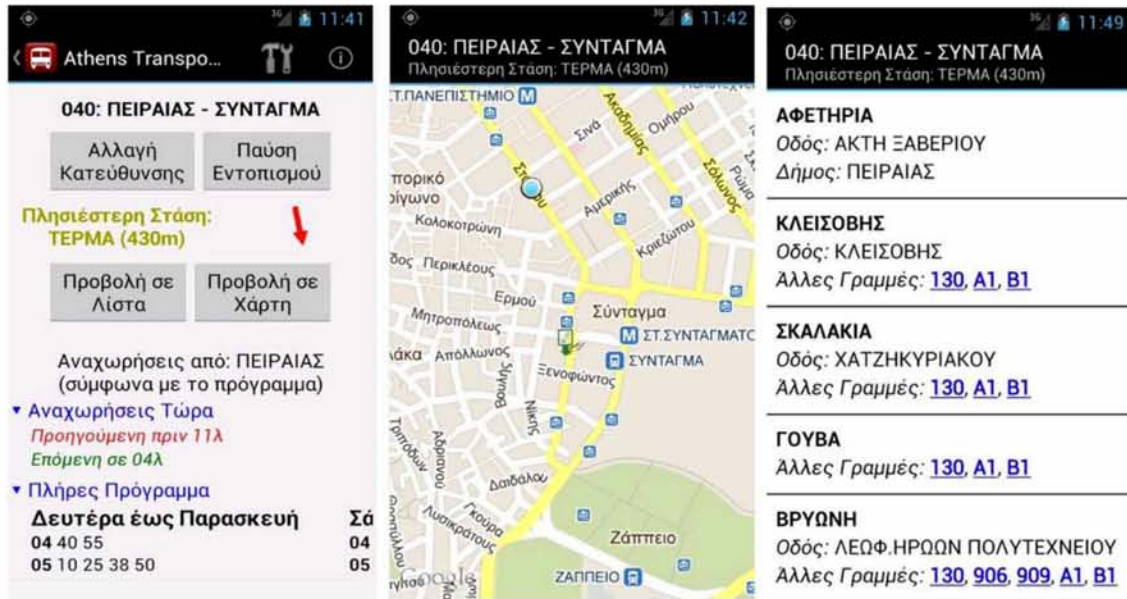
Το Transportation in Athens είναι μία από τις λίγες εφαρμογές που αφορούν τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς στην περιοχή της Αθήνας. Έχει σχεδιαστεί για λειτουργικό σύστημα Android και μπορεί να δώσει πληροφορίες χωρίς ο χρήστης να είναι συνδεδεμένος στο διαδίκτυο. Η εφαρμογή περιέχει τις γραμμές και τις στάσεις όλων των μέσων αστικών συγκοινωνιών της Αθήνας (λεωφορεία, τρόλεϊ, τραμ, μετρό, ηλεκτρικός και προαστιακός) με τις ώρες των δρομολογίων τους καθώς και σχετικές ανακοινώσεις από τον ΟΑΣΑ. Το Transportation in Athens δεν βελτιστοποιεί την επιθυμητή διαδρομή του χρήστη βάσει κάποιου κριτηρίου και δεν χρησιμοποιεί κάποιον αλγόριθμο δρομολόγησης.

Οι πληροφορίες που παρέχονται στο χρήστη μέσω της εφαρμογής είναι:

- ✓ Ώρες εκκίνησης δρομολογίου από αφετηρία/στάση
- ✓ Στάσεις διαδρομής
- ✓ Σύγκριση 2 διαδρομών
- ✓ Αναζήτηση διαδρομής
- ✓ Αποθήκευση αγαπημένων διαδρομών

Ο χρήστης αφού εγκαταστήσει την εφαρμογή σε συσκευή Android επιλέγει την λεωφορειακή γραμμή που επιθυμεί, είτε εισάγοντας απευθείας τον κωδικό ή το όνομά της, είτε επιλέγοντας από τη δοθείσα λίστα βάσει του Δήμου που εξυπηρετεί. Αφού επιλέξει τη λεωφορειακή γραμμή βλέπει ποια είναι η κοντινότερη στάση στην τοποθεσία που βρίσκεται, κάνοντας χρήση του ενσωματωμένου GPS και της πυξίδας της συσκευής (απαιτεί να βρίσκεται σε απόσταση έως 1.5 χιλιόμετρο περίπου από την κοντινότερη στάση). Στη συνέχεια του απεικονίζονται τόσο σε λίστα όσο και σε χαρτογραφικό υπόβαθρο, οι αναχωρήσεις από την επιλεγθείσα στάση (προηγούμενες και επόμενες) καθώς και το αναλυτικό πρόγραμμα με όλα τα δρομολόγια (εικόνα 25). Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί προέρχονται από την ιστοσελίδα του Οργανισμού Αστικών Συγκοινωνιών Αθήνας (ΟΑΣΑ) και περιέχουν επιπλέον διορθώσεις. Η χωρητικότητα που καταλαμβάνει στη συσκευή είναι πολύ μικρή, περίπου 1MB, αν επιλεγτεί ως σημείο μεταφόρτωσης της βάσης η κάρτα μνήμης. Η εφαρμογή έχει κατασκευαστεί από ιδιώτη και δεν έχει καμία σχέση με τον ΟΑΣΑ (Κούρτης, 2012, Transportation in Athens, 2015).

Εικόνα 23: Εφαρμογή Transportation in Athens



Πηγή: Transportation in Athens, 2015

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ i-Mobi Volos

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της εφαρμογής δρομολόγησης που στο εξής θα καλείται πλατφόρμα πληροφόρησης μετακινούμενων με το ακρωνύμιο i-Mobi Volos, περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση: Σε αυτό το στάδιο γίνεται συλλογή καλών πρακτικών σχετικά με τη λειτουργική δομή των άλλων εφαρμογών δρομολόγησης καθώς και των αλγόριθμων που χρησιμοποιούνται. Παράλληλα, διενεργείται έρευνα για τον προσδιορισμό εξισώσεων υπολογισμού της απόστασης, του κόστους και των ρύπων που εκπέμπονται για τη μετάβαση από έναν κόμβο του δικτύου σε έναν άλλο με κάθε μεταφορικό μέσο.

Συλλογή Δεδομένων: Συλλέχθηκαν δεδομένα σχετικά με τα Οικοδομικά Τετράγωνα (ΟΤ) που απαρτίζουν το ΠΣΒ, τα σημεία ενδιαφέροντος που υπάρχουν, τα κόμιστρα των αστικών λεωφορειών και τα δρομολόγια όλων των μέσων μεταφοράς στο ΠΣΒ (Αστικό ΚΤΕΛ, ΟΣΕ, Υπεραστικό ΚΤΕΛ, Θαλάσσιες μεταφορές).

Ανάλυση δεδομένων: Η ανάλυση δεδομένων έγινε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου VISUM για την προσομοίωση του συγκοινωνιακού δικτύου και του λογισμικού ArcGIS για την δημιουργία του χαρτογραφικού υπόβαθρου και την επεξεργασία των γεωγραφικών πληροφοριών. Σε αυτό το στάδιο, κατασκευάστηκε κατάλληλη βάση δεδομένων για κάθε μεταφορικό μέσο για τον υπολογισμό της απόστασης, του κόστους και των εκπεμπόμενων ρύπων κατά τη μετάβαση από έναν κόμβο του δικτύου σε έναν άλλο.

Προσδιορισμός αλγόριθμου επίλυσης του προβλήματος συντομότερης διαδρομής στο δίκτυο του ΠΣΒ: Μετά την ανάλυση των δεδομένων και στηριζόμενοι στις καλές πρακτικές άλλων εφαρμογών δρομολόγησης, έγινε ο προσδιορισμός του αλγόριθμου για την επίλυση του προβλήματος συντομότερης διαδρομής στο δίκτυο του Πολεοδομικού Συγκροτήματος Βόλου, όπου όλα τα βάρη ακμών του δικτύου είναι θετικά.

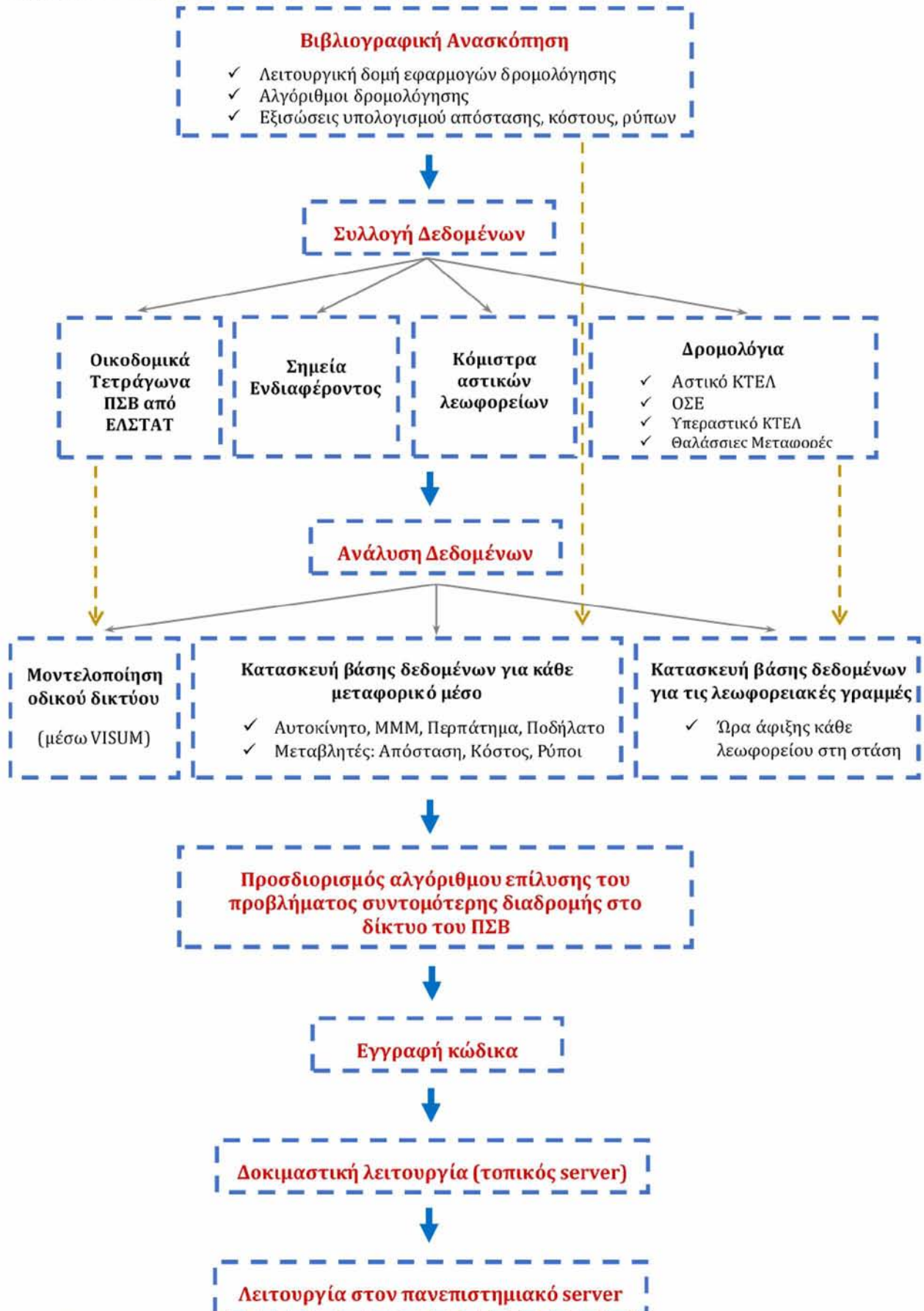
Εγγραφή Κώδικα: Η εγγραφή του κώδικα και η επιλογή των γλωσσών προγραμματισμού έγινε από αντίστοιχους φοιτητές του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Δοκιμαστική λειτουργία: Η εγγραφή του κώδικα από τους προγραμματιστές και η χρήση των επεξεργασμένων δεδομένων, επέτρεψε τη δοκιμαστική λειτουργία του i-Mobi σε τοπικό server για τον προσδιορισμό τυχόν παραλείψεων και επιδιορθώσεων.

Λειτουργία στον πανεπιστημιακό server: Μετά τις όποιες αλλαγές που έγιναν με στόχο την ορθή λειτουργία του i-Mobi Volos, η εφαρμογή «ανέβηκε» στο server του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και είναι διαθέσιμη για όλους τους μετακινούμενους στην πόλη του Βόλου.

Τα αναλυτικά βήματα της μεθοδολογικής προσέγγισης για την κατασκευή της πλατφόρμας πληροφόρησης μετακινούμενων i-Mobi Volos απεικονίζονται στο Διάγραμμα 1.

Διάγραμμα 1: Μεθοδολογία υλοποίησης του i-Mobi Volos



Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Πριν την υλοποίηση του i-Mobi Volos, σχεδιάστηκε το σύστημα σύμφωνα με τις βασικές αρχές και τις λειτουργικές προδιαγραφές που το διέπουν. Το παρόν κεφάλαιο, λοιπόν, επικεντρώνεται στην περιγραφή της πλατφόρμας πληροφόρησης μετακινούμενων i-Mobi Volos και στην μακροσκοπική παρουσίαση των υποσυστημάτων από τα οποία αποτελείται. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές αρχές του συστήματος και στη συνέχεια παρουσιάζονται εκτενέστερα οι λειτουργικές του προδιαγραφές.

6.1 Βασικές αρχές συστήματος

Οι βασικές αρχές του συστήματος αφορούν:

- ✓ την παροχή πληροφόρησης στον μετακινούμενο σχετικά με τα διαθέσιμα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς, τα χαρακτηριστικά τους (δρομολόγια, κόμιστρα), τα σημεία ενδιαφέροντος (αθλητικές εγκαταστάσεις, δημοτικές υπηρεσίες, εκπαιδευτικοί χώροι, στάσεις λεωφορείων, τερματικοί σταθμοί κ.α.) και τους διαθέσιμους τρόπους επικοινωνίας με τους εμπλεκόμενους φορείς.
- ✓ την εισαγωγή των χαρακτηριστικών μετακίνησης του χρήστη, δηλαδή της αναχώρησης και της άφιξης, του επιθυμητού μεταφορικού μέσου, της επιλογής των κριτηρίων που θα βελτιστοποιήσουν τη διαδρομή του και της ώρας αναχώρησης.
- ✓ την εκτίμηση της βέλτιστης διαδρομής και των χαρακτηριστικών αυτής δηλαδή χρόνος, απόσταση, λεωφορειακή γραμμή κ.α.
- ✓ την αξιολόγηση της πλατφόρμας και την εισαγωγή προτάσεων για την καλύτερη εξυπηρέτηση των χρηστών.

6.2 Λειτουργικές προδιαγραφές συστήματος

Μέσα από το i-Mobi Volos, ο μετακινούμενος, τόσο ο κάτοικος όσο και ο επισκέπτης έχει τη δυνατότητα να πληροφορείται και να επιλέγει την βέλτιστη για αυτόν διαδρομή, στοχεύοντας στην ορθή διαχείριση της κινητικότητας του καθώς και στην προώθηση, ενδυνάμωση και διευκόλυνση της προσβασιμότητας του προς τις υπάρχουσες υπηρεσίες παροχής μεταφορικού έργου αλλά και προς τον τελικό του προορισμό. Σύμφωνα με τις βασικές αρχές του συστήματος, διαμορφώνονται τέσσερις λειτουργίες που αφορούν α) υπηρεσίες πληροφόρησης του

μετακινούμενου, β) δυνατότητα εισαγωγής χαρακτηριστικών της μετακίνησης, γ) υπηρεσίες εύρεσης βέλτιστης διαδρομής και δ) δυνατότητα συμμετοχής των χρηστών σε έρευνα αναγκών μετακίνησης και αξιολόγησης του i-Mobi Volos. Οι λειτουργίες αυτές περιγράφονται αναλυτικά στις παρακάτω παραγράφους.

6.2.1 Υπηρεσίες πληροφόρησης μετακινούμενου

Χρησιμοποιώντας το i-Mobi Volos ο χρήστης λαμβάνει πληροφόρηση σχετικά με τα σημεία ενδιαφέροντος του Βόλου. Τα σημεία ενδιαφέροντος καλύπτουν μεγάλο εύρος κατηγοριών, παρέχοντας πληροφορίες που αφορούν τόσο τον τουρισμό όσο και την καθημερινότητα της πόλης (πολιτιστικοί χώροι, ξενοδοχεία, δημοτικές υπηρεσίες, αθλητικές εγκαταστάσεις κ.α.). Η οπτικοποίηση των σημείων πάνω στο υπόβαθρο του i-Mobi Volos και η παροχή πληροφοριών επικοινωνίας και ηλεκτρονικής 'επίσκεψης' των διαδικτυακών τόπων των φορέων για επιπρόσθετες πληροφορίες, παρέχουν μια σφαιρική και ολοκληρωμένη ενημέρωση στους χρήστες.

Το i-Mobi Volos παρέχει επίσης πληροφόρηση σχετικά με τα δρομολόγια των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς (αστικό ΚΤΕΛ Βόλου, ΟΣΕ, υπεραστικό ΚΤΕΛ Βόλου και θαλάσσιες μεταφορές). Η πληροφόρηση για τα προγράμματα των λεωφορειακών γραμμών και τις στάσεις του αστικού ΚΤΕΛ Βόλου διευκολύνει το σχεδιασμό των μετακινήσεων εντός του αστικού ιστού της πόλης του Βόλου, ενώ η πρόσβαση σε μια ενιαία βάση δεδομένων με συγκεντρωτικά στοιχεία για τις αναχωρήσεις και τις αφίξεις όλων των διατιθέμενων Μέσων Μαζικής Μεταφοράς διευκολύνει τον χρήστη στην καλύτερη οργάνωση της μετακίνησής του.

Εκτός από τα δρομολόγια ο χρήστης πληροφορείται και για τα κόμιστρα του αστικού ΚΤΕΛ Βόλου. Η αστική συγκοινωνία στον Βόλο χωρίζεται σε δύο ζώνες, Α' και Β'. Τα όρια των ζωνών και τις τιμές των εισιτηρίων τα καθορίζει αποκλειστικά το Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων με τις εκάστοτε αποφάσεις που δημοσιεύει. Ο χρήστης λαμβάνει πληροφόρηση για τα εισιτήρια όλων των κατηγοριών που ισχύουν και για τις δύο ζώνες, είτε αυτά εκδίδονται εντός των λεωφορείων είτε στα εκδοτήρια.

6.2.2 Εισαγωγή χαρακτηριστικών μετακίνησης

Για τον σχεδιασμό της μετακίνησης και την ενημέρωση των χαρακτηριστικών αυτής, το i-Mobi Volos παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα εισαγωγής των

χαρακτηριστικών της μετακίνησης, έτσι ώστε η προτεινόμενη βέλτιστη διαδρομή να ανταπεξέρχεται στις ανάγκες και στις προτιμήσεις του. Ο χρήστης αρχικά καλείται να δηλώσει το σημείο αναχώρησης και το σημείο άφιξης της μετακίνησής του, ενώ σε δεύτερο στάδιο εισάγει στην εφαρμογή τον τρόπο μετακίνησης, το κριτήριο βάσει του οποίου θα βελτιστοποιηθεί η δρομολόγηση και την ώρα έναρξης της μετακίνησης. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι απαραίτητα προκειμένου να προγραμματιστεί, να υπολογιστεί και να αναδειχθεί η βέλτιστη διαδρομή στον χρήστη. Η εισαγωγή αυτών των στοιχείων βοηθά στην καλύτερη εξυπηρέτηση του χρήστη, στην βελτίωση των μετακινήσεων του (συντομότερες, οικονομικότερες και περιβαλλοντικά φιλικές διαδρομές) και στην επίτευξη ενός καλύτερου βιοτικού επιπέδου σε ό,τι αφορά τις μετακινήσεις και το περιβάλλον.

6.2.3 Υπηρεσίες εύρεσης βέλτιστης διαδρομής

Το i-Mobi Volos παρέχει τη δυνατότητα εύρεσης βέλτιστης διαδρομής με 3 κριτήρια α) συντομότερη, β) οικονομικότερη και β) περιβαλλοντικά φιλική.

Στην πρώτη κατηγορία αναδεικνύεται η μικρότερη σε μήκος και χρόνο διαδρομή από το σημείο αναχώρησης στο σημείο άφιξης. Για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής λαμβάνονται υπόψη οι αποστάσεις και ο χρόνος μεταξύ όλων των κόμβων του οδικού δικτύου καθώς και οι κατευθύνσεις των οδικών αξόνων ώστε να παρέχονται στο χρήστη έγκυρες και ορθές οδηγίες.

Το κριτήριο οικονομικότερη διαδρομή αναδεικνύει τη διαδρομή με το χαμηλότερο συνολικό κόστος από το σημείο αναχώρησης στο σημείο άφιξης. Για την εύρεση της οικονομικότερης διαδρομής λαμβάνεται υπόψη το κόστος που απαιτείται για τη μετακίνηση από το σημείο αναχώρησης στο σημείο άφιξης για κάθε ένα από τα μεταφορικά μέσα. Το ποδήλατο και το περπάτημα έχουν μηδενικό κόστος.

Επιλέγοντας το κριτήριο περιβαλλοντικά φιλική δρομολόγηση, αναδεικνύεται η διαδρομή με τη χαμηλότερη εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NO_x) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) ανά μέσο. Το ποδήλατο και το περπάτημα είναι τα περιβαλλοντικά φιλικότερα μέσα, καθώς δεν εκπέμπουν ρύπους στην ατμόσφαιρα.

Για τη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης επιλέχθηκαν τα αέρια CO_2 και NO_x καθώς αυτά συγκροτούν τους σημαντικότερους ατμοσφαιρικούς ρύπους μαζί με τα οξείδια του θείου (SO_x), τους υδρογονάνθρακες (HC) και τα αιωρούμενα σωματίδια (TSP). Ειδικότερα, οι πιο σημαντικές εκπομπές της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

αφορούν το CO₂, το οποίο δεν είναι τοξικό αέριο αλλά με την υπερβολική συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα οξείδια του αζώτου (NO, NO₂, NO_x) είναι συνήθως αέριοι ρύποι των καυσαερίων των οχημάτων (40-50%). Τα NO_x είναι ένας ακόμη παράγοντας για την παραγωγή όξινης βροχής, ενώ συμβάλλουν μαζί με το CO₂ και το μεθάνιο (CH₄) στην έξαρση του φαινομένου του θερμοκηπίου (Κούγκολος, 2015).

6.2.4 Έρευνα αναγκών μετακίνησης και αξιολόγησης του i-Mobi Volos

Οι χρήστες του i-Mobi Volos έχουν τη δυνατότητα συμμετοχής στην έρευνα διερεύνησης αναγκών μετακίνησης και πληροφόρησης η οποία αναφέρεται στην περιοχή μελέτης της εφαρμογής, δηλαδή στο Πολεοδομικό Συγκρότημα Βόλου. Μέσω της δειγματοληπτικής έρευνας με τη χρήση ερωτηματολογίου διερευνώνται τα χαρακτηριστικά των μετακινήσεων των χρηστών και οι ανάγκες πληροφόρησης τους, με στόχο να σκιαγραφηθεί το κυκλοφοριακό τους προφίλ.

Το i-Mobi Volos παρέχει επίσης τη δυνατότητα αξιολόγησής του. Η αξιολόγηση αφορά τόσο τη λειτουργικότητα της εφαρμογής όσο και την ποιότητα των παρεχόμενων οδηγιών. Τα στοιχεία που συλλέγονται χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας και της αποδοτικότητάς του, ενώ τα αποτελέσματα αξιοποιούνται για την ανατροφοδότηση του σχεδιασμού, έτσι ώστε να ανταπεξέρχεται στις ανάγκες των χρηστών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Τα μοντέλα τα οποία αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται από το i-Mobi Volos για τον σχεδιασμό της μετακίνησης σύμφωνα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά εισαγωγής του χρήστη είναι τα ακόλουθα.

7.1 Μοντέλο εκτίμησης συντομότερης διαδρομής

Όπως αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 6.2.3 μία από τις υπηρεσίες βέλτιστης διαδρομής είναι η ανάδειξη της συντομότερης διαδρομής. Ως στοιχεία εισόδου στο μοντέλο εκτίμησης συντομότερης διαδρομής είναι η απόσταση (σε μέτρα) και ο χρόνος (σε λεπτά) που απαιτείται μεταξύ όλων των κόμβων του οδικού δικτύου. Υπολογίζοντας τη συντομότερη σε μήκος και χρόνο διαδρομή μεταξύ των σημείων αναχώρησης και άφιξης με τη χρήση του αλγόριθμου Dijkstra, η επιλογή του οποίου αιτιολογείται στο ακόλουθο κεφάλαιο, και θέτοντας ως περιορισμό (constraint) στο μοντέλο τις κατευθύνσεις των οδικών αξόνων του δικτύου, παρέχεται στο χρήστη η βέλτιστη δρομολόγηση ως προς την ελαχιστοποίηση της χρονοαπόστασης (εικόνα 26).

Εικόνα 24: Μοντέλο εκτίμησης συντομότερης διαδρομής



Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως η επιλογή της συντομότερης διαδρομής για το δίκτυο των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς δεν ακολουθεί τις ίδιες ακριβώς διαδικασίες σε σχέση με το οδικό δίκτυο, το δίκτυο ποδηλάτου και το αντίστοιχο για περπάτημα. Αφού ο χρήστης δηλώσει την προέλευση και τον προορισμό και «τρέξει» ο αλγόριθμος Dijkstra για το δίκτυο των αστικών λεωφορειών (ως εδώ η διαδικασία είναι όμοια σε όλα τα δίκτυα), διενεργείτε μία επεξεργασία στα σημεία που επιστρέφονται. Αρχικά, ελέγχονται όλες οι στάσεις που υπάρχουν μεταξύ των σημείων που επέστρεψε ο αλγόριθμος καθώς και τα λεωφορεία που διέρχονται από αυτές. Στη συνέχεια, εξετάζεται η κατεύθυνση που θα κινηθεί ο χρήστης και αφαιρούνται οι στάσεις που βρίσκονται στην αντίθετη κατεύθυνση. Στο τρίτο επίπεδο ελέγχου, διερευνάται η συχνότητα εμφάνισης του κάθε λεωφορείου (λεωφορειακή γραμμή) και επιλέγεται εκείνο με τη μεγαλύτερη συχνότητα. Οι

κόμβοι από τους οποίους διέρχεται το λεωφορείο που επιλέχθηκε ενώνονται και το τμήμα από το σημείο αναχώρησης μέχρι την πρώτη στάση από την οποία θα διέλθει το επιλεγόμενο λεωφορείο καθώς και το αντίστοιχο της τελευταίας στάσης μέχρι το σημείο άφιξης του χρήστη γίνεται μέσω περπατήματος. Η επιλογή του μοντέλου αυτού στηρίζεται στη λογική δρομολόγησης των MMM που αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 4.4.1, στην περίπτωση όμως που δεν γίνονται μετεπιβιβάσεις και ο χρήστης καλείται να επιλέξει μία λεωφορειακή γραμμή.

7.2 Μοντέλο εκτίμησης κόστους διαδρομής

Το μοντέλο εκτίμησης κόστους διαδρομής θέτει ως στοιχεία εισόδου το κόστος που απαιτείται για τη μετάβαση μεταξύ όλων των κόμβων του οδικού δικτύου. Στο αστικό ΚΤΕΛ Βόλου, ως κόστος λαμβάνεται η τιμή του εισιτηρίου, ενώ στα ΙΧ αυτοκίνητα το κόστος βενζίνης ανά χιλιόμετρο που υπολογίστηκε ίσο με 0,12€/χλμ. Το ποδήλατο και το περπάτημα έχουν μηδενικό κόστος. Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος Dijkstra εκτελείται λαμβάνοντας ως βάρος της κάθε ακμής του κόμβου του οδικού δικτύου την παράμετρο του κόστους. Τα δεδομένα που εξάγονται από το συγκεκριμένο μοντέλο αφορούν την ανάδειξη της διαδρομής με το ελάχιστο απαιτούμενο κόστος (εικόνα 27).

Εικόνα 25: Μοντέλο εκτίμησης κόστους διαδρομής



Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

7.3 Μοντέλο εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Τα στοιχεία εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων αφορούσαν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και οξειδίων του αζώτου (NO_x). Για τον υπολογισμό αυτών των ρύπων χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα εκτίμησης ρύπων όπως αναπτύχθηκαν στο έντυπο υλικό του ευρωπαϊκού προγράμματος PORTAL¹ σχετικά με τις επιπτώσεις των αστικών μεταφορών και της κατανάλωσης ενέργειας στο περιβάλλον

¹ Το πρόγραμμα είναι προϊόν των εξής κοινοπραξιών: MEET-Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport (σε συνδυασμό με τη δράση COST Action 319, COMMUTE-Common Methodology for Multi-Modal Transport Environmental και ARTEMIS- Assessment of Road Transport Emission Models and Inventory Systems).

«Environment, Energy and Transport». Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος PORTAL οι εκπομπές NO_x στα βενζινοκίνητα αμάξια κατηγορίας EURO V που ισχύουν σήμερα υπολογίζονται από την εξίσωση: $0.526 - 0.0085V + 8.54E-0.5V^2$, όπου η μέση ταχύτητα V εντός του αστικού ιστού του Βόλου για τα ΙΧ οχήματα είναι 30χλμ/ώρα. Η αντίστοιχη εξίσωση για τον υπολογισμό των εκπομπών του CO₂ είναι: $231 - 3.62V + 0.0263V^2 + 2526/V$. Για τα αστικά λεωφορεία οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των εκπομπών NO_x είναι: $16.3 - 0.173V + 111/V$, όπου η μέση ταχύτητα V στα αστικά λεωφορεία εντός του αστικού ιστού της πόλης του Βόλου είναι 20χλμ/ώρα. Η εξίσωση για τον υπολογισμό των εκπομπών CO₂ των αστικών λεωφορείων είναι: $679 - 0.00268V^3 + 9635/V$ (Mitrovich,2003).

Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος Dijkstra που εκτελείται θέτει ως βάρος της κάθε ακμής του κόμβου του οδικού δικτύου το συνολικό άθροισμα των ρύπων CO₂ και NO_x (σε γρ./χλμ). Τα δεδομένα που εξάγονται από το συγκεκριμένο μοντέλο αφορούν την ανάδειξη του μεταφορικού μέσου με τους λιγότερους ρύπους CO₂ και NO_x (εικόνα 28).

Εικόνα 26: Μοντέλο εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων



Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ i-Mobi Volos

Ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των στοιχείων εισόδου και την εύρεση της συντομότερης, οικονομικότερης και της φιλικά περιβαλλοντικής διαδρομής, είναι ο Dijkstra.

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου Dijkstra είναι η σήμανση των κόμβων του δικτύου ως μόνιμους ή προσωρινούς. Αρχικά, όλοι οι κόμβοι είναι μαρκαρισμένοι ως προσωρινοί και κάθε ακμή έχει ως βάρος την απόσταση, το κόστος και τους ρύπους μεταξύ των κόμβων που συνδέει. Δηλαδή το βάρος της κάθε ακμής είναι ένα από τα τρία κριτήρια βελτιστοποίησης, ανάλογα με τις επιλογές του χρήστη. Κάθε κόμβος, εκτός από το χαρακτηρισμό του ως μόνιμος ή προσωρινός χαρακτηρίζεται και από μια εγγραφή (ετικέτα) που παρουσιάζει την απόστασή του, το κόστος του και τους ρύπους από τον κόμβο προέλευσης καθώς και την καλύτερη γνωστή (ως την τρέχουσα χρονική στιγμή) διαδρομή. Στην εκκίνηση του δικτύου αυτές οι ετικέτες περιέχουν την τιμή 'άπειρο'. Κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου οι ετικέτες διαμορφώνονται δυναμικά εμπεριέχοντας τις τρέχουσες καλύτερες διαδρομές. Όταν κάποια ετικέτα περιέχει τη βέλτιστη (συντομότερη, οικονομικότερη ή περιβαλλοντικά φιλική) διαδρομή τότε ο κόμβος μαρκάρεται ως μόνιμος και δεν αλλάζει στο μέλλον. Επί της ουσίας, ο αλγόριθμος υπολογίζει για κάθε κόμβο μονοπάτια ελάχιστου κόστους προς κάθε άλλο κόμβο του γράφου (δικτύου) και επιστρέφει πίνακα με περιεχόμενα αυτές τις διαδρομές για κάθε κόμβο. Πρόκειται, δηλαδή, για έναν επαναληπτικό αλγόριθμο ο οποίος, μετά από k επαναλήψεις, θα έχει επιστρέψει τα μονοπάτια ελάχιστου κόστους για k προορισμούς (Sniedovich, 2006).

Ο ψευδοκώδικας του Dijkstra και η αναλυτικότερη λειτουργία του παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 2.5.1. Η επιλογή του συγκεκριμένου αλγόριθμου στηρίχθηκε σε μία σειρά παραγόντων που τον καθιστούν καταλληλότερο σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγόριθμους επίλυσης του προβλήματος συντομότερης διαδρομής.

Ως πλεονέκτημα του αλγορίθμου θεωρείται, αρχικά, η απλότητά του αλλά και η βεβαιότητα πως, τελικά, θα επιστρέψει το συντομότερο μονοπάτι. Η λογική πάνω

στην οποία στηρίζεται ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι απλή και κατανοητή, ενώ η χρήση του είναι ιδιαίτερα εύκολη.

Στην περίπτωση που επιδιώκεται ο προσδιορισμός του μονοπατιού από έναν κόμβο προέλευσης προς έναν ή περισσότερους κόμβους προορισμούς (one-to-one, one-to-some), ο αλγόριθμος του Dijkstra αποτελεί την καλύτερη επιλογή. Στο i-Mobi Volos το ζεύγος προέλευσης / προορισμού είναι γνωστό και δηλώνεται από το χρήστη ανάλογα με τις προσωπικές του προτιμήσεις. Οπότε πρόκειται για δρομολόγηση από έναν κόμβο προέλευσης προς ένα κόμβο προορισμού (one to one).

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο των αλγορίθμων, ο Dijkstra σταματά την κατασκευή του δένδρου συντομότερων μονοπατιών μόλις ο κόμβος προορισμού προστεθεί σ' αυτό. Έτσι, αν ο κόμβος προορισμού βρίσκεται σχετικά «κοντά» στην προέλευση (μικρό δίκτυο), η υπολογιστική διαδικασία μπορεί να τερματιστεί αμέσως μόλις ο κόμβος προορισμού προστεθεί στο δένδρο συντομότερων μονοπατιών οπότε και εξοικονομείται χρόνος. Στην περίπτωση του i-Mobi Volos το οδικό δίκτυο του Βόλου δεν είναι μεγάλο καθώς πρόκειται για μία πόλη μεσαίου μεγέθους. Εκτός από μικρό και συνεκτικό, το δίκτυο το οποίο μελετάται είναι και κατευθυνόμενο καθώς έχουν ληφθεί υπόψη οι κατευθύνσεις των οδών.

Όλα τα βάρη των ακμών είναι θετικά δεδομένου ότι οι υπό μελέτη μεταβλητές είναι η απόσταση, το κόστος και οι ρύποι NO_x και CO₂, που όλες είναι μεγαλύτερες του μηδενός. Το i-Mobi Volos χρησιμοποιεί στατικά δεδομένα και όχι δυναμικά, παράγοντας που ενδυναμώνει την επιλογή του Dijkstra.

Τέλος, όπως καταδεικνύεται από τις αντίστοιχες καλές πρακτικές άλλων εφαρμογών δρομολόγησης ο Dijkstra αποτελεί μία ευρέως διαδεδομένη επιλογή σε περιπτώσεις στατικών δεδομένων με γνωστά τα σημεία προέλευσης / προορισμού. Οι περισσότερες εφαρμογές δρομολόγησης των οποίων τα δεδομένα και ο τρόπος λειτουργίας τους είναι γνωστός στο κοινό, κυρίως μέσω δημοσιεύσεων σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά χρησιμοποιούν ως αλγόριθμο επίλυσης του προβλήματος συντομότερης διαδρομής, τον Dijkstra.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες οι οποίοι απαριθμούνται συνοπτικά στον πίνακα 3, αιτιολογούν την επιλογή του συγκεκριμένου αλγόριθμου.

Πίνακας 3: Κριτήρια επιλογής Dijkstra για τη δρομολόγηση στο i-Mobi Volos

A/A	Κριτήριο επιλογής
1	Απλότητα
2	Γνωστό το ζεύγος προέλευσης / προορισμού
3	Μικρό, συνεκτικό υπό μελέτη δίκτυο
4	Κατευθυνόμενο δίκτυο
5	Θετικά βάρη ακμών
6	Στατικά δεδομένα
7	Καλές πρακτικές (όμοια χαρακτηριστικά με άλλες εφαρμογές δρομολόγησης)

Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ i-Mobi Volos

Το i-Mobi Volos οργανώνεται σε τρία διακριτά βήματα τα οποία απαιτούνται για τον σχεδιασμό της μετακίνησης.

1ο Βήμα: «Αναχώρηση από – Άφιξη σε»

2ο Βήμα: «Επιλογές μετακίνησης»

3ο Βήμα: «Οι διαδρομές μου»

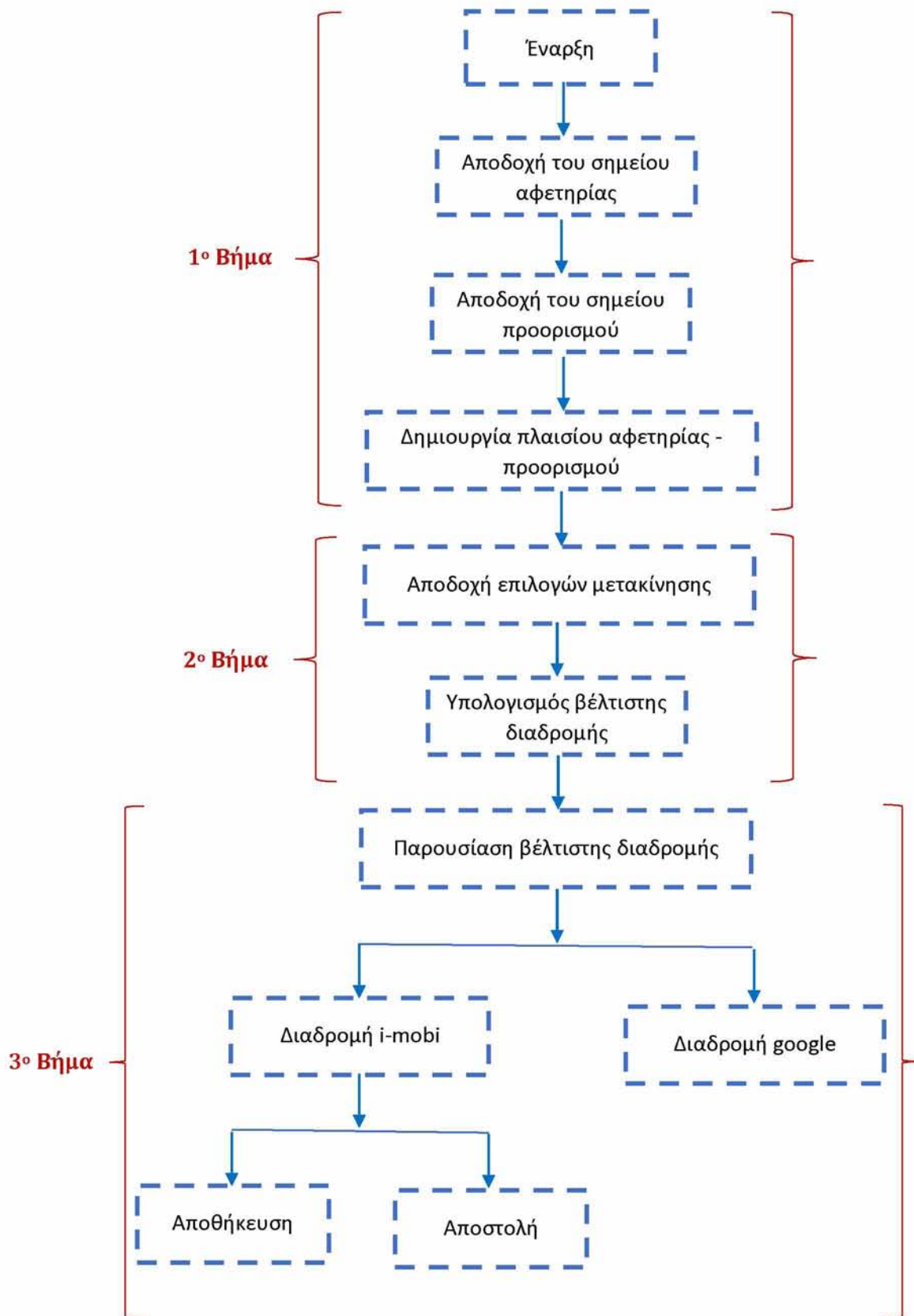
Στο 1ο Βήμα όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 2 ο χρήστης εισέρχεται στην εφαρμογή και εισάγει το σημείο αναχώρησης και το σημείο άφιξης. Με την αποδοχή των σημείων αυτών από το i-Mobi Volos, δημιουργείται ένα πλαίσιο αφετηρίας προορισμού όπου απεικονίζονται τα επιλεχθέντα σημεία, ενώ υπάρχει η δυνατότητα αντιστροφής τους, δηλαδή η μετατροπή του σημείου αφετηρίας σε σημείο άφιξης.

Στο 2ο Βήμα ο χρήστης καθορίζει τις επιλογές μετακίνησής του, δηλαδή τον τρόπο μετακίνησης, το κριτήριο βελτιστοποίησης της διαδρομής και την ημερομηνία και ώρα αναχώρησης. Με την αποδοχή των επιλογών μετακίνησης, το i-Mobi Volos έχει όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την εκκίνηση της διαδικασίας υπολογισμού της βέλτιστης διαδρομής.

Το 3ο βήμα όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα 2 περιλαμβάνει τη διαδικασία της παρουσίασης της βέλτιστης διαδρομής και των χαρακτηριστικών αυτής. Το i-Mobi Volos παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα παρουσίασης της βέλτιστης διαδρομής τόσο βάσει των υπολογισμών της αναπτυσσόμενης εφαρμογής όσο και τη δυνατότητα σύγκρισής της με τις αντίστοιχες βέλτιστες της εφαρμογής Google. Παράλληλα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης της σχεδιαζόμενης διαδρομής του, για τον υπολογισμό δεύτερης διαδρομής εκ νέου καθώς και τη δυνατότητα αποστολής των οδηγιών δρομολόγησης μέσω συστήματος ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mail) στον προσωπικό του λογαριασμό.

Στο ακόλουθο διάγραμμα (διάγραμμα 2) απεικονίζεται σχηματικά η ροή λειτουργιών του i-Mobi Volos.

Διάγραμμα 2: Διάγραμμα ροής των λειτουργιών του i-Mobi Volos

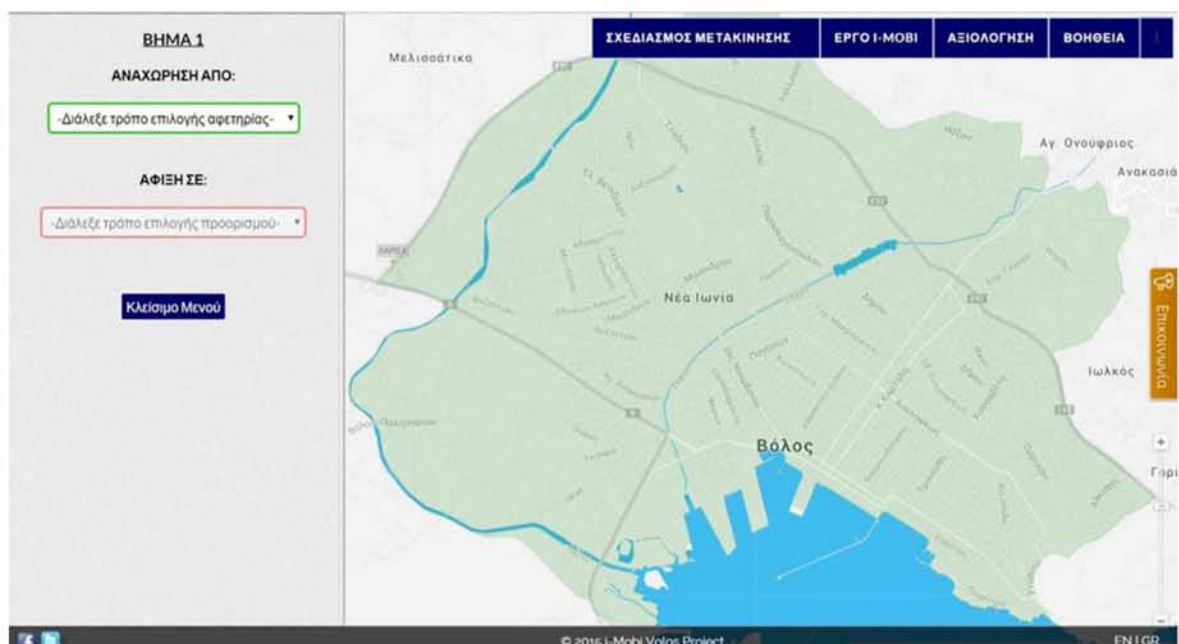


Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

9.1 1ο Βήμα «Αναχώρηση από – Άφιξη σε»

Το i-Mobi Volos είναι σχεδιασμένο χωρίς να απαιτείται προσωποποιημένη χρήση από τον μετακινούμενο. Ο μετακινούμενος μπορεί να χρησιμοποιήσει την εφαρμογή ανώνυμα, ώστε να είναι πιο εύκολη η χρήση της από πολλές κατηγορίες ανθρώπων (μόνιμοι κάτοικοι του Βόλου, τουρίστες, παραθεριστές κ.α.). Αρχικά, η διαδικασία σχεδιασμού της μετακίνησης απαιτεί τον καθορισμό των γενικών στοιχείων αναζήτησης. Στο 1ο βήμα, ο χρήστης καλείται να δηλώσει το σημείο αναχώρησης και το σημείο άφιξης της μετακίνησής του (εικόνα 29). Η επιλογή αυτών των σημείων γίνεται χειροκίνητα μέσω τριών δυνατών επιλογών: 1) επιλογή σημείου ενδιαφέροντος από συγκεκριμένη λίστα, 2) εισαγωγή διεύθυνσης σύμφωνα με τις οδηγίες που δίνονται (εικόνα 30) και 3) δεξί κλικ πάνω στο χάρτη. Σε περιπτώσεις που το σημείο άφιξης που δήλωσε ο χρήστης, είναι σε περιοχή εκτός των ορίων της περιοχής μελέτης της πλατφόρμας, ο χρήστης ενημερώνεται πως «το i-Mobi Volos δεν μπορεί να παρέχει δρομολόγηση έξω από τα όρια της περιοχής μελέτης». Η πρώτη επιλογή της χρήσης σημείων ενδιαφέροντος για τον καθορισμό της αναχώρησης και της άφιξης, παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα της οπτικής παρουσίασης στο υπόβαθρο του i-Mobi Volos όλων των διαθέσιμων σημείων ενδιαφέροντος.

Εικόνα 27: 1^ο βήμα του σχεδιασμού μετακίνησης στο i-Mobi Volos



Πηγή: i-Mobi Volos, 2015

Επιλέγοντας ο χρήστης ένα σημείο ενδιαφέροντος, του παρέχονται πληροφορίες επικοινωνίας με τον αντίστοιχο φορέα καθώς και ο ηλεκτρονικός σύνδεσμος (link) για άμεση επίσκεψη της ιστοσελίδας.

Τα σημεία ταξινομούνται σε 12 κατηγορίες ως εξής:

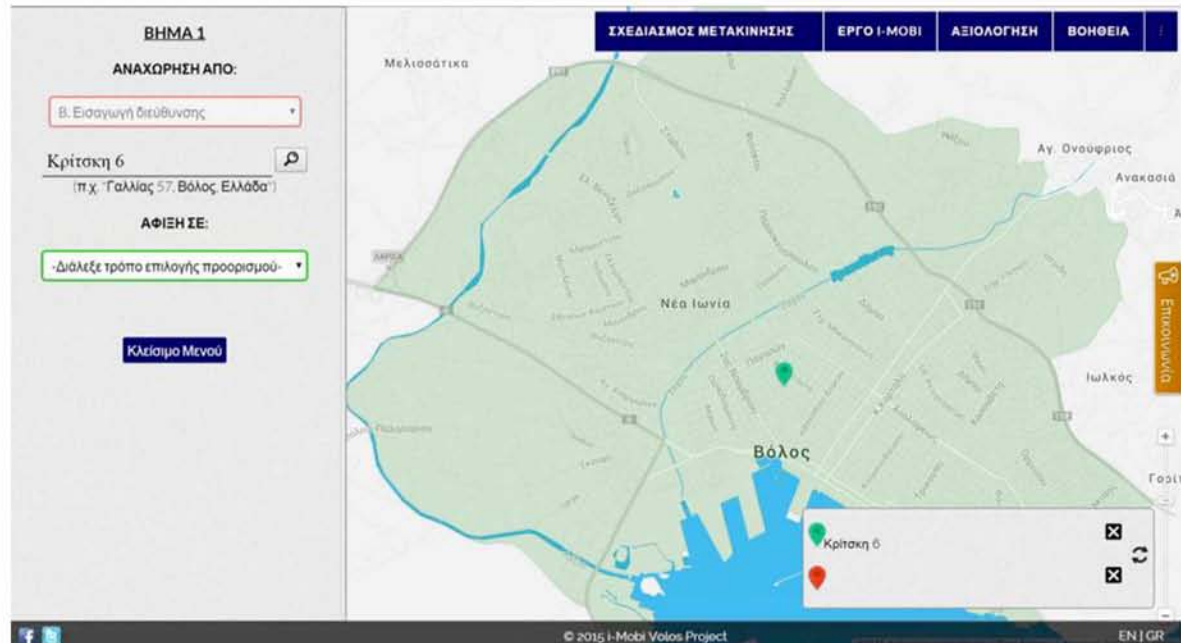
- 1) Αθλητικές εγκαταστάσεις
- 2) Δημοτικές υπηρεσίες
- 3) Εκπαίδευση (με υποκατηγορίες: πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια, τριτοβάθμια και άλλες σχολές)
- 4) Θρησκευτικοί χώροι
- 5) Πολιτιστικοί χώροι
- 6) Ξενοδοχεία
- 7) Στάσεις λεωφορείων (παρουσιάζοντας όλα τα εκτελούμενα δρομολόγια και όλες οι γραμμές λεωφορείων κατ' αντιστοιχία του φορέα 'Αστικό ΚΤΕΛ Βόλου')
- 8) Πιάτσες ταξί
- 9) Τερματικοί σταθμοί
- 10) Ενοικιάσεις αυτοκινήτων
- 11) Χώροι στάθμευσης
- 12) Υγεία – πρόνοια

Τα σημεία ενδιαφέροντος καλύπτουν μεγάλο εύρος κατηγοριών, παρέχοντας πληροφορίες που διευκολύνουν τις μετακινήσεις τόσο των μόνιμων κατοίκων του Βόλου όσο και των τουριστών. Η δυνατότητα αυτή σε συγκερασμό με την λειτουργία του i-Mobi Volos σε δύο γλώσσες (ελληνικά και αγγλικά) αποσκοπούν στην κάλυψη των αναγκών μεγάλης ομάδας χρηστών, χωρίς κοινωνικούς αποκλεισμούς και στην παροχή ισότιμης μεταχείρισης σε όλα τα μέλη του κοινωνικού συνόλου.

Με την εισαγωγή του σημείου αναχώρησης από το χρήστη δημιουργείται ένα πλαίσιο στο κάτω δεξιά μέρος του i-Mobi Volos στο οποίο απεικονίζεται το επιλεγόμενο σημείο και η δυνατότητα αντιστροφής μεταξύ του σημείου αναχώρησης και του σημείου άφιξης (εικόνα 30).

Για την εξοικείωση του χρήστη και για την εύκολη και γρήγορη πλοήγησή του στο χάρτη, το υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε είναι ταυτόσημο με το αντίστοιχο της Google. Η οριοθέτηση της περιοχής μελέτης σκιαγραφείται με πράσινο χρώμα ώστε να υποδηλώνεται ευκρινώς το όριο στο οποίο παρέχεται δρομολόγηση με βάσει τα δεδομένα και τον αλγόριθμο του i-Mobi Volos.

Εικόνα 28: Επιλογή σημείου αναχώρησης στο 1ο βήμα σχεδιασμού της μετακίνησης



Πηγή: i-Mobi Volos, 2015

9.2 2ο Βήμα «Επιλογές μετακίνησης»

Το 2ο βήμα της διαδικασίας σχεδιασμού μετακίνησης στο i-Mobi Volos απαιτεί τον καθορισμό των επιλογών μετακίνησης. Αρχικά, ο χρήστης επιλέγει τον τρόπο μετακίνησης μέσα από τις εξής παρεχόμενες επιλογές:

- ✓ Αυτοκίνητο
- ✓ Μέσα Μαζικής Μεταφοράς
- ✓ Περπάτημα
- ✓ Ποδήλατο
- ✓ Οποιοδήποτε μέσο

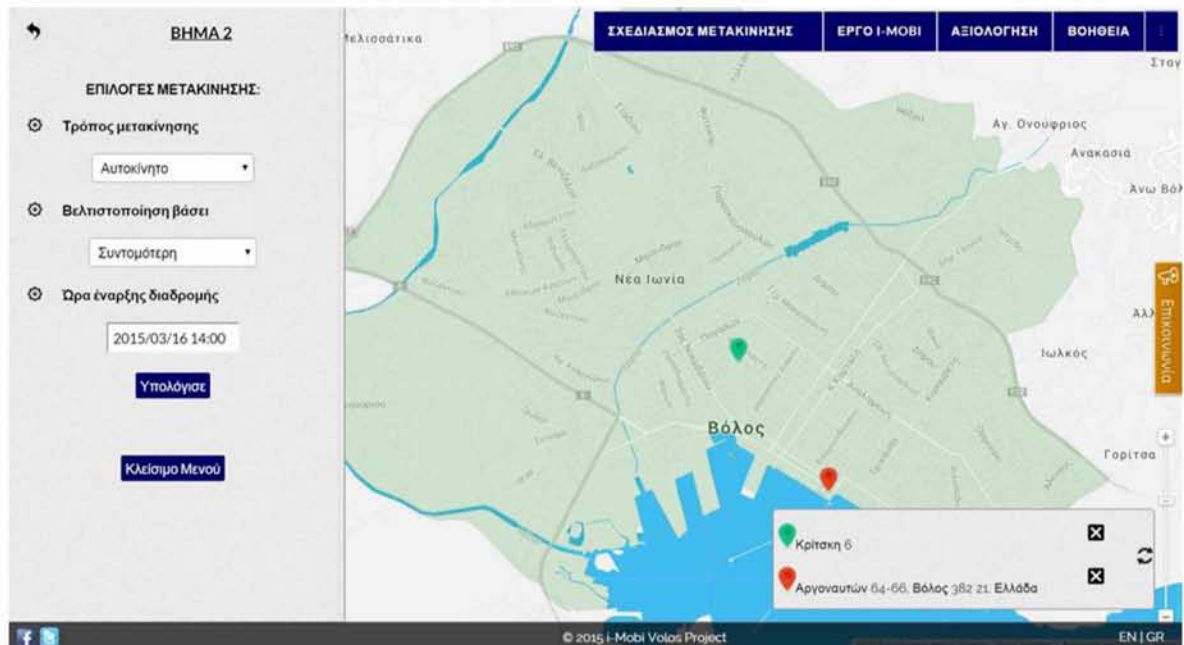
Η τελευταία επιλογή παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής σύμφωνα με το κριτήριο που επιλέγει ακολούθως ανεξαρτήτως του μέσου μετακίνησης. Στη συνέχεια, του 2ου βήματος ο χρήστης καλείται να επιλέξει

το κριτήριο βελτιστοποίησης. Η βέλτιστη διαδρομή που εξάγεται διαμορφώνεται σύμφωνα με τις εξής παραμέτρους:

- ✓ Απόσταση για τη συνολική διαδρομή (εύρεση συντομότερης διαδρομής)
- ✓ Κόστος για τη συνολική διαδρομή (εύρεση οικονομικότερης διαδρομής)
- ✓ Ατμοσφαιρικοί ρύποι που εκπέμπονται ανάλογα με το επιλεγόμενο μέσο για τη συνολική διαδρομή (εύρεση περιβαλλοντικά φιλικότερης διαδρομής με μέσο που εκπέμπει τους λιγότερους ατμοσφαιρικούς ρύπους)

Στο τέλος του 2ου βήματος ο χρήστης δηλώνει την ημερομηνία και την ώρα έναρξης της μετακίνησής του, πατώντας το κουμπί «Υπολόγισε» (εικόνα 31).

Εικόνα 29: 2ο βήμα του σχεδιασμού μετακίνησης στο i-Mobi Volos



Πηγή: i-Mobi Volos, 2015

Πριν την εκτέλεση του αλγόριθμου εύρεσης βέλτιστης διαδρομής, ο χρήστης μπορεί είτε να διορθώσει τις επιλογές μετακίνησης του παρόντος βήματος 2, είτε να ανατρέξει στο προηγούμενο παράθυρο του βήματος 1 μέσω της εντολής που βρίσκεται στο πάνω αριστερά μέρος της πλατφόρμας (εικόνα 31).

Μόλις δοθούν τα απαραίτητα δεδομένα, η πλατφόρμα εκτελεί τον αλγόριθμο Dijkstra που έχει επιλεγεί για την κάλυψη των αναγκών της αναπτυσσόμενης εφαρμογής. Για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής με τη χρήση του αλγόριθμου Dijkstra έχουν κατασκευαστεί 4 βάσεις δεδομένων, μία για κάθε μεταφορικό μέσο (αυτοκίνητο, αστικό λεωφορείο, ποδήλατο και πεζή μετακίνηση). Η κάθε μία από

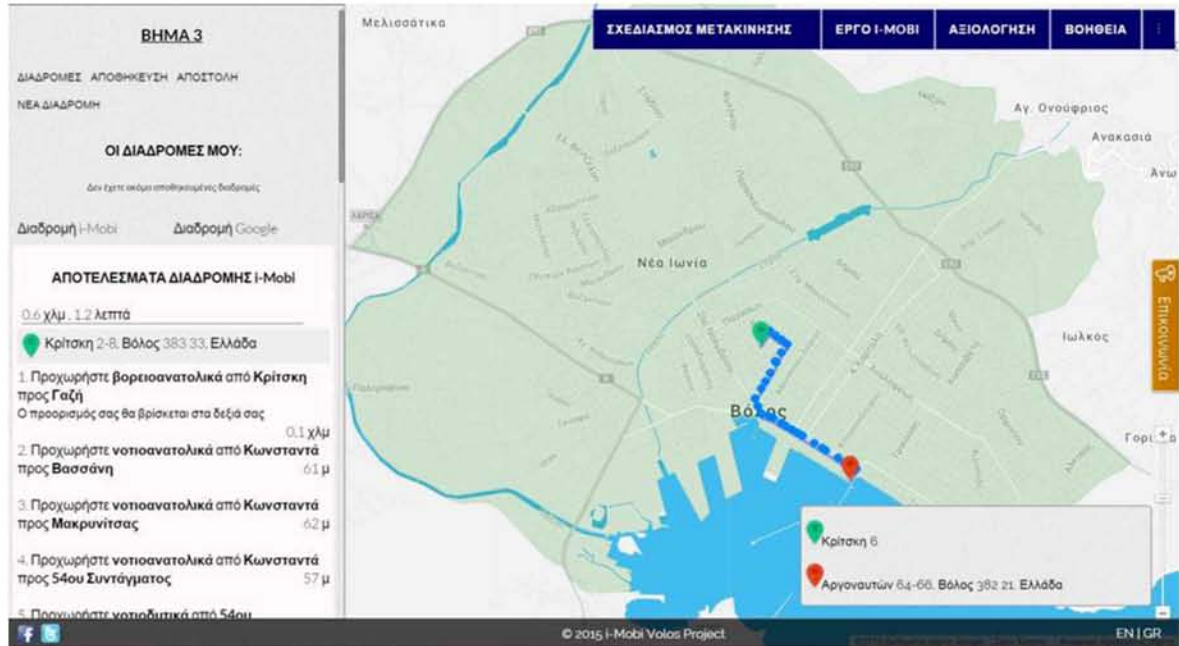
τις βάσεις δεδομένων, περιέχει πληροφορίες που αφορούν την απόσταση, το χρόνο, το κόστος και τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου και διοξειδίου του άνθρακα για κάθε τμήμα του οδικού δικτύου.

9.3 3^ο Βήμα «Οι διαδρομές μου»

Αφού γίνει ο υπολογισμός της βέλτιστης διαδρομής ως προς το κριτήριο που επέλεξε ο χρήστης, στο 3ο βήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αλγόριθμου Dijkstra. Στο υπόβαθρο του i-Mobi Volos απεικονίζεται η προτεινόμενη βέλτιστη διαδρομή, ενώ στο αριστερό πλαίσιο της πλατφόρμας δίνονται αναλυτικές οδηγίες (χρόνος, απόσταση και κατευθύνσεις) στο χρήστη σχετικά με τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει για να φτάσει από το σημείο προέλευσης στο σημείο προορισμού (εικόνα 32). Εκτός από τη διαδρομή που προτείνεται από το i-Mobi Volos, ο χρήστης δύναται να ενημερωθεί για την αντίστοιχη βέλτιστη διαδρομή που προτείνεται από την εφαρμογή της Google. Οι διαδρομές και των δύο εφαρμογών στην πλειοψηφία των περιπτώσεων συγκλίνουν, ενισχύοντας την εγκυρότητα και την αξιοπιστία των παρεχόμενων πληροφοριών.

Αφού ο χρήστης πληροφορηθεί σχετικά με τον τρόπο, χρόνο και απόσταση που απαιτείται για την άφιξη στον προορισμό του, του παρέχεται η δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης της διαδρομής, αποστολής της διαδρομής μέσω συστήματος ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mail) στον προσωπικό του λογαριασμό και σχεδιασμού νέας μετακίνησης από την αρχή. Οι δυνατότητες αυτές παρέχονται μέσα από τις εντολές «ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ», «ΑΠΟΣΤΟΛΗ» και «ΝΕΑ ΔΙΑΔΡΟΜΗ», που βρίσκονται στο πάνω αριστερά μέρος του παραθύρου της πλατφόρμας (εικόνα 32).

Εικόνα 30: 3ο βήμα του σχεδιασμού μετακίνησης στο i-Mobi Volos



Πηγή: i-Mobi Volos, 2015

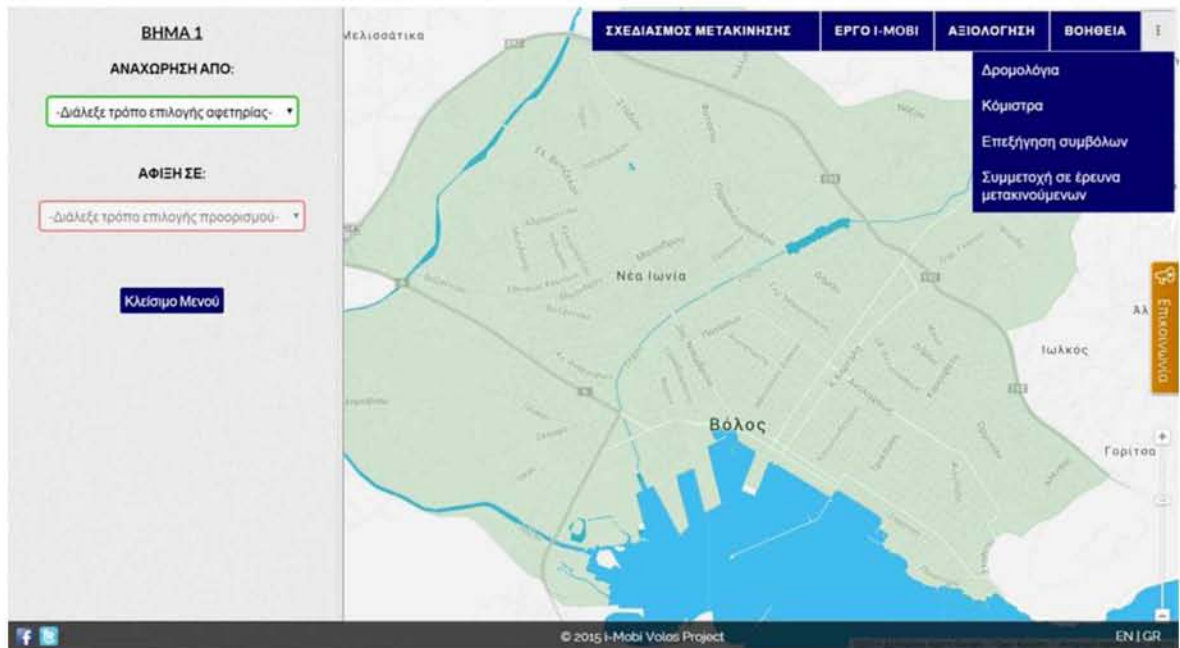
Η εντολή «ΕΡΓΟ I-MOBI» (εικόνα 33) που βρίσκεται αριστερά του «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ» στο κύριο μενού εργαλείων, αποσκοπεί στην πληροφόρηση των χρηστών αναφορικά με την πλατφόρμα πληροφόρησης μετακινούμενων, τους στόχους που τέθηκαν, τα αναμενόμενα αποτελέσματα που θα επιφέρει η λειτουργία της πλατφόρμας, τα πακέτα εργασίας που υλοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της καθώς και τις ηλεκτρονικές σελίδες κοινωνικής δικτύωσης των χρηστών. Η τελευταία δυνατότητα της κοινωνικής δικτύωσης μέσω της σελίδας «Facebook» και «Twitter» παρέχεται επίσης και από τις εντολές που υπάρχουν στο κάτω αριστερά μέρος του i-Mobi Volos (εικόνα 33).

Προκειμένου να διευκολυνθεί η πλοήγηση του χρήστη στο i-Mobi Volos η εντολή «ΒΟΗΘΕΙΑ» (εικόνα 33) παρέχει υποστηρικτικές υπηρεσίες χρήσης της πλατφόρμας, ενώ μέσω της εντολής «Επεξήγηση συμβόλων», αποσαφηνίζεται η ερμηνεία όλων των συμβόλων και των χαρακτήρων που χρησιμοποιούνται στο i-Mobi Volos, ώστε το τελευταίο να είναι όσο το δυνατό εύχρηστο και προσβάσιμο από όλες τις κατηγορίες χρηστών.

Οι εντολές «ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΑ» και «ΚΟΜΙΣΤΡΑ» λειτουργούν υποστηρικτικά ως προς τον κύριο σκοπό του σχεδιασμού μετακίνησης, ενημερώνοντας τους χρήστες για τα διαθέσιμα δρομολόγια όλων των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς (Αστικό ΚΤΕΛ

Βόλου, ΟΣΕ, Υπεραστικό ΚΤΕΛ Βόλου και θαλάσσιες μεταφορές) και για τα κόμιστρα που καταβάλλονται στη χρήση των αστικών λεωφορείων.

Εικόνα 31: Επιπρόσθετες εντολές στο κύριο μενού εντολών



Πηγή: i-Mobi Volos, 2015

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑΣ i-Mobi Volos

Οι γλώσσες προγραμματισμού οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του i-Mobi Volos είναι η Python, η PHP και η Javascript. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης που επιλέχθηκε, δηλαδή ο Dijkstra υλοποιήθηκε σε Python για λόγους απόδοσης της πλατφόρμας. Για να μπορέσει να φτάσει η πληροφορία στο χρήστη δημιουργήθηκε ένα κανάλι διπλής κατεύθυνσης για την επικοινωνία μεταξύ πελάτη (client), διακομιστή (server) και των αποτελεσμάτων από το «τρέξιμο» του αλγόριθμου (διάγραμμα 3).

Διάγραμμα 3: Κανάλι επικοινωνίας μεταξύ πελάτη, διακομιστή και αποτελεσμάτων αλγόριθμου



Πηγή: Ιδία Επεξεργασία

Ο τρόπος που λειτουργεί αυτό το κανάλι επικοινωνίας και κατ' επέκταση το i-Mobi Volos είναι ο εξής: Μέσω jQuery AJAX call² καλείται ένα αρχείο PHP στο οποίο δηλώνονται ως παράμετροι τα χαρακτηριστικά μετακίνησης του χρήστη (σημείο αναχώρησης και άφιξης, τρόπος μετακίνησης και κριτήριο βελτιστοποίησης), ενώ παράλληλα διενεργείται μία σειρά ελέγχων για την ορθότητα των στοιχείων. Η PHP με τη σειρά της «καλεί» το Python αρχείο στο οποίο είναι υλοποιημένος ο αλγόριθμος Dijkstra, περνώντας τις παραμέτρους του χρήστη στον αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος παίρνει τις παραμέτρους και αναλόγως με τις επιλογές του χρήστη χρησιμοποιεί το κατάλληλο δίκτυο και υπολογίζει την ακολουθία των σημείων, η οποία και αποτελεί τη βέλτιστη διαδρομή για το χρήστη. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία, η Python επιστρέφει την ακολουθία σημείων πίσω στην PHP, η οποία με τη σειρά της την επιστρέφει σε μορφή πίνακα πίσω στη Javascript στην πλευρά του πελάτη, ώστε να επιτραπούν στη συνέχεια τα κατάλληλα αιτήματα δρομολόγησης στη Google χρησιμοποιώντας ως ενδιάμεσα σημεία (waypoints), την ακολουθία σημείων που επέστρεψε ο Dijkstra (Schaffer, 2005).

² Η AJAX είναι μια ομάδα αλληλένδετων μεθόδων ανάπτυξης ιστοσελίδων, που χρησιμοποιούνται στην πλευρά του πελάτη, με σκοπό τη δημιουργία ασύγχρονων web εφαρμογών. Με την AJAX, οι web εφαρμογές μπορούν να στείλουν και να ανακτήσουν δεδομένα από ένα server ασύγχρονα (στο παρασκήνιο).

Όλα τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του i-Mobi Volos ήταν σε μορφή QML και MySQL. Αρχικά, το δίκτυο της περιοχής μελέτης προσομοιώθηκε στο λογισμικό πακέτο για συγκοινωνιολόγους μηχανικούς VISUM (PTV VISUM, 2015). Τα τμήματα (links) και οι κόμβοι (nodes) που σχηματίζουν το οδικό δίκτυο του Πολεοδομικού Συγκροτήματος Βόλου, εισήχθησαν σε ειδικά διαμορφωμένη βάση δεδομένων, συνοδευόμενα από τις συντεταγμένες τους στο γεωδαιτικό σύστημα WGS84, ώστε να είναι εφικτή η εισαγωγή τους στο υπόβαθρο της Google. Όλα τα επιπρόσθετα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του i-Mobi Volos (όπως σημεία ενδιαφέροντος, στάσεις λεωφορείου κ.α.) εισήχθησαν με τη μορφή σημείων, συνοδευόμενων πάντα από τις συντεταγμένες τους στο γεωδαιτικό σύστημα WGS84. Για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής ως προς τα κριτήρια α) συντομότερη, β) οικονομικότερη και γ) περιβαλλοντικά φιλική, δημιουργήθηκαν στο λογισμικό πακέτο Microsoft Office Excel, 4 βάσεις δεδομένων μία για κάθε μέσο (αυτοκίνητο, αστικό λεωφορείο, ποδήλατο και πεζή μετακίνηση). Η κάθε βάση περιείχε πληροφορίες σχετικά με την απόσταση (μέτρα) και το χρόνο (λεπτά) που απαιτούνται για την μετάβαση μεταξύ όλων των κόμβων που συγκροτούν το οδικό δίκτυο της περιοχής μελέτης, το κόστος μεταφοράς (ευρώ) και τις εκπομπές NO_x και CO₂. Για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Dijkstra, ο οποίος είναι ο πιο διαδεδομένος για την επίλυση προβλημάτων εύρεσης συντομότερης διαδρομής (shortest path problem) σε κατευθυνόμενο δίκτυο με μη αρνητικά κόστη στις ακμές (Nha, 2012).

Το i-Mobi Volos φιλοξενείται στην ιστοσελίδα: <http://www.imobivolos.uth.gr/> και είναι διαθέσιμο σε δύο γλώσσες, ελληνικά και αγγλικά. Ύστερα από αίτηση στον φορέα διαχείρισης του Κέντρου Δικτύου Τηλεματικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με την ονομασία 'webmaster', αποδόθηκε ο κατάλληλος χώρος στο server του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, ο οποίος φιλοξενεί το i-Mobi Volos.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ i-Mobi Volos ΚΑΙ ΕΠΟΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση του i-Mobi Volos, διενεργήθηκε δοκιμαστική λειτουργία, ώστε να εντοπιστούν τυχόν προβλήματα και αδυναμίες και να υλοποιηθούν διορθωτικές ενέργειες για την αποκατάστασή τους.

Αρχικά, δοκιμαστική λειτουργία του i-Mobi Volos διενεργήθηκε μεταξύ της ομάδας ανάπτυξης της πλατφόρμας, ώστε να εντοπιστούν τα κρισιμότερα προβλήματα στην ομαλή λειτουργία της. Σε δεύτερο επίπεδο, πιλοτική εφαρμογή έγινε σε τυχαίο δείγμα χρηστών, οι οποίοι δεν ήταν γνώστες της χρήσης της πλατφόρμας, ώστε να διαπιστωθεί αν το i-Mobi Volos είναι φιλικό προς το χρήστη, αν απαντώνται δυσκολίες κατά τη χρήση του και αν εντοπίζονται προβλήματα στην εύρεση της βέλτιστης διαδρομής, στην αποδοτικότητα του αλγόριθμου, στον απαιτούμενο χρόνο για τον υπολογισμό της βέλτιστης διαδρομής και στην ορθή παρουσίαση των οδηγιών τόσο στην οπτική αναπαράστασή τους στο υπόβαθρο του i-Mobi Volos όσο και στη μορφή πλαισίου κειμένου διαλόγου.

Οποιαδήποτε προβλήματα εντοπίστηκαν κατά την πιλοτική λειτουργία του i-Mobi Volos αποτέλεσαν την ανατροφοδότηση (feedback) για την βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας της πλατφόρμας.

Στο πλαίσιο της περαιτέρω ανάπτυξης του i-Mobi Volos, τίθεται σαν στόχος η δυνατότητα παροχής υπηρεσιών εύρεσης βέλτιστης διαδρομής για συνδυασμένη μετακίνηση. Σκοπός αυτής της επιλογής θα είναι η παροχή βέλτιστης λύσης μετακίνησης με συνδυασμό οχήματος ιδιωτικής χρήσης και Μέσων Μαζικής Μεταφοράς. Η υπηρεσία θα αφορά μετακινήσεις με αφετηρία περιοχές εκτός του Πολεοδομικού Συγκροτήματος Βόλου και προορισμό κεντρικές περιοχές της πόλης. Οι λύσεις θα αφορούν σε μετακίνηση με αυτοκίνητο μέχρι κάποιο τερματικό σταθμό όπου υπάρχει χώρος για στάθμευση και συνέχιση σε επιβαρυμένες κυκλοφοριακά περιοχές με χρήση Μέσων Μαζικής Μεταφοράς ή περπάτημα.

Τέλος, σαν μακροπρόθεσμος στόχος ορίζεται η παροχή ενημέρωσης των χρηστών για τις κυκλοφοριακές συνθήκες σε πραγματικό χρόνο, η οποία προϋποθέτει την εγκατάσταση εξοπλισμού προηγμένης τεχνολογίας, η οποία θα καταγράφει τις κυκλοφοριακές συνθήκες (φόρτοι, ταχύτητες) και με την εφαρμογή έξυπνων

αλγορίθμων θα υπολογίζει το χρόνο διαδρομής μεταξύ οποιωνδήποτε σημείων του δικτύου, ορίσει ο χρήστης. Με τη σύνδεση του i-Mobi Volos με τα συστήματα αυτά, θα ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα της πλατφόρμας και θα επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία στις παρεχόμενες οδηγίες προς τους χρήστες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μοντελοποίηση και η αναπαράσταση των συγκοινωνιακών δικτύων στηρίζεται στη θεωρία των γράφων, σύμφωνα με την οποία ένα δίκτυο είναι ένα πεπερασμένο σύνολο κόμβων και ακμών και κάθε ακμή χαρακτηρίζεται από μία ετικέτα βάρους, η μεταβλητή της οποίας εξαρτάται από το εκάστοτε εξεταζόμενο πρόβλημα.

Για την επίλυση των βασικότερων προβλημάτων της θεωρίας δικτύων (προβλήματα συντομότερης διαδρομής, προβλήματα πλανόδιου πωλητή, προβλήματα δρομολόγησης στόλου οχημάτων) έχει αναπτυχθεί πληθώρα αλγορίθμων, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται σε τρεις διακριτές ομάδες: 1) ακριβείς αλγόριθμοι, 2) ευρετικοί αλγόριθμοι και 3) μεθευρετικοί αλγόριθμοι.

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης διαδρομών σε εφαρμογές δρομολόγησης – route planners, αποτελούν στην ουσία περιπτώσεις επίλυσης προβλημάτων εύρεσης συντομότερης διαδρομής. Οι πιο γνωστοί αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής και μελετήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι ο Dijkstra, ο Bellman Ford, ο Floyd Warsall και ο A*.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη της πλατφόρμας πληροφόρησης μετακινούμενων i-Mobi Volos, ήταν η μελέτη, διερεύνηση και συλλογή καλών πρακτικών άλλων εφαρμογών δρομολόγησης (state -of-the- art) με συναφείς λειτουργίες. Οι υπό μελέτη εφαρμογές δρομολόγησης κατηγοριοποιούνται σε δύο ομάδες: α) σε αυτές που υπάρχει γνώση της λειτουργικής τους δομής και των δεδομένων που χρησιμοποιούν και β) σε αυτές που ενώ είναι ευρέως διαδεδομένες και χρησιμοποιούνται συστηματικά από πολλούς χρήστες, δεν υπάρχει γνώση της λειτουργικής τους δομής, με τους αλγορίθμους και τα επί μέρους δεδομένα να αποτελούν εμπιστευτικά στοιχεία, μη δημοσιοποιήσιμα.

Οι βασικές αρχές του συστήματος του i-Mobi Volos αφορούν α) τις υπηρεσίες πληροφόρησης μετακινούμενων, β) την εισαγωγή χαρακτηριστικών μετακίνησης, γ) υπηρεσίες εύρεσης βέλτιστης διαδρομής και δ) έρευνα αναγκών μετακίνησης και αξιολόγησης της εφαρμογής δρομολόγησης. Για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής αναπτύχθηκαν τρία μοντέλα ανταποκρινόμενα στα κριτήρια βελτιστοποίησης που παρέχονται: 1) μοντέλο εκτίμησης συντομότερης διαδρομής, 2) μοντέλο εκτίμησης κόστους διαδρομής και 3) μοντέλο εκτίμησης

περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ο αλγόριθμος που τελικά επιλέχθηκε είναι ο Dijkstra, λόγω μιας σειράς παραμέτρων (απλότητα, γνωστό ζεύγος προέλευσης / προορισμού, μικρό – συνεκτικό κατευθυνόμενο υπό μελέτη δίκτυο, θετικά βάρη ακμών, στατικά δεδομένα, καλές πρακτικές).

Εν κατακλείδι, η επιλογή ενός αλγορίθμου, αλλά και του εκάστοτε μοντέλου που αναπτύσσεται εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και του προβλήματος που εξετάζεται. Όπως διερευνήθηκε από αντίστοιχες πρακτικές, υπάρχει πληθώρα εφαρμογών δρομολόγησης κάθε μια από τις οποίες βελτιστοποιεί διαφορετικό κριτήριο και απευθύνεται σε χρήστες διαφορετικών μέσων μεταφοράς.

Αυτό που χρήζει αναφοράς είναι, πως τόσο η μοντελοποίηση όσο και η διαδικασία εύρεσης βέλτιστης διαδρομής για τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς, είναι διαφορετική σε σχέση με τα άλλα μεταφορικά μέσα, δεδομένης της πολυπλοκότητας του δικτύου και της εξυπηρέτησης μιας διαδρομής από διαφορετικές λεωφορειακές γραμμές.

Συνοψίζοντας, παρατηρείται πως οι εφαρμογές δρομολόγησης και τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε αυτές, είναι ένας τομέας που εξελίσσεται συνεχώς, ανταποκρινόμενος στις τεχνολογικές εξελίξεις και στις μεταβαλλόμενες ανάγκες των χρηστών. Η ανάπτυξη και η κατασκευή εφαρμογών δρομολόγησης θα πρέπει να στηρίζεται σε ανθρωποκεντρικές προσεγγίσεις, καθώς κύριος στόχος είναι η βελτίωση των μετακινήσεων των πολιτών και της ποιότητας ζωής τους στον αστικό ιστό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alexanderson, G. L. (2006) 'About the cover: Euler and Königsberg's Bridges: A historical view' *Bulletin of the American Mathematical Society*, (43) 567-573
- AlShawi, I.S., Yan, L., Pan, W. and Luo, B. (2012) 'Lifetime Enhancement in Wireless Sensor Networks Using Fuzzy Approach and A-Star Algorithm' *IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers*, (12) 3010-3018
- Applegate, D. L., Bixby, R. E., Chvátal, V., & Cook, W. J. (2007) *The traveling salesman problem: A computational study*, Princeton, NJ: Princeton University Press
- Bast, H., Delling, D., and Werneck, R. (2014) *Route Planning in Transportation Networks*, Redmond, Washington: Microsoft Research, Microsoft Corporation
- Bureau of Public Roads (1964) *Traffic assignment manual*, U.S. Department of Commerce, Urban Planning Division, Washington, DC
- Caric, T. and Gold, H. (2008) *Vehicle Routing Problem*, Austria: In-Teh
- Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R. and Stein, C. (2001) *Introduction to Algorithms*, The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology
- Ferris, B., Watkins, K., Borning, A. (2009) 'OneBusAway: A Transit Traveller Information System' *Proceedings of Mobicase*, California: San Diego
- Google Maps [διαδίκτυο (online)]. Διαθέσιμο στο: <URL: <http://www.googlemaps.com>> [πρόσβαση 11 Ιουλίου 2015]
- Google Transit [διαδίκτυο (online)]. Διαθέσιμο στο: <URL: <http://maps.google.com/landing/transit/index.html/>> [Πρόσβαση 23 Ιουνίου 2015]
- Gooze, A. (2013) 'Benefits of Real-Time Transit Information and the Impacts of Data Accuracy on the Rider Experience' *92th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 1-17
- Harary F. (1969) *Graph Theory*, Philippines: Addison – Wesley Publishing Company
- i-Mobi Volos (2015) [διαδίκτυο (online)]. Διαθέσιμο στο: <URL: <http://www.imobivolos.uth.gr/>> [Πρόσβαση 9 Ιουλίου 2015]

- Ingole, P. and Nichat, M. (2013) 'Landmark based shortest path detection by using Dijkstra Algorithm and Haversine Formula' *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, (3) 162-165
- European Commission, Directorate-General Mobility and Transport (2011) 'Study Towards a European Multi-Modal Journey Planner. D6 – Final report, ITS Action Plan, Framework Service Contract TREN/G4/FV-2008/475/01'. Διαθέσιμο στο: <URL: http://ec.europa.eu/transport/themes/its/studies/doc/2011_09-multimodal-journey-planner.pdf > [Πρόσβαση 20 Ιανουαρίου 2015]
- Jahn, O., Mohring, R. H., Schulz, A. S. and Stier-Moses, N. E. (2005) 'System-Optimal Routing of Traffic Flows with User Constraints in Networks with Congestion' *Operations Research* (53), 4, 600-616
- Jensen, J. B. and Gutin, G. (2009) *Diagraphs: Theory, Algorithms and Applications*, Second Edition, London: Springer
- Kameda, H., Li, J. and Altman, E. (2011) 'Optimal Routing for Multiclass Networks, *Advances in Operations Research*, (2011) 1-21
- Kolomvos, G., Saharidis, G.K.D., Golias, M.M. (2014) 'Improvements in the exact solution method for the traveling salesman problem' *93th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 1-10
- Karoonsoontawong, A. (2015) 'Modified Efficient Insertion Heuristics for Multi-Trip Vehicle Routing Problem with Time Windows and Shift Time Limits' *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 1-30
- Lerner, J., Wagner, D. and Zweig, K. (2009) *Algorithms of Large and Complex Networks, Design, Analysis, and Simulation*, Germany, Berlin: Springer
- Lopez, C. L. and Saffidine, A. (2015) 'A Preliminary Selection of Problems in Heuristic Search' *Proceedings of the Eighth International Symposium on Combinatorial Search*, 186-190
- Lowe, M.D. (1988) 'Bicycling into the future' *World Watch Magazine*, vol. 1 (4) 426-435

- Makone, A. (2012) 'Application for Marketing Executives Implementing Dijkstra's Shortest Path Algorithm in Android Device' *Proceedings of International Conference on Computer Science, Information and Technology*, 5-8
- Medhi, D. and Ramasamy, K. (2007) *Network Routing: Algorithms, Protocols and Architectures*, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers (an imprint of Elsevier)
- Mitrovich, S. (2003) *Environment, Energy and Transport*, Portal Written Material, EU-funded Urban Transport Research Project Results
- Neis, P. and Zipf, A. (2007) 'A Web Accessibility Analysis Service based on the OpenLS Route Service', *International Conference on Geographic Information Science of the Association of Geographic Information Laboratories for Europe (AGILE)*, Denmark: Aalborg.
- Mertsching, B., Hund, M. and Aziz, Z. (2009) 'KI 2009: Advances in Artificial Intelligence', *32nd Annual German Conference on AI Paderborn*, Germany: Springer
- Nha, V. T. N., Djahel, S. and Murphy, J. (2012) 'A Comparative Study of Vehicles' Routing Algorithms for Route Planning in Smart Cities' *IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers*. Διαθέσιμο στο: <URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=639870> > [Πρόσβαση 20 Ιανουαρίου 2015]
- O'Sullivan D., Morrison A., Shearer J. (2000) 'Using desktop GIS for the investigation of accessibility by public transport: an isochrone approach' *International Journal Geographical Information Science*, (14) 85-104
- OpenRouteService.org [διαδίκτυο (online)]. Διαθέσιμο στο: <URL: <http://www.openrouteservice.org/contact.html#top>> [πρόσβαση 15 Ιουλίου 2015]
- Ortuzar, J. and Willumsen, L. (2011) *Modelling Transport 4th Edition*, United Kingdom: Wiley
- Peng, Z-R., Huang, R. (2000) 'Design and development of interactive trip planning for web-based transit information systems' *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, (8) 409-425

Pepping, W. (2009) 'The Shortest Route, Developing an online bicycle route planner for the Netherlands'. Master Thesis. Faculty of Business Mathematics & Informatics, VU University Amsterdam.

PTV VISUM [διαδίκτυο (online)]. Διαθέσιμο στο: <URL: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-visum/>> [πρόσβαση 15 Ιανουαρίου 2015]

Prasanna, C. and Yasasvi, K. (2010) *Secure Routing Protocols for Wireless AdHoc Networks* [διαδίκτυο (online)]. International Journal & Magazine of Engineering, Technology, Management and Research. Διαθέσιμο στο: <URL: <http://www.yuvaengineers.com/?p=699>> [Πρόσβαση 17 Ιουνίου 2015]

Schafer, S. (2005) *Web Standards Programmer's Reference: HTML, CSS, JavaScript, Perl, Python, and PHP*, 1st Edition, Indiana: Wiley Publishing

Sniedovich, M. (2006) 'Dijkstra's algorithm revisited: the dynamic programming connection' *Control and Cybernetics*, (35) 600-620

Transportation in Athens [διαδίκτυο (online)]. Διαθέσιμο στο: <URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=andr.AthensTransportation>> [πρόσβαση 2 Ιουλίου 2015]

Qureshi, M. F., Shad, S. M., Ismail, C. and Al-Matroushi, C. (2013) 'A comparative analysis of multi-criteria road network' *European Journal of Computer Science and Information Technology*, (2) 27-47

Rainsford, D. and Mackaness, W. (2002) 'Mobile Journey Planning for Bus Passengers' *Proceedings of second International Conference, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 228-242

Sedgewick, R. and Wayne, K. (2014) *Algorithms, 4th Edition*, United Kingdom: Pearson

Shivani, Jaswinder, S. (2013) 'Route Planning on Vanet by Comparative Study of Algorithms' *International Journal of advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, (3) 682-689

- Su, J., Winters, M., Melissa, N. and Brauer, M. (2010) 'Designing a route planner to facilitate and promote cycling in Metro Vancouver, Canada' *Transportation Research Part A, Elsevier*, (44) 495–505
- Taha, H. A. (1997) *Operations Research: An Introduction*, New Jersey: Prentice Hall
- Tewari, A. (2014) *Different Routing Algorithm for computer Networks* [διαδίκτυο (online)]. Kaav International Journal of Science, Engineering & Technology. Διαθέσιμο στο: <URL: <http://www.kaavpublications.org/journals/journal-3/article/article-13.pdf>> [Πρόσβαση 23 Ιουνίου 2015]
- Tom Tom [διαδίκτυο (online)]. Διαθέσιμο στο: <URL: <http://routes.tomtom.com/>> [Πρόσβαση 15 Ιουνίου 2015]
- Transit IDEA Program, (2011) 'Google Transit Data Tool for Small Transit Agencies' *Transportation Research Board of the National Academies* Διαθέσιμο στο: <URL: http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/IDEA/FinalReports/Transit/Transit58_Final_Report.pdf> [Πρόσβαση 27 Ιουλίου 2015]
- Transportation Association of Canada, (1999) *Geometric Design Guide for Canadian Roads*, Part 2, Ottawa, Ontario.
- Via Michelin [διαδίκτυο (online)]. Διαθέσιμο στο: <URL: <http://www.viamichelin.com/>> [Πρόσβαση 15 Ιουνίου 2015]
- Khafa, F. and Abraham, A. (2008) *Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications*, Studies in Computational Intelligence, Berlin: Springer - Verlag Berlin Heidelberg
- Zeng, W., Miwa, T. and Morikawa, T. (2015) 'Finding a Reliable Shortest Path for Risk-averse Navigation Based on Historical Probe Vehicle', *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 1-14
- Βούρος, Γ. (2002) *Διακριτά Μαθηματικά*, Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
- Κούγκολος, Α. (2007) *Εισαγωγή στην Περιβαλλοντική Μηχανική*, Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα
- Κούρτης, Β. (2012) 'Mobile Client για τη βέλτιστη χρήση των Αστικών Συγκοινωνιών στην περιοχή της Αθήνας'. Διπλωματική εργασία. Τομέας

Τεχνολογίας Πληροφορικής και Υπολογιστών, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κωνσταντόπουλος, Π. (2008) *Γραφήματα*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου