



ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ
ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΤΑΞΙ**

Σπουδάστρια:

Αλεξάνδρα Κοτοπούλη

Επιβλέπων:

Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας τη φοιτητική μου πορεία καθώς και τη διπλωματική μου εργασία, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν σημαντικά και στα δύο.

Έτσι, αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου, του οποίου η συμβολή ήταν καθοριστική για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Αφενός, μου προσέφερε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα, και αφετέρου, ο χρόνος που αφιέρωσε, οι συμβουλές, καθώς και οι ιδέες του ήταν μέγιστης σημασίας κατά τη διάρκεια υλοποίησης της εργασίας.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω και τους κ. Κωνσταντίνο Αντωνίου, αναπληρωτή καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, όπως και τον κ. Νικόλαο Λαγαρό, επίκουρο καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, ως μέλη της τριμελούς επιτροπής.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στους φίλους μου Γιώργο Κολοβό, πολιτικό μηχανικό, και Δημήτρη Σβορώνο, τοπογράφο μηχανικό, τόσο για την ουσιαστική συμπαράσταση κατά τη διάρκεια της εργασίας, όσο και για τις πρακτικές συμβουλές και υποδείξεις τους.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ την οικογένειά μου και όλους μου τους φίλους, οι οποίοι συνετέλεσαν εν αγνοία τους, με τη συμπαράσταση και την υπομονή τους, στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά και των σπουδών μου γενικότερα.

Αλεξάνδρα Κοτοπούλη

Ιούλιος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη ενός προτύπου βέλτιστης χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών ταξί. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, αναπτύσσεται μία επέκταση ενός μοντέλου χωροθέτησης, του Προβλήματος Σταθερού Κόστους, χάρη στο οποίο καθορίζεται ο βέλτιστος αριθμός και οι θέσεις των εγκαταστάσεων, ενώ εφαρμόζεται ένας γενετικός αλγόριθμος για την επίλυση του μοντέλου χωροθέτησης. Πραγματοποιείται εφαρμογή σε περιοχή της Αττικής που επιλέχθηκε. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για το πρόβλημα χωροθέτησης που μελετήθηκε, επαρκεί ένας μικρός αριθμός εγκαταστάσεων (16 σταθμοί), σε σύγκριση με την αρχική υπόθεση των 39 υποψήφιων σταθμών φόρτισης.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλεκτρικά ταξί, Σταθμοί Φόρτισης, Πρόβλημα Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων, Βελτιστοποίηση, Πρόβλημα Σταθερού Κόστους, Γενετικοί Αλγόριθμοι

ABSTRACT

This diploma thesis aims to develop a facility location model for the charging of electric taxis in Attica. For this purpose, an extension of a basic location model (“Fixed Charge Location Problem”) is developed, in order to determine the optimal number and locations of facilities, while a genetic algorithm is applied to address the location problem. The application was conducted in a selected area in Attica. The results suggest that for the location problem studied, a small number of facilities is sufficient (16 stations), in contrast to the initial estimate of 39 potential charging stations.

KeyWords: Electric Taxis, Charging Stations, Facility Location Problem, Optimization, Fixed Charge Location Problem, Genetic Algorithms

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Ηλεκτρικά Ταξί.....	4
1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	6
1.4 Η Περίπτωση της Ελλάδας.....	9
1.5 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.....	10
1.6 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ.....	13
2.1 Το Πρόβλημα της Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων (Facility Location Problem)	13
2.2 Μεθοδολογικό Πλαίσιο.....	14
2.3 Κριτήρια Χωροθέτησης Σταθμών Φόρτισης.....	15
3.1 Βασικά Μοντέλα Χωροθέτησης.....	20
3.1.1 Μοντέλα Μέγιστης Απόστασης (Maximum Distance Models).....	20
3.1.2 Μοντέλα Συνολικής ή Μέσης Απόστασης (Total or Average Distance Models).....	29
3.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μοντέλων Χωροθέτησης Σταθμών Φόρτισης....	36
3.3 Συμπεράσματα Ανασκόπησης.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	41
4.1 Διαμόρφωση του Προβλήματος Σταθερού Κόστους (Fixed Charge Location Problem - FCLP).....	41
4.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	44
4.2.1 Η Έννοια του Γενετικού Αλγορίθμου.....	44
4.2.2 Πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων.....	52
4.2.3 Λόγοι Επιλογής των Γενετικών Αλγορίθμων ως Τεχνική Επίλυσης του Προβλήματος Χωροθέτησης.....	54
4.3 Επίλυση των Γενετικών Αλγορίθμων – Λογισμικό Evolver.....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	63
5.1 Δεδομένα Προβλήματος.....	63
5.2 Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου.....	66

5.3 Αποτελέσματα Γενετικού Αλγορίθμου	67
5.4 Ανάλυση Ευαισθησίας	78
5.5 Σύνοψη Αποτελεσμάτων	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ	
ΕΡΕΥΝΑ	85
6.1 Σύνοψη Εργασίας	85
6.2 Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου	86
6.3 Ανάλυση Ευαισθησίας Γενετικού Αλγορίθμου	86
6.4 Σύγκλιση Γενετικού Αλγορίθμου.....	87
6.5 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, το οποίο αποτελεί το εισαγωγικό κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των ηλεκτρικών οχημάτων και κατ' επέκταση των ηλεκτρικών ταξί, τα οποία αποτελούν το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, διατυπώνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων, ενώ επίσης μελετάται η αναγκαιότητα της χρήσης και λειτουργίας τους. Τέλος, στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται το βασικό αντικείμενο της εργασίας αυτής, καθώς και η δομή της.

1.1 Γενικά

Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο (electric vehicle - EV) χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια η οποία αποθηκεύεται σε εγκατεστημένους συσσωρευτές εντός του οχήματος (Σπέντζας, 2009). Εκτός από τα ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτή, άλλοι τύποι οχημάτων που λειτουργούν με βάση την ηλεκτρική ενέργεια, αποτελούν αυτά με μονάδα επέκτασης της αυτονομίας, τα οποία έχουν επίσης συσσωρευτές αλλά διαθέτουν επιπλέον επί του οχήματος μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (γεννήτρια). Άλλη μία κατηγορία ηλεκτρικών οχημάτων είναι αυτά με κυψέλες καυσίμου, τα οποία αποθηκεύουν ενέργεια με τη μορφή υδρογόνου που μαζί με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας τροφοδοτεί κυψέλη καυσίμου, και μέσω της ηλεκτρόλυσης παράγεται ηλεκτρισμός. Τέλος, τα επαναφορτιζόμενα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό κινητήρα εσωτερικής καύσης και ηλεκτροκινητήρα για την κίνησή τους. (Σπέντζας, 2009)

Ήδη σήμερα οι αυτοκινητοβιομηχανίες κατασκευάζουν ή έχουν ήδη προγραμματίσει την κατασκευή ηλεκτρικών οχημάτων. Σύμφωνα με τον Carlos Ghosn, πρόεδρο και διευθύνοντα σύμβουλο της Renault και της Nissan, το 2020 θα έχουν κυκλοφορήσει περίπου 1.5 εκατομμύριο ηλεκτρικά αυτοκίνητα των δύο αυτών αυτοκινητοβιομηχανιών, ενώ την ίδια περίοδο, το ποσοστό πωλήσεων ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα έχει ανέλθει στο 10% των συνολικών πωλήσεων οχημάτων (Giménez et al., 2014).

Με το πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο τέθηκε σε ισχύ στις 16 Φεβρουαρίου του 2005 και το οποίο στοχεύει στη μακροπρόθεσμη αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου και των κλιματικών αλλαγών, εντάθηκε το ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά

αυτοκίνητα, κυρίως από χώρες όπως η Αυστραλία, η Νορβηγία, η Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο, το Βέλγιο, ο Καναδάς και η Κίνα (Σπέντζας, 2009).

Η ταχύτατη αύξηση του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων τα τελευταία χρόνια οφείλεται κυρίως στη φιλικότητά τους προς το περιβάλλον, όπως και στο χαμηλό κόστος καθημερινής χρήσης και συντήρησης σε σχέση με τα οχήματα που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα. Η επικράτησή τους στις αστικές περιοχές, είναι καθοριστική για τη μείωση της εξάρτησης από το πετρέλαιο αλλά και την ελάττωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Πιριπίτση, 2010).



Σχήμα 1.1: Ηλεκτρικά οχήματα κατά τη φόρτισή τους στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής

Η κυρίαρχη πρόκληση στη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων εστιάζει στο ενεργειακό αποθηκευτικό σύστημά τους. Επιδιώκεται να βρεθεί η καλύτερη δυνατή ισορροπία μεταξύ της χωρητικότητας αποθήκευσης, της επίδοσης (χρέωσης χρόνου, δύναμης και διάρκειας ζωής) αλλά και του κόστους (Πιριπίτση, 2010). Σε ό, τι αφορά πάλι στη φόρτιση, υπάρχουν τρεις τύποι εμπορικά διαθέσιμων τεχνολογιών επαναφόρτισης, η αργή φόρτιση, η γρήγορη φόρτιση και η ανταλλαγή μπαταριών. (Giménez et al., 2014). Σύμφωνα με τους κατασκευαστές αυτοκινήτων, η αργή φόρτιση είναι η

προτιμώμενη και συνιστώμενη μεταξύ των τριών τύπων. Αυτό συμβαίνει διότι παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα, με κυριότερα αυτά της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής της μπαταρίας και των καλύτερων αποτελεσμάτων φόρτισης. Η εναλλακτική της γρήγορης φόρτισης έχει αρνητικές επιπτώσεις στη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, ενώ τέλος η ανταλλαγή μπαταριών φαίνεται ως μία ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση ώστε να μη χάνεται χρόνος κατά τη φόρτιση, ωστόσο απαιτεί εναλλακτικές μπαταρίες κάτι το οποίο καθιστά αυτή την εναλλακτική συνήθως οικονομικά ασύμφορη (Kukreja, n.d.).

Οι περισσότερες μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων οι οποίες διατίθενται σήμερα στην αγορά, έχουν αυτονομία μεταξύ 100 και 200 χιλιομέτρων σε ιδανικές συνθήκες, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1. Για συνήθεις αστικές χρήσεις οι αυτονομίες αυτές μειώνονται περίπου μεταξύ 80 και 160 χιλιομέτρων. (Πιριπίτση, 2010). Μία πλήρης φόρτιση αυτών των οχημάτων ποικίλει μεταξύ 3,5 και 9 ωρών στην αργή φόρτιση, και εξαρτάται από το μέγεθος των μπαταριών και την ικανότητα του φορτιστή που χρησιμοποιείται. Ειδικά στις περιπτώσεις δημόσιων φορτιστών ο χρόνος της φόρτισης δεν πρέπει να ξεπερνάει τις 8 ώρες. Σύμφωνα με μία έρευνα της Eurostat (Ευρωπαϊκή Στατιστική Υπηρεσία), οι περισσότεροι Ευρωπαίοι κάνουν κατά μέσο όρο 3 διαδρομές την ημέρα και διανύουν μεταξύ 30 και 40 χιλιόμετρα την ημέρα. (Giménez et al., 2014).

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά τυπικών μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων που διατίθενται στην αγορά (Giménez et al., 2014)

Μοντέλο	Έτος κυκλοφορίας	Αυτονομία (Km)	Μπαταρία (Kwh)	Χρόνος φόρτισης (h σε 240V)
Mitsubishi i MiEV (Citroen C-Zerp/ Peugeot iOn)	2010	160	16	7,0
Nissan Leaf	2010	175	24	8,0
Renault Fluence ZE	2012	185	22	9,0
Renault Twizy	2012	100	7	3,5
Ford Focus Electric	2013	122	23	4,0
SmartED	2013	110	17,6	6,0

1.2 Ηλεκτρικά Ταξί

Εκτός από τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τα ηλεκτρικά ταξί αποτελούν και αυτά με τη σειρά τους μια σημαντική καινοτομία στον τομέα της ηλεκτροκίνησης. Στο πλαίσιο του αγώνα κατά της αλλαγής του κλίματος και άλλων περιβαλλοντικών ζητημάτων, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ως στόχο να χρησιμοποιεί το 20 τοις εκατό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έως το 2020. (Chen et al., 2013). Αυτό έχει ενθαρρύνει όλο και περισσότερα κράτη μέλη να διερευνήσουν τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας στον τομέα των μεταφορών, έναντι των παραδοσιακών καυσίμων. (Chan&Chau, 1997).



Σχήμα 1.2: Ηλεκτρικό ταξί Nissan κατά την επαναφόρτισή του

«Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας στα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένου και του τομέα των ταξί, είναι ζωτικής σημασίας για την ποιότητα ζωής των ευρωπαίων πολιτών», δήλωσε ο Pascal Smet, υπουργός μεταφορών και δημόσιων έργων στις Βρυξέλλες, κατά την επίσημη έναρξη λειτουργίας των ηλεκτρικών ταξί «e6» από την κινέζικη εταιρεία BYD (Build Your Dreams) (<https://www.gsb.stanford.edu>). Σύμφωνα με τον ίδιο, επίσης, τα ηλεκτρικά ταξί παράγουν λιγότερη ρύπανση και ηχορύπανση, συγκριτικά με εκείνα που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα. Ειδικά το Βέλγιο μάλιστα, μια πρωτοπόρα χώρα στη χρήση ηλεκτρικών αυτοκινήτων και κατ' επέκταση ταξί, στις 15 Οκτώβρη του 2014, υποδέχτηκε 34 ηλεκτρικά ταξί της εταιρείας BYD, ενώ μάλιστα οι κινεζική κυβέρνηση ενθαρρύνει και άλλες μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες να επενδύσουν στη χώρα αυτή (Rigoglioso, 2010).

Επιπλέον, ο πρεσβευτής της Κίνας Liao Liqiang, στην ίδια εκδήλωση στο Βέλγιο, δήλωσε ότι στην Κίνα έχει δοθεί μεγάλη έμφαση τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη λιγότερο ρυπογόνων αυτοκινήτων και στη βιομηχανία εξοικονόμησης ενέργειας, ενώ προσέθεσε πως τα 34 αυτά «e6» ταξί της εταιρείας BYD, συμβολίζουν την ηγεσία της κινεζικής νέας τεχνολογίας οχημάτων, βοηθώντας να έτσει τον τομέα των μεταφορών

στις Βρυξέλλες (Rigoglioso, 2010). Τέλος, ο ίδιος σημείωσε το γεγονός ότι η κινεζική κυβέρνηση ενθαρρύνει τις περισσότερες εταιρείες, όπως και την BYD, να επενδύσουν στο Βέλγιο.

Σύμφωνα μάλιστα με το διευθύνοντα σύμβουλο της εταιρείας αυτής, Isbrand Ho, η εταιρεία θα παραδώσει στους οδηγούς ταξί καθώς και στους φορείς εκμετάλλευσης, όχι μόνο μία πράσινη λύση μεταφοράς αλλά και την εξοικονόμηση κόστους σε σύγκριση με το πετρέλαιο κίνησης. Μάλιστα, το συγκεκριμένο ηλεκτρικό ταξί, αποτελεί ένα ευρύχωρο πέντε-επιβατών όχημα, το οποίο τροφοδοτείται με μπαταρίες σιδήρου-φωσφορικού, και μπορεί να διανύσει έως και 300 χιλιόμετρα, εκπέμποντας μηδενικούς ρύπους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3 (Rigoglioso, 2010).



Σχήμα 1.3: Ηλεκτρικά ταξί BYD «e6»

1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ηλεκτρικών Οχημάτων

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα τα οποία προκύπτουν από την αντικατάσταση των οχημάτων που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα, με αυτά που χρησιμοποιούν για τη λειτουργία τους την ηλεκτρική ενέργεια, έχουν ως εξής (Kukreja, n.d.):

- Ένα πλεονέκτημα της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί το γεγονός ότι δεν εκπέμπουν κανενός είδους ρυπογόνα αέρια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μακροπρόθεσμη μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Έχει διαπιστωθεί επίσης πως ακόμη και κατά τη διάρκεια της φόρτισης

των μπαταριών των ηλεκτρικών οι ρύποι οι οποίοι εκπέμπονται είναι μειωμένοι κατά 2/3 σε σύγκριση με εκείνους των συμβατικών οχημάτων.

- Χάρη στα ηλεκτρικά οχήματα, τα επίπεδα ηχορύπανσης ελαττώνονται σε μεγάλο βαθμό συγκριτικά με τη χρήση βενζινοκίνητων οχημάτων.
- Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα έχουν πολύ μικρότερο κόστος συντήρησης σε σχέση με τα οχήματα που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα, καθώς το μοναδικό κινούμενο μέρος τους αποτελεί ο ηλεκτρικός κινητήρας, σε αντίθεση με τα συμβατικά οχήματα τα οποία αποτελούνται από πολλά κινούμενα μέρη.
- Χάρη σε αυτά, επιτυγχάνεται η σταδιακή απεξάρτηση από το πετρέλαιο στον τομέα των μεταφορών και κατ' επέκταση την εξάρτηση στον τομέα αυτό από τις χώρες της Μέσης Ανατολής.
- Το κόστος της καθημερινής χρήσης τους είναι επίσης μειωμένο σε σχέση με αυτό των συμβατικών οχημάτων, καθώς τα τελευταία χρόνια η τιμή του πετρελαίου έχει παρουσιάσει πολύ ανοδικές τάσεις.
- Μέσω της χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων, επιτυγχάνεται ακόμη σχεδόν σταθερή ροπή από την ακινησία, έως το μέγιστο όριο στροφών λειτουργίας.
- Δίνεται επίσης η δυνατότητα σχεδιασμού ηλεκτρικών οχημάτων που να αυτο-φορτίζονται κατά την επιβράδυνσή τους βελτιώνοντας ακόμα περισσότερο το δείκτη κατανάλωσης.
- Επιπλέον, τα ηλεκτρικά οχήματα έχει τη δυνατότητα να λειτουργούν σε υψηλότερες στροφές από αυτές των βενζινοκινητήρων (έως και 14.000 στροφές/λεπτό).
- Τέλος, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι πολύ περισσότερο ενεργειακά αποδοτικά σε σχέση με τα συμβατικά. Σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης οι οποίες καταναλώνουν αυξημένες ποσότητες καυσίμων και δεν είναι ενεργειακά αποδοτικές (ο βαθμός απόδοσης των συμβατικών οχημάτων είναι μεταξύ 20% και 30%, οι ηλεκτροκινητήρες αποδίδουν το 75% έως και το 85% της ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη στις μπαταρίες τους για την κίνηση των τροχών).

Παρόλο που τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν τα ηλεκτρικά οχήματα, όπως παρατέθηκαν παραπάνω είναι πολύ σημαντικά, υπάρχουν και ορισμένοι περιορισμοί,

τους οποίους ο καταναλωτής θα πρέπει να εξετάσει διεξοδικά προτού προβεί στην αγορά και την καθημερινή χρήση τους. Πιο συγκριμένα, τα βασικότερα μειονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι τα εξής (Kukreja, n.d.):

- Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί η μειωμένη αυτονομία τους. Αυτό συμβαίνει γιατί με κάθε κύκλο φόρτισης της μπαταρίας τους μπορούν να διανύσουν περιορισμένη χιλιομετρική απόσταση. Σήμερα, τα περισσότερα ηλεκτρικά αυτοκίνητα παρουσιάζουν αυτονομία ταξιδιού μεταξύ 100 και 200 χιλιομέτρων, η οποία εξαρτάται από τον τύπο του οχήματος (οχήματα πόλης και μεγάλης ισχύος αντίστοιχα).
- Επιπλέον, μειονέκτημα για τη χρήση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αποτελεί η μεγάλη χρονική διάρκεια που απαιτεί η επαναφόρτισή τους, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 3.5 και 9 ωρών περίπου για μια πλήρη επαναφόρτιση. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον περιορισμό στην απόσταση που μπορούν να διανύσουν καθιστά δυσκολότερη τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων για ταξίδια ή μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί πως ορισμένα σύγχρονα μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων σε λιγότερο από μία ώρα μπορούν να φορτίσουν το 80% περίπου της μπαταρίας τους.
- Ένα άλλο μειονέκτημα που παρουσιάζουν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, είναι αυτό των υψηλών δαπανών κατασκευής τους, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα και την υψηλή τιμή πώλησής τους. Επιπλέον, ένας άλλος παράγοντας ο οποίος ευθύνεται για τη διατήρηση της τιμής πώλησής τους σε υψηλά επίπεδα, είναι η χαμηλή ζήτηση, λόγω του ότι τα ποσοστά διείσδυσής τους μέχρι και σήμερα διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα.
- Η ζωή μιας μπαταρίας ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι αρκετά περιορισμένη, αφού κυμαίνεται από 3 έως 4 χρόνια συνήθως, ή περίπου 1500 κύκλους λειτουργίας (300-400 κύκλοι λειτουργίας ανά έτος). Ωστόσο, σε κάποια σύγχρονα μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων η ζωή της μπαταρίας μπορεί να φτάσει τα 8 ή ακόμη και τα 10 έτη.
- Τέλος, ένα ακόμα μειονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί το βάρος αλλά και ο όγκος των μπαταριών τους, όπως επίσης και ο όγκος των εγκατεστημένων συστημάτων ασφαλείας που αφορούν την προστασία από την εκδήλωση φωτιάς στις μπαταρίες. Οι συστοιχίες μπαταριών είναι αρκετά βαριές και καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο στο όχημα.

1.4 Η Περίπτωση της Ελλάδας

Στην Ελλάδα της οικονομικής κρίσης και της αυξανόμενης εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα για τη μετακίνηση τόσο των ανθρώπων όσο και των αγαθών, που αποτελεί βασική αιτία των υψηλών επιπέδων ρύπανσης της χώρας μας αλλά και του φαινομένου του θερμοκηπίου, η επαναπροώθηση της χρήσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, μπορεί να αποτελέσει μία σημαντική λύση στον περιορισμό τέτοιου είδους προβλημάτων.

Στον αγώνα αυτό, γίνονται προσπάθειες και στη χώρα μας για την ένταξη της ηλεκτροκίνησης στην καθημερινότητα των Ελλήνων. Τα τελευταία χρόνια, ολοένα και περισσότερες επιχειρήσεις και δημόσιοι φορείς δίνουν έμφαση στην αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Η ελληνική κυβέρνηση έχει θεσπίσει νομοθεσία η οποία αποσκοπεί στην προώθηση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην Ελλάδα. Κατά αυτό τον τρόπο θα φέρει τη χώρα μας πιο κοντά στην επίτευξη των στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με τη διάδοση της ηλεκτροκίνησης. Η πρώτη φάση του προγράμματος το οποίο θα εποπτεύεται από μια ειδική επιτροπή που έχει συσταθεί στη Γενική Γραμματεία του υπουργείου Ενέργειας, προβλέπει ένα ολοκληρωμένο Δίκτυο το οποίο θα λειτουργεί σε πιλοτική μορφή (“Transport: Greece; Athens to promote use of electric cars”, 2014). Επιπλέον αρμοδιότητα της επιτροπής αυτής μάλιστα, θα αποτελεί μια εκστρατεία ενημέρωσης του κοινού.

Παρόλα αυτά, η Ελλάδα, βρίσκεται ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο στην προσπάθεια αυτή, καθώς σήμερα κυκλοφορούν μόλις 25 αποκλειστικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα στους δρόμους της Ελλάδας, ενώ μαζί με τις παραγγελίες της ΔΕΗ φτάνουν τα 40. Ωστόσο, τα οχήματα αυτά μπορούν να καλύψουν 100 χιλιόμετρα μέσα στην πόλη με μόλις 90 λεπτά του ευρώ. Επιπλέον, η ρήτρα για την εγκατάσταση σταθμών φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στη χώρα μας εισήχθη στη νομοθεσία μόλις τον περασμένο Ιανουάριο. Σύμφωνα με την τροπολογία αυτή, οι σταθμοί φόρτισης δεν θα χρειαστούν ειδική άδεια για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Με βάση τους στόχους που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση, η Ελλάδα θα πρέπει να έχει 13.000 σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων έως το τέλος του 2020, εκ των οποίων το 10% θα βρίσκονται σε δημόσιους χώρους, αλλά και σε χώρους στάθμευσης (“Transport: Greece; Athens to promote use of electric cars”, 2014).

Για την υλοποίηση του παραπάνω εγχειρήματος, καθοριστική είναι η συμβολή της ΔΕΗ, από την πλευρά της οποίας βρίσκεται ήδη σε πορεία υλοποίησης το δίκτυο των 15 σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Σήμερα, βρίσκονται σε λειτουργία 4 σταθμοί φόρτισης στην Αττική (επί των οδών: Χαλκοκονδύλη -κεντρικά γραφεία ΔΕΗ, Μεσογείων –υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Καλλιρόης -κεντρικά γραφεία ΔΕΔΔΗΕ και Πειραιώς –γραφεία ΡΑΕ) και άλλοι 6 στην πόλη της Κοζάνης (Καγιαμπάκης, n.d.).

Το ερώτημα που γεννάται σχετικά με την περίπτωση της Ελλάδας, είναι αν η χρήση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αποτελεί μια βιώσιμη επιλογή για το ευρύ κοινό, ή αφορά μονάχα πολίτες με υψηλό εισόδημα. Σύμφωνα με τα όσα ειπώθηκαν παραπάνω, η τιμή αγοράς ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι αρκετά υψηλή, καθώς κυμαίνεται από 22.000€ έως 58.000 €, για τα ηλεκτρικά οχήματα που διατίθενται σήμερα στην αγορά, ενώ αναμένονται πάντως και νέα μοντέλα με κόστος χαμηλότερο των 15.000€(Καγιαμπάκης, n.d.). Ωστόσο, το κόστος λειτουργίας τους, όπως προαναφέρθηκε, είναι πολύ χαμηλό σε σχέση με αυτό των αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα, αφού με λιγότερο από ένα ευρώ μπορούν να καλύψουν 100 χιλιόμετρα εντός της πόλης (Giménez et al., 2014). Έτσι, σύμφωνα με τις σημερινές τιμές των υγρών καυσίμων και της ηλεκτρικής ενέργειας το κόστος χρήσης παρουσιάζει μία σχέση 1 προς 3,8 - 5 υπέρ των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, ενώ φορείς της ηλεκτροκίνητης αγοράς εκτιμούν ότι ακόμη και αν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας (λόγω κάποιας επιπλέον φορολογίας) αυξηθεί, «το κόστος των υγρών καυσίμων θα έχει μόνο ανοδικές τάσεις, λόγω εξάντλησης των ‘φθηνών’ αποθεμάτων και διάθεσης στην αγορά καυσίμων από δυσπρόσιτες και κατά συνέπεια ακριβές πηγές». Έτσι, θα μπορούσε να ειπωθεί πως η αγορά ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου αποτελεί μια συμφέρουσα επιλογή για τις μετακινήσεις των Ελλήνων.

1.5 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Λαμβάνοντας υπόψη τη χρησιμότητα που διαπιστώθηκε πως έχει η χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων, και γενικότερα της ηλεκτροκίνησης, τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο όσο και ειδικότερα στην Ελλάδα, η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το σχεδιασμό ενός δικτύου σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί, τόσο σε επιστημονικό πλαίσιο, όσο και με τη δημιουργία και επίλυση του

κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου, με απώτερο σκοπό τη δημιουργία ενός ρεαλιστικού μοντέλου, το οποίο να μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη.

Βασικό αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη ενός προτύπου βέλτιστης χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών ταξί, με στόχο τον καθορισμό των βέλτιστων θέσεων και του αριθμού των εγκαταστάσεων, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή εξυπηρέτηση των οχημάτων.

Με τη διαμόρφωση και την επίλυση του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου το οποίο θα αναπτυχθεί στα πλαίσια της εργασίας, υιοθετείται μια ρεαλιστική προσέγγιση χωροθέτησης, καθώς ελαχιστοποιείται το κόστος μετακίνησης, και ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η όσο το δυνατόν καλύτερη εξυπηρέτηση των οδηγών των ηλεκτρικών ταξί. Η τεχνική επίλυσης που εφαρμόζεται είναι αυτή των μεθρευτικών αλγορίθμων, και συγκεκριμένα των γενετικών αλγορίθμων, ενώ η εφαρμογή του μοντέλου γίνεται σε μία επιλεγμένη περιοχή του νομού Αττικής.

1.6 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια, και είναι δομημένη κατά τον ακόλουθο τρόπο:

- **Κεφάλαιο 1:** αποτελεί το εισαγωγικό κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, στο οποίο γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των ηλεκτρικών οχημάτων και κατ' επέκταση των ηλεκτρικών ταξί και εξηγήθηκε ο σκοπός της εργασίας αυτής.
- **Κεφάλαιο 2:** στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εισαγωγή στο πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων και μελετάται το μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο θα εφαρμοστεί στην παρούσα εργασία, ενώ έπειτα σχολιάζονται τα κυριότερα κριτήρια βάσει των οποίων θα επιλεγθούν κάποιες υποψήφιες θέσεις σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί στην Αττική.
- **Κεφάλαιο 3:** στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση των βασικών μοντέλων χωροθέτησης, στη συνέχεια μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ενώ τέλος επιλέγεται το καταλληλότερο μοντέλο για την περίπτωση χωροθέτησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- **Κεφάλαιο 4:** το 4^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας αφορά τη διαμόρφωση καθώς και την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου που επιλέχθηκε για το

πρόβλημα που μελετάται, και στη συνέχεια γίνεται μία εισαγωγή στους γενετικούς αλγορίθμους και στο λογισμικό Eolver, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε.

- **Κεφάλαιο 5:** στο κεφάλαιο αυτό, εφαρμόζεται ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, εισάγοντας αρχικά τα δεδομένα του προβλήματος και τις παραμέτρους του αλγορίθμου, ενώ τέλος, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου και πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για ορισμένες παραμέτρους του προβλήματος.
- **Κεφάλαιο 6:** στο 6^ο κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν, ενώ τέλος διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.
- **Κεφάλαιο 7:** στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται η λίστα με τις βιβλιογραφικές αναφορές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύεται το πρόβλημα της χωροθέτησης εγκαταστάσεων, ενώ στη συνέχεια, μελετάται το μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο θα εφαρμοστεί με απώτερο σκοπό τη βέλτιστη χωροθέτηση των λειτουργικών μονάδων που αφορούν την παρούσα διπλωματική εργασία.

2.1 Το Πρόβλημα της Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων (Facility Location Problem)

Το πρόβλημα της χωροθέτησης εγκαταστάσεων αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι επιστήμες της λήψης αποφάσεων, και κατ' επέκταση η επιστήμη της επιχειρησιακής έρευνας. Τα οφέλη που απορρέουν από τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων είναι πολλά και για το λόγο αυτό έχουν γίνει πολλές έρευνες και μελέτες τα τελευταία χρόνια που αφορούν το ζήτημα αυτό και γενικότερα την ανάπτυξη και τη βελτιστοποίηση των υπό σχεδιασμό δικτύων (Klose&Drex1, 2005). Έτσι, η σημασία της σωστής επιλογής της βέλτιστης τοποθεσίας για την εγκατάσταση μιας λειτουργικής μονάδας ασκεί καθοριστικό ρόλο στη μετέπειτα πορεία και λειτουργία της.

Οι εγκαταστάσεις χωροθετούνται με τρόπο τέτοιο έτσι ώστε να ικανοποιούν τη ζήτηση, τον ανεφοδιασμό, την κάλυψη περιοχών ή ακόμη και να αλληλεπιδρούν με την ύπαρξη άλλων εγκαταστάσεων (Klose&Drex1, 2005). Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή της βέλτιστης θέσης μιας εγκατάστασης γίνεται μετά από προσεκτική μελέτη, καθώς αρχικά εξετάζεται μεμονωμένα κάθε εγκατάσταση ως προς τα λειτουργικά της χαρακτηριστικά (facility layout), αλλά σχετίζεται και με την ανάπτυξη και τον σχεδιασμό ευρύτερων συστημάτων με βάση την κατανομή των πόρων του συστήματος που εξυπηρετεί. Οι πόροι του συστήματος οι οποίοι αναφέρθηκαν, αποτελούν τα σταθερά σημεία του συστήματος όπου ανάλογα με το πρόβλημα, αντιπροσωπεύουν άλλες εγκαταστάσεις, αγορές ή καταναλωτές, αφετηρίες ή προορισμούς με τους οποίους αλληλεπιδρά η μία ή περισσότερες εγκαταστάσεις που πρόκειται να χωροθετηθούν (Plastria, 1995). Ο γενικευμένος όρος ο οποίος περιγράφει αυτή τη διαδικασία αναζήτησης θέσεων για εγκαταστάσεις μέσα σε δίκτυα εξυπηρέτησης, είναι προβλήματα χωροθέτησης-κατανομής (location-allocation problems). Σε τέτοιου είδους προβλήματα ζητείται η χωροθέτηση κέντρων

εξυπηρέτησης σε συγκεκριμένο χώρο, με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτεται η ζήτηση στον χώρο αυτό με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Ωστόσο, η επιλογή της βέλτιστης τοποθεσίας για την εγκατάσταση μιας λειτουργικής μονάδας, πέραν των όσων αναφέρθηκαν παραπάνω, γίνεται και μέσω μιας πληθώρας κριτηρίων, τα οποία ποικίλουν ανάλογα με το είδος της μονάδας που θα εγκατασταθεί και τις ανάγκες που παρουσιάζει. Στον τομέα των μεταφορών, οι βασικότεροι στόχοι ενός προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελούν η μείωση του κόστους μετακίνησης και ταυτόχρονα η αύξηση της ποσότητας των αγαθών που μεταφέρονται μέσω του δικτύου που μελετάται, όπως και η εξοικονόμηση χρόνου.

Το πρόβλημα της χωροθέτησης εγκαταστάσεων αντιμετωπίζεται με τη διατύπωση και την επίλυση ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο θα περιλαμβάνει μια σειρά από μεταβλητές, περιορισμούς και μία αντικειμενική συνάρτηση, με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους μετακίνησης. Η ανάπτυξη μαθηματικών προτύπων και αλγορίθμων τοποθέτησης εγκαταστάσεων κάθε τύπου σε χωρικό ή γεωγραφικό περιβάλλον, αναφέρεται ως ανάλυση χωροθέτησης (location analysis).

Τα μοντέλα χωροθέτησης συνήθως είναι δύσκολο να επιλυθούν, τουλάχιστον κατά το βέλτιστο τρόπο. Ακόμη και βασικά πρότυπα είναι αρκετά δυσεπίλυτα στις περιπτώσεις προβλημάτων πολλών μεταβλητών (Μητρόπουλος, 2007). Επιπλέον, τα μοντέλα αυτά είναι πλήρως ορισμένα, καθώς η δομική τους μορφή, δηλαδή η αντικειμενική συνάρτηση, οι περιορισμοί και οι μεταβλητές που τα αποτελούν, καθορίζονται από το συγκεκριμένο πρόβλημα χωροθέτησης που μελετάται. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχει ένα γενικότερο μοντέλο το οποίο να είναι κατάλληλο για όλες τις υποθετικές ή τις υπάρχουσες εφαρμογές. Για το λόγο αυτό, σε επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθούν διεξοδικά τα μοντέλα χωροθέτησης και θα επιλυθεί αυτό το οποίο θα επιλεγεί ως καταλληλότερο για το πρόβλημα χωροθέτησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.2 Μεθοδολογικό Πλαίσιο

Η χωροθέτηση των εγκαταστάσεων αποτελεί ένα πολυδιάστατο πρόβλημα του οποίου η μεθοδολογική προσέγγιση ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες που παρουσιάζει κάθε πρόβλημα. Η μεθοδολογία η οποία θα εφαρμοστεί, καθορίζει τη βέλτιστη τοποθεσία των λειτουργικών μονάδων με βάση κάποιες χωρικά κατανεμημένες προϋποθέσεις, οι

οποίες αφορούν χαρακτηριστικά του «χώρου» ή «περιβάλλοντος», που αποτελεί το χωρικό σύστημα ζήτησης υπηρεσιών. Στη συνέχεια, επιλέγονται τα κατάλληλα σημεία μέσω κάποιων συγκεκριμένων μετρήσιμων κριτηρίων.

Η επίλυση των μοντέλων χωροθέτησης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα κριτήρια που έχουν επιλεγεί, όπως και από την αντικειμενική συνάρτηση που θα χρησιμοποιηθεί η οποία έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση αυτών των κριτηρίων. Καθοριστικός στα προβλήματα αυτά, αποτελεί επίσης ο διαχωρισμός των αναγκών μεταξύ δημόσιων ή ιδιωτικών. Στον ιδιωτικό τομέα, απώτερος σκοπός της χωροθέτησης αποτελεί η ελαχιστοποίηση του κόστους ή η μεγιστοποίηση του κέρδους, τα οποία, εκτός από χρήματα, μπορεί να αναφέρονται τόσο σε χρόνο όσο και σε απόσταση. Αντίθετα, στο δημόσιο τομέα η διαδικασία είναι πιο πολύπλοκη λόγω πολιτικών και κοινωνικοοικονομικών προβλημάτων, ενώ αντικειμενικός σκοπός αποτελεί η μεγιστοποίηση του κοινωνικού οφέλους. Τέλος, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου συναντάται αβεβαιότητα σε τέτοιου είδους προβλήματα, λόγω της έλλειψης των διαθέσιμων στοιχείων (Μητρόπουλος, 2007).

Κάθε πρόβλημα χωροθέτησης μπορεί να αντιμετωπιστεί με διαφορετικούς τρόπους, και κατ' αυτόν τον τρόπο μεταβάλλονται και οι τρόποι επίλυσης λόγω των διαφορετικών μαθηματικών προτύπων χωροθέτησης – κατανομής που εφαρμόζονται κάθε φορά. Υπάρχει όμως ένα γενικότερο μεθοδολογικό πλαίσιο, το οποίο εφαρμόζεται στα περισσότερα προβλήματα χωροθέτησης, και ακολουθεί τα παρακάτω στάδια εφαρμογής (Rahman και Smith, 2000):

- Καθορισμός και κατανόηση του χωροθετικού προβλήματος
- Ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου
- Ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και εκτέλεση αυτών

2.3 Κριτήρια Χωροθέτησης Σταθμών Φόρτισης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο προσδιορισμός των θέσεων των σταθμών επαναφόρτισης των ηλεκτρικών ταξί στην Αττική, ο οποίος γίνεται μέσω συγκεκριμένων κριτηρίων. Τα κριτήρια αυτά, επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο

εύρος παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν τη χωροθέτηση – κατανομή των θέσεων αυτών.

Πιο συγκεκριμένα, η χωροθέτηση των σταθμών αυτών μπορεί να ενταχθεί στο γενικότερο πλαίσιο των προβλημάτων υποδομής ανεφοδιασμού καυσίμων, ωστόσο οι περισσότερες προσεγγίσεις που έχουν γίνει στο συγκεκριμένο θέμα ως σήμερα, αγνοούν το χρόνο επαναφόρτισης και υποθέτουν πως όλοι οι πελάτες οι οποίοι φτάνουν σε ένα τέτοιο σταθμό ή διέρχονται από αυτόν, εξυπηρετούνται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι προσεγγίσεις αυτές να είναι ρεαλιστικές μόνο σε περιπτώσεις προβλημάτων «γρήγορης» φόρτισης, κάτι το οποίο δεν ανταποκρίνεται στα ηλεκτρικά οχήματα, παρά μόνο σε αυτά που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα ή με υδρογόνο.

Στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, και ακόμη περισσότερο των ηλεκτρικών ταξί, οι οδηγοί, προκειμένου να μην περιμένουν, συχνά θα απορρίψουν το σταθμό, στην περίπτωση που όλοι οι φορτιστές είναι κατειλημμένοι. Επιπλέον, είναι συχνό το φαινόμενο της μερικής φόρτισης, καθώς οι οδηγοί σπάνια έχουν στη διάθεσή τους 3.5 με 9 ώρες που απαιτεί περίπου η πλήρης φόρτιση των περισσότερων ηλεκτρικών οχημάτων σήμερα.

Έτσι λοιπόν, στο σημείο αυτό, θα σχολιαστούν πιο αναλυτικά μερικά από τα κριτήρια, βάσει των οποίων επιλέχθηκε μια σειρά από υποψήφιες θέσεις σταθμών επαναφόρτισης στην Αττική.

Αρχικά, βασικό παράγοντα αποτελεί η ζήτηση σε ταξί που έχει κάθε περιοχή της Αττικής, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει τη ζήτηση σε ηλεκτρικά ταξί, και σύμφωνα με αυτή θα χωροθετηθούν οι σταθμοί φόρτισης. Δηλαδή, για περιοχές με μεγαλύτερη ζήτηση σε ηλεκτρικά ταξί, κρίνεται σημαντική η δημιουργία περισσότερων σταθμών επαναφόρτισης σε σύγκριση με περιοχές με μικρότερη ζήτηση. Η ζήτηση αυτή προσδιορίζεται από ένα πλήθος παραγόντων, με κυριότερους αυτούς του εισοδήματος των καταναλωτών, τις προτιμήσεις τους σε ταξί, της κατοχής ή μη αυτοκινήτου, ακόμη και από το μορφωτικό τους επίπεδο.

Ένα άλλο κριτήριο επιλογής των θέσεων των σταθμών, κυρίως εξαιτίας της μειωμένης αυτονομίας των ηλεκτρικών ταξί, αποτελεί η εγκατάστασή τους σε κεντρικά σημεία. Δηλαδή, είναι σημαντικό να εγκατασταθούν σταθμοί

επαναφόρτισης σε σημεία τέτοια, που οι οδηγοί διέρχονται συχνά και η ζήτηση σε ταξί είναι μεγάλη. Κατ' αυτόν τον τρόπο οι οδηγοί θα έχουν το μεγαλύτερο δυνατό όφελος, καθώς δε θα ξοδεύουν μέρος της μπαταρίας μετά τη φόρτιση, έως ότου ξεκινήσουν μια διαδρομή. Σκόπιμο είναι λοιπόν, η χωροθέτηση να γίνει όσο το δυνατόν σε κεντρικά σημεία κάθε δήμου, κοντά σε στάσεις των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, και γενικότερα σε σημεία που υπάρχει πλήθος ταξί σε αναμονή, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν καλύτερη εξυπηρέτηση τόσο των οδηγών όσο και των πελατών με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Επιπρόσθετα, σημασία έχει η χωροθέτηση των σταθμών να γίνει σε σημεία με αρκετό ελεύθερο χώρο, έτσι ώστε να μη χάνεται χρόνος κατά την αναμονή των ταξί και να μη δημιουργείται συμφόρηση στο οδικό δίκτυο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα θα μπορούσε να αποτελέσει η τοποθέτησή τους σε χώρους στάθμευσης είτε αυτοί είναι υπαίθριοι, είτε στεγασμένοι, ή ακόμη και υπόγειοι. Με αυτό τον τρόπο θα διευκολυνθούν οι οδηγοί των ταξί, αλλά και οι πελάτες αφού ταυτόχρονα οι σταθμοί αυτοί θα μπορέσουν να αποτελέσουν και σημεία παραλαβής πελατών, χωρίς οι οδηγοί να ξοδέψουν τμήμα της ενέργειάς τους.

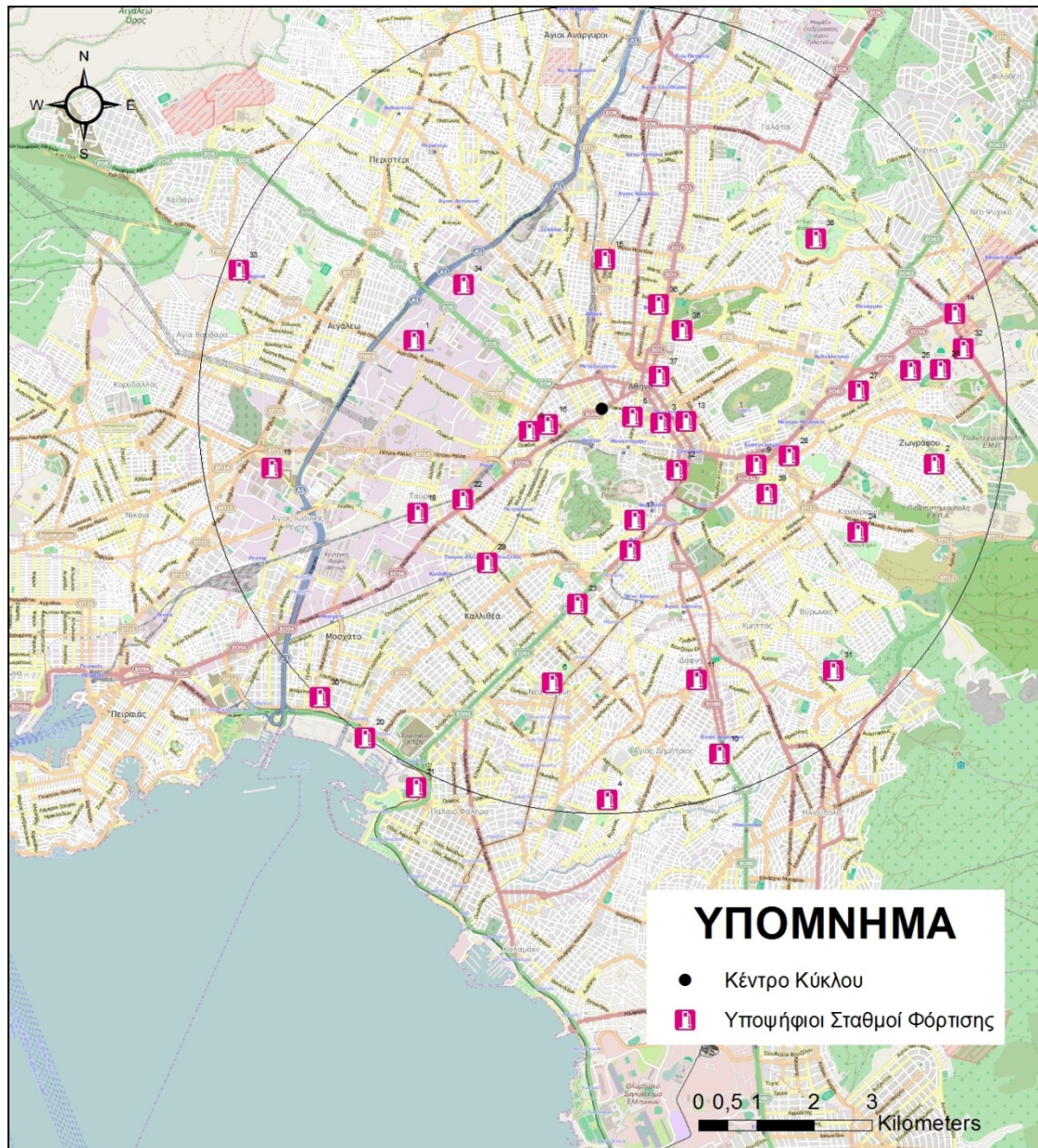
Στη συνέχεια, αξίζει να σημειωθεί πως η ευκολία στην πρόσβαση, αποτελεί έναν ακόμη βασικό παράγοντα για το ζήτημα αυτό. Αυτό συμβαίνει γιατί η φόρτιση αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία, με αποτέλεσμα όσο μεγαλύτερο τμήμα του πληθυσμού διέρχεται από τα σημεία αυτά, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο αριθμός των πελατών που θα χρησιμοποιήσει τα ταξί αμέσως μετά τη φόρτισή τους. Έτσι λοιπόν, ιδανική λύση θα αποτελούσε η εγκατάστασή τους σε σημεία όπως, υπόγειοι χώροι στάθμευσης εντός των σταθμών του μετρό, ή χώροι στάθμευσης έξω από αυτούς, ή ακόμη και εντός χώρων στάθμευσης μεγάλων εμπορικών κέντρων όπου η διέλευση είναι μεγάλη και θα μπορούν να παραλάβουν πλήθος πελατών.

Έτσι λοιπόν, με βάση τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς επίσης και με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS, σε πρώτο στάδιο επιλέχθηκαν κάποιες υποψήφιες θέσεις των σταθμών επαναφόρτισης των ηλεκτρικών ταξί σε μία περιοχή που επιλέχθηκε. Οι υπηρεσίες διαδικτύου GIS αναπτύχθηκαν για την ανταλλαγή γεωχωρικών πληροφοριών και υπηρεσιών γεω-σχετικών εγκαταστάσεων. Συγκεκριμένα, ορίστηκε ένα κέντρο, γύρω από το οποίο δημιουργήθηκε ένας κύκλος ακτίνας 7 χιλιομέτρων ο οποίος εκτείνεται βόρεια έως τους Αγίους Αναργύρους, ανατολικά έως

το δήμο Ζωγράφου, νότια έως τον Άγιο Δημήτριο, και δυτικά έως το δήμο Νίκαιας, και εντός της περιοχής αυτής χωροθετήθηκαν 39 σταθμοί επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί.

Πιο αναλυτικά, οι σταθμοί αυτοί, τοποθετήθηκαν κυρίως σε χώρους στάθμευσης περιοχών στις οποίες υπάρχουν περισσότεροι κόμβοι συγκέντρωσης ταξί, και κατά συνέπεια σε περιοχές όπου η ζήτηση σε ταξί είναι μεγαλύτερη από άλλες, όπου τοποθετήθηκαν αραιότερα. Η ζήτηση, καθορίζεται από πλήθος παραγόντων, οι οποίοι αναφέρθηκαν παραπάνω, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να τοποθετηθούν περισσότεροι σταθμοί σε περιοχές με κατοίκους υψηλότερου εισοδήματος συγκριτικά με άλλες, όπως και σε εμπορικές περιοχές, σε περιοχές με πληθώρα χώρων εστίασης, και γενικότερα σε περιοχές που προσελκύουν μεγάλο τμήμα του πληθυσμού. Επιπλέον, καθοριστικό παράγοντα στη χωροθέτησή τους αποτέλεσε η ευκολία στην πρόσβαση, και για το λόγο αυτό, τοποθετήθηκαν κοντά σε σταθμούς μετρό ή άλλων Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, ενώ τέλος μερικοί από αυτούς τοποθετήθηκαν σε χώρους στάθμευσης εντός εμπορικών κέντρων, ή ακόμη και νοσοκομείων, και πολιτιστικών χώρων, ύστερα από ιδιαίτερη συμφωνία με τους χώρους αυτούς, καθώς οι πελάτες που θα εξυπηρετούν τα ταξί μετά την επαναφόρτισή τους, θα αποτελούν και πελάτες των χώρων αυτών.

Στο Σχήμα 2.1 που παρουσιάζεται παρακάτω, φαίνονται οι υποψήφιες θέσεις των σταθμών επαναφόρτισης που θα χωροθετηθούν στο τμήμα της Αττικής που μελετήθηκε, και οι οποίες επιλέχθηκαν σύμφωνα με τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση τμήματος Αττικής με τις υποψήφιες θέσεις των σταθμών φόρτισης

Τέλος, μετά την επιλογή των υποψήφιων θέσεων, δημιουργήθηκε ένας κάνναβος στην περιοχή που επιλέχθηκε, ο οποίος σχεδιάστηκε με βήμα 300 μέτρων, και στον οποίο το κέντρο κάθε τετραγώνου από τα οποία σχηματίζεται, θεωρήθηκε ότι αποτελεί έναν κόμβο ζήτησης. Με αυτό τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα για ευκολότερο εντοπισμό των θέσεων αυτών, καθώς και στην εξαγωγή των απαραίτητων στοιχείων για τη μετέπειτα επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης με τη βοήθεια του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστούν οκτώ βασικά μοντέλα χωροθέτησης και θα αναλυθεί ο σκοπός και η λειτουργία τους, ενώ επίσης θα γίνει και μία βιβλιογραφική ανασκόπηση στις μελέτες που έχουν γίνει ως σήμερα και έχουν ως στόχο τη χωροθέτηση λειτουργικών μονάδων, και πιο συγκεκριμένα ενός δικτύου φόρτισης κατάλληλο για ηλεκτρικά οχήματα. Τέλος, στην ενότητα αυτή, θα επιλεγεί αυτό που θα κριθεί ως καταλληλότερο για το σχεδιασμό του δικτύου σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί στην Αττική.

3.1 Βασικά Μοντέλα Χωροθέτησης

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν οκτώ βασικά μοντέλα χωροθέτησης, των οποίων ο διαχωρισμός έχει γίνει βάσει της απόστασης, και είναι τα παρακάτω: το set covering location problem (πρόβλημα συνόλου κάλυψης), το maximal covering location problem (πρόβλημα μέγιστης κάλυψης), το p-center location problem (πρόβλημα p-διακέντρων) και το p – dispersion location problem (πρόβλημα p-διασποράς), τα οποία βασίζονται στη μέγιστη απόσταση αλλά και το p-median location problem (πρόβλημα p-διαμέσων), το fixed charge location problem (πρόβλημα σταθερού κόστους), το hub location problem (πρόβλημα χωροθέτησης πλήμνης) και το maxisum location problem, τα οποία βασίζονται στη συνολική (ή μέση) απόσταση. Έτσι, γίνεται αντιληπτό πως η απόσταση, όπως επίσης και άλλα μέτρα τα οποία σχετίζονται με αυτήν, όπως το χρόνος ή το κόστος μιας διαδρομής ή ικανοποίηση της ζήτησης, είναι καθοριστικής σημασίας σε τέτοιου είδους προβλήματα.

Σε όλα τα παραπάνω μοντέλα, το δίκτυο είναι δεδομένο, όπως και οι θέσεις ζήτησης οι οποίες θα εξυπηρετηθούν από τις εγκαταστάσεις, αλλά και οι θέσεις των ήδη υπάρχουσών εγκαταστάσεων. Το γενικό πρόβλημα αποτελεί η χωροθέτηση νέων εγκαταστάσεων με απώτερο σκοπό τη βελτιστοποίηση κάποιου στόχου.

3.1.1 Μοντέλα Μέγιστης Απόστασης (Maximum Distance Models)

Σε κάποια προβλήματα χωροθέτησης, η μέγιστη απόσταση κάλυψης (maximum distance) διατίθεται εκ των προτέρων (a priori). Στη βιβλιογραφία της χωροθέτησης εγκαταστάσεων, αυτές οι a priori μέγιστες αποστάσεις, αναφέρονται ως «καλυπτόμενες» αποστάσεις (“covering” distances), ενώ η ζήτηση εντός της

καλυπτόμενης απόστασης της κοντινότερης της εγκατάστασης αναφέρεται ως «καλυμμένη» (“covered”) (Hamacher&Drezner, 2002). Σημαντική υπόθεση αυτού του μέτρου της μέγιστης απόστασης αποτελεί το γεγονός ότι η ζήτηση ικανοποιείται πλήρως στην περίπτωση που η πιο κοντινή εγκατάσταση βρίσκεται εντός της καλυπτόμενης απόστασης, ενώ δεν ικανοποιείται εάν η πλησιέστερη εγκατάσταση βρίσκεται εκτός αυτής της απόστασης.

Ένα παράδειγμα του δημόσιου τομέα που θα μπορούσε να κάνει πιο κατανοητά τα παραπάνω μπορεί να αποτελέσουν οι μαθητές κάποιων σχολείων διάφορων συνοικιών, τα σπίτια των οποίων βρίσκονται σε ακτίνα ενός χιλιομέτρου από το σχολείο, και πηγαίνουν στο σχολείο με τα πόδια, ενώ για τους μαθητές των οποίων τα σπίτια δε βρίσκονται σε αυτή τη μέγιστη απόσταση θα πρέπει να παραχωρείται σε αυτούς δημόσια συγκοινωνία. Έτσι, μια σχολική περιφέρεια μπορεί να έχει ως στόχο τη χωροθέτηση σχολείων με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των μαθητών που θα χρησιμοποιήσουν τα λεωφορεία με δημόσια δαπάνη. Από την άλλη μεριά, σε ό, τι αφορά τον ιδιωτικό τομέα, ορισμένες εταιρείες μπορεί να εγγυώνται εξυπηρέτηση μέσα σε έναν προκαθορισμένο χρόνο, και έτσι, απώτερος σκοπός των εταιριών αυτών μπορεί να αποτελέσει η χωροθέτηση των καταστημάτων τους με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιηθεί ο αριθμός των πιθανών πελατών τους.

✓ Πρόβλημα Συνόλου Κάλυψης (SCLP - Set Covering Location Problem)

Το πρόβλημα συνόλου κάλυψης (set covering location problem) αποτελεί το πρώτο πρόβλημα κάλυψης τοποθεσίας (Toregas et al., 1971). Ο βασικός σκοπός αυτού του προβλήματος είναι η χωροθέτηση του ελάχιστου αριθμού απαιτούμενων εγκαταστάσεων έτσι ώστε να «καλυφθεί» όλη η ζήτηση των κόμβων.

Για τη διατύπωση του προβλήματος αυτού, είναι απαραίτητος ο καθορισμός των παρακάτω δεδομένων και συνόλων:

I = το σύνολο της ζήτησης των κόμβων που συμβολίζονται με i ,

J = το σύνολο των υπονήφιας θέσεων εγκατάστασης που συμβολίζονται με j ,

D_{ij} = η απόσταση μεταξύ του κόμβου ζήτησης i και της υπονήφιας θέσης j ,

D_c = η απόσταση κάλυψης,

$N_i = \{j \mid d_{ij} < D_c\}$ = το σύνολο όλων των υποψήφιων θέσεων που μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση στο σημείο i , και

η παρακάτω μεταβλητή απόφασης:

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{στην περίπτωση που η χωροθέτηση γίνει στη θέση } j \\ 0 & \text{εάν όχι} \end{cases}$$

Με τον παραπάνω συμβολισμό, το πρόβλημα συνόλου κάλυψης (set covering location problem - SCLP) μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} x_j \quad (3.1)$$

$$\text{s.t.: } \sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \forall i \in I \quad (3.2)$$

$$x_j \in \{0,1\} \forall j \in J \quad (3.3)$$

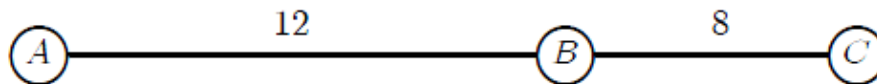
Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.1) είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν. Ο περιορισμός (3.2) επιβεβαιώνει το γεγονός ότι κάθε κόμβος ζήτησης καλύπτεται από τουλάχιστον μία εγκατάσταση, ενώ ο περιορισμός (3.3) ενισχύει την απόφαση χωροθέτησης με ένα ναι ή με ένα όχι. Στην περίπτωση που συμπεριληφθούν στην αντικειμενική συνάρτηση συγκεκριμένα κόστη χωροθέτησης ως συντελεστές των μεταβλητών απόφασης, τότε αυτή μπορεί να γενικευτεί και ο απώτερος σκοπός τότε θα αποτελέσει η ελαχιστοποίηση του συνολικού σταθερού κόστους της διαμόρφωσης της χωροθέτησης και όχι ο αριθμός των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν.

Σύμφωνα με τους Garey & Johnson (1979), και οι δύο παραπάνω εκδοχές του μοντέλου συνόλου κάλυψης είναι NP – hard (non deterministic polynomial time – hard), δηλαδή προβλήματα τουλάχιστον τόσο «δύσκολα» όσο οποιοδήποτε πρόβλημα της κλάσης NP. Η κλάση NP περιλαμβάνει όλα τα προβλήματα τα οποίων η λύση μπορεί να επαληθευτεί (“verifiable” προβλήματα) πολυωνυμικά.

Οι περιορισμοί του μοντέλου συνόλου κάλυψης προϋποθέτουν πως κάθε σημείο ζήτησης καλύπτεται από μία αντίστοιχη εγκατάσταση. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, αυτό απαιτεί τη χωροθέτηση πάρα πολλών εγκαταστάσεων, με αποτέλεσμα οι λύσεις που προκύπτουν να μην είναι οικονομικά βιώσιμες. Επιπλέον, έχει αναπτυχθεί

μια πληθώρα από κανόνες για την ελάττωση των γραμμών και των στηλών προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος του προβλήματος (Daskin, 1995). Το μοντέλο αυτό, όπως διατυπώνεται σύμφωνα με τις σχέσεις (3.1), (3.2) και (3.3), υποθέτει πως οι υποψήφιες θέσεις των εγκαταστάσεων βρίσκονται στους κόμβους ενός δικτύου. Ένα σχέδιο χωροθέτησης χαμηλότερου κόστους θα ήταν εφικτό στην περίπτωση που οι εγκαταστάσεις χωροθετούνταν κατά μήκος των τόξων του δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

Οι Church & Meadows (1979) παρουσίασαν μια μέθοδο τροποποίησης του αρχικού δικτύου, με τρόπο τέτοιο ώστε να επιτρέπεται η χωροθέτηση εγκαταστάσεων σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος των τόξων του δικτύου, εξακολουθώντας όμως να επιλύουν το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τη διατύπωση (3.1) – (3.3). Η μέθοδος αυτή, αυξάνει το αρχικό δίκτυο με ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων οι οποίοι χωροθετούνται κατά μήκος των τόξων του δικτύου. Η συμπερίληψη αυτών των επιπλέον κόμβων στο σύνολο J (το σύνολο των υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης), θα οδηγήσει σε μια λύση εξίσου καλή με το να επιτρεπόταν η χωροθέτηση των εγκαταστάσεων σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος των τόξων.



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα δικτύου

✓ **Πρόβλημα Μέγιστης Κάλυψης (MCLP - Maximal Covering Location Problem)**

Το μοντέλο συνόλου κάλυψης που σχολιάστηκε παραπάνω, κάνει μια σημαντική υπόθεση που στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι ρεαλιστική. Υποθέτει δηλαδή, πως όλοι οι κόμβοι ζήτησης πρέπει να καλυφθούν, χωρίς να συμπεριλαμβάνει κάποιο περιορισμό στον προϋπολογισμό. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις σχεδιασμού εγκαταστάσεων λαμβάνεται υπόψη ο προϋπολογισμός. Για το σκοπό αυτό διατυπώθηκε το πρόβλημα μέγιστης κάλυψης (maximal covering location

problem – MCLP) από τους Church & ReVelle (1974), με σκοπό τη χωροθέτηση ενός προκαθορισμένου αριθμού εγκαταστάσεων, που θα συμβολίζεται με p , με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται η ζήτηση. Ουσιαστικά, το μοντέλο αυτό απευθύνεται στο σχεδιασμό εγκαταστάσεων οι οποίες έχουν ένα ανώτατο στον αριθμό των μονάδων που θα χωροθετηθούν. Δηλαδή, το MCLP θεωρεί πως οι εγκαταστάσεις μπορεί να μην επαρκούν για την πλήρη κάλυψη των κόμβων ζήτησης, και σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο αναζητά το σχέδιο χωροθέτησης το οποίο θα μπορεί να καλύψει το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης.

Για τη διατύπωση του μοντέλου αυτού, προσθέτουμε στα δεδομένα που εισήχθησαν και στα σύνολα του set covering location problem (SCLP), τα εξής:

h_i = η ζήτηση στον κόμβο i ,

p = ο αριθμός των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν,

$z_i = \begin{cases} 1 & \text{στην περίπτωση που ο κόμβος ζήτησης } i \text{ καλύπτεται} \\ 0 & \text{εάν όχι} \end{cases}$

Έτσι, το maximal covering location problem (MCLP), μπορεί διατυπωθεί ως εξής:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in I} h_i z_i \quad (3.4)$$

$$\text{s.t.: } \sum_{j \in N_i} x_j - z_i \geq 0 \forall i \in I \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.6)$$

$$x_j \in \{0,1\} \forall j \in J \quad (3.7)$$

$$z_i \in \{0,1\} \forall i \in I \quad (3.8)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.4) αποτελεί η μεγιστοποίηση της συνολικής κάλυψης της ζήτησης. Ο περιορισμός (3.5) εξασφαλίζει ότι η ζήτηση στον κόμβο i δε θεωρείται καλυμμένη αν δε χωροθετηθεί εγκατάσταση σε μία από τις υποψήφιες θέσεις που καλύπτει τον κόμβο i . Ο περιορισμός (3.6) θέτει ένα όριο στον αριθμό των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν. Οι περιορισμοί (3.7) και (3.8) αναφέρονται στη δυαδική φύση των αποφάσεων χωροθέτησης και της κάλυψης της

ζήτησης των κόμβων, αντίστοιχα, ενώ τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι, οι περιορισμοί (3.5) και (3.7), επιτρέπουν την αντικατάσταση του περιορισμού (3.8) με $z_i \leq 1, \forall i \in I$, χωρίς απώλεια της γενικότητας.

Όπως και στο μοντέλο συνόλου κάλυψης (SCLP), έτσι και στο μοντέλο μέγιστης κάλυψης (MCLP) στην περίπτωση που οι εγκαταστάσεις χωροθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος των τόξων του δικτύου, τότε το δίκτυο μπορεί να τροποποιηθεί όπως προτείνεται από τους Church & Meadows (1979), και έτσι το πρόβλημα θα επιλυθεί με τη διατύπωση (3.4) – (3.8) που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το MCLP είναι και αυτό NP-hard (Megiddo et al., 1983), αλλά γενικά μπορεί να επιλυθεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας ευρετικούς αλγόριθμους. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για τα μοντέλα μέγιστης απόστασης, υπάρχουν κάποια σενάρια σχεδιασμού, όπου υπάρχει μια επιθυμητή απόσταση κάλυψης και μια μέγιστη απόσταση πέρα από τη οποία, η εξυπηρέτηση δεν είναι αποδεκτή. Για τέτοιου είδους προβλήματα, οι Church & ReVelle (1974), διατύπωσαν το maximal covering location problem με υποχρεωτικούς περιορισμούς εγγύτητας.

Με βάση τους προηγούμενους περιορισμούς και σύμφωνα με τα παρακάτω:

D_m = η μέγιστη απόσταση στην οποία μπορεί να βρίσκεται ένας κόμβος ζήτησης από μία εγκατάσταση που έχει δυνατότητα εξυπηρέτησης, και

$$M_i = \{j \mid d_{ij} \leq D_m\},$$

το MCLP με υποχρεωτικούς περιορισμούς εγγύτητας μπορεί να διατυπωθεί προσθέτοντας τον ακόλουθο περιορισμό στη διατύπωση (3.4) – (3.8):

$$\sum_{j \in M_i} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \tag{3.9}$$

Και τα δύο παραπάνω μοντέλα που σχολιάστηκαν, το SCLP και το MCLP, θεωρούν ότι η καλυπτόμενη απόσταση, D_c , είναι ένα σταθερό, προκαθορισμένο πρότυπο, το οποίο είναι σίγουρα σωστό σε πολλές περιπτώσεις σχεδιασμού εγκαταστάσεων. Ωστόσο, σε κάποιες άλλες περιπτώσεις, το D_c , αποτελεί το στόχο και όχι ένα σταθερό πρότυπο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χωροθέτηση δημόσιων εγκαταστάσεων, όπως δημόσιες υπηρεσίες, οι οποίες μπορεί να επιθυμούν να ελαχιστοποιήσουν τη μέγιστη απόσταση για λόγους ισότητας των πολιτών (Marsh & Schilling, 1994). Άλλες εγκαταστάσεις, όπως είναι τα σχολεία ή οι πυροσβεστικοί

σταθμοί, μπορεί να έχουν μια επιθυμητή απόσταση και μια άλλη απόσταση πέρα από την οποία η εξυπηρέτηση να είναι μη αποδεκτή. Τα μοντέλα που θα παρουσιαστούν παρακάτω απευθύνονται σε τέτοιες περιπτώσεις σχεδιασμού.

✓ Πρόβλημα p – Κέντρων (**P - Center Problem**)

Το μοντέλο p – Διακέντρων, (Hakimi, 1964, 1965) αντιμετωπίζει το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της μέγιστης απόστασης που απέχει κάθε κόμβος ζήτησης από την πλησιέστερη εγκατάσταση, με την προϋπόθεση ότι χωροθετείται ένας προκαθορισμένος αριθμός εγκαταστάσεων. Αποτελεί ένα από τα πιο γνωστά NP - hard διακριτά προβλήματα χωροθέτησης. Αποτελείται από p εγκαταστάσεις και την ανάθεση των πελατών σε αυτές για με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόστασης μεταξύ ενός πελάτη και της εγκατάστασης στην οποία έχει ανατεθεί (δηλαδή στην πλησιέστερη εγκατάσταση). Το μοντέλο αυτό έχει πολυάριθμες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα τη χωροθέτηση πυροσβεστικών σταθμών ή ασθενοφόρων, όπου η απόσταση από τις εγκαταστάσεις από τις οποίες θα ανατεθεί κάποιος πιθανός πελάτης θα πρέπει να είναι ελάχιστες. Ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν υπάρχει κάποια αρκετά ικανοποιητική ακριβής ή ευρετική μέθοδος η οποία να μπορεί να προσφέρει λύση σε περιπτώσεις προβλημάτων πολλών μεταβλητών. Επίσης, το μοντέλο αυτό είναι πιο δύσκολο να επιλυθεί από ό, τι το p – median problem (πρόβλημα p – διαμέσων), ένα άλλο βασικό διακριτό πρόβλημα χωροθέτησης το οποίο θα αναλυθεί παρακάτω.

Υπάρχουν αρκετές παραλλαγές του βασικού μοντέλου p - center. Το “vertex¹” p – center problem περιορίζει το σύνολο των υποψήφιων θέσεων χωροθέτησης στους κόμβους του δικτύου, ενώ το “absolute²” p – center problem επιτρέπει στις εγκαταστάσεις να χωροθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος των τόξων του δικτύου. Και οι δύο παραπάνω εκδοχές μπορεί να είναι είτε σταθμισμένες είτε μη σταθμισμένες. Στο μη σταθμισμένο μοντέλο, όλοι οι κόμβοι ζήτησης επεξεργάζονται ισοδύναμα. Αντίθετα, στο σταθμισμένο μοντέλο, οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων ζήτησης και των εγκαταστάσεων πολλαπλασιάζονται επί ένα βάρος το οποίο σχετίζεται με τον κόμβο ζήτησης. Για παράδειγμα, το βάρος αυτό θα μπορούσε να

¹ vertex = κορυφή

² absolute = απόλυτος

αντιπροσωπεύει το πόσο σημαντικός είναι ένας κόμβος, ή ακόμα πιο συχνά το επίπεδο της ζήτησής του.

Με δεδομένα όλα τα παραπάνω αλλά και τις ακόλουθες μεταβλητές απόφασης:

W = η μέγιστη απόσταση μεταξύ του κόμβου ζήτησης και της εγκατάστασης στην οποία έχει ανατεθεί

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{στην περίπτωση που ο κόμβος ζήτησης } i \text{ έχει ανατεθεί σε} \\ & \text{εγκατάσταση του κόμβου } j \\ 0 & \text{στην αντίθετη περίπτωση} \end{cases}$$

το p – center problem μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\text{Minimize } W \tag{3.10}$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in J} x_j = p \tag{3.11}$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \tag{3.12}$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \tag{3.13}$$

$$W - \sum_{j \in J} h_j d_{ij} y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I \tag{3.14}$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \tag{3.15}$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \tag{3.16}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.10) έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόστασης σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση μεταξύ κάθε κόμβου ζήτησης και της πλησιέστερης σε αυτόν εγκατάστασης με δυνατότητα εξυπηρέτησης. Ο περιορισμός (3.11) ορίζει ότι πρόκειται να χωροθετηθούν p εγκαταστάσεις. Ο περιορισμός (3.12) εξασφαλίζει ότι κάθε κόμβος ζήτησης θα πρέπει να ανατεθεί σε μία ακριβώς εγκατάσταση, ενώ ο περιορισμός (3.13) περιορίζει τις αναθέσεις των κόμβων ζήτησης μόνο σε εγκαταστάσεις που έχουν δυνατότητα εξυπηρέτησης. Ο περιορισμός (3.14) ορίζει το κατώτερο όριο της μέγιστης σταθμισμένης απόστασης σε σχέση με τη ζήτηση, η οποία ελαχιστοποιείται. Ο περιορισμός (3.15) ορίζει τη μεταβλητή χωροθέτησης ως δυαδική. Ο περιορισμός (3.16) εξασφαλίζει πως η ζήτηση σε έναν

κόμβο μπορεί να ανατεθεί μόνο σε μια εγκατάσταση και μπορεί να αντικατασταθεί με $y_{ij} \geq 0 \forall i \in I, j \in J$ επειδή ο περιορισμός (3.13) εγγυάται ότι $y_{ij} \leq 1$. Στην περίπτωση που κάποια y_{ij} είναι κλασματικά, μπορεί απλά ο κόμβος i να ανατεθεί στην πλησιέστερη σε αυτόν εγκατάσταση με δυνατότητα εξυπηρέτησης.

Το πρόβλημα p – διακέντρων, μπορεί να επιλυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο για σταθερές τιμές του p , αλλά είναι NP – hard για μεταβλητές τιμές του p (Garey & Johnson, 1979). Ο Daskin (2000) έδειξε πως το maximal covering problem μπορεί να αντικαταστήσει αποτελεσματικά το set covering model ως ένα υπο – πρόβλημα για την επίλυση του μη σταθμισμένου vertex p – center προβλήματος.

✓ Πρόβλημα p - Διασποράς (The p –Dispersion Problem - PDP)

Τα μοντέλα τα οποία σχολιάστηκαν παραπάνω, αφορούν την απόσταση μεταξύ των νέων εγκαταστάσεων και της ζήτησης και παραδέχονται πως η εγγύτητα σε μία εγκατάσταση είναι επιθυμητή. Αντίθετα, το p – dispersion problem (PDP), διαφέρει από τα παραπάνω μοντέλα σε δύο σημεία (Kuby, 1987). Αρχικά, αφορά μόνο την απόσταση μεταξύ των νέων εγκαταστάσεων, και δεύτερον, βασικός στόχος αποτελεί η μεγιστοποίηση της ελάχιστης απόστασης μεταξύ κάθε ζεύγους εγκαταστάσεων.

Για τη διατύπωση του μοντέλου αυτού απαιτείται μια συμπληρωματική μεταβλητή (M) αλλά και μια μεταβλητή απόφασης (D):

M = μια μεγάλη σταθερά

D = η ελάχιστη απόσταση μεταξύ κάθε ζεύγους εγκαταστάσεων

Έτσι, με βάση τα παραπάνω, το μοντέλο αυτό μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\text{Maximize } D \quad (3.17)$$

$$\text{s.t.: } \sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.18)$$

$$D + (M - d_{ij})x_i + (M - d_{ij})x_j \leq 2M - d_{ij} \quad \forall i, j \in J, i < j \quad (3.19)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.20)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.17) στην περίπτωση αυτή, αποτελεί η μεγιστοποίηση της απόστασης μεταξύ των δύο πιο κοντινών εγκαταστάσεων. Ο

περιορισμός (3.18) ορίζει ότι οι p εγκαταστάσεις θα χωροθετηθούν. Ο περιορισμός (3.19) ορίζει τον ελάχιστο διαχωρισμό μεταξύ κάθε ζεύγους εγκαταστάσεων, ενώ ο περιορισμός (3.20) αποτελεί έναν τυπικό περιορισμό πληρότητας. Στην περίπτωση που x_i ή x_j είναι μηδέν, ο περιορισμός (3.19) δεν είναι δεσμευτικό, ενώ στην περίπτωση που και οι δύο είναι ίσοι με 1, τότε ο περιορισμός αυτός ισοδυναμεί με $D \leq d_{ij}$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η μεγιστοποίηση του D να οδηγεί στη μεγαλύτερη δυνατή μεγιστοποίηση της μικρότερης απόστασης μεταξύ των εγκαταστάσεων.

3.1.2 Μοντέλα Συνολικής ή Μέσης Απόστασης (Total or Average Distance Models)

Πολλές από τις περιπτώσεις προβλημάτων χωροθέτησης εγκαταστάσεων τόσο του δημόσιου όσο και του ιδιωτικού τομέα, αφορούν τη συνολική απόσταση μεταξύ των εγκαταστάσεων και των κόμβων ζήτησης. Ένα παράδειγμα του δημόσιου τομέα, θα μπορούσε να αποτελέσει η χωροθέτηση ενός δικτύου παροχών εξυπηρέτησης, με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της συνολικής απόστασης, ενώ στον ιδιωτικό τομέα, η χωροθέτηση παραγωγικών μονάδων. Η προσέγγιση αυτή μπορεί αν θεωρηθεί αρκετά αποτελεσματική, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως στις οποίες βασικός στόχος αποτελούσε η ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόστασης.

✓ Πρόβλημα p - Διαμέσων (P – Median Problem)

Ένα τυπικό μοντέλο αυτής της κατηγορίας μπορεί να αποτελέσει το p – median problem ή πρόβλημα p - διαμέσων (Hakimi, 1964, 1965). Το μοντέλο αυτό, εντοπίζει τις τοποθεσίες των p – εγκαταστάσεων με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνολική απόσταση σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση μεταξύ των κόμβων ζήτησης και των εγκαταστάσεων στις οποίες αυτοί έχουν ανατεθεί.

Το μοντέλο αυτό μπορεί να διατυπωθεί όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (3.21)$$

$$\text{s.t.: } \sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.22)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.23)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.24)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.25)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.26)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.21) του προβλήματος αυτού, αποτελεί η ελαχιστοποίηση της συνολικής απόστασης σταθμισμένης ως προς τη ζήτηση. Οι περιορισμοί (3.22), (3.23) και (3.24) είναι ακριβώς ίδιοι με τους (3.11), (3.12) και (3.13), που περιγράφηκαν για τη διατύπωση του p – center προβλήματος, ενώ οι περιορισμοί (3.25) και (3.26) είναι ίδιοι με τους (3.15) και (3.16). Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στο p – center problem για τον περιορισμό (3.16), έτσι και εδώ ο περιορισμός (3.26) μπορεί να παραλειφθεί.

Η παραπάνω διατύπωση, σύμφωνα με τους Toregas & ReVelle (1972) ελαχιστοποιεί ακόμα τη μέση απόσταση μεταξύ των εγκαταστάσεων και της ζήτησης. Θεωρεί όμως ότι οι πιθανές τοποθεσίες εγκαταστάσεων αποτελούν κόμβοι του δικτύου. Όπως αναφέρθηκε για το p – center πρόβλημα, έτσι και το p -median μπορεί να επιλυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο για σταθερές τιμές του p , αλλά είναι NP – hard για μεταβλητές τιμές του p (Garey & Johnson, 1979).

✓ Πρόβλημα Σταθερού Κόστους (Fixed Charge Location Problem – FCLP)

Το p – median problem κάνει τρεις βασικές παραδοχές που συχνά δεν είναι κατάλληλες για κάποια προβλήματα χωροθέτησης (Hamacher&Drezner, 2002). Αρχικά, θεωρεί πως κάθε πιθανή θέση έχει τα ίδια σταθερά κόστη για τη χωροθέτηση μιας εγκατάστασης σε αυτή. Επιπλέον, θεωρεί πως οι εγκαταστάσεις που θα χωροθετηθούν δεν έχουν την ικανότητα εξυπηρέτησης σε σχέση με τη ζήτηση που μπορούν να εξυπηρετήσουν. Στη βιβλιογραφία, τέτοιου είδους προβλήματα αναφέρονται ως “uncapacitated problems”, δηλαδή προβλήματα περιορισμένης χωρητικότητας σε σύγκριση με τα “capacitated problems”, τα οποία δεν έχουν περιορισμένη χωρητικότητα. Τέλος, το p – median problem, υποθέτει πως κάποιος γνωρίζει εκ των προτέρων (a priori) τον αριθμό των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν (p εγκαταστάσεις) (Hamacher&Drezner, 2002).

Αντίθετα, το πρόβλημα σταθερού κόστους δίνει τη δυνατότητα «χαλάρωσης» των τριών αυτών παραδοχών. Ο αντικειμενικός στόχος του μοντέλου αυτού είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εγκατάστασης και μετακίνησης. Έτσι, καθορίζει το βέλτιστο αριθμό και τις θέσεις των εγκαταστάσεων, όπως επίσης και τις αναθέσεις της ζήτησης σε κάθε εγκατάσταση. Επιπλέον, χάρη στο γεγονός ότι οι εγκαταστάσεις έχουν ικανότητες εξυπηρέτησης, το μοντέλο αυτό, δίνει τη δυνατότητα η ζήτηση να μην ανατεθεί απαραίτητα στην πλησιέστερη εγκατάσταση, όπως γινόταν στα προηγούμενα μοντέλα που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο.

Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα δεδομένα και τις παρακάτω μεταβλητές:

f_j = σταθερό κόστος χωροθέτησης μιας εγκατάστασης σε μια υποψήφια θέση j ,

c_j = η χωρητικότητα μιας εγκατάστασης στην υποψήφια θέση j και

a = το κόστος ανά μονάδα ζήτησης ανά μονάδα απόστασης,

το “capacitated” fixed location problem μπορεί να διατυπωθεί ως εξής (Balinski, 1965):

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} f_j x_j + a \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (3.27)$$

$$\text{s.t.: } \sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.28)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.29)$$

$$\sum_{j \in J} h_i y_{ij} - C_j x_j \leq 0 \quad \forall i \in I \quad (3.30)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.31)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.32)$$

Στο πρόβλημα σταθερού κόστους, στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.27) αποτελεί η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του σταθερού κόστους χωροθέτησης των εγκαταστάσεων και του συνολικού κόστους μετακίνησης που πρέπει να εξυπηρετηθεί. Πιο αναλυτικά, ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.27) αναφέρεται σε απόσταση σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση. Ο περιορισμός (3.30)

απαγορεύει η συνολική ζήτηση που θα ανατεθεί σε μια εγκατάσταση να υπερβαίνει τη χωρητικότητα της εγκατάστασης (c_j). Οι περιορισμοί (3.28), (3.29), (3.31) και (3.32) λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο με τους αντίστοιχους περιορισμούς στα προβλήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Με χαλάρωση του περιορισμού (3.32), επιτρέπεται η ανάθεση της ζήτησης σε έναν κόμβο σε πολλαπλές εγκαταστάσεις.

Επειδή ο περιορισμός (3.30) θα αναγκάσει τη ζήτηση να ανατεθεί μόνο σε εγκαταστάσεις με δυνατότητες εξυπηρέτησης, ο περιορισμός (3.29) δεν είναι απαραίτητος σε αυτή τη διαμόρφωση. Ωστόσο, συμπεριλαμβανομένου του περιορισμού (3.29), ενισχύεται σημαντικά η «χαλάρωση» του γραμμικού προγραμματισμού του μοντέλου. Επιπλέον, ο περιορισμός (3.32) ορίζει ότι όλη η ζήτηση σε μία θέση θα πρέπει να ανατεθεί σε μία εγκατάσταση. Επίσης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ζήτηση μπορεί να εξυπηρετείται από μία εγκατάσταση η οποία δεν είναι απαραίτητα η πλησιέστερή της, και αυτό συμβαίνει λόγω των παραγωγικών ικανοτήτων των εγκαταστάσεων. Στην περίπτωση που στη διατύπωση του μοντέλου που παρουσιάζεται, δε συμπεριληφθεί ο περιορισμός (3.30), τότε το μοντέλο θα μετατραπεί σε “uncapacitated fixed charge location problem”, (UFCLP), και η ζήτηση σε κάθε κόμβο θα μπορεί να εξυπηρετηθεί εξ’ ολοκλήρου από την πλησιέστερη σε αυτήν εγκατάσταση (Silva & De la Figuera, 2007).

✓ Πρόβλημα Χωροθέτησης Πλήμνης (Hub Location Problem)

Στην πρώιμη βιβλιογραφία της επιχειρησιακής έρευνας, ως πλήμνη (hub) αναφέρεται είτε μια κεντρική εγκατάσταση, είτε με μια κεντρική αποθήκη. Έτσι, ένας κόμβος πλήμνης αποτελεί ουσιαστικά μια κεντρική εγκατάσταση η οποία χωροθετείται στο κέντρο ενός συνόλου περιοχών που παρουσιάζουν ζήτηση για κάποια μεταφορά. Ωστόσο, ο Goldman (1969) όρισε μια εγκατάσταση πλήμνης ως ένα «κέντρο». Στη μελέτη του, χωροθέτησε εγκαταστάσεις σε θέσεις «κέντρα», με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μετακίνησης, και με τον τρόπο αυτό διατυπώθηκε ένα γενικό πρόβλημα χωροθέτησης πλημνών.

Όλων των ειδών οι μεταφορές απαιτούν ένα δίκτυο από διασυνδέσεις μεταξύ των πηγών και των προορισμών. Ένα τέτοιο είδος δικτύων είναι το δίκτυο κόμβων πλήμνης που αναφέρθηκε παραπάνω, το οποίο έχει σχεδιαστεί με σκοπό την εξυπηρέτηση όλων των μεταφορών μεταξύ πολλαπλών πηγών και προορισμών. Σημαντική εφαρμογή των δικτύων αυτών αποτελούν οι αεροπορικές μεταφορές, όπου

όρος «κόμβος πλήμνη» ή απλά «πλήμνη» λαμβάνεται για να ορίσει μια γεωγραφική περιοχή, ταξινομημένη βάσει του ποσοστού των συνολικών επιβατών σε εκείνη την περιοχή.

Οι πλήμνες επιτρέπουν την κατασκευή ενός δικτυού όπου οι απευθείας συνδέσεις μεταξύ μιας πηγής και του προορισμού της μπορούν να αντικατασταθούν με λιγότερες έμμεσες συνδέσεις. Πολλά μοντέλα (π.χ. O'Kelly, 1986a, 1986b; Campbell, 1990, 1994) έχουν διατυπωθεί για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων χωροθέτησης. Τα περισσότερα από αυτά τα μοντέλα έχουν ως στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους σε συνάρτηση με την απόσταση. Ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης αυτών των προβλημάτων είναι αρκετά μεγάλος, όπως και οι λύσεις σε αυτά τα υπο - προβλήματα είναι ιδιαίτερα αλληλοεξαρτώμενες.

Το βασικό p - hub μοντέλο χωροθέτησης έχει διατυπωθεί χρησιμοποιώντας τους παρακάτω συμβολισμούς:

h_{ij} = ο αριθμός των μονάδων ροής μεταξύ των κόμβων i και j ,

c_{ij} = το μοναδιαίο κόστος μετακίνησης μεταξύ των κόμβων i και j ,

a = συντελεστής μείωσης ($a \leq 1$)

και τις ακόλουθες μεταβλητές απόφασης:

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{στην περίπτωση που μία πλήμνη χωροθετείται στον κόμβο } j \\ 0 & \text{στην αντίθετη περίπτωση} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{στην περίπτωση που η ζήτηση στον κόμβο } i \text{ έχει ανατεθεί σε μία} \\ & \text{πλήμνη που βρίσκεται στον κόμβο } j \\ 0 & \text{στην αντίθετη περίπτωση} \end{cases}$$

ως εξής:

$$\text{Minimize: } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} h_{ij} \left(\sum_{k \in N} c_{ik} y_{ik} + \sum_{m \in N} c_{jm} y_{jm} + a \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} c_{kl} y_{ik} y_{jl} \right) \quad (3.33)$$

$$\text{s.t.: } \sum_{j \in N} x_j = p \quad (3.34)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.35)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.36)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.37)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.38)$$

Στη διατύπωση του μοντέλου αυτού, στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.33) είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του κόσμους μετακίνησης από μία πηγή σε μία πλήμνη, το κόστος από έναν προορισμό σε μια πλήμνη, αλλά και το κόστος μεταξύ των δύο πλημνών. Οι περιορισμοί (3.34) έως (3.38) είναι ακριβώς ίδιοι με τους περιορισμούς (3.22) έως και (3.27) του p – median μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, ο περιορισμός (3.34) ορίζει ότι επιλέγονται ακριβώς p πλήμνες και ο περιορισμός (3.35) απαιτεί ότι κάθε κόμβος θα πρέπει να συνδέεται με μία ακριβώς πλήμνη. Πρακτικά όμως, μπορεί να «χαλαρώσει» αυτός ο περιορισμός και να είναι δυνατόν ροές από ιδιαίτερα μεγάλους κόμβους να εξυπηρετούνται από δύο ή περισσότερες πλήμνες.

Ακόμη και ένα μεσαίου μεγέθους πρόβλημα χωροθέτησης πλήμνης παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες στην επίλυσή του κατά το βέλτιστο τρόπο, και για το λόγο αυτό οι Ernst & Krishnamoorthy (1996) πρότειναν ευρετικούς αποτελεσματικούς αλγόριθμους για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων. Οι Kuby & Gray (1993) ανέλυσαν ένα δίκτυο αερομεταφορών με ένα μοντέλο χωροθέτησης πλήμνης.

Τέλος, υπάρχουν και κάποιες παραλλαγές του προβλήματος χωροθέτησης p -πλημνών. Ο Campbell στην εργασία του (1992) παρουσίασε τέσσερα μαθηματικά μοντέλα για τις παραλλαγές του προβλήματος αυτού, δηλαδή του προβλήματος εύρεσης και χωροθέτησης των πλημνών σε ένα δίκτυο σε συνδυασμό με την πλήρη ανάπτυξη του υπό μελέτη δικτύου. Με βάση κυρίως την αντικειμενική συνάρτηση κόστους, παρουσίασε τέσσερις διακριτές παραλλαγές του προβλήματος, τις οποίες ανέλυσε και για τις οποίες ανέπτυξε από ένα μαθηματικό μοντέλο. Οι υποκατηγορίες αυτές είναι:

- το πρόβλημα διάμεσου p -πλημνών (p -hub median problem),

- το πρόβλημα χωροθέτησης πλήμνης με περιορισμό στη χωρητικότητα (uncapacitated hub location problem),
- το πρόβλημα κέντρου p-πλημνών (p-hub center problem), και τέλος
- το πρόβλημα κάλυψης πλήμνης (hub covering problem)

✓ The Maxisum Location Problem

Τα μοντέλα μέσης απόστασης που παρουσιάστηκαν παραπάνω, θεωρούν ότι είναι επιθυμητό η χωροθέτηση των εγκαταστάσεων να γίνεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη ζήτηση. Το maxisum location problem αναζητά τις θέσεις των p εγκαταστάσεων έτσι ώστε η συνολική απόσταση, σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση μεταξύ των κόμβων ζήτησης και των εγκαταστάσεων στις οποίες ανατίθενται, να μεγιστοποιείται.

Αυτό το μοντέλο μπορεί να διατυπωθεί όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (3.39)$$

$$\text{s.t.: } \sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.40)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.41)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.42)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{i[k]_i} - x_{[m]_i} \geq 0 \quad \forall i \in I, m = 1, \dots, N-1 \quad (3.43)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.44)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.45)$$

Ο τρόπος με τον οποίο διατυπώνεται το maxisum location problem είναι όμοιος με αυτόν του p – median problem με δύο αξιοσημείωτες διαφορές. Την πρώτη αποτελεί ο στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.39), ο οποίος στο μοντέλο αυτό είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής απόστασης σταθμισμένης ως προς τη ζήτηση και όχι η ελαχιστοποίηση, όπως συμβαίνει στο p – median problem. Η επίπτωση όμως της

αντικειμενικής συνάρτησης στο μοντέλο που μελετάμε είναι ότι υποχρεώνει τη ζήτηση να ανατεθεί στην πιο απομακρυσμένη εγκατάσταση. Έτσι, στη διατύπωση αυτή έχει προστεθεί ο περιορισμός (3.43), ο οποίος επιβεβαιώνει ότι οι απαιτήσεις της ζήτησης ανατίθενται στη πλησιέστερη εγκατάσταση. Στον περιορισμό αυτό, ο $[k]_i$ αποτελεί το δείκτη της k πιο απομακρυσμένης υποψήφιας θέσης από τον κόμβο ζήτησης i . Ο περιορισμός (3.43) αναφέρει επίσης ότι αν η m πλησιέστερη εγκατάσταση στο κόμβο ζήτησης i έχει δυνατότητα εξυπηρέτησης, τότε η ζήτηση του κόμβου i θα πρέπει να ανατεθεί σ' αυτή την εγκατάσταση ή σε μια πιο κοντινή εγκατάσταση.

3.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μοντέλων Χωροθέτησης Σταθμών Φόρτισης

Ο σχεδιασμός ενός δικτύου σταθμών επαναφόρτισης, το πρόβλημα δηλαδή το οποίο αφορά την παρούσα εργασία έχει προταθεί να γίνει κυρίως μέσω μοντέλων βελτιστοποίησης και ευρετικών αλγορίθμων. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις για το πρόβλημα αυτό. Για παράδειγμα, οι (Feng et al., 2012) ανέπτυξαν μία μέθοδο βασισμένη στη διαίρεση του δικτύου έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες των χρηστών κατά τη διαδρομή τους προς τους σταθμούς επαναφόρτισης, ενώ επίσης το 2011 πρότειναν μία νέα μέθοδο η οποία βασίζεται στο σταθμισμένο διάγραμμα Voronoi, με τον ίδιο σκοπό και της προηγούμενης μεθόδου. Άλλο παράδειγμα αποτελεί η μέθοδος που χρησιμοποίησαν οι (Worley et al., 2012) οι οποίοι για το συγκεκριμένο πρόβλημα χωροθέτησης χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο που είχε ως στόχο να ελαχιστοποιήσει τα κόστη της μετακίνησης, των λειτουργιών της φόρτισης και της επένδυσης του δικτύου αυτού. Αντίθετα, οι (Chen et al. 2013) ανέπτυξαν ένα μοντέλο με σκοπό την ελαχιστοποίηση της απόστασης που θα διανύσουν οι χρήστες περπατώντας από τη θέση στάθμευσης έως τη θέση προορισμού.

Τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται έως σήμερα σε προβλήματα χωροθέτησης σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, δεν καθορίζουν τον αριθμό ή τον τύπο των φορτιστών για την εγκατάσταση σε κάθε θέση, παρά μόνο τη θέση των σταθμών. Ο προσδιορισμός του αριθμού των φορτιστών σε κάθε σταθμό είναι αρκετά σημαντικός, καθώς επηρεάζει το κόστος της υποδομής όπως επίσης και τον αριθμό των οχημάτων που αυτός εξυπηρετεί. Κατ' αυτόν τον τρόπο, γίνεται αντιληπτό πως

είναι πιθανό να απαιτούνται πολλαπλοί σταθμοί επαναφόρτισης σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία έτσι ώστε να μπορούν να εξυπηρετήσουν ακόμα και μεγάλη ροή.

Επιπλέον, στις περισσότερες περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί μέχρι σήμερα σχετικά με την επιλογή θέσεων εγκατάστασης σταθμών επαναφόρτισης σε αστικές περιοχές, επιλέγονται τοποθεσίες οι οποίες, ενώ συνήθως είναι εύκολα ορατές, συχνά επιφέρουν ανεπαρκείς λύσεις για τις καθημερινές ανάγκες φόρτισης των ηλεκτρικών ταξί. Η μεγάλη χρονική διάρκεια που απαιτεί η επαναφόρτισή τους, σε συνδυασμό με τη μειωμένη αυτονομία τους, καθιστά τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα χωροθέτησης ακατάλληλα για τις συνθήκες των αστικών περιοχών.

Για το λόγο αυτό, μία νέα προσέγγιση για την επιλογή καταλληλότερων θέσεων δημόσιων σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί στις αστικές περιοχές, η οποία περιγράφει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διαδικασίας επαναφόρτισης των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων και αξιολογεί τα αναμενόμενα αποτελέσματα της χωροθέτησης ενός σταθμού επαναφόρτισης σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, είναι αυτή που έγινε από τους Giménez et al. (2014). Καθοριστικό ρόλο για την προσέγγιση αυτή ασκεί ακόμη ο αριθμός των κατοίκων, των εργαζομένων ή των καθημερινών καταναλωτών σε μια περιοχή, ώστε να εκτιμηθεί η σημασία της κάθε περιοχής, όπως επίσης και ο χρόνος κάθε δραστηριότητας, αλλά και το επίπεδο των δυνητικών πελατών.

Στη μέθοδο αυτή, αρχικά γίνεται μία ανάλυση των χαρακτηριστικών φόρτισης των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία έχουν συλλεχθεί ύστερα από επισκόπηση της βιβλιογραφίας και της αγοράς, και η οποία επιτρέπει την αξιολόγηση των καθημερινών αναγκών φόρτισης. Το επόμενο τμήμα αποτελεί η εφαρμογή ενός μοντέλου χωροθέτησης – βελτιστοποίησης, το οποίο να μεγιστοποιεί την πρόσβαση του πληθυσμού στους σταθμούς αυτούς, και κατά συνέπεια την πιθανή χρήση τους, και τέλος μία εκτίμηση των δυνητικών πελατών μέσα από τη μελέτη των κοινωνικοοικονομικών χαρακτηριστικών των χρηστών. Μερικά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου προβλήματος χωροθέτησης αυτής της προσέγγισης αποτελούν ο απαιτούμενος χρόνος φόρτισης, η ευκολία στην πρόσβαση και οι δυνατότητες φόρτισης.

Έπειτα, χρησιμοποιείται το maximal gradual covering location model, το οποίο με απώτερο σκοπό να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη του δημόσιου δικτύου φόρτισης και να

επιλεγεί η βέλτιστη θέση για ένα συγκεκριμένο αριθμό σταθμών. Το μοντέλο αυτό μεγιστοποιεί ταυτόχρονα και τα οφέλη των χρηστών, αυξάνοντας τις ευκαιρίες πρόσβασης στους σταθμούς επαναφόρτισης, ενώ τέλος δίνει τη δυνατότητα αύξησης της δυναμικής χρήσης των σταθμών αυτών. Τα μοντέλα κάλυψης, όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην προσέγγιση που αναφέρθηκε, παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά από τους Church & ReVelle (1974), και έχουν εφαρμοστεί πρόσφατα σε προβλήματα χωροθέτησης σταθμών επαναφόρτισης εναλλακτικών καυσίμων. Τα δεδομένα που απαιτούνται στην επίλυση του maximal gradual covering location model είναι ο αριθμός των κατοίκων οι οποίοι δεν έχουν πρόσβαση σε κάποιο ιδιωτικό χώρο στάθμευσης, των καθημερινών αγοραστών, ή των επισκεπτών σε ψυχαγωγικές δραστηριότητες, καθώς και ορισμένα κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά των χρηστών αυτών.

Μία άλλη ενδιαφέρουσα μέθοδος για το ίδιο πρόβλημα χωροθέτησης, είναι αυτή που πρότειναν Cavadas et al. (2014). Σε αυτή, λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη δυνατότητα εξυπηρέτησης κάθε πιθανής θέσης για την εγκατάσταση ενός σταθμού επαναφόρτισης, σχετικά με τον αριθμό των θέσεων που ο κάθε ένας από αυτούς μπορεί να διαθέτει, καθώς και με την απόσταση της θέσης αυτής από κάθε κόμβο ζήτησης, η οποία μετριέται σε χρόνο με τα πόδια. Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, αναπτύσσεται ένα μοντέλο με βάση τα δεδομένα στάθμευσης, θεωρώντας ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια στάθμευσης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η πιθανότητα φόρτισης, ενώ επίσης λαμβάνεται υπόψη η σχέση μεταξύ της ζήτησης στα διάφορα σημεία. Ένα παράδειγμα μπορεί να αποτελέσει η περίπτωση που ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να φορτιστεί στο σπίτι, τότε η πιθανότητα να χρειάζεται φόρτιση στη δουλειά είναι σημαντικά μειωμένη. Η μέθοδος αυτή, εφαρμόστηκε στην Coimbra, μία πόλη της Πορτογαλίας, η οποία διαθέτει ήδη δίκτυο σταθμών φόρτισης, και σκοπός της αποτελεί η μεγιστοποίηση του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων που να ικανοποιούνται κάτω από έναν συγκεκριμένο προϋπολογισμό για τη δημιουργία των σταθμών.

Η προσέγγιση αυτή, αρχικά χρησιμοποιεί μία ήδη υπάρχουσα έρευνα έτσι ώστε να εξάγει δεδομένα στάθμευσης και να δημιουργήσει ένα πλέγμα ζήτησης, και έπειτα εφαρμόζεται το μοντέλο το οποίο θα δώσει τη βέλτιστη θέση των σταθμών φόρτισης για ολόκληρη την πόλη που μελετάται έτσι ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση. Το μοντέλο αυτό, κάνει δύο βασικές παραδοχές. Αρχικά, υποθέτει πως ο μέσος αριθμός

των φορών που ένα ηλεκτρικό όχημα φορτίζεται κατά τη διάρκεια μίας μέρας είναι αριθμός για όλα τα ηλεκτρικά οχήματα. Κατά δεύτερον, θεωρεί ότι η πιθανότητα ένα όχημα να φορτίζεται κατά τη διάρκεια μίας από τις στάσεις του σε μία μέρα είναι ανάλογη με το χρόνο που μένει σταθμευμένο στη θέση αυτή.

Η μέθοδος αυτή για την εκτίμηση της ζήτησης για φόρτιση, βασίζεται στο χρόνο στάθμευσης κάθε θέσης αλλά ταυτόχρονα λαμβάνει υπόψη τη ζήτηση της μεταφοράς για τις μετακινήσεις μεταξύ των διάφορων θέσεων στάθμευσης. Με τον τρόπο αυτό, το μοντέλο μπορεί να ορίσει ποια θέση θα είναι πιο ευεργετική ώστε να χωροθετηθεί ένας σταθμός επαναφόρτισης, χωρίς όμως απαραίτητα να αρνείται μέρος της ζήτησης από άλλες πιθανές θέσεις. Έτσι, μπορεί να διατυπωθεί ένα μοντέλο βελτιστοποίησης το οποίο έχει ως στόχο να μεγιστοποιήσει τη ζήτηση που εξυπηρετείται κάτω από έναν καθορισμένο προϋπολογισμό. Έπειτα, το μοντέλο αυτό μπορεί να βελτιωθεί, λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα μετακίνησης της ζήτησης μεταξύ των διάφορων θέσεων και προσθέτοντας χρονικά διαστήματα στην τελική διατύπωση, καθώς η ζήτηση σε μία θέση υφίσταται πολλές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια μιας μέρας. Η εφαρμογή αυτή, εξειδικεύεται για την περίπτωση της πόλης Coimbra, όπως αναφέρθηκε.

3.3 Συμπεράσματα Ανασκόπησης

Έχοντας παρουσιάσει οκτώ βασικά μοντέλα χωροθέτησης, στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να επιλεγεί το κατάλληλο μοντέλο, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί και θα επιλυθεί για το πρόβλημα χωροθέτησης που απασχολεί την παρούσα διπλωματική εργασία, δηλαδή της χωροθέτησης σταθμών επαναφόρτισης των ηλεκτρικών ταξί στην Αττική.

Σκοπός της χωροθέτησης αποτελεί η μεγιστοποίηση του αριθμού των ηλεκτρικών ταξί που θα εξυπηρετούνται με το μικρότερο δυνατό κόστος και κάτω από ένα σταθερό προϋπολογισμό που έχει οριστεί για την κατασκευή των σταθμών. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη η μέγιστη ικανότητα εξυπηρέτησης κάθε πιθανής θέσης για την εγκατάσταση ενός σταθμού, με βάση τον αριθμό των πριζών που ο καθένας μπορεί να διαθέτει, αλλά και την απόσταση μεταξύ της θέσης αυτής και του κάθε σημείου ζήτησης. Τέλος, μεγάλης σημασίας αποτελεί η σχέση μεταξύ της ζήτησης στα διάφορα δυνατά σημεία. Δηλαδή, αν για παράδειγμα ένα ηλεκτρικό ταξί μπορεί

να επαναφορτιστεί σε ιδιωτικό χώρο, η πιθανότητα να χρειαστεί επαναφόρτιση σε κάποιο δημόσιο χώρο μειώνεται σημαντικά.

Έτσι λοιπόν, για την περιοχή της Αττικής, όπου βασικός σκοπός αποτελεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εγκατάστασης και μετακίνησης και ταυτόχρονα όσο το δυνατόν καλύτερη εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών ταξί, θα επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί και να επιλυθεί το πρόβλημα σταθερού κόστους (fixed charge location problem). Το μοντέλο αυτό δίνει τη δυνατότητα στη ζήτηση να ανατεθεί σε εγκατάσταση που δεν είναι απαραίτητα η πλησιέστερη και έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του σταθερού κόστους χωροθέτησης των εγκαταστάσεων και του συνολικού κόστους μετακίνησης της ζήτησης που πρέπει να εξυπηρετηθεί. Αρχικά θα γίνει μία έρευνα με βάση τα υπάρχοντα στοιχεία για την εξαγωγή δεδομένων, και έπειτα θα εφαρμοστεί το μοντέλο το οποίο θα δώσει τις βέλτιστες θέσεις για την εγκατάσταση των σταθμών για την περιοχή που επιλέχθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά διαμορφώνεται και επεκτείνεται το μαθηματικό μοντέλο που επιλέχθηκε – το πρόβλημα σταθερού κόστους (FCLP) - για την επίλυση του προβλήματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δηλαδή του προβλήματος χωροθέτησης σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί στην περιοχή της Αττικής που επιλέχθηκε. Έπειτα, παρουσιάζεται και αναλύεται ο γενετικός αλγόριθμος που θα αποτελέσει το εργαλείο επίλυσης του μαθηματικού μοντέλου, ενώ τέλος περιγράφεται το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του αλγορίθμου, το *Evolver*.

4.1 Διαμόρφωση του Προβλήματος Σταθερού Κόστους (Fixed Charge Location Problem - FCLP)

Στην ενότητα αυτή, και αφού επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το πρόβλημα σταθερού κόστους στο πρόβλημα χωροθέτησης της παρούσας εργασίας, αφού κρίθηκε ως το καταλληλότερο από όσα περιγράφηκαν, γίνεται προσπάθεια επέκτασης – τροποποίησης του μοντέλου, με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να συμπεριλάβει πρόσθετες πτυχές του προβλήματος χωροθέτησης σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί.

Βασικός στόχος του μαθηματικού μοντέλου FCLP, όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω αποτελεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εγκατάστασης και μετακίνησης, διατηρώντας σταθερό το κόστος της εγκατάστασης.

Έτσι, στην προσπάθεια επέκτασης της βασικής μορφής του Fixed Charge Location Problem (FCLP), θα προστεθεί ένας επιπλέον όρος, ο εξής:

$$\sum_{j \in J} (c_j x_j - \sum_{i \in I} y_{ij}) \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.1)$$

ο οποίος, δείχνει ουσιαστικά το ποσοστό της ζήτησης το οποίο δεν εξυπηρετείται από κάθε σταθμό φόρτισης

Για τη διατύπωση του προβλήματος αυτού, είναι απαραίτητος ο καθορισμός των παρακάτω δεδομένων και συνόλων:

I = το σύνολο της ζήτησης των κόμβων που συμβολίζονται με i ,

J = το σύνολο των υπογήφινων θέσεων εγκατάστασης που συμβολίζονται με j ,

f_j = το μοναδιαίο κόστος θέσης φόρτισης κάθε εγκατάστασης σε μια υποψήφια θέση j ,

c_j : η χωρητικότητα κάθε εγκατάστασης j

a = το κόστος ανά μονάδα ζήτησης ανά μονάδα απόστασης,

h_i = η ζήτηση στον κόμβο i ,

d_{ij} = η απόσταση μεταξύ του κόμβου ζήτησης i και της υποψήφιας θέσης j

και οι παρακάτω μεταβλητές απόφασης:

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{στην περίπτωση που η χωροθέτηση γίνει στη θέση } j \\ 0 & \text{εάν όχι} \end{cases}, \text{ και}$$

y_{ij} = το ποσοστό ζήτησης για κάθε κόμβο i

Με βάση τα παραπάνω, η μαθηματική διατύπωση της βασικής εκδοχής του προβλήματος FCLP, θα πάρει την παρακάτω μορφή:

Minimize

$$\sum_{j \in J} f_j c_j x_j + a \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} + \sum_{j \in J} (c_j x_j - \sum_{i \in I} y_{ij}) \quad (4.2)$$

με τους παρακάτω περιορισμούς:

$$\text{s.t.: } \sum_{j \in J} y_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (4.3)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (4.4)$$

$$\sum_{j \in J} h_i y_{ij} - C_j x_j \leq 0, \forall i \in I \quad (4.5)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (4.6)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \forall i \in I, j \in J \quad (4.7)$$

ενώ τέλος θα προστεθεί και ένας επιπλέον περιορισμός, ο εξής:

$$\sum_{i \in I} h_i \left(\sum_{j \in J} x_{ij} \right) \leq c_j, \forall j \in J \quad (4.8)$$

Στο πρόβλημα αυτό, στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (4.2) αποτελεί η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του σταθερού κόστους χωροθέτησης των εγκαταστάσεων, του συνολικού κόστους μετακίνησης που πρέπει να εξυπηρετηθεί καθώς και του ποσοστού της ζήτησης που δεν εξυπηρετείται από κάθε σταθμό φόρτισης.

Πιο αναλυτικά, ο πρώτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης (4.2), δείχνει το κόστος χωροθέτησης των εγκαταστάσεων σταθμισμένο ως προς τη χωρητικότητα που μπορεί να έχει κάθε σταθμός φόρτισης, ο δεύτερος όρος αναφέρεται σε απόσταση σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση, ενώ ο τρίτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης (4.2), όπως αναφέρθηκε παραπάνω, συμβολίζει το ποσοστό της ζήτησης που δεν εξυπηρετείται από κάθε σταθμό φόρτισης.

Ο περιορισμός (4.3) εξασφαλίζει ότι κάθε κόμβος ζήτησης θα πρέπει να ανατεθεί σε μία ακριβώς εγκατάσταση, ενώ ο περιορισμός (4.4) περιορίζει τις αναθέσεις των κόμβων ζήτησης μόνο σε εγκαταστάσεις που έχουν ικανότητα εξυπηρέτησης. Ο περιορισμός (4.5) απαγορεύει η συνολική ζήτηση που θα ανατεθεί σε μια εγκατάσταση να υπερβαίνει τη παραγωγική ικανότητα της εγκατάστασης (C_j). Ο περιορισμός (4.6) ορίζει τη μεταβλητή χωροθέτησης ως δυαδική, ενώ ο περιορισμός (4.7) εξασφαλίζει πως η ζήτηση σε έναν κόμβο μπορεί να ανατεθεί μόνο σε μία εγκατάσταση και μπορεί να αντικατασταθεί με $y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J$ επειδή ο περιορισμός (4.4) εγγυάται ότι $y_{ij} \leq 1$.

Με χαλάρωση του περιορισμού (4.7), επιτρέπεται η ανάθεση της ζήτησης σε έναν κόμβο σε πολλαπλές εγκαταστάσεις. Επειδή ο περιορισμός (4.5) αναγκάζει τη ζήτηση να ανατεθεί μόνο σε εγκαταστάσεις που έχουν ικανότητα εξυπηρέτησης, ο περιορισμός (4.4) δεν είναι απαραίτητος σε αυτή τη διαμόρφωση. Ωστόσο, στην περίπτωση που αυτός συμπεριληφθεί στη διαμόρφωση του μοντέλου, ενισχύεται σημαντικά η «χαλάρωση» του γραμμικού προγραμματισμού.

Εν συνεχεία, ο περιορισμός (4.7) ορίζει ότι όλη η ζήτηση σε μία θέση θα πρέπει να ανατεθεί σε μία εγκατάσταση. Επίσης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ζήτηση μπορεί να εξυπηρετείται από μία εγκατάσταση η οποία δεν είναι απαραίτητα η

πλησιέστερή της, και αυτό συμβαίνει λόγω των παραγωγικών ικανοτήτων των εγκαταστάσεων. Στην περίπτωση που στη διατύπωση του μοντέλου που παρουσιάζεται, δε συμπεριληφθεί ο περιορισμός (4.5), τότε το μοντέλο θα μετατραπεί σε “uncapacitated fixed charge location problem”, και η ζήτηση σε κάθε κόμβο θα μπορεί να εξυπηρετηθεί εξ’ ολοκλήρου από την πλησιέστερη σε αυτήν εγκατάσταση (Silva & De la Figuera, 2007).

Τέλος, ο περιορισμός (4.8), ορίζει ότι κάθε εγκατάσταση έχει συγκεκριμένη χωρητικότητα, η οποία δε μπορεί να ξεπεραστεί. Η χωρητικότητα αυτή συμβολίζεται με c_j , και έτσι, στη μαθηματική διατύπωση της βασικής εκδοχής του FCLP προστέθηκε ο περιορισμός (4.8), ο οποίος αφορά στη χωρητικότητα των σταθμών φόρτισης που πρόκειται να χωροθετηθούν.

4.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι

4.2.1 Η Έννοια του Γενετικού Αλγορίθμου

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms) αποτελούν μια μέθοδο αναζήτησης βέλτιστων λύσεων σε πολλά μαθηματικά προβλήματα, και ειδικότερα σε προβλήματα πολλών παραμέτρων, με σκοπό την εύρεση αποδεκτών, σύμφωνα με κάποιο κριτήριο λύσεων. Ανήκουν στο κλάδο της επιστήμης υπολογιστών, ενώ ο τρόπος λειτουργίας τους είναι εμπνευσμένος από τη βιολογία. Συγκεκριμένα, έκαναν την πρώτη εμφάνισή τους στις αρχές της δεκαετίας του 1950, όταν κάποιοι επιστήμονες από το χώρο της βιολογίας αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές με απώτερο σκοπό την προσομοίωση πολύπλοκων βιολογικών συστημάτων.

Η ανάπτυξη όμως των γενετικών αλγορίθμων, στη μορφή με την οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στις μέρες μας, πραγματοποιήθηκε τη δεκαετία του 1970 από τον John Holland (Holland 1975), και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan. Ο Holland αποδείχτηκε πρωτοπόρος των γενετικών αλγορίθμων, καθώς θεώρησε ότι κάποιες από τις ιδέες και λειτουργίες που εφαρμόζει η φύση στα συστήματά της θα μπορούσαν να έχουν αποτελέσματα, στην περίπτωση που αυτοί ενσωματώνονταν σε αλγορίθμους για υπολογιστές, με τρόπο τέτοιο, ώστε να προκύψουν αποδοτικές τεχνικές επίλυσης δύσκολων προβλημάτων. Αποτέλεσμα αυτής της εργασίας ήταν οι γενετικοί αλγόριθμοι, μια νέα, εξελισσόμενη και πολλά

υποσχόμενη τεχνική αναζήτησης και βελτιστοποίησης, που αποτελεί εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης.

Σημαντικοί γενετικοί αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν επίσης από τους Goldberg & Lingle (1985), Schmitt (1995) και Bean (1994), ενώ οι Colomi et al., (1991) είναι οι δημιουργοί του αλγόριθμου των μυρμηγκιών, οι οποίοι αποτύπωσαν αλγοριθμικά και προσομοίωσαν τον τρόπο με τον οποίο εξερευνούν τα μυρμήγκια το περιβάλλον. Τέλος βασισμένες στα νευρωνικά δίκτυα είναι οι έρευνες των Ghaziri (1996), Matsuyama (1991), και Schumann & Retzko (1995).

Η βασική ιδέα των γενετικών αλγορίθμων είναι η μίμηση των μηχανισμών της βιολογικής εξέλιξης που συναντώνται στη φύση, δηλαδή της διαδικασίας που οδηγεί στην αύξηση της ικανότητας ενός πληθυσμού να μπορεί να επιβιώσει σε κάποιο συγκεκριμένο περιβάλλον, που ονομάζεται Εξελικτική Προσαρμογή. Δανείζονται την ορολογία τους από τη σύγχρονη γενετική. Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται εκτενώς ως εργαλείο βελτιστοποίησης, και μάλιστα, αποσκοπούν στην εξυπηρέτηση πολύπλοκων και με πολύ αυστηρούς περιορισμούς προβλημάτων, τα οποία είναι δυνατόν να επιλυθούν μόνο προσεγγιστικά από τους σημερινούς υπολογιστές.

Ανήκουν σε μία ευρύτερη κατηγορία αλγορίθμων, τους εξελικτικούς αλγόριθμους (evolutionary algorithms), οι οποίοι με τη σειρά τους ανήκουν στη ευρύτερη ομάδα των μεθευρετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, ενώ η ευρεία χρήση τους οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο στοχαστικό χαρακτήρα που ακολουθούν κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας για τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης. Βέλτιστη, θεωρείται η λύση η οποία ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση, ενώ ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος (Καρλαύτης και Λαγαρός 2010). Παρόλα αυτά, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι και κατ' επέκταση οι γενετικοί, δε μπορούν να εγγυηθούν την εύρεση της βέλτιστης λύσης, αλλά μιας «καλής» λύσης.

Παρόλο που όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι γενετικοί αλγόριθμοι ανήκουν στην κατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων, διαφέρουν αρκετά από τους αλγορίθμους οι οποίοι εφαρμόζουν τυχαίες μεθόδους αναζήτησης και βελτιστοποίησης, αφού είναι έχουν τη δυνατότητα να συνδυάζουν στοιχεία τόσο από άμεσες όσο και από στοχαστικές τεχνικές αναζήτησης. Για το λόγο αυτό, θεωρούνται πιο «εύρωστοι» από τις υπάρχουσες μεθόδους άμεσης αναζήτησης. Επιπλέον, σε αντίθεση με τις άλλες

μεθόδους αναζήτησης οι οποίες επεξεργάζονται μόνο ένα σημείο του διαστήματος αναζήτησης, οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων πάνω στον οποίο πειραματίζονται. Με τον τρόπο αυτό, ένας γενετικός αλγόριθμος πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις και δίνει τη δυνατότητα καταγραφής και ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων.

Έπειτα, αξίζει να αναφερθούν τα πέντε βασικά τμήματα που περιλαμβάνει ένας γενετικός αλγόριθμος για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα, τα οποία είναι τα παρακάτω:

- αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος,
- δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων,
- μία αντικειμενική συνάρτηση αξιολόγησης η οποία κατατάσσει τις λύσεις σύμφωνα με την καταλληλότητά τους,
- γενετικούς τελεστές για τη δημιουργία λύσεων, και τέλος
- τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο γενετικός αλγόριθμος (όπως για παράδειγμα: μέγεθος του πληθυσμού, ή πιθανότητες εφαρμογές των γενετικών τελεστών).

Τα βασικά βήματα τα οποία ακολουθούνται συνήθως για την επίλυση προβλημάτων με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων, είναι τα ακόλουθα (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης 1999):

- Κωδικοποίηση της λύσης
- Καταρτισμός αρχικού πληθυσμού
- Αποτίμηση πληθυσμού μέσω συνάρτησης καταλληλότητας
- Επιλογή
- Διασταύρωση
- Μετάλλαξη

✓ **Κωδικοποίηση της λύσης**

Ένας από τους βασικότερους παράγοντες για μια επιτυχημένη βελτιστοποίηση ενός προβλήματος με χρήση γενετικών αλγορίθμων αποτελεί ο τρόπος με το οποίο γίνεται

αναπαράσταση και κωδικοποίηση των υποψήφιων λύσεων, ή αλλιώς, η γενετική αναπαράσταση των λύσεων. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αναπαράστασης των υποψήφιων λύσεων είναι η μετατροπή των μεταβλητών σχεδιασμού σε μια σειρά δυαδικών ψηφίων (0,1), τα οποία ονομάζονται δυαδικές συμβολοσειρές (bit strings). Επίσης είναι δυνατή και η αναπαράσταση των λύσεων με τη χρήση ακεραίων ή πραγματικών αριθμών ή ακόμη και χαρακτήρων, όπως τα γράμματα της αλφαβήτου. Υπάρχουν τέλος και πιο σύνθετοι τρόποι γενετικής αναπαράστασης όπως η δένδροειδής κωδικοποίηση. Η ακρίβεια της αναπαράστασης εξαρτάται από τον αριθμό των δυαδικών ψηφίων. Έτσι με την αύξηση των δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται, αυξάνεται και η ακρίβεια της αναπαράστασης της συνεχούς μεταβλητής.

✓ Καταρτισμός αρχικού πληθυσμού

Στο στάδιο αυτό δημιουργείται τυχαία ένας πληθυσμός από υποψήφιες πιθανές λύσεις. Κάθε μέλος του πληθυσμού αντιστοιχεί σε μια σειρά δυαδικών ψηφίων συγκεκριμένου μήκους που αποτελεί τη συνολική κωδικοποίηση που επιλέγεται για το σύνολο των μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος. Κάθε τέτοια σειρά δυαδικών ψηφίων ονομάζεται γονότυπος ή χρωμόσωμα. Ένα βασικό χαρακτηριστικό που πρέπει να ορίζεται πάντοτε κατά την επίλυση προβλημάτων με χρήση γενετικών αλγορίθμων αποτελεί το μέγεθος του πληθυσμού, του αριθμού δηλαδή των χρωμοσωμάτων που συνθέτουν κάθε πληθυσμό. Είναι καλό το μέγεθος του πληθυσμού να είναι επαρκώς μεγάλο και να παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου, καθώς πληθυσμοί οι οποίοι αποτελούνται από μικρό αριθμό χρωμοσωμάτων μειώνουν τις πιθανότητες πραγματοποίησης της διαδικασίας της διασταύρωσης με αποτέλεσμα να εξετάζεται ένα μικρό κομμάτι του χώρου αναζήτησης.

✓ Αποτίμηση πληθυσμού μέσω συνάρτησης καταλληλότητας

Η αντικειμενική συνάρτηση αποτελεί έναν από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες για τη διαδικασία αναζήτησης, γιατί ορίζει τη μορφή του χώρου αναζήτησης. Υπολογίζεται για κάθε μέλος του πληθυσμού και αποτελεί την προς βελτιστοποίηση συνάρτηση. Ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης ενός χρωμοσώματος που αντιστοιχεί σε κάποιες τιμές του συνόλου των παραμέτρων σχεδιασμού του προβλήματος είναι ανεξάρτητος από τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού κάθε

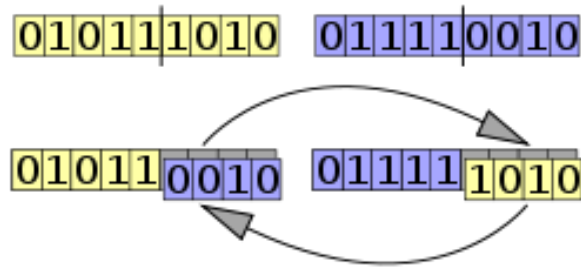
άλλου μέλους του πληθυσμού. Ωστόσο, η ποιότητα και η βαθμονόμηση ενός μέλους ορίζεται σε σχέση με τα υπόλοιπα μέλη του πληθυσμού.

✓ **Επιλογή**

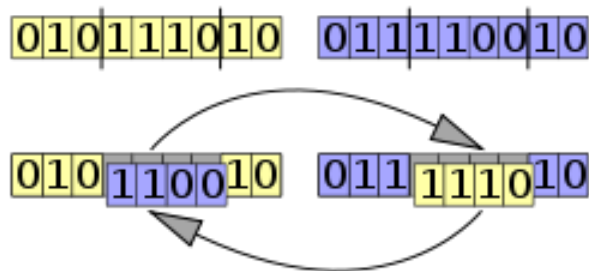
Σκοπός της διαδικασίας της επιλογής, δηλαδή του τρόπου με τον οποίο θα επιλεγθούν τα χρωμοσώματα κάθε πληθυσμού ώστε να παράγουν απογόνους, αποτελεί η προτίμηση των «ικανότερων» χρωμοσωμάτων, δηλαδή εκείνων των οποίων έχουν τις περισσότερες πιθανότητες επιβίωσης και κατά συνέπεια και αναπαραγωγής ώστε να δημιουργήσουν ακόμα πιο ικανούς απογόνους. Ωστόσο, πρέπει να διατηρούνται οι ισορροπίες καθώς υπάρχει ο κίνδυνος κατακλυσμού του πληθυσμού από ιδιαίτερα «ικανά» αλλά όχι βέλτιστα χρωμοσώματα, μειώνοντας έτσι τη διαφορετικότητα εντός του πληθυσμού που απαιτείται για την αλλαγή και την εξέλιξή του. Η διαδικασία της επιλογής, εφαρμόζεται στον αλγόριθμο μέσω του τελεστή επιλογής, ο οποίος διαλέγει τα χρωμοσώματα από τον πληθυσμό που θα αναπαραχθούν, και η διαδικασία αυτή αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στάδιο του αλγορίθμου.

✓ **Διασταύρωση**

Η διαδικασία της διασταύρωσης, η οποία εφαρμόζεται με χρήση του τελεστή διασταύρωσης, αποτελεί το βασικότερο διαχωριστικό χαρακτηριστικό των γενετικών αλγορίθμων από τους υπόλοιπους εξελικτικούς. Ο τελεστής διασταύρωσης επιλέγει τυχαία μια θέση, και ανταλλάσσει τις αλυσίδες των γονιδίων πριν ή/και μετά από αυτή τη θέση ανάμεσα στα δύο χρωμοσώματα για να παράγει δύο απογόνους. Η διασταύρωση ενός σημείου αποτελεί την πιο απλουστευμένη μορφή αυτής της διαδικασίας. Ωστόσο, χάρη στη μεγάλη αποτελεσματικότητά της, χρησιμοποιείται ευρέως και η διασταύρωση δύο σημείων, ενώ χρησιμοποιείται ακόμα και η ομοιόμορφη διασταύρωση.



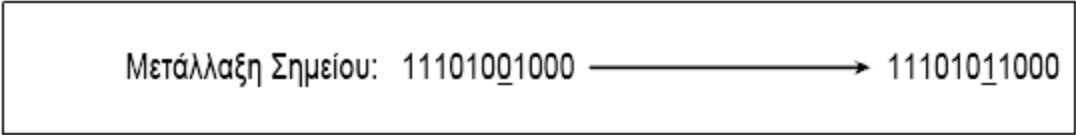
Σχήμα 4.1: Διασταύρωση ενός σημείου



Σχήμα 4.2: Διασταύρωση δύο σημείων

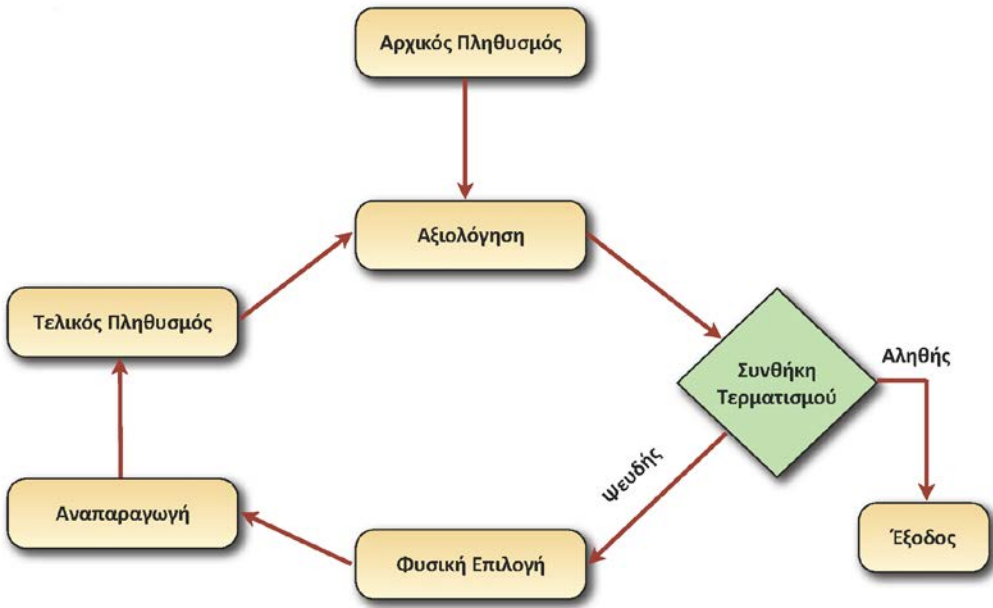
✓ **Μετάλλαξη**

Κατά τη διαδικασία της μετάλλαξης, ο τελεστής μετάλλαξης, επιλέγει με τυχαίο τρόπο κάποια γονίδια από τα χρωμοσώματα των μελών του πληθυσμού και μεταβάλλει την τιμή τους. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη γενετική αναπαραστάση με δυαδικό σύστημα, επιλέγονται ορισμένα δυαδικά ψηφία του πληθυσμού με μικρή πιθανότητα, η οποία συνήθως δε ξεπερνάει το 1%, και αντιστρέφονται, γίνεται δηλαδή μετατροπή του 0 σε 1 και αντίστροφα. Παρόλο που όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διαδικασία της διασταύρωσης αποτελεί το βασικό εργαλείο που διαφοροποιεί τους γενετικούς αλγορίθμους, η διαδικασία της μετάλλαξης είναι απαραίτητη γιατί εξασφαλίζει την ύπαρξης μιας μόνιμης κατάστασης σε κάποια θέση, και έτσι λειτουργεί υποστηρικτικά.

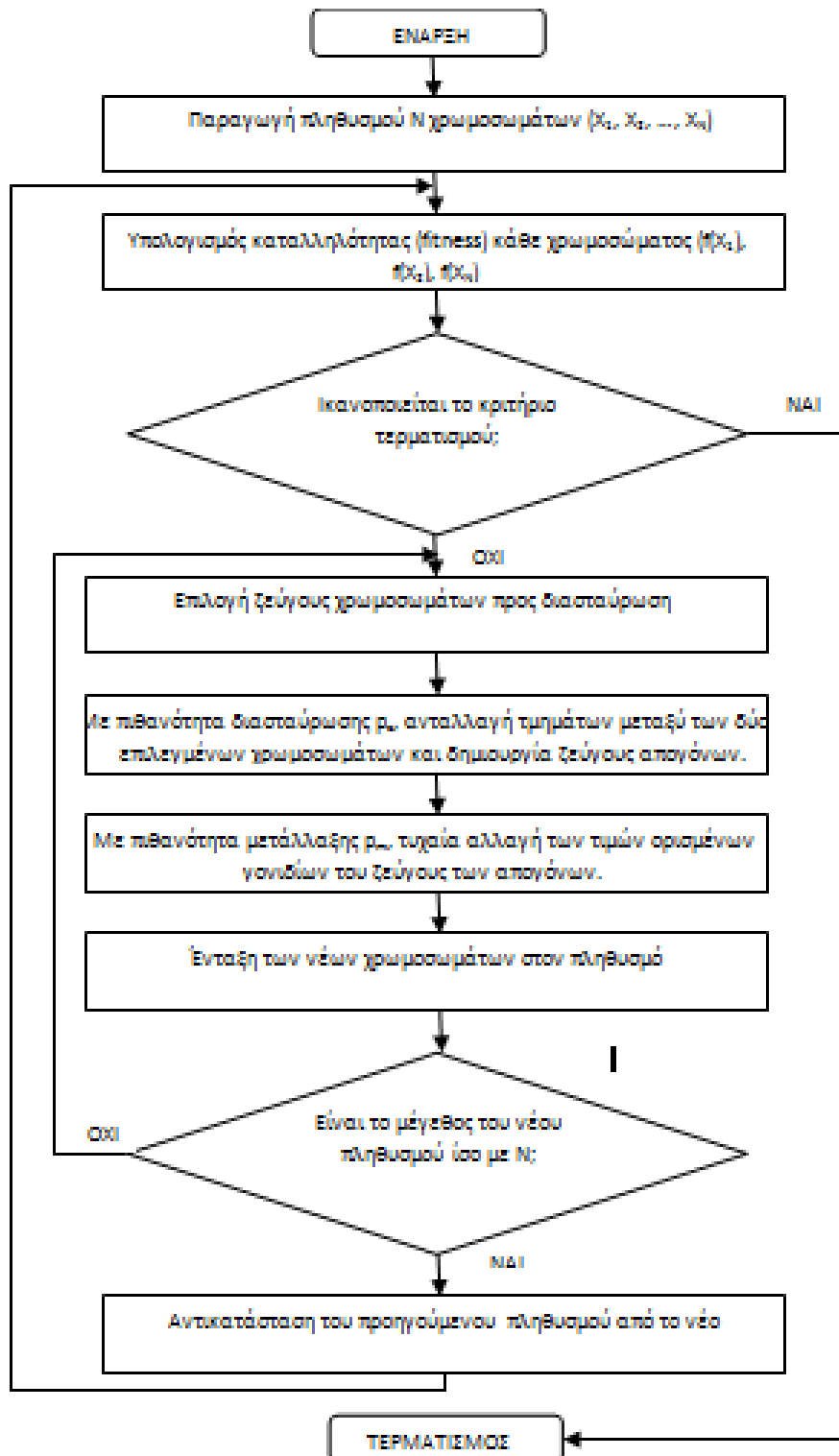


Σχήμα 4.3: Τελεστής μετάλλαξης ενός γονιδίου (Πηγή: Βλαχάβας κ.α., 2006)

Κλείνοντας, στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται ο βασικός εξελικτικός κύκλος ενός γενετικού αλγορίθμου, ο οποίος συνεχίζεται μέχρι την ικανοποίηση κάποιου κριτηρίου τερματισμού, ενώ στο Σχήμα 4.5 φαίνεται το διάγραμμα ροής ενός τυπικού γενετικού αλγορίθμου:



Σχήμα 4.4: Βασικός εξελικτικός κύκλος του γενετικού αλγορίθμου



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ροής τυπικού Γενετικού Αλγορίθμου (Πηγή: Μακρόπουλος και Ευστρατιάδης, 2011)

4.2.2 Πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα τα οποία προκύπτουν από τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων, είναι τα παρακάτω (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης 1999):

- Έχουν τη δυνατότητα να επιλύουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Μάλιστα, η αποδοτικότητα των γενετικών αλγορίθμων αποτελεί ένα βασικό λόγο για τη χρησιμοποίησή τους. Μπορούν να αντιμετωπίσουν την επίλυση προβλημάτων με πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις, ενώ ακόμη συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις, δε δημιουργούν πρόβλημα στη χρήση των γενετικών αλγορίθμων, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.
- Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι, καθώς οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή.
- Για τη βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγορίθμους απαιτείται μόνο η γνώση της αντικειμενικής συνάρτησης και όχι πρόσθετων πληροφοριών. Αυτό σημαίνει πως δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους οι οποίες απαιτούν την ύπαρξη περιορισμών, με αποτέλεσμα να καθίστανται δύσκαμπτες και ακατάλληλες. Επίσης, οι γενετικοί αλγόριθμοι «επικοινωνούν» με το περιβάλλον τους μέσω της συνάρτησης «ικανότητας», χωρίς να ενδιαφέρονται για τη σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας, και με αυτό τον τρόπο εγγυάται η επιτυχία τους ανεξαρτήτως της σημασίας του προβλήματος, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως δεν υπάρχουν άλυτα προβλήματα για τους γενετικούς αλγορίθμους.
- Έχουν τη δυνατότητα να συνεργάζονται εύκολα με τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Αυτό συμβαίνει καθώς οι γενετικοί αλγόριθμοι δίνουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα, να μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πρόσθετο τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, χωρίς να απαιτούν τον επανασχεδιασμό τους. Επίσης, μπορούν να συνεργαστούν με τους υπάρχοντες κώδικες, καθώς χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της διαδικασίας ή της συνάρτησης που θα βελτιστοποιήσουν, χωρίς να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της στο σύστημα ή όλη δομή του συστήματος.

- Έχουν τη δυνατότητα να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Παρόλο που οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν μεγάλη ισχύ, σε ορισμένες περιπτώσεις προβλημάτων, δίνεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος γενετικού αλγορίθμου με διαφορετική μέθοδο, κάτι το οποίο συμβαίνει χάρη στην ευελιξία που προσφέρουν οι γενετικοί αλγόριθμοι.
- Μπορούν να εφαρμοστούν σε πολύ περισσότερα πεδία από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Το χαρακτηριστικό μάλιστα που τους δίνει αυτή τη δυνατότητα είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλήθος τομέων, όπως την οικονομία, το σχεδιασμό μηχανών ή ακόμα και την επίλυση μαθηματικών εξισώσεων.
- Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν τη μοναδική μέθοδο που εξερευνά το χώρο αναζήτησης και ταυτόχρονα εκμεταλλεύεται την ήδη επεξεργασμένη πληροφορία. Με το τυχαίο ψάξιμο γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου, αλλά δεν γίνεται εκμετάλλευση της πληροφορίας, ενώ με την αναζήτηση γίνεται καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας, αλλά όχι καλή εξερεύνηση, δύο ανταγωνιστικά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι επιθυμητό να συνυπάρχουν ταυτόχρονα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, κάτι το οποίο τους καθιστά αποδοτικούς και ελκυστικούς.
- Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού. Ένας γενετικός αλγόριθμος, σε κάθε του βήμα επεξεργάζεται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, καθώς κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Έχει υπολογιστεί ότι 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000. Έτσι, μπορούν να καλύψουν μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.
- Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση. Έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών, αφού εύκολα μπορούν να δεχτούν παράλληλη υλοποίηση. Το χαρακτηριστικό αυτό τους καθιστά ακόμη περισσότερο αποδοτικούς, ενώ σπανίως συναντάται στις παραδοσιακές μεθόδους.

4.2.3 Λόγοι Επιλογής των Γενετικών Αλγορίθμων ως Τεχνική Επίλυσης του Προβλήματος Χωροθέτησης

Η επίλυση προβλημάτων χωροθέτησης γενικότερα, και ειδικότερα της χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών ταξί στην περιοχή της Αττικής που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι αρκετά πολύπλοκη, και για το λόγο αυτό, η χρήση της μεθόδου των γενετικών αλγορίθμων, κρίνεται σημαντική. Επίσης, ένας άλλος λόγος επιλογής τους είναι τα ικανοποιητικά αποτελέσματα τα οποία δίνουν, τα οποία σε πολλές περιπτώσεις είναι καλύτερα από αυτά των παραδοσιακών μεθόδων, ενώ ακόμα παρατηρείται το γεγονός ότι οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζουν μικρή τυπική απόκλιση.

Επιπρόσθετα, η ανάγκη για μίας καλής ποιότητας λύση σε αποδεκτό χρόνο (Sáez et al., 2008), είναι ένας βασικός λόγος που επιλέχθηκε η χρήση τους. Συνήθως, οι υπολογιστικοί χρόνοι δεν υπερβαίνουν τα 30 λεπτά, ενώ μπορεί να παρατηρηθεί ακόμα το γεγονός ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος του προβλήματος, τόσο υπερτερεί η χρήση των γενετικών αλγορίθμων σε συγκριτικά με άλλες μεθόδους σε ό, τι αφορά στην εξοικονόμηση χρόνου.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι λοιπόν, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω πλεονεκτούν αισθητά στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που τους διαφοροποιούν από αυτές σύμφωνα με τον Goldberg (1989), είναι τα εξής:

- Οι γενετικοί αλγόριθμοι δουλεύουν με μια κωδικοποίηση ενός συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές του προβλήματος.
- Κάνουν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα, όπως συμβαίνει στις παραδοσιακές μεθόδους.
- Χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία, σε αντίθεση με πολλές μεθόδους αναζήτησης οι οποίες απαιτούν αρκετές βοηθητικές πληροφορίες για τη συνάρτηση που επεξεργάζονται.

- Τέλος, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς κανόνες αναζήτησης και όχι ντετερμινιστικούς, χωρίς όμως όλη η διαδικασία βασίζεται στην τύχη.

Τα τέσσερα παραπάνω χαρακτηριστικά συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό έτσι ώστε να έχουν οι Γενετικοί Αλγόριθμοι την ιδιότητα της «ευρωστίας» που αναφέρθηκε, σε σύγκριση με τις υπάρχουσες μεθόδους.

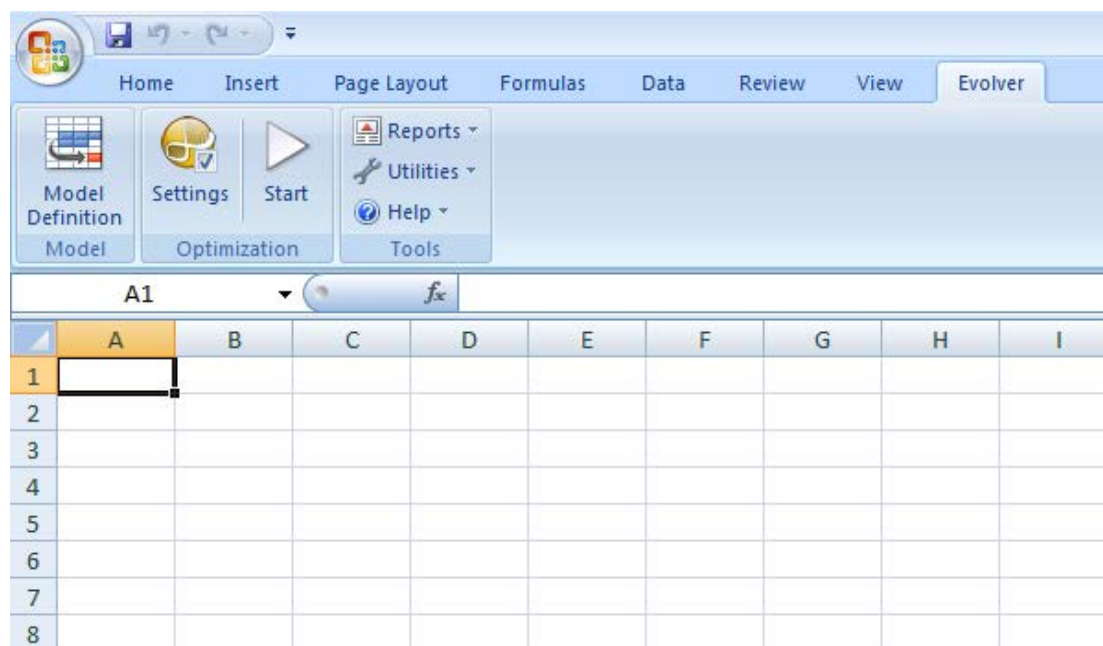
4.3 Επίλυση των Γενετικών Αλγορίθμων – Λογισμικό Evolver

Για την επίλυση του γενετικού αλγορίθμου που διαμορφώνεται στο πρόβλημα χωροθέτησης που μελετάται, χρησιμοποιείται το λογισμικό Evolver 5.5. Το λογισμικό αυτό, αποτελεί ένα ταχύτατο και πολύ εξελιγμένο εργαλείο που δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να επιλυθεί μια ευρεία ποικιλία των προβλημάτων βελτιστοποίησης με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων.

Το Evolver, όταν κυκλοφόρησε για πρώτη φορά στην αγορά, το 1990, αποτελούσε το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο λογισμικό πακέτο γενετικού αλγορίθμου για προσωπικούς υπολογιστές. Το πρόγραμμα αυτό, αρχικά αναπτύχθηκε από την εταιρεία Axcelis Inc. ενώ σήμερα ανήκει στην Palisade Corporation. Αποτελεί ένα επιπρόσθετο εργαλείο του Microsoft Excel, και μπορεί να επιλύσει προβλήματα οποία θεωρούνται «άλυτα» κατά τη γραμμική και τη μη γραμμική βελτιστοποίηση. Χρησιμοποιεί καινοτόμες τεχνολογίες γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Τα προβλήματα αυτά, αρχικά διαμορφώνονται στο Microsoft Excel, και στη συνέχεια επιλύονται από το λογισμικό Evolver, το οποίο δίνει τη δυνατότητα εύρεσης της βέλτιστης λύσης. Έτσι συμβαίνει και στην περίπτωση του προβλήματος της παρούσας εργασίας, του οποίου η μοντελοποίηση γίνεται στο Microsoft Excel, ενώ η επίλυσή του, με το λογισμικό Evolver. Το βασικότερο στάδιο της επίλυσης του μαθηματικού μοντέλου, αποτελεί η διαμόρφωσή του μέσω του Excel, ενώ στη συνέχεια, ο προσδιορισμός της βέλτιστης λύσης μέσω του Evolver, είναι μία απλή σχετικά διαδικασία η οποία θα αναλυθεί παρακάτω.

Αρχικά, έχοντας εγκαταστήσει το λογισμικό Evolver 5.5, εμφανίζεται στο Excel, ως μία επιπλέον γραμμή εργαλείων, στην ήδη υπάρχουσα δομή του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 που απεικονίζεται παρακάτω:



Σχήμα 4.6: Μενού επιλογών λογισμικού Evolver

Το μενού του λογισμικού αυτού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.6, αποτελείται από τρεις βασικές επιλογές:

1. **Model** (Μοντέλο): Model Definition: δίνει τη δυνατότητα καθορισμού του μαθηματικού προτύπου, μέσω του οποίου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα περιγραφής του μοντέλου με απλό και άμεσο τρόπο.
2. **Optimization** (Βελτιστοποίηση):
 - 2.1: Settings (Ρυθμίσεις): αποτελούν τις ρυθμίσεις του λογισμικού
 - 2.2: Start (Έναρξη): αποτελεί την εκκίνηση της διαδικασίας της επίλυσης του προβλήματος
3. **Tools** (Εργαλεία): Reports, Utilities, Help: άλλες επιλογές, στις οποίες περιλαμβάνονται αναφορές, άλλες τεχνικές χρήσης, αλλά και η βοήθεια.

Το πρώτο κουμπί που εμφανίζεται όταν ανοίξει ο χρήστης το λογισμικό, είναι το Model Definition, το οποίο αποτελείται από πέντε βασικές επιλογές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.7 που παρουσιάζεται παρακάτω. Οι επιλογές αυτές είναι οι εξής (Palisade Corporation, 2010):

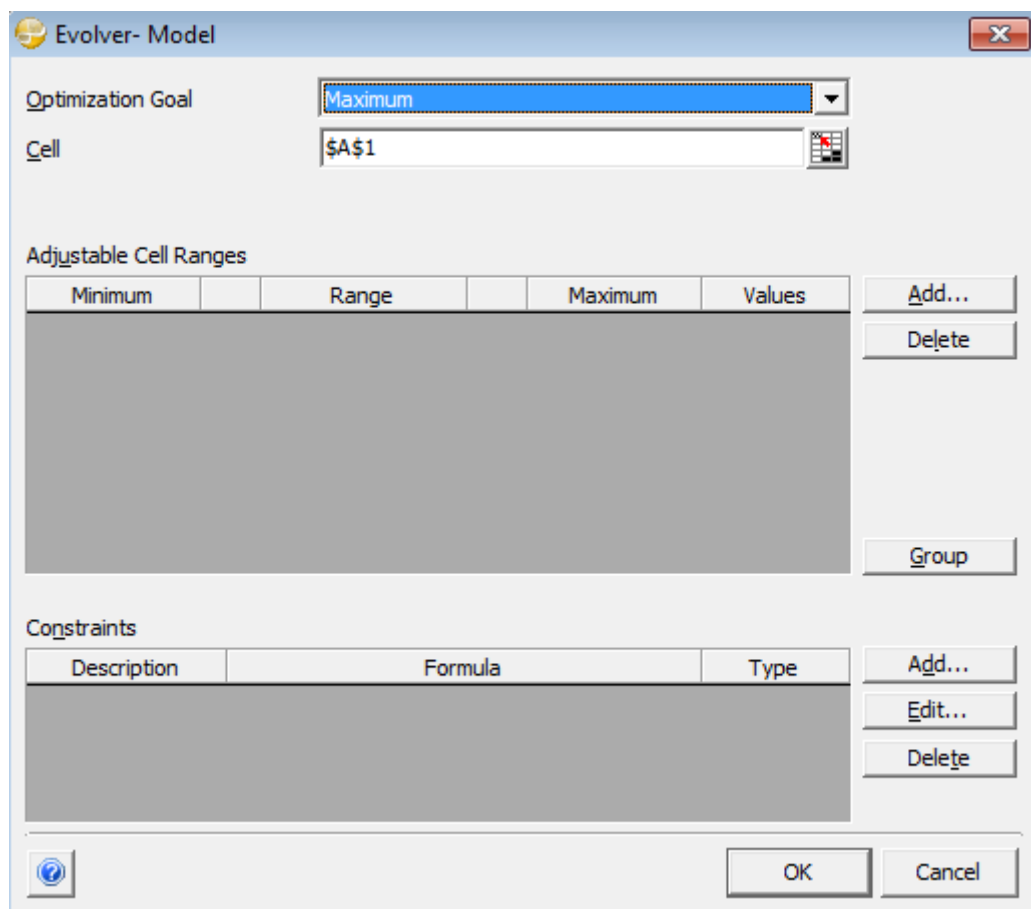
1. **Optimization Goal** (Στόχος Βελτιστοποίησης): αυτό το παράθυρο του λογισμικού αποτελεί το στόχο της βελτιστοποίησης, τον οποίο πρέπει το Evolver να αναζητήσει και στη συνέχεια να επιτύχει. Ο στόχος αυτός, μπορεί

να είναι είτε maximize, είτε minimize, είτε τέλος target value. Στο πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα εργασία, βασικός σκοπός αποτελεί η ελαχιστοποίηση (minimize) του συνολικού κόστους εγκατάστασης και μετακίνησης.

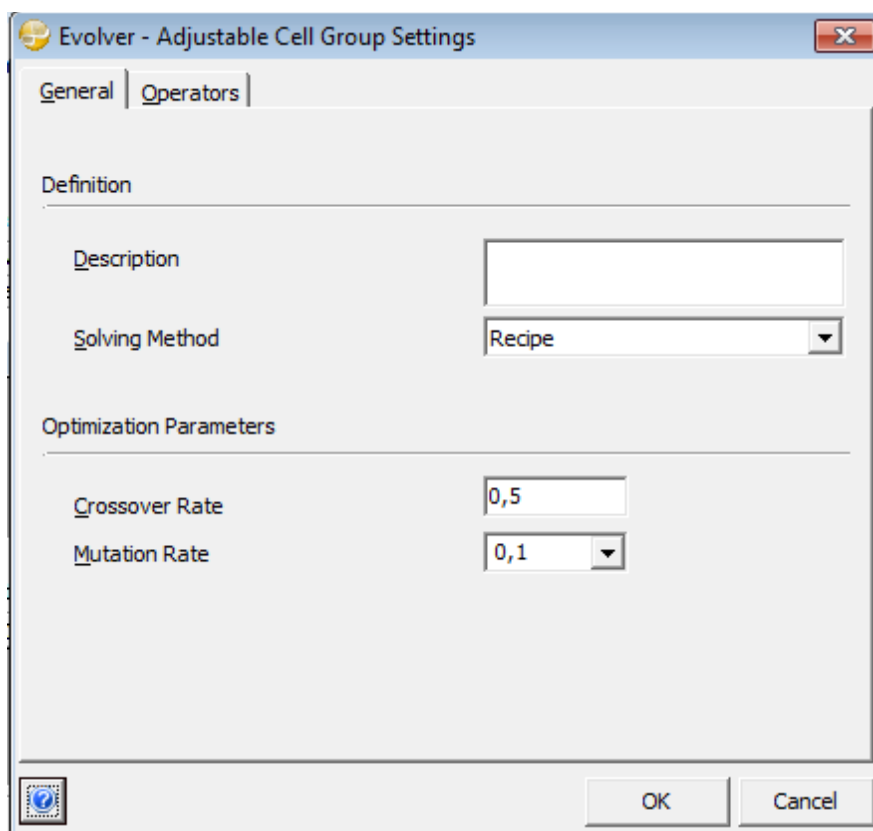
2. **Cell** (Κελί): το κελί, ή αλλιώς κελί προσδιορισμού περιέχει το αποτέλεσμα του μοντέλου. Για κάθε λύση που παράγει το λογισμικό, δημιουργείται μια τιμή για αυτό το κελί, η οποία χρησιμοποιείται ως εκτίμηση από το Solver, έτσι ώστε να αξιολογήσει κάθε πιθανό σενάριο. Με αυτόν τον τρόπο, και καθώς το Solver αναζητά μία μοναδική λύση, καθορίζει ποιες τιμές των μεταβλητών θα απορρίψει και ποιες θα συνεχίσει να διασταυρώνει.
3. **Adjustable Cell Ranges** (Εύρος Ρυθμιζόμενων Κελιών): το παράθυρο αυτό του λογισμικού καθορίζει τις ομάδες των κελιών τις οποίες πρέπει να ρυθμίζει το πρόγραμμα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της εύρεσης βέλτιστης λύσης, όπως αυτό έχει οριστεί από το χρήστη. Η προσθήκη των κελιών γίνεται μέσω της επιλογής “Add”, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, ενώ έπειτα, αφού οριστεί η θέση των ρυθμιζόμενων κελιών, μέσω των επιλογών “Minimum” και “Maximum”, ορίζεται το εύρος των αποδεκτών τιμών κάθε κελιού. Κάθε ρυθμιζόμενο κελί μπορεί να πάρει έναν πραγματικό αριθμό με δύο δεκαδικά ψηφία. Το πεδίο “Range” είναι αυτό που ορίζει την αναφορά του κελιού που θα ρυθμιστεί, ενώ τέλος το πεδίο “Values” δίνει τη δυνατότητα να ορίζεται, όταν κρίνεται απαραίτητο, η επιλογή να αντιμετωπίζονται όλες οι μεταβλητές από το Solver ως ακέραιοι αριθμοί.
4. **Group** (Ομάδα): στο πεδίο αυτό, γίνονται κάποιες βασικές ρυθμίσεις για τα κελιά του προηγούμενου πεδίου (Adjustable Cell Ranges). Αμέσως μετά τον καθορισμό των ρυθμιζόμενων κελιών, επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος επίλυσης (solving method) η οποία θα χρησιμοποιηθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8 που απεικονίζεται παρακάτω. Οι διαφορετικοί τύποι των ρυθμιζόμενων κελιών χειρίζονται από διαφορετικές μεθόδους επίλυσης. Κάθε μέθοδος επίλυσης, ουσιαστικά αποτελεί ένα διαφορετικό γενετικό αλγόριθμο με τους δικούς του τρόπους επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης. Οι μέθοδοι αυτοί είναι οι: Recipe solving method, Order solving method, Group solving method, budget solving method, project solving method και schedule solving method. Για το γενετικό αλγόριθμο που επιλέγεται στην παρούσα εργασία, επιλέγεται η μέθοδος επίλυσης Recipe. Έπειτα από την επιλογή της

κατάλληλης μεθόδου επίλυσης, ακολουθεί η επιλογή του βαθμού διασταύρωσης (crossover rate), αλλά και του βαθμού μετάλλαξης (mutation rate), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7 που απεικονίζεται παρακάτω. Ο πρώτος κυμαίνεται μεταξύ 0.01 και 1.00, και δείχνει την πιθανότητα που έχουν τα μελλοντικά σενάρια να περιέχουν μείγμα πληροφοριών από την προηγούμενη γενιά, ενώ ο δεύτερος κυμαίνεται μεταξύ 0.00 και 1.00 και δείχνει την πιθανότητα που έχουν τα μελλοντικά σενάρια να περιέχουν κάποιες τυχαίες τιμές.

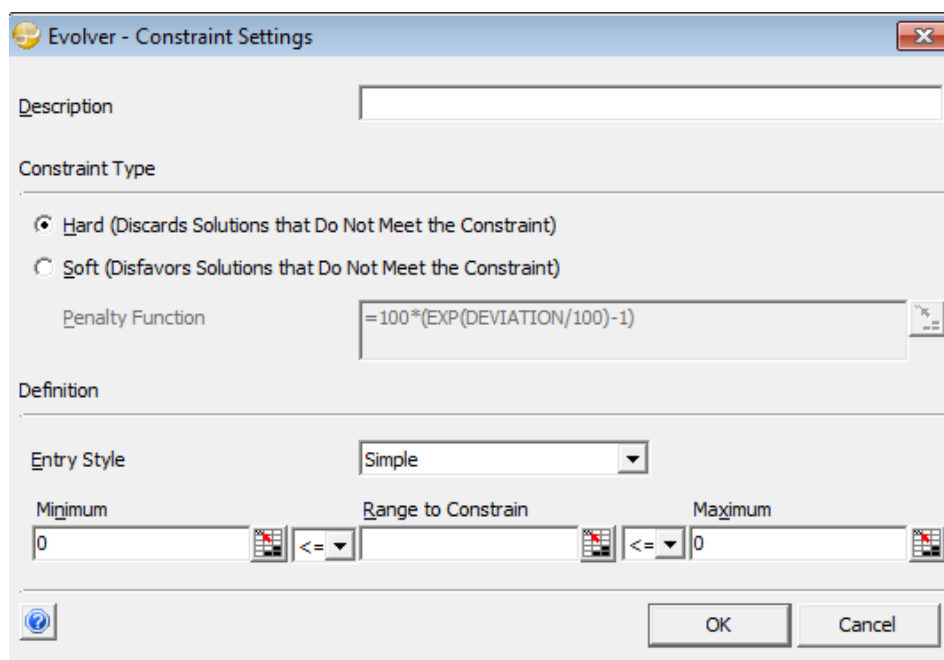
5. **Constraints** (Περιορισμοί): το Evolver δίνει τη δυνατότητα να εισαχθούν περιορισμοί, οι οποίοι ουσιαστικά αποτελούν τις συνθήκες που πρέπει να πληρούνται έτσι ώστε μία λύση να θεωρείται έγκυρη. Στο πεδίο αυτό, δε συμπεριλαμβάνονται οι συνθήκες του προβλήματος, καθώς αυτές έχουν ήδη συμπεριληφθεί. Οι περιορισμοί αυτοί, ρυθμίζονται από το παράθυρο “Constraint Settings”, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9 που απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 4.7: Επιλογή Model Definition του λογισμικού Evolver

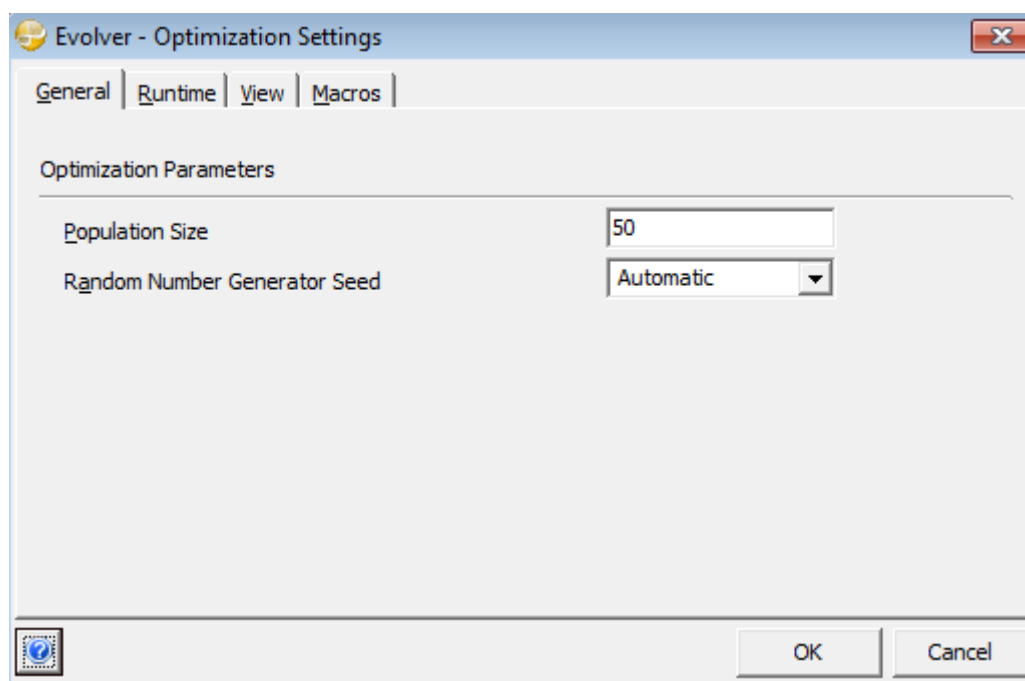


Σχήμα 4.8: Επιλογή Group Settings του λογισμικού Evolver



Σχήμα 4.9: Επιλογή Constraint του λογισμικού Evolver

Επιστρέφοντας στο κεντρικό μενού του λογισμικού, και έχοντας ολοκληρώσει τη διαδικασία η οποία περιγράφηκε παραπάνω, στην επιλογή “optimization”, η οποία αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν οι ρυθμίσεις (settings) οι οποίες αποτελούν μια επιπλέον δυνατότητα του Evolver. Στην καρτέλα “General” (γενικά), υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του πληθυσμού από όπου θα ξεκινήσει η διαδικασία της βελτιστοποίησης, ενώ δίνεται και δυνατότητα να οριστεί η αρχική τιμή για τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιείται στο Evolver, κάτι το οποίο γίνεται είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα, όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 4.10:

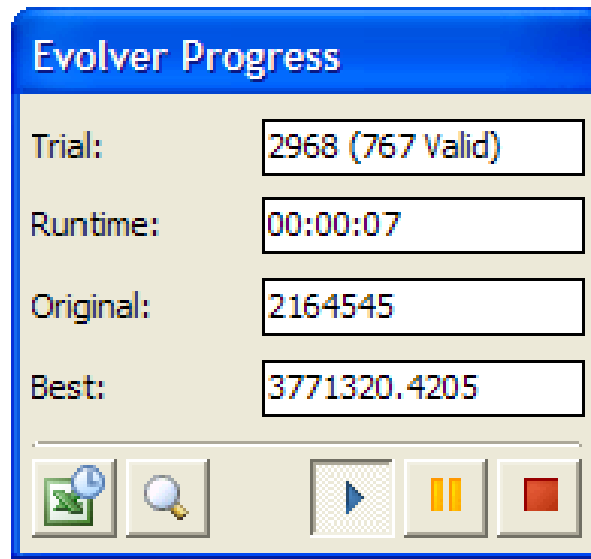


Σχήμα 4.10: Ρυθμίσεις βελτιστοποίησης (Optimization Settings) – General

Η καρτέλα “Runtime” που διαθέτουν επίσης οι ρυθμίσεις βελτιστοποίησης δίνει τη δυνατότητα καθορισμού του χρόνου της βελτιστοποίησης. Στην καρτέλα “View” εμφανίζονται οι ρυθμίσεις των ιδιοτήτων των εμφανιζόμενων επαναυπολογισμών, ενώ τέλος η καρτέλα “Macros” αφορά τη χρονική στιγμή που επιλέγεται να εκτελεστούν οι μακροεντολές του προβλήματος.

Έχοντας ολοκληρώσει όλες οι ρυθμίσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, και έχοντας ορίσει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους, ξεκινά η διαδικασία της βελτιστοποίησης, επιλέγοντας την εντολή “Start”.

Κατά την εκκίνηση της διαδικασίας εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο προόδου (Σχήμα 4.11):



Σχήμα 4.11: Παράθυρο προόδου του λογισμικού Evolver

Κατά τη διάρκεια που η διαδικασία «τρέχει», όπως φαίνεται και στο παραπάνω Σχήμα 4.11, στο παράθυρο προόδου η ένδειξη “Trial” αναφέρεται στον αριθμό της δοκιμής που βρίσκεται τότε η διαδικασία, η ένδειξη “Run Time” το χρόνο που έχει περάσει από τη στιγμή της εκκίνησης της διαδικασίας της βελτιστοποίησης, η ένδειξη “Original” την αρχική τιμή του κελιού – στόχου, ενώ τέλος η ένδειξη “Best” απεικονίζει τη βέλτιστη λύση που έχει επιτευχθεί μέχρι εκείνη τη στιγμή.

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία, και στην περίπτωση που έχει ικανοποιηθεί κάποια από τις συνθήκες τερματισμού, εμφανίζεται το παράθυρο “Optimization Summary”, το οποίο ουσιαστικά αποτελεί μια επιπλέον δυνατότητα του Evolver να δημιουργήσει μια συνοπτική έκθεση βελτιστοποίησης που περιέχει πληροφορίες όπως η ημερομηνία και η ώρα της διαδρομής, οι ρυθμίσεις βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν, η τιμή που υπολογίζεται για το κελί - στόχο και τέλος η τιμή για κάθε ένα από τα ρυθμιζόμενα κελιά. Η έκθεση αυτή είναι πολύ χρήσιμη καθώς δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων των διαδοχικών βελτιστοποιήσεων. Το παράθυρο αυτό, με τις πληροφορίες που μπορεί να περιέχει, φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 4.12:

Evolver: Optimization Summary

Performed By: Test
 Date: Monday, February 16, 2009 2:34:24 PM
 Model: Bakery.xls

Goal	
Cell to Optimize	Sheet1!\$I\$11
Type of Goal	Maximum
Results	
Valid Trials	6251
Total Trials	26249
Original Value	\$2,164,545
+ soft constraint penalties	\$0
= result	\$2,164,545
Best Value Found	\$3,845,767
+ soft constraint penalties	\$0
= result	\$3,845,767
Best Simulation Number	26249
Time to Find Best Value	0:00:42
Reason Optimization Stopped	Stop button pressed
Time Optimization Started	2/16/2009 14:33
Time Optimization Finished	2/16/2009 14:34
Total Optimization Time	0:00:42
Adjustable Cell Values	Sheet1!\$B\$4
Original	20,405
Best	23,403
Adjustable Cell Values	Sheet1!\$C\$4
Original	50,144
Best	50,317
Adjustable Cell Values	Sheet1!\$D\$4
Original	36,968
Best	35,110
Adjustable Cell Values	Sheet1!\$E\$4
Original	1,980
Best	14,222
Adjustable Cell Values	Sheet1!\$F\$4
Original	2,495
Best	81,768
Adjustable Cell Values	Sheet1!\$G\$4
Original	3,001
Best	1,738

Σχήμα 4.12: Επιλογή Optimization Summary του λογισμικού Evolver

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ –

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό, και αφού έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία προσδιορισμού της μαθηματικής διατύπωσης του προβλήματος, ακολουθεί η εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε για τη χωροθέτηση σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί που αφορά την παρούσα εργασία. Αρχικά έγινε η εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος, καθώς και οι παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου, ενώ τέλος παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

5.1 Δεδομένα Προβλήματος

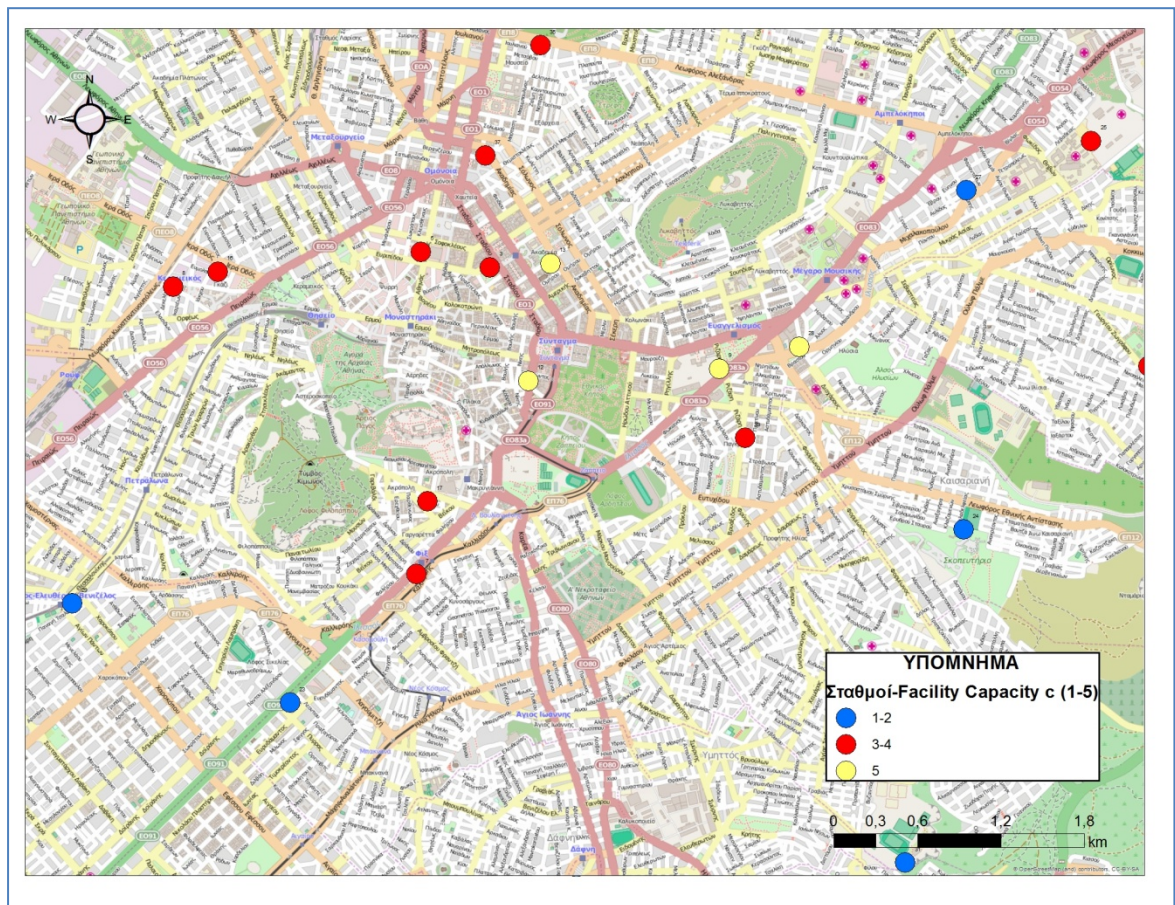
Για την εφαρμογή του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε ένα τμήμα της Αττικής, όπως αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία προέκυψαν με εύλογες παραδοχές σε ό, τι αφορά το μοναδιαίο κόστος θέσης φόρτισης κάθε εγκατάστασης, τη ζήτηση κάθε κόμβου, καθώς και τη χωρητικότητα κάθε μίας από αυτές.

Πιο αναλυτικά, το μοναδιαίο κόστος θέσης φόρτισης κάθε εγκατάστασης που πρόκειται να χωροθετηθεί σε μία υποψήφια θέση, είναι σταθερό και ορίστηκε ίσο με 500€. Έπειτα, η ζήτηση κάθε κόμβου θεωρήθηκε ότι μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως 5, κάτι το οποίο συμβαίνει και με τη χωρητικότητα που διαθέτει κάθε εγκατάσταση. Τέλος, στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε το σενάριο στο οποίο η προσφορά είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση κάθε κόμβου.

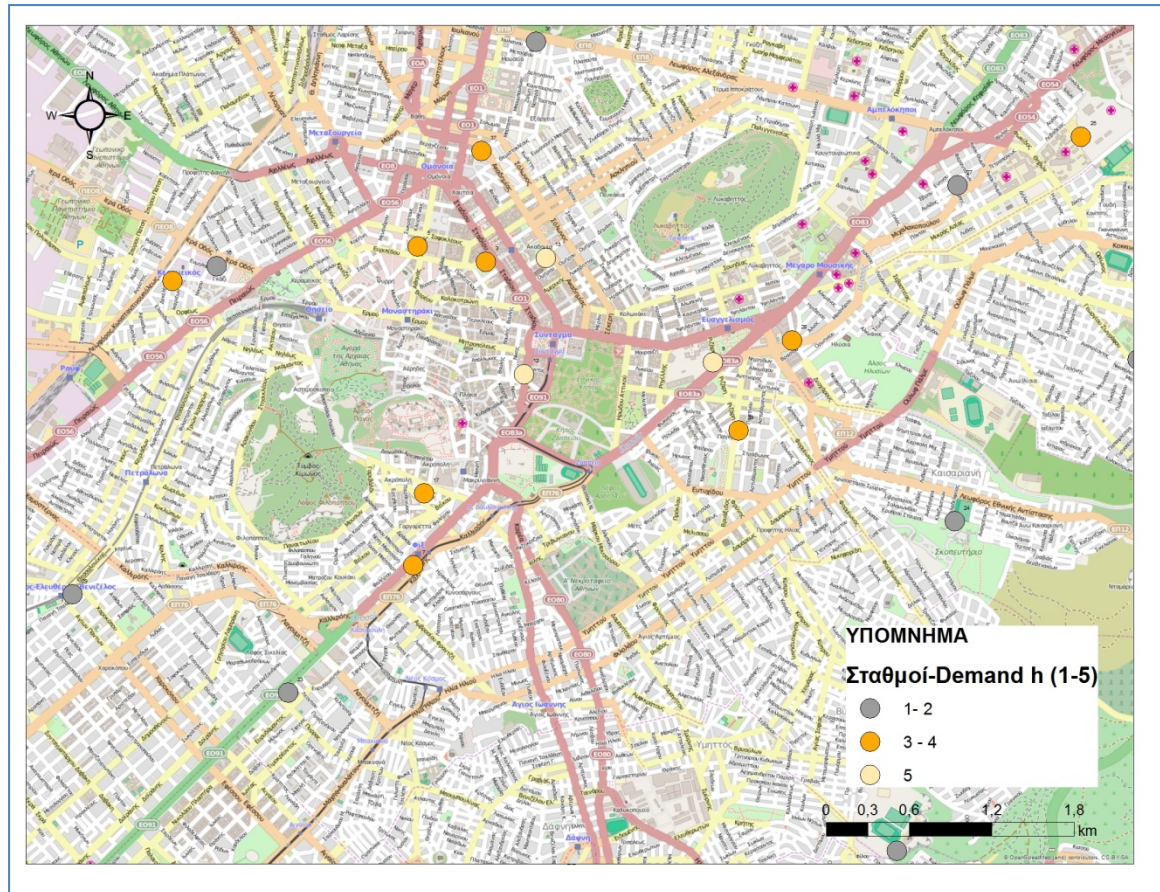
Οι απλοποιήσεις αυτές διευκολύνουν σε μεγάλο βαθμό τους υπολογισμούς, και επιπλέον εξυπηρετούν το σκοπό της εργασίας, που αποτελεί η ανάπτυξη μιας ευρύτερης και ευέλικτης μεθοδολογίας προσέγγισης του προβλήματος του συγκοινωνιακού σχεδιασμού και όχι μια ακριβής συγκοινωνιακή μελέτη στην περιοχή της Αττικής. Έτσι, η απεικόνιση της λύσης αποτελεί μια παραστατική απεικόνιση της εφαρμογής της μεθοδολογίας με γνωστά στοιχεία.

Στα σχήματα που απεικονίζονται παρακάτω, φαίνεται ένα μέρος της περιοχής που μελετήθηκε με τις υποψήφιες θέσεις σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί που επιλέχθηκαν, με βάση τα κριτήρια που αναφέρθηκαν στο 2^ο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 5.1 απεικονίζονται οι υποψήφιες εγκαταστάσεις που πρόκειται να χωροθετηθούν βάσει της χωρητικότητάς τους, ενώ στο Σχήμα 5.2

απεικονίζονται οι υποψήφιες θέσεις σταθμών βάσει της ζήτησης των αντίστοιχων κόμβων, σύμφωνα με τις παραδοχές που έγιναν παραπάνω.



Σχήμα 5.1: Απεικόνιση τμήματος Αττικής με υποψήφιες θέσεις σταθμών φόρτισης βάσει χωρητικότητας των εγκαταστάσεων



Σχήμα 5.2: Απεικόνιση τμήματος Αττικής με υποψήφιες θέσεις σταθμών φόρτισης βάσει της ζήτησης των κόμβων

Σκοπός της παρούσας εργασίας, όπως έχει αναφερθεί ήδη, αποτελεί η εύρεση της βέλτιστης χωροθέτησης σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί στο τμήμα της Αττικής που επιλέχθηκε, η οποία θα ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος εγκατάστασης και μετακίνησης. Ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται, εφαρμόζεται για τη χωροθέτηση σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί, στην περιοχή, στην οποία χωροθετήθηκαν 39 υποψήφιοι σταθμοί σύμφωνα με τα κριτήρια που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2. Ως κόμβοι ζήτησης θεωρήθηκαν τα κέντρα των τετραγώνων που σχηματίζουν τον κάνναβο που σχεδιάστηκε πάνω στο χάρτη της περιοχής που επιλέχθηκε. Κατά τη διαδικασία χωροθέτησης του προβλήματος, βασική προϋπόθεση αποτελεί ο εντοπισμός των αποστάσεων μεταξύ των υποψήφιων εγκαταστάσεων και των κόμβων ζήτησης, κάτι το οποίο πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό ArcGIS, μεταξύ όλων των εγκαταστάσεων και των αντίστοιχων κόμβων ζήτησης.

5.2 Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου

Ο καθορισμός των βασικών παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου, κρίνεται καθοριστικός για την επίλυσή του μέσω του λογισμικού Evolver. Τις βασικές αυτές παραμέτρους αποτελούν ο πληθυσμός (population), ο βαθμός διασταύρωσης (crossover rate), καθώς και ο βαθμός μετάλλαξης (mutation rate).

Όσον αφορά τον πληθυσμό, επιλέγονται τρεις διαφορετικές τιμές. Αρχικά, το μέγεθος του πρώτου πληθυσμού που επιλέγεται είναι 150, ενώ στη συνέχεια το πρόβλημα εξετάζεται και για μεγαλύτερο μέγεθος πληθυσμού με τιμές ίσες με 200 και με 250. Αυτό συμβαίνει καθώς, με αυξημένο πληθυσμό, οι πιθανότητες εύρεσης βέλτιστης λύσης είναι μεγαλύτερες, λόγω και της μεγαλύτερης ποικιλίας γονιδίων (Golberg, 1989).

Η επόμενη καθοριστική παράμετρος για την επίλυση του γενετικού αλγορίθμου, είναι ο βαθμός διασταύρωσης (crossover rate). Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο βαθμός αυτός μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 0.01 και 1.00, ενώ στη συγκεκριμένη περίπτωση λαμβάνει διαδοχικά τις τιμές 0.2, 0.4 και 0.6 για κάθε τιμή πληθυσμού. Αντίστοιχα, ο βαθμός μετάλλαξης (mutation rate), λαμβάνει διαδοχικά τις τιμές 0.05, 0.1 και 0.15. Ο βαθμός αυτός, γενικά κυμαίνεται από 0.00 έως 1.00, και γενικότερα λαμβάνει μικρές τιμές, αφού επιδιώκεται η τυχαιότητα να μην επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κάθε λύση που παράγεται (Golberg, 1989).

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν, δημιουργούνται 27 διαφορετικοί συνδυασμοί των βασικών παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου, για κάθε έναν από τους οποίους εκτελείται ο αλγόριθμος 5 φορές. Έτσι, ο αλγόριθμος εκτελείται συνολικά 135 φορές, και για κάθε φορά, απώτερος σκοπός αποτελεί ο υπολογισμός του μέτρου καταλληλότητας.

Ο γενετικός αλγόριθμος τερματίζεται όταν δε σημειώνεται βελτίωση της συνάρτησης καταλληλότητας, ή στην περίπτωση που η βελτίωση που παρατηρείται δεν ξεπερνά το 0.1%, για έναν αριθμό γονέων. Η επίλυση του γενετικού αλγορίθμου για όλους τους συνδυασμούς που αναφέρθηκαν, έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του μέτρου καταλληλότητας που υλοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση, και κατ' επέκταση την εύρεση της βέλτιστης χωροθέτησης των σταθμών επαναφόρτισης.

5.3 Αποτελέσματα Γενετικού Αλγορίθμου

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των επαναλήψεων πραγματοποιήθηκαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου, για τους διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν. Πιο αναλυτικά, εμφανίζεται η τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το σύνολο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για κάθε συνδυασμό, ο μέσος όρος αυτών για κάθε συνδυασμό, καθώς και η βέλτιστη από αυτές τιμή, η τυπική απόκλιση αλλά και το ποσοστό του λόγου της τυπικής απόκλισης προς το μέσο όρο.

Οι διαφορετικοί συνδυασμοί των παραμέτρων δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα, ενώ όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1, ο συνδυασμός που δίνει κατά μέσο όρο τις καλύτερες τιμές είναι αυτός για τον οποίο οι τιμές των παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου παίρνουν τις παρακάτω τιμές: πληθυσμός 200, συντελεστής διασταύρωσης 0,6 και συντελεστής μετάλλαξης 0.15.

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα διαφορετικών συνδυασμών παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου

ID	Πληθυσμός	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Αντικειμενική Συνάρτηση	Μέσος Όρος (Μ.Ο.)	Τυπική Απόκλιση	Τυπική Απόκλιση/Μ.Ο.%
1A	150	0,2	0,05	449747,46	457163,23	5995,85	1,32
1B				458516,02			
1C				466232,55			
1D				455980,65			
1E				455339,46			
2A	150	0,2	0,1	466255,74	449374,67	15937,58	3,55
2B				458737,61			
2C				425080,41			
2D				443336,30			
2E				453463,30			
3A	150	0,2	0,15	440739,27	440111,67	14583,87	3,32
3B				462316,16			
3C				429886,22			
3D				424499,76			

ID	Πληθυσμός	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Αντικειμενική Συνάρτηση	Μέσος Όρος (Μ.Ο.)	Τυπική Απόκλιση	Τυπική Απόκλιση/Μ.Ο.%
3E				443116,96			
4A	150	0,4	0,05	469517,99	464154,91	4003,12	0,87
4B				460489,70			
4C				459867,60			
4D				465158,46			
4E				465740,79			
5A	150	0,4	0,1	446737,78	450504,46	14968,89	3,33
5B				428804,14			
5C				462950,18			
5D				447754,81			
5E				466275,39			
6A	150	0,4	0,15	443919,16	458275,85	13988,41	3,06
6B				446434,91			
6C				457892,08			
6D				465126,58			
6E				478006,52			
7A	150	0,6	0,05	465343,06	471789,55	4773,04	1,02
7B				474795,36			
7C				468523,67			
7D				477063,80			
7E				473221,83			
8A	150	0,6	0,1	447140,52	446198,13	10793,67	2,42
8B				439818,25			
8C				462868,17			
8D				434122,50			
8E				447041,22			
9A	150	0,6	0,15	458072,59	449354,11	15885,23	3,54
9B				440467,19			
9C				426032,69			
9D				465258,19			
9E				456939,87			
10A	200	0,2	0,05	461806,85	460312,83	5457,74	1,19
10B				464753,85			

ID	Πληθυσμός	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Αντικειμενική Συνάρτηση	Μέσος Όρος (Μ.Ο.)	Τυπική Απόκλιση	Τυπική Απόκλιση/Μ.Ο.%
10C				458606,55			
10D				464730,67			
10E				451666,22			
11A	200	0,2	0,1	440483,01	452937,70	9074,74	2,01
11B				446586,41			
11C				456832,59			
11D				458443,27			
11E				462343,22			
12A	200	0,2	0,15	457851,76	455697,71	8194,30	1,80
02B				467090,61			
12C				453324,38			
12D				455859,41			
12E				444362,41			
13A	200	0,4	0,05	461809,51	457928,95	2552,06	0,56
13B				458231,13			
13C				456798,64			
13D				457978,41			
13E				454827,04			
14A	200	0,4	0,1	455609,54	446888,29	10761,56	2,41
14B				450696,99			
14C				444305,18			
14D				454495,32			
14E				429334,43			
15A	200	0,4	0,15	464112,49	442069,05	22554,59	5,11
15B				469026,78			
15C				421940,38			
15D				427292,91			
15E				427972,70			
16A	200	0,6	0,05	461803,73	460751,72	4524,06	0,99
16B				460858,96			
16C				459161,68			
16D				454716,95			
16E				467217,29			

ID	Πληθυσμός	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Αντικειμενική Συνάρτηση	Μέσος Όρος (Μ.Ο.)	Τυπική Απόκλιση	Τυπική Απόκλιση/Μ.Ο.%
17A	200	0,6	0,1	465727,23	446670,74	15359,02	3,44
17B				456797,56			
17C				435945,72			
17D				427630,51			
17E				447252,68			
18A	200	0,6	0,15	461615,48	66439268,24 Best	24424,81	5,57
18B				401903,25			
18C				432816,56			
18D				439547,09			
18E				460458,82			
19A	250	0,2	0,05	448076,72	459184,39	8362,32	1,83
19B				453510,23			
19C				468341,92			
19D				465364,16			
19E				460628,91			
20A	250	0,2	0,1	444289,25	447303,39	8929,97	1,99
20B				448526,88			
20C				459879,21			
20D				448696,22			
20E				435125,38			
21A	250	0,2	0,15	443376,27	447687,05	21803,24	4,88
21B				427596,37			
21C				484896,61			
21D				443805,84			
21E				438760,13			
22A	250	0,4	0,05	466899,65	456214,09	6075,17	1,34
22B				455258,63			
22C				452399,41			
22D				453750,55			
22E				452762,20			
23A	250	0,4	0,1	456278,05	446973,31	11628,47	2,61
23B				446493,72			
23C				433735,81			

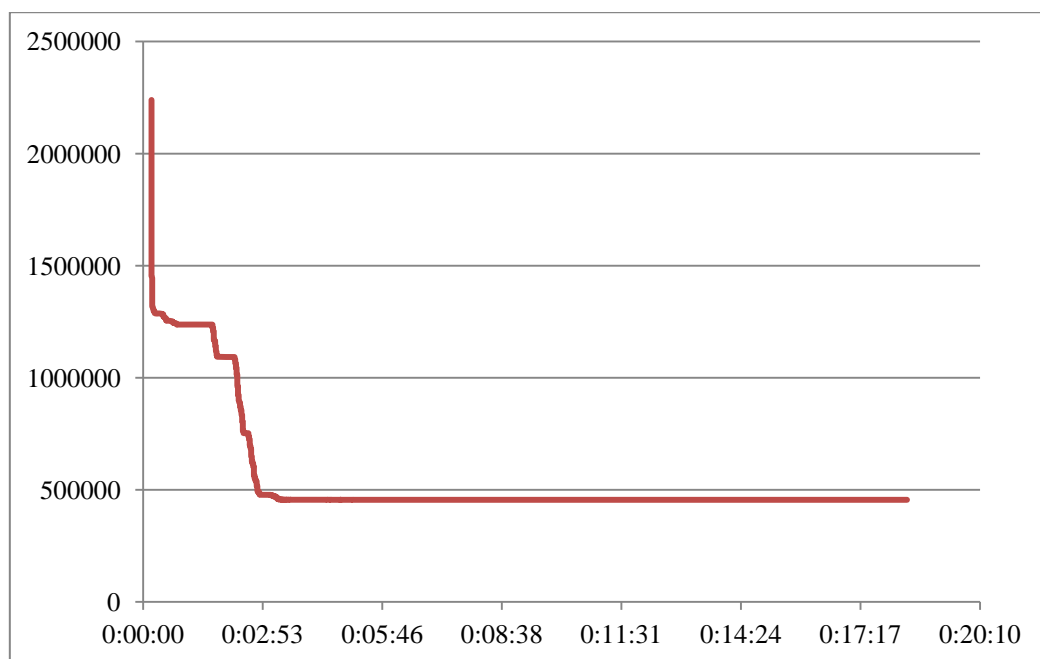
ID	Πληθυσμός	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Αντικειμενική Συνάρτηση	Μέσος Όρος (Μ.Ο.)	Τυπική Απόκλιση	Τυπική Απόκλιση/Μ.Ο.%
23D				460779,29			
23E				437579,67			
24A	250	0,4	0,15	469177,51	449185,80	11629,66	2,59
24B				448713,82			
24C				441197,32			
24D				445744,34			
24E				441096,02			
25A	250	0,6	0,05	456863,20	457065,43	2421,17	0,53
25B				461256,97			
25C				456299,21			
25D				455622,68			
25E				455285,08			
26A	250	0,6	0,1	444578,41	450802,65	8402,05	1,87
26B				453428,07			
26C				462532,76			
26D				440988,58			
26E				452485,43			
27A	250	0,6	0,15	479307,24	454994,99	20372,99	4,48
27B				445757,88			
27C				470805,42			
27D				428218,72			
27E				450885,69			

Έπειτα, πραγματοποιήθηκαν μερικές ακόμα επαναλήψεις με το συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων που αναφέρθηκε παραπάνω, και ο οποίος έδωσε τις καλύτερες τιμές. Τα αποτελέσματα φαίνονται των επαναλήψεων αυτών φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

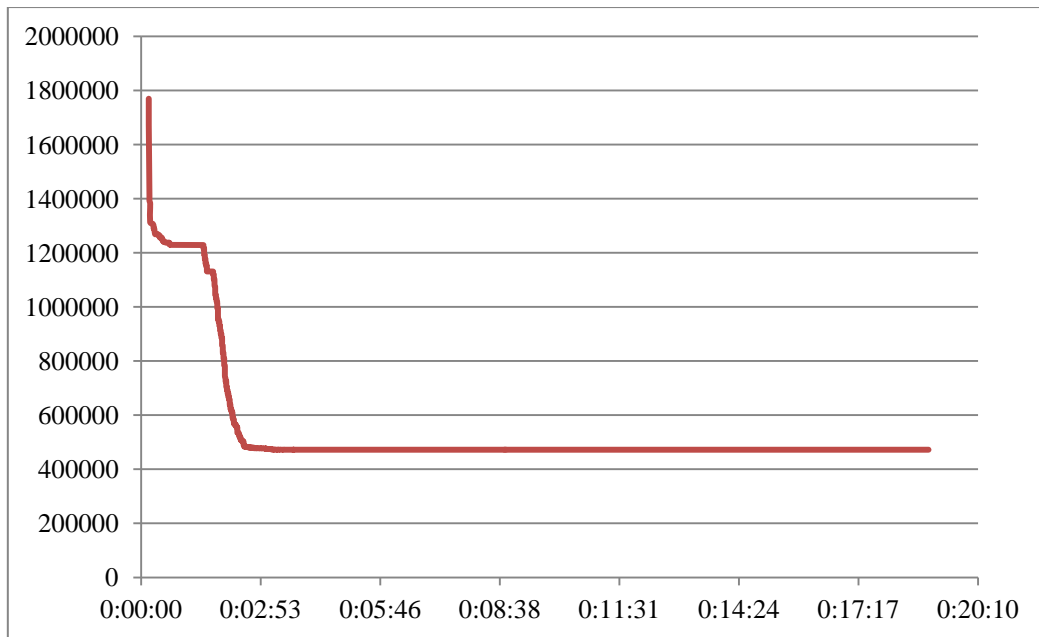
Πίνακας 5.2: Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτουν από το βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου

ID	Πληθυσμός	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Αντικειμενική Συνάρτηση	Μέσος Όρος (Μ.Ο.)	Τυπική Απόκλιση	Τυπική Απόκλιση /Μ.Ο.%
1	200	0.6	0.15	438431.05	452087.41	10385.60	2.30
2				455778.94			
3				445640.25			
4				455045.72			
5				465541.09			

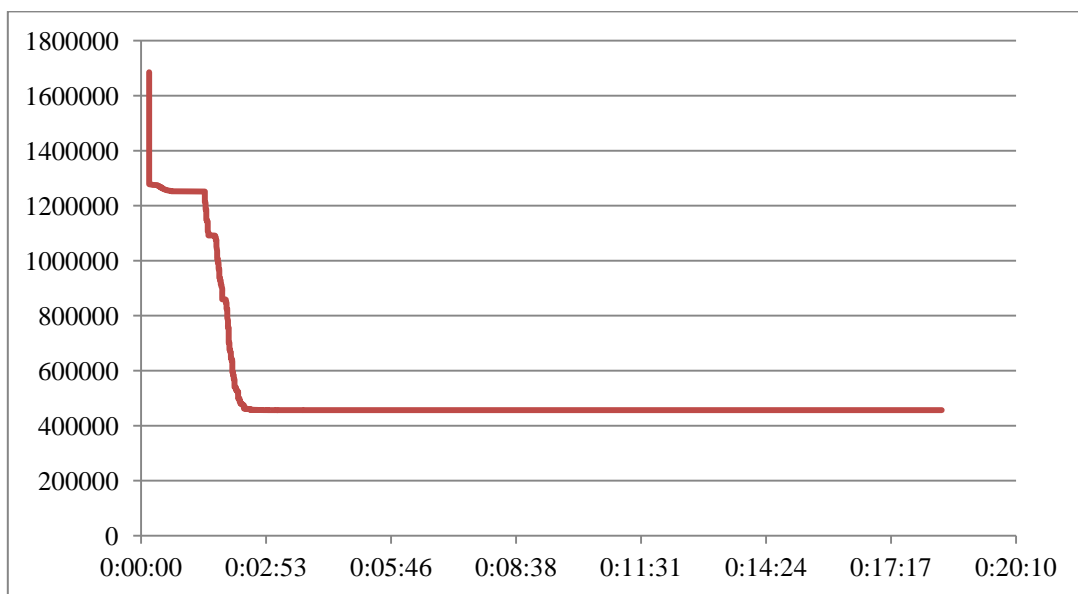
Ακολουθούν ορισμένα διαγράμματα, τα οποία παρουσιάζουν τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του χρόνου, καθώς και τις διακυμάνσεις αυτής, για διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου.



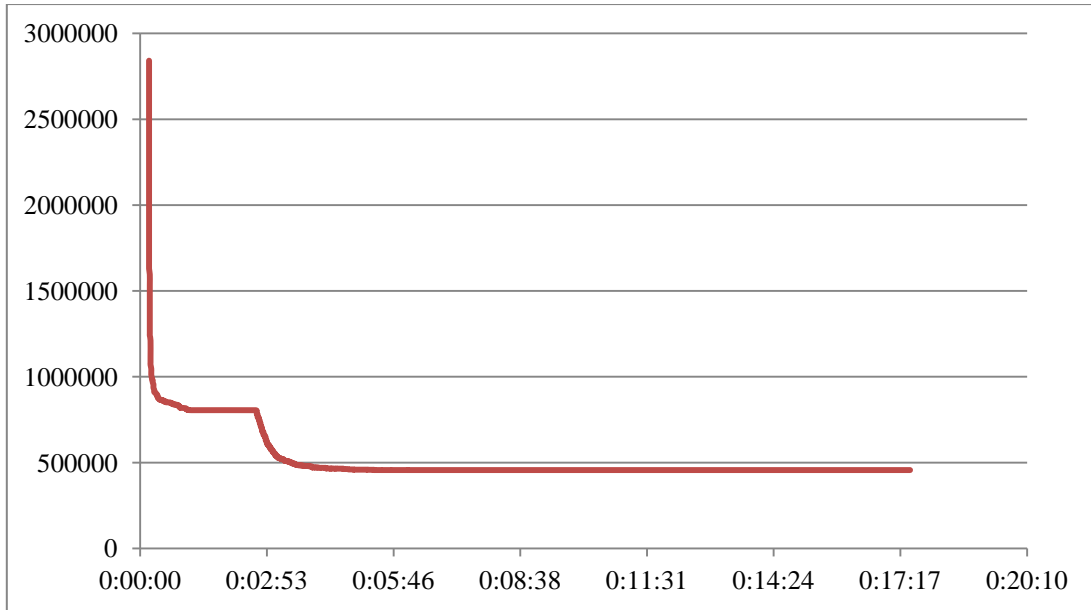
Σχήμα 5.3: Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του χρόνου με συνδυασμό παραμέτρων: Pop.: 200, Cros. Rate 0.6, Mut. Rate 0.15



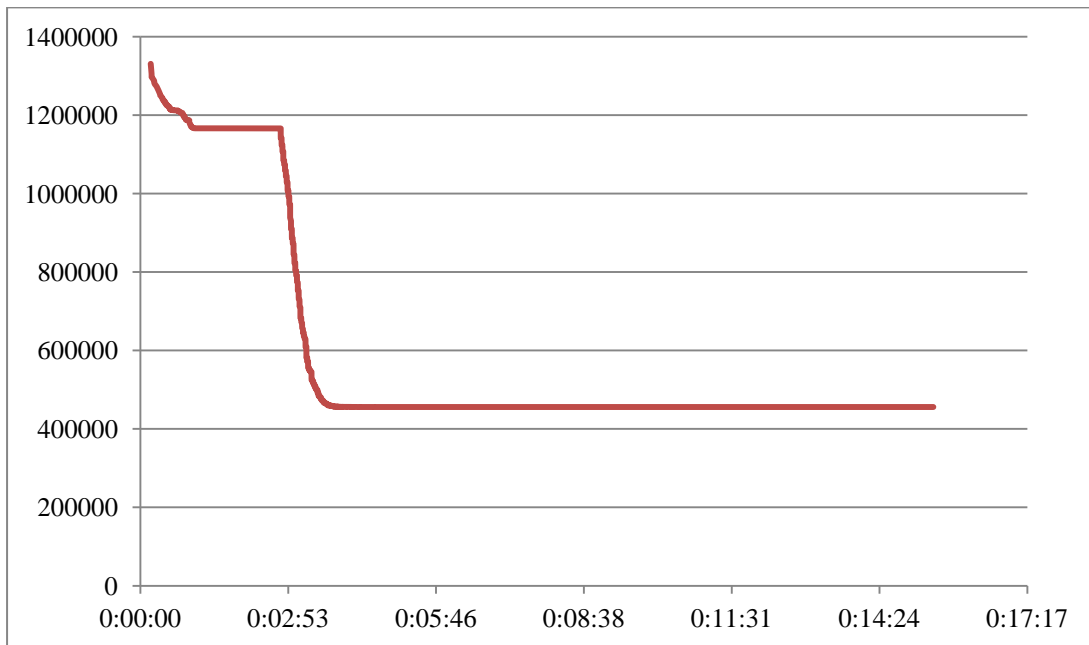
Σχήμα 5.4: Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του χρόνου με συνδυασμό παραμέτρων: Pop.: 150, Cros. Rate: 0.2, Mut. Rate 0.15



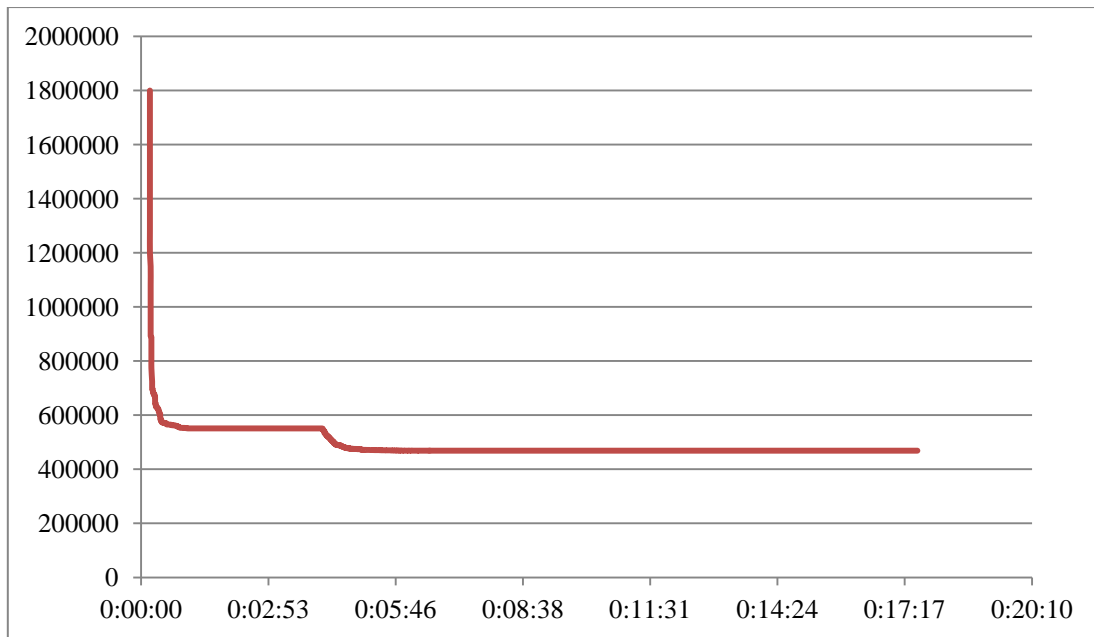
Σχήμα 5.5: Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του χρόνου με συνδυασμό παραμέτρων: Pop.: 150, Cros. Rate 0.4, Mut. Rate 0.15



Σχήμα 5.6: Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του χρόνου με συνδυασμό παραμέτρων: Pop.: 250, Cros. Rate 0.4, Mut. Rate 0.1



Σχήμα 5.7: Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του χρόνου με συνδυασμό παραμέτρων: Pop.: 250, Cros. Rate 0.6, Mut. Rate 0.15



Σχήμα 5.8: Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του χρόνου με συνδυασμό παραμέτρων: Pop.: 150, Cros. Rate 0.2, Mut. Rate 0.05

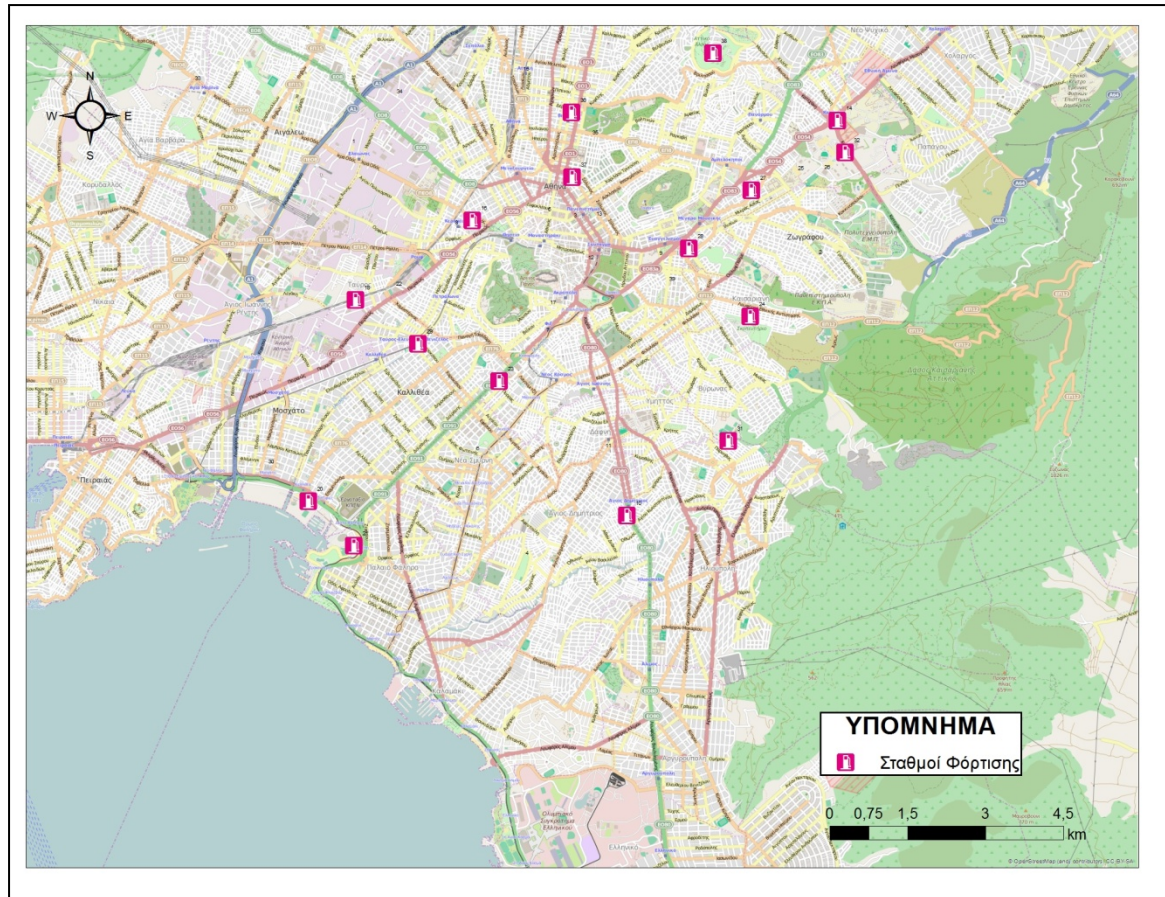
Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, τα οποία απεικονίζουν τις διαφορετικές τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης σε συνάρτηση με το χρόνο, για την εκτέλεση του αλγορίθμου με διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων, γίνεται αντιληπτό το γεγονός ότι μετά το 3^ο λεπτό περίπου, οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης αρχίζουν να σταθεροποιούνται, ενώ μέχρι τότε υφίστανται διαρκείς διακυμάνσεις. Δηλαδή, η αρχική τιμή που βρίσκει ο αλγόριθμος στην επίλυση, πέφτει σημαντικά μετά το 3^ο λεπτό και παίρνει τη βέλτιστη τιμή, η οποία διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της επίλυσης και για το συνολικό αριθμό των δοκιμών που πραγματοποιούνται.

Στο Σχήμα 5.9 που παρουσιάζεται παρακάτω, φαίνονται οι τελικές θέσεις των σταθμών επαναφόρτισης που θα χωροθετηθούν στο τμήμα της Αττικής που μελετήθηκε, και οι οποίες προκύπτουν από το συνδυασμό παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου που έδωσε την καλύτερη λύση.

Πιο συγκεκριμένα, οι σταθμοί θα χωροθετηθούν στις εξής περιοχές της Αττικής:

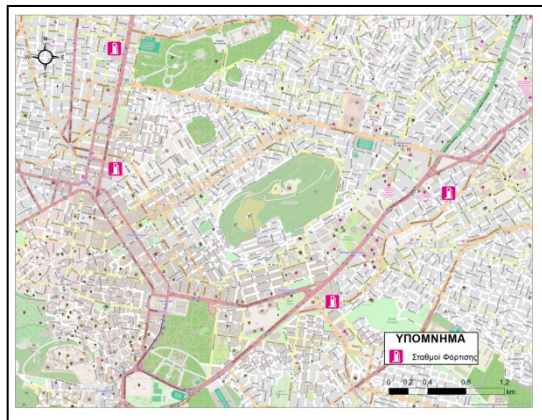
- Άγιος Δημήτριος, εντός του υπόγειου χώρου στάθμευσης του εμπορικού κέντρου «Athens Metro Mall» και πλησίον του σταθμού του μετρό Άγιος Δημήτριος - Αλέξανδρος Παναγούλης (Γραμμή Μετρό 2)

- Λεωφόρος Μεσογείων, εντός του υπαίθριου παρκινγκ που διαθέτει το μετρό στο σταθμό Κατεχάκη (Γραμμή Μετρό 3)
- Κεραμεικός, εντός του χώρου στάθμευσης πλησίον του μετρό στο σταθμό Κεραμεικό (Γραμμή Μετρό 3)
- Ταύρος, εντός του χώρου στάθμευσης που βρίσκεται επί της λεωφόρου Κωνσταντινουπόλεως
- Καλλιθέα, εντός του χώρου στάθμευσης όπισθεν της λεωφόρου Ποσειδώνος
- Παλαιό Φάληρο, εντός του υπαίθριου χώρου στάθμευσης που διαθέτει ο πολυχώρος «Village Φάληρο»
- Λεωφόρος Συγγρού, εντός του υπόγειου παρκινγκ του πολυχώρου «Odeon Starcity»
- Καισαριανή, εντός του χώρου στάθμευσης νότια της λεωφόρου Εθνικής Αντιστάσεως
- Ιλίσια, εντός του χώρου στάθμευσης βόρεια της οδού Μιχαλακοπούλου
- Χίλτον, εντός του χώρου στάθμευσης του ξενοδοχείου Χίλτον
- Ταύρος, πλησίον της στάσης του μετρό Ταύρος – Ελευθέριος Βενιζέλος (Γραμμή Μετρό 1)
- Βύρωνας, εντός του χώρου στάθμευσης του Θεάτρου Βράχων
- Λεωφόρος Κατεχάκη, εντός του χώρου στάθμευσης του Νοσοκομείου της Αεροπορίας
- Βικτώρια, εντός του χώρου στάθμευσης πλησίον του σταθμού του μετρό Βικτώρια (Γραμμή Μετρό 1)
- Πλατεία Κάνιγγος, εντός του χώρου στάθμευσης που βρίσκεται επί της πλατείας
- Γαλάτσι, εντός του χώρου στάθμευσης που βρίσκεται πλησίον του Αττικού Άλσους

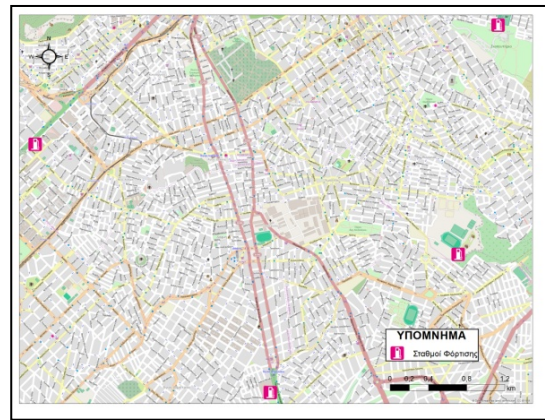


Σχήμα 5.9: Απεικόνιση τμήματος Αττικής με τις τελικές θέσεις των σταθμών φόρτισης

Παρακάτω, στο Σχήμα 5.10, για λόγους ευκρίνειας, απεικονίζονται τμήματα της περιοχής που μελετήθηκε, σε μεγαλύτερη κλίμακα (1:10.000), με τους τελικούς σταθμούς φόρτισης σε κάθε ένα από αυτά.



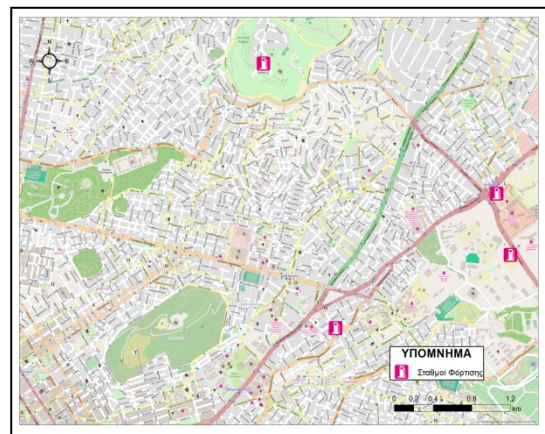
5.10α



5.10β



5.10γ



5.10δ

Σχήμα 5.10: Απεικόνιση τμημάτων της Αττικής με τις θέσεις των σταθμών φόρτισης

Πιο αναλυτικά, στο Σχήμα 5.10α απεικονίζεται η περιοχή από τη Βικτώρια έως την Ομόνοια και το Χίλτον και το δήμο Ιλισίων περίπου, στο Σχήμα 5.10β απεικονίζεται η περιοχή που εκτείνεται από το Νέο Κόσμο, τον Άγιο Δημήτριο, το Βύρωνα έως και την Καισαριανή, στο Σχήμα 5.10γ απεικονίζεται η περιοχή που εκτείνεται παραλιακά από το Μοσχάτο έως και το Παλαιό Φάληρο περίπου, ενώ τέλος το Σχήμα 5.10δ δείχνει την περιοχή από το Αττικό Άλσος έως τα Ιλίσια και τη λεωφόρο Κατεχάκη.

5.4 Ανάλυση Ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) πραγματοποιείται με κύριο σκοπό την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του γενετικού αλγορίθμου που εφαρμόστηκε. Χάρη σε αυτή, δίνεται η δυνατότητα να μελετηθούν οι επιδράσεις στην τιμή των αποτελεσμάτων, και στην περίπτωση που μελετάται στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, εάν μεταβληθούν ορισμένες παράμετροι του μοντέλου του

προβλήματος, διατηρώντας όμως το συνδυασμό των παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου που δίνει τη βέλτιστη λύση. Δηλαδή, οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου για την πραγματοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας είναι: πληθυσμός 200, συντελεστής διασταύρωσης 0,6 και συντελεστής μετάλλαξης 0.15.

Τα εναλλακτικά σενάρια τα οποία θα μελετηθούν είναι τα ακόλουθα:

- a) Μεταβολή μοναδιαίου κόστους θέσης φόρτισης κάθε εγκατάστασης σε μια υποψήφια θέση j (f_j)
- b) Μεταβολή χωρητικότητας των εγκαταστάσεων (c)
- c) Μεταβολή της ζήτησης των κόμβων (h_i)
- d) Περίπτωση όπου η ζήτηση (h_i) είναι μεγαλύτερη από την προσφορά (c)

a) Μεταβολή μοναδιαίου κόστους θέσης φόρτισης κάθε εγκατάστασης σε μια υποψήφια θέση j (f_j)

Αρχικά, επιλέχθηκε να μελετηθεί η περίπτωση στην οποία μεταβάλλεται το μοναδιαίο κόστος θέσης φόρτισης κάθε εγκατάστασης σε μια υποψήφια θέση j (f_j), και συγκεκριμένα η περίπτωση αύξησής του κατά 20%. Στον Πίνακα 5.4 που απεικονίζεται παρακάτω (Πίνακας 5.3) φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του σεναρίου αυτού συγκριτικά με το αρχικό.

Πίνακας 5.3: Σύγκριση τιμών αντικειμενικής συνάρτησης αρχικού και νέου σεναρίου για το κόστος f_j

	Πληθυσμός	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Αντικειμενική Συνάρτηση
Αρχικό Σενάριο Κόστους f_j	200	0.6	0.15	438431.05
Νέο Σενάριο Κόστους f_j				434230.35
Ποσοστιαία Μεταβολή				-0.97

Από τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό το γεγονός ότι με την αύξηση του μοναδιαίου κόστους θέσης φόρτισης κάθε εγκατάστασης σε μια υποψήφια θέση j (f_j) κατά 20%, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μεταβάλλεται ελάχιστα, καθώς παρατηρείται μία μεταβολή μικρότερη του 1%. Αυτό σημαίνει ότι, η επιλογή του κόστους θέσης φόρτισης κάθε εγκατάστασης δεν επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτει από την επίλυση του γενετικού αλγορίθμου.

b) Μεταβολή χωρητικότητας των εγκαταστάσεων (c)

Έπειτα, μελετήθηκε η περίπτωση στην οποία μεταβάλλεται η χωρητικότητα των εγκαταστάσεων που πρόκειται να χωροθετηθούν (c), και συγκεκριμένα η μείωση αυτής κατά ένα μικρό ποσοστό της τάξης του 10%. Στον Πίνακα 5.4, εμφανίζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού, με την αρχική κάθε εγκατάσταση.

Πίνακας 5.4: Σύγκριση τιμών αντικειμενικής συνάρτησης αρχικού και νέου σεναρίου για τη χωρητικότητα c

	Πληθυσμός	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Αντικειμενική Συνάρτηση
Αρχικό Σενάριο Χωρητικότητας c	200	0.6	0.15	438431.05
Νέο Σενάριο Χωρητικότητας c				454254.27
Ποσοστιαία Μεταβολή				3.49

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, παρατηρείται ότι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στο εναλλακτικό σενάριο χωρητικότητας, είναι αυξημένη κατά 3.5% περίπου, κάτι το οποίο κρίνεται λογικό, καθώς με τη μείωση κατά 10% της χωρητικότητας των εγκαταστάσεων που πρόκειται να τοποθετηθούν στην περιοχή που μελετάται, η επίλυση του γενετικού αλγορίθμου δίνει χειρότερες τιμές.

c) Μεταβολή της ζήτησης των κόμβων (h_i)

Στη συνέχεια μελετήθηκε η περίπτωση της μεταβολής της ζήτησης των κόμβων (h_i), και ειδικότερα της μείωσης της ζήτησης κατά 5%. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την εφαρμογή του αλγορίθμου στην περίπτωση αυτή, φαίνονται στον Πίνακα 5.5, σε σύγκριση με τα αρχικά.

Πίνακας 5.5: Σύγκριση τιμών αντικειμενικής συνάρτησης αρχικού και νέου σεναρίου για τη ζήτηση h_i

	Πληθυσμός	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Αντικειμενική Συνάρτηση
Αρχικό Σενάριο Ζήτησης h_i	200	0.6	0.15	438431.05
Νέο Σενάριο Ζήτησης h_i				426564.75
Ποσοστιαία Μεταβολή				-2.79

Στην περίπτωση μείωσης της ζήτησης των κόμβων κατά 5% συγκριτικά με το αρχικό σενάριο, παρατηρείται μία μικρή βελτίωση στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (μείωσης της τιμής της κατά 2.79%), κάτι το οποίο συνεπάγεται και μείωση της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης σε σύγκριση με το αρχικό σενάριο, δηλαδή μείωση του 3^{ου} όρου της αντικειμενικής συνάρτησης, ο οποίος από 67, μειώθηκε στις 53 θέσεις οι οποίες παραμένουν ελεύθερες.

d) Περίπτωση όπου η ζήτηση (h_i) είναι μεγαλύτερη από την προσφορά (c)

Τέλος, επιλέχθηκε η περίπτωση στην οποία η ζήτηση κάθε κόμβου (h_i) είναι μεγαλύτερη από την προσφορά, δηλαδή τη χωρητικότητα κάθε εγκατάστασης (c), ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι του προβλήματος παραμένουν σταθερές, και να εκτελεστεί ξανά ο γενετικός αλγόριθμος με τα νέα δεδομένα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν απεικονίζονται στον Πίνακα 5.6, σε σύγκριση με τα αρχικά, με την περίπτωση δηλαδή όπου η προσφορά είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση.

Πίνακας 5.6 Σύγκριση τιμών αντικειμενικής συνάρτησης αρχικού και νέου σεναρίου για προσφορά και ζήτηση

	Πληθυσμός	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Αντικειμενική Συνάρτηση
Αρχικό Σενάριο: Προσφορά > Ζήτηση	200	0.6	0.15	438431.05
Νέο Σενάριο: Ζήτηση > Προσφορά				464592.31
Ποσοστιαία Μεταβολή				5.64

Στο τελευταίο σενάριο το οποίο μελετήθηκε για να γίνει ανάλυση ευαισθησίας του αλγορίθμου, στην περίπτωση δηλαδή όπου η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την προσφορά, παρατηρείται αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης κατά 5.64%. Αυτό υποδηλώνει το γεγονός ότι η επίλυση του αλγορίθμου στην περίπτωση του εναλλακτικού σεναρίου, όπου δηλαδή η προσφορά των εγκαταστάσεων που πρόκειται να χωροθετηθούν δεν καλύπτει όλη τη ζήτηση των κόμβων, δίνει χειρότερες τιμές αντικειμενικής συνάρτησης συγκριτικά με την περίπτωση του αρχικού σεναρίου.

5.5 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Έχοντας μελετήσει τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου για το πρόβλημα χωροθέτησης που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, μπορεί να ειπωθεί το γεγονός ότι η εργασία, η οποία αφορά στην ανάπτυξη ενός προτύπου βέλτιστης χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών ταξί, αποτελεί μία αρκετά ρεαλιστική προσέγγιση για την περιοχή της Αττικής που μελετήθηκε.

Αρχικά, κατά την αντιμετώπιση του προβλήματος χωροθέτησης, λήφθηκαν υπόψη οι περιορισμοί χωρητικότητας που διαθέτει κάθε σταθμός, οι προτιμήσεις των καταναλωτών σε ηλεκτρικά ταξί, που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη ζήτηση, όπως και το οικονομικό συμφέρον, καθώς επιδιώχθηκε η ελαχιστοποίηση του κόστους μετακίνησης, ενώ ταυτόχρονα η καλύτερη δυνατή εξυπηρέτηση των οδηγών των

ηλεκτρικών ταξί και των επιβατών. Έτσι, με τη διαμόρφωση και την επίλυση του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου, δημιουργήθηκε ένα αρκετά ρεαλιστικό μοντέλο, το οποίο θα μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου, για τους διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, και για το σύνολο των επαναλήψεων που πραγματοποιήθηκαν, ο συνδυασμός που δίνει κατά μέσο όρο τις καλύτερες τιμές είναι αυτός για τον οποίο οι τιμές των παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου παίρνουν τις τιμές: 200, συντελεστής διασταύρωσης 0.6 και συντελεστής μετάλλαξης 0.15. Για το συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων, ο αλγόριθμος επαναλήφθηκε έως ότου η αντικειμενική συνάρτηση πάρει τη βέλτιστη τιμή, η οποία και είναι 438431.05. Η τιμή αυτή βρέθηκε μετά το 3^ο λεπτό περίπου και διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της επίλυσης, σε αντίθεση με τα τρία πρώτα λεπτά της εκτέλεσης του αλγορίθμου που υφίσταται διαρκείς διακυμάνσεις.

Από τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από το συνδυασμό των παραμέτρων του αλγορίθμου που έδωσε τις καλύτερες τιμές αντικειμενικής συνάρτησης, προκύπτει ότι το ποσοστό της ζήτησης που δεν εξυπηρετείται από κάθε σταθμό φόρτισης φτάνει το 64% περίπου. Η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση, στην περίπτωση μείωσης της ζήτησης των κόμβων κατά 5%, όπως μελετήθηκε, μειώνεται και αυτή κατά ένα ποσοστό 21%.

Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι ο αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί για τη χωροθέτηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών ταξί στην περιοχή που μελετήθηκε, καθώς ανταποκρίνεται σε ρεαλιστικές συνθήκες. Δηλαδή, για τη χωροθέτηση των σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί εντός της περιοχής που μελετήθηκε, επαρκεί ένας σχετικά μικρός αριθμός εγκαταστάσεων (16 σταθμοί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9 που απεικονίζεται παραπάνω), σε σχέση με την αρχική υπόθεση των 39 σταθμών στην Αττική.

Επιπρόσθετα, ικανοποιείται η ζήτηση, κάτι το οποίο σημαίνει ότι είναι δυνατή με αυτό τον τρόπο η εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού επιβατών και κατά συνέπεια, η αύξηση των εσόδων. Όμως, παρατηρείται ακόμα ότι όσο αυξάνεται η συνολική ζήτηση, τόσο αυξάνεται το ποσοστό της οποίας δε μπορεί να εξυπηρετηθεί και, κατά συνέπεια, αυξάνεται το πλήθος των μετακινούμενων οι οποίοι δε μπορούν να εξυπηρετηθούν.

Κλείνοντας, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί παλαιότερα, η μέθοδος που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία παράγει ικανοποιητικές λύσεις, αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα χωροθέτησης με βάση τη ζήτηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στο παρόν κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας γίνεται μια γενική ανασκόπηση των στόχων, της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε αλλά και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου. Επισημαίνεται τα κυριότερα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν, ενώ τέλος διατυπώνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

6.1 Σύνοψη Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η ανάπτυξη ενός προτύπου χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών ταξί στην Αττική. Το πρόβλημα διατυπώθηκε μαθηματικά, και είχε ως βασικό στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης και μετακίνησης. Αφού λήφθηκαν υπόψη οι κατάλληλοι περιορισμοί, το πρόβλημα επιλύθηκε με την εφαρμογή ενός γενετικού αλγορίθμου, ο οποίος αναπτύχθηκε για το μαθηματικό μοντέλο Fixed Charge Location Problem, το οποίο χρησιμοποιήθηκε.

Πιο αναλυτικά, στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας έγινε μία συνοπτική παρουσίαση των ηλεκτρικών οχημάτων και κατ' επέκταση των ηλεκτρικών ταξί, αναπτύχθηκαν τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους και η αναγκαιότητα της χρήσης τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε μία εισαγωγή στο πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων και μελετήθηκε το μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο εφαρμόστηκε, ενώ τέλος σχολιάστηκαν τα κυριότερα κριτήρια βάσει των οποίων επιλέχθηκαν οι υποψήφιες θέσεις σταθμών επαναφόρτισης ηλεκτρικών ταξί στην Αττική.

Στο τρίτο κεφάλαιο έγινε μία παρουσίαση των βασικών μοντέλων χωροθέτησης, έπειτα μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ενώ τέλος επιλέχθηκε το Fixed Charge Location Problem (FCLP) ως το καταλληλότερο για το πρόβλημα χωροθέτησης της παρούσας εργασίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο διαμορφώθηκε και επιλύθηκε το μαθηματικό μοντέλο που επιλέχθηκε, ενώ στη συνέχεια έγινε μία εισαγωγή στους γενετικούς αλγορίθμους και στο λογισμικό Evolver το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εφαρμόζεται ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, εισάγοντας αρχικά τα δεδομένα του προβλήματος και τις παραμέτρους του αλγορίθμου. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του, ενώ τέλος πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, έτσι ώστε να μελετηθούν οι επιδράσεις στην τιμή των αποτελεσμάτων, εάν μεταβληθούν ορισμένες παράμετροι του μοντέλου του προβλήματος, διατηρώντας όμως το συνδυασμό των παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου που δίνει τη βέλτιστη λύση.

6.2 Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου

Μετά την ολοκλήρωση της εφαρμογής του αλγορίθμου προέκυψε ότι η επιλογή των παραμέτρων του επηρεάζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Όπως αναφέρθηκε, διαπιστώθηκε ότι, ο για μέγεθος πληθυσμού 200 δίνονται τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, ενώ ο συντελεστής μετάλλαξης έχει καθοριστική σημασία, και για την τιμή 0.15 δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, ενώ παρατηρούνται διακυμάνσεις στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τις τιμές 0.05 και 0.1, ανεξάρτητα από τις τιμές των άλλων παραμέτρων. Τέλος, ο συντελεστής διασταύρωσης δίνει τις καλύτερες τιμές για τιμή 0.6. Παρόλα αυτά, παρατηρείται το γεγονός ότι με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης δεν επηρεάζονται σημαντικά, αλλά η διακύμανσή της βρίσκεται σε ποσοστό από 1% - 5%.

6.3 Ανάλυση Ευαισθησίας Γενετικού Αλγορίθμου

Από την ανάλυση ευαισθησίας του γενετικού αλγορίθμου που πραγματοποιήθηκε, γίνεται αντιληπτό ότι η λύση που προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος είναι ευαίσθητη ως προς τη χωρητικότητα των εγκαταστάσεων, αλλά και ως προς τη σχέση προσφοράς και ζήτησης.

Πιο αναλυτικά, παρατηρείται το γεγονός ότι, μεταβάλλοντας τη χωρητικότητα των εγκαταστάσεων που πρόκειται να χωροθετηθούν, μεταβάλλεται και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτει από την επίλυση του αλγορίθμου. Δηλαδή, μειώνοντας τη χωρητικότητα των εγκαταστάσεων κατά 10% περίπου, παρατηρείται αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης κατά 3.5% περίπου, κάτι το οποίο σημαίνει ότι η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει χειρότερες τιμές, ενώ

επίσης σε αυτή την περίπτωση, σημειώνεται πως υπάρχει μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης των κόμβων το οποίο δεν εξυπηρετείται.

Σε ό, τι αφορά τη σχέση μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης, παρατηρείται το γεγονός ότι η λύση που προκύπτει από την επίλυση του αλγορίθμου είναι αρκετά ευαίσθητη. Δηλαδή, στην περίπτωση όπου η ζήτηση των κόμβων είναι μεγαλύτερη από την προσφορά των εγκαταστάσεων που πρόκειται να εγκατασταθούν κατά 7% περίπου, σημειώνεται αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης κατά ένα ποσοστό που ξεπερνά το 5%. Αυτό υποδηλώνει ότι η επίλυση του αλγορίθμου στην περίπτωση όπου η προσφορά των εγκαταστάσεων που πρόκειται να χωροθετηθούν δεν καλύπτει όλη τη ζήτηση των κόμβων, δίνει χειρότερες τιμές αντικειμενικής συνάρτησης συγκριτικά με την περίπτωση που μελετήθηκε αρχικά, όταν δηλαδή η προσφορά είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση.

6.4 Σύγκλιση Γενετικού Αλγορίθμου

Κατά την εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου, συχνά, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε διαφορετικές επαναλήψεις παρουσιάζει μικρή διακύμανση. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, ο αλγόριθμος, εντοπίζει μια «καλή», αλλά με σημαντική διαφορά από τη βέλτιστη, λύση, που έχει εντοπίσει σε άλλες δοκιμές, σε μικρό χρονικό διάστημα, δηλαδή συγκλίνει πρώιμα. Όλα τα παραπάνω γίνονται εμφανή από τα διαγράμματα προόδου του γενετικού αλγορίθμου, τα οποία έχουν παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 5 (Σχήμα 5.3 – 5.8). Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να παρατηρηθεί το γεγονός ότι δύο διαφορετικές επαναλήψεις με ίδιο επιλεγμένο μέγεθος πληθυσμού, συντελεστή διασταύρωσης, καθώς και συντελεστή μετάλλαξης, μπορούν να δώσουν διαφορετική τιμή αντικειμενικής συνάρτησης και να απαιτούν διαφορετικό χρόνο μέχρι αυτή να αποκτήσει τη βέλτιστη τιμή.

6.5 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να προταθούν ορισμένες βελτιώσεις, τόσο για την επέκταση του προβλήματος που αντιμετωπίστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, όσο και για την αλγοριθμική αντιμετώπιση που αυτή εφάρμοσε, εισάγοντας ορισμένες υποθέσεις που περιγράφονται παρακάτω.

Αρχικά, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η εξέταση του βαθμού στον οποίο η αρχική λύση που επιλέχθηκε επηρεάζει το αποτέλεσμα που δίνει ο γενετικός αλγόριθμος. Αυτό

συμβαίνει γιατί, στη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε, ο αρχικός πληθυσμός παράγεται τυχαία. Έτσι, θα μπορούσε να κατασκευαστεί μια μέθοδος για την παραγωγή της αρχικής λύσης και με τον τρόπο αυτό να μελετηθεί αν και κατά πόσο βελτιώνεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Στη συνέχεια, θα παρουσίαζε ενδιαφέρον η περίπτωση που το μαθηματικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε, το Fixed Charge Location Problem, τροποποιούνταν με διαφορετικό τρόπο, τόσο με την αντικατάσταση ορισμένων όρων της αντικειμενικής συνάρτησης του μοντέλου είτε ακόμα και με το διαφορετικό ορισμό μερικών από αυτούς.

Μία ακόμη ενδιαφέρουσα πρόταση η οποία καθιστά το μαθηματικό μοντέλο που επιλέχθηκε πιο σύνθετο, είναι ο διαχωρισμός των κόμβων ζήτησης σε κατοικήσιμες και εμπορικές – βιομηχανικές περιοχές, και η πληροφορία η οποία προκύπτει να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω βελτίωση του μοντέλου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί, χάρη στο γεγονός ότι το Fixed Charge Location Problem, όπως και τα περισσότερα βασικά μοντέλα χωροθέτησης τα οποία αναπτύχθηκαν στην εργασία, είναι αρκετά απλά, με αποτέλεσμα να μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν στις ανάγκες του προβλήματος που μελετάται κάθε φορά και να βελτιωθούν.

Τέλος, μία κατεύθυνση προς την οποία θα μπορούσε να στραφεί η μελλοντική έρευνα αφορά στην αβεβαιότητα που υπεισέρχεται σε τέτοιου είδους προβλήματα. Τα μοντέλα το οποίο χρησιμοποιήθηκε, όπως και όλα τα βασικά μοντέλα χωροθέτησης, υποθέτουν πως οι παράμετροι του προβλήματος είναι γνωστές με βεβαιότητα. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι απόλυτα ρεαλιστικό, καθώς υπάρχει μια σημαντική αβεβαιότητα στα περισσότερα προβλήματα χωροθέτησης εγκαταστάσεων. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής των περισσότερων εγκαταστάσεων. Η ζήτηση, ο χρόνος μετακίνησης, τα έξοδα των εγκαταστάσεων, ακόμα και η απόσταση μπορεί να αλλάζουν, κάτι το οποίο συνήθως γίνεται τυχαία. Έτσι λοιπόν, η δημιουργία στοχαστικών μοντέλων χωροθέτησης αποτελεί βασική προϋπόθεση για την προσαρμογή του προβλήματος σε ρεαλιστικές συνθήκες.

Κλείνοντας, αξίζει να αναφερθεί πως παρά τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η μεθοδολογία η οποία αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία μπορεί να παρέχει ένα αρκετά ρεαλιστικό πρότυπο χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών ταξί στην

Αττική, και μια αξιόλογη συμβολή στην αναπτυσσόμενο τομέα της ηλεκτρικής κινητικότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη Βιβλιογραφία

Balinski, M. L. (1965). "Integer programming: methods, uses, computations," *Management Science*, 12(3), 253-313.

Bean, J. C. (1994), "Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization," *ORSA journal on computing*, 6(2), 154-160

Campbell, J. F. (1990). "Locating transportation terminals to serve an expanding demand," *Transportation Research Part B: Methodological*, 24(3), 173-192.

Campbell, J. F. (1994). "Integer programming formulations of discrete hub location problems," *European Journal of Operational Research*, 72(2), 387-405.

Cavadas, J., Correia, G., & Gouveia, J. (2014). "Electric vehicles charging network planning". In *Computer-based Modelling and Optimization in Transportation* (pp. 85-100). Springer International Publishing.

Chan, C. C., & Chau, K. T. (1997). "An overview of power electronics in electric vehicles," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 44(1), 3-13.

Chen, T. D., Kockelman, K. M., & Khan, M. (2013, January). "The electric vehicle charging station location problem: a parking-based assignment method for Seattle," In *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting* (Vol. 340, pp. 13-1254).

Church, R. L., & Meadows, M. E. (1979). "Location modeling utilizing maximum service distance criteria," *Geographical Analysis*, 11(4), 358-373.

Church, R., & ReVelle, C. R. (1974). "The maximal covering location problem," *Papers in regional science*, 32(1), 101-118.

Colorni, A., Dorigo, M., & Maniezzo, V. (1991, December), "Distributed optimization by ant colonies," In *Proceedings of the first European conference on artificial life* (Vol. 142, pp. 134-142).

Daskin, M. S. (2000). "A new approach to solving the vertex p-center problem to optimality: Algorithm and computational results," *Communications of the Operations Research Society of Japan*, 45(9), 428-436.

- Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. (1996). "Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem," *Location science*, 4(3), 139-154.
- Feng, L., Ge, S., & Liu, H. (2012, March). "Electric vehicle charging station planning based on weighted Voronoi diagram," In *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific* (pp. 1-5). IEEE.
- Garey, M. R., & Johnson, D. S. (1979). "Computer and intractability: a guide to theory of NP-completeness," S. Francisco.
- Ghaziri H. (1991). "Solving routing problems by a self-organizing map," 79 *Artificial Neural Networks*. pp. 829-834
- Giménez, D. A., Ribeiro, A., Gutiérrez-Puebla, J., & Pais-Antunes, A. (2014). "Charging-Stations for Electrical Vehicles: Analysis and Model to Identify the Most Convenient Locations," In *Computer-based Modelling and Optimization in Transportation* (pp. 101-111). Springer International Publishing.
- Goldberg, D. E., & Lingle, R. (1985, July). "Alleles, loci, and the traveling salesman problem," In *Proceedings of the first international conference on genetic algorithms and their applications* (pp. 154-159). Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- Golberg, D. E. (1989). "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning," *Addion wesley*, 1989.
- Goldman, A. J. (1969). "Optimal locations for centers in a network," *Transportation Science*, 3(4), 352-360.
- Hakimi, S. L. (1964). "Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph." *Operations research*, 12(3), 450-459.
- Hakimi, S. L. (1965). "Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems," *Operations Research*, 13(3), 462-475.
- Hamacher, H. W., & Drezner, Z. (2002). "*Facility location: applications and theory*," Springer Science & Business Media.

- Holland, J. H. 1975, "Adaptation in Natural and Artificial Systems," University of Michigan Press, (Second edition: MIT Press, 1992).
- Klose, A., & Drexl, A. (2005), "Facility location models for distribution system design," *European Journal of Operational Research*, 162(1), 4-29.
- Marsh, M. T., & Schilling, D. A. (1994). "Equity measurement in facility location analysis: A review and framework," *European Journal of Operational Research*, 74(1), 1-17.
- Megiddo, N., Zemel, E., & Hakimi, S. L. (1983). "The maximum coverage location problem," *SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods*, 4(2), 253-261.
- O'Kelly, M. E. (1986a). "Activity levels at hub facilities in interacting networks," *Geographical Analysis*, 18(4), 343-356.
- O'Kelly, M. E. (1986b). "The location of interacting hub facilities," *Transportation science*, 20(2), 92-106.
- Palisade Corporation, January 2010, "Guide to using Evolver – The Genetic Algorithm Solver for Microsoft Excel Version 5.5".
- Plastria, F. (1995). "Continuous location problems: research, results and questions," *Facility Location: A survey of applications and methods*, 85-127.
- Rahman, S. U., & Smith, D. K. (2000). "Use of location-allocation models in health service development planning in developing nations," *European Journal of Operational Research*, 123(3), 437-452.
- Sáez, D., Cortés, C. E., & Núñez, A. (2008). "Hybrid adaptive predictive control for the multi-vehicle dynamic pick-up and delivery problem based on genetic algorithms and fuzzy clustering," *Computers & Operations Research*, 35(11), 3412-3438.
- Silva, F. J. F., & De la Figuera, D. S. (2007). "A capacitated facility location problem with constrained backlogging probabilities," *International journal of production research*, 45(21), 5117-5134.

Schmitt L.J. (1995), “An evaluation of a genetic algorithmic approach to the vehicle routing problem,” Working paper, Department of Information Technology Management, Christian Brothers University, Memphis, TN.

Schumann, M., & Retzko, R. (1995). “Self Organizing Maps for Vehicle Routing Problems-minimizing an explicit cost function,” In Fogelman-Soulie F., editor, Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks, Paris. pp. 401-406.

Suyama, Y. M. (1991, July). “Self-organization via competition, cooperation and categorization applied to extended vehicle routing problems,” In *Neural Networks, 1991., IJCNN-91-Seattle International Joint Conference on* (Vol. 1, pp. 385-390). IEEE.

Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., & Bergman, L. (1971). “The location of emergency service facilities,” *Operations Research*, 19(6), 1363-1373

Toregas, C., & ReVelle, C. (1972). “Optimal location under time or distance constraints,” *Papers in Regional Science*, 28(1), 133-144.

Worley, O., Klabjan, D., & Sweda, T. M. (2012, March). “Simultaneous vehicle routing and charging station siting for commercial electric vehicles,” In *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International* (pp. 1-3). IEEE.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Βλαχάβας, Ι., Κεφαλας, Π., & Βασιλειάδης, Ν. Φ. Κόκκορας και Η. Σακελλαρίου, 2006, «Τεχνητή Νοημοσύνη» - Γ' Έκδοση, εκδ. Μ. Γκιούρδας.[2] Κεραυνού. *Ε Τεχνητή Νοημοσύνη και Έμπειρα Συστήματα. Ελληνικό Ανοιχτό Πανεπιστήμιο. Πάτρα.*

Γεωργόπουλος, Ε.Φ., Λυκοθανάσης, Σ.Δ., 1999, «Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής

Καρλαύτης, Μ.Γ., Λαγαρός, Ν.Δ., 2010. «Επιχειρησιακή Έρευνα και Βελτιστοποίηση για Μηχανικούς», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα

Μακρόπουλος, Χ., Ευστρατιάδης, Α., 2011, «Γενετικοί Αλγόριθμοι», σειρά διαφανειών, Τομέας υδατικών Πόρων και περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μητρόπουλος, Π., 2007, «Πολυκριτηριακή ανάλυση στη λήψη αποφάσεων για τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων και την κατανομή πόρων,» (Doctoral dissertation).

Πιριπίτση Κ., 2010, «Αειφόρος Κινητικότητα, Τύποι εναλλακτικών οχημάτων και νέες τεχνολογίες,» Ίδρυμα Ενέργειας Κύπρου

Σπέντζας, Κ., 2009, «Ηλεκτροκίνητα Οχήματα στην Ελλάδα: Δυνατότητες και Προοπτικές», Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτόματου Ελέγχου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Διαδίκτυο

Kukreja R, n.d., “*Advantages and Disadvantages of Electric Cars,*” ανακτήθηκε από: <http://www.conserve-energy-future.com>

Rigoglioso M., 2010, “*Carlos Ghosn: Electric Cars Are Alive and Well,*” ανακτήθηκε από: <https://www.gsb.stanford.edu>

“*Transport: Greece; Athens to promote use of electric cars,*” 2014, ανακτήθηκε από: <http://www.ansamed.info/ansamed/it/>

Καγιαμπάκης Μ., n.d., «*Η Ηλεκτροκίνηση στην Ελλάδα*», ανακτήθηκε από: Εργαστήρια Ηλεκτρολογίας του Σύγχρονου ΣΕΚ Ηρακλείου, <http://www.electricalab.gr>

