

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

*«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΙΝΗΤΩΝ
ΜΟΝΑΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ»*



Εκπόνηση: Θεοδώρα Κωνσταντίνου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Κεραπτσόγλου,

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Διπλωματική εργασία με θέμα:

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΙΝΗΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ
ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ»

Εκπόνηση: Θεοδώρα Κωνσταντίνου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Ιουλίου 2016.

.....
Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννα Σπυροπούλου
Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Βασίλειος Ψαριανός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Ανάπτυξη μοντέλου χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων» ανατέθηκε από τον κ. Κ. Κεπαπτσόγλου, Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Μ.Π., τον Φεβρουάριο του 2016 και εκπονήθηκε στον τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους είχαν καθοριστική συμβολή στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, αλλά και των σπουδών μου γενικότερα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου τόσο για την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας όσο και για την πλήρη επιστημονική υποστήριξη, την άρτια συνεργασία, τη συνεχή ενθάρρυνση, τις κατευθύνσεις και τις συμβουλές που μου παρείχε σε όλα τα στάδια εκπόνησής της.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλειο Ψαριανό, Καθηγητή του Ε.Μ.Π. και την κ. Ιωάννα Σπυροπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια του Ε.Μ.Π., που δέχτηκαν να είναι μέλη της τριμελούς επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες σε όλο το εκπαιδευτικό προσωπικό της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών για τις τόσες γνώσεις και εμπειρίες που μας μετέφερε κατά τη διάρκεια αυτών των πέντε χρόνων σπουδών.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στους δικούς μου ανθρώπους για την ανεκτικότητα, τη θερμή υποστήριξη και την αμέριστη συμπαράσταση που μου έδειξαν καθ' όλη τη φοιτητική μου πορεία μέχρι σήμερα.

Κωνσταντίνου Θεοδώρα

Αθήνα, Ιούλιος 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου βέλτιστης χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων για μια επιλεγμένη περιοχή της Αλεξανδρούπολης. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται αποτελεί μια παραλλαγή ενός μοντέλου χωροθέτησης εγκαταστάσεων, του μοντέλου συνόλου κάλυψης, και διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό κατάλληλους περιορισμούς. Στόχος του μοντέλου αυτού είναι η αναζήτηση του βέλτιστου αριθμού και των βέλτιστων θέσεων των απαιτούμενων κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων στην περιοχή εφαρμογής, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί επάρκεια ελέγχων αλλά και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος χωροθέτησης. Η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου πραγματοποιείται με τη μέθοδο των Γενετικών Αλγορίθμων και τη χρήση του λογισμικού Eolver. Επιλέγονται εκείνες οι παράμετροι του Γενετικού Αλγορίθμου που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα και, με βάση αυτές, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται δείχνουν ότι η μέθοδος των Γενετικών Αλγορίθμων δίνει ικανοποιητικές λύσεις σε αποδεκτό υπολογιστικό χρόνο και ότι, έτσι, είναι δυνατή η αποτελεσματική εφαρμογή της προσέγγισης που ακολουθήθηκε στην πράξη.

Λέξεις-Κλειδιά: Κινητές Μονάδες Ελέγχου Καυσαερίων, Πρόβλημα Βελτιστοποίησης, Μοντέλο Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων, Μοντέλο Συνόλου Κάλυψης, Γενετικοί Αλγόριθμοι

ABSTRACT

The objective of this diploma thesis is the development of a mathematical model, for locating vehicle emissions testing mobile units in an urban area. The model developed is the set covering location model, and is formulated as an optimization problem under suitable constraints. The model aims at determining the optimal number and locations of the mobile units that are required in a network, in an attempt to ensure inspection adequacy and to minimize fixed and variable costs. In order to solve the model, Genetic Algorithms are utilized. The results presented show that Genetic Algorithms produce satisfactory solutions in an acceptable computational time and that the approach suggested in this thesis can be implemented effectively.

Key Words: Vehicle Emissions Testing Mobile Units, Optimization Problem, Facility Location Model, Set Covering Location Model, Genetic Algorithms

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vi
ABSTRACT	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ	xiii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενική Ανασκόπηση.....	1
1.2 Τεχνικός Έλεγχος Οχημάτων	4
1.3 Κινητές Μονάδες Ελέγχου Κausσαερίων.....	11
1.4 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας	20
1.5 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	21
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	23
2.1. Εισαγωγή στη Χωροθέτηση Εγκαταστάσεων	23
2.2. Ιστορική Αναδρομή και Εξέλιξη	28
2.3. Μεθοδολογική Προσέγγιση.....	30
3. ΒΑΣΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ	35
3.1. Μοντέλα Μέσης ή Συνολικής Απόστασης (Total or Average Distance Models).....	35
3.2. Μοντέλα Μέγιστης Απόστασης (Maximum Distance Models)	50
3.3. Μοντέλα Κάλυψης (Covering Location problems).....	55
4. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	65
4.1. Κριτήρια Χωροθέτησης Κινητών Μονάδων Ελέγχου Κausσαερίων	65
4.2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	67
4.3. Επιλογή Μοντέλου Χωροθέτησης.....	72

4.4.	Περιοχή Εφαρμογής – Δεδομένα	77
5.	ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	81
5.1.	Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους.....	81
5.2.	Βασικές Έννοιες και Χαρακτηριστικά Γενετικών Αλγορίθμων	83
5.3.	Δομή Γενετικών Αλγορίθμων.....	86
5.4.	Πλεονεκτήματα και Λόγοι Χρήσης Γενετικών Αλγορίθμων	93
5.5.	Επίλυση με Χρήση του Λογισμικού Evolver	97
6.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	111
6.1.	Υπόβαθρο Εφαρμογής.....	111
6.2.	Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου.....	112
6.3.	Αποτελέσματα	114
7.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	127
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	133
8.1.	Ανασκόπηση Διπλωματικής Εργασίας.....	133
8.2.	Συμπεράσματα.....	134
8.3.	Προτάσεις	137
9.	ΠΗΓΕΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ	141

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Όρια εκπεμπόμενων ρύπων, Euro 6.....	4
Πίνακας 1.2: Οχήματα χωρίς καταλύτη που ταξινομήθηκαν ή τέθηκαν σε κυκλοφορία για πρώτη φορά μέχρι την 1-10-1986.....	17
Πίνακας 1.3: Οχήματα χωρίς καταλύτη που ταξινομήθηκαν ή τέθηκαν σε κυκλοφορία για πρώτη φορά μετά την 1-10-1986.....	17
Πίνακας 1.4: Οχήματα χωρίς καταλύτη που ταξινομήθηκαν ή τέθηκαν σε κυκλοφορία για πρώτη φορά μέχρι την 1-07-2002.....	17
Πίνακας 1.5: Οχήματα χωρίς καταλύτη που ταξινομήθηκαν ή τέθηκαν σε κυκλοφορία για πρώτη φορά μετά την 1-07-2002.....	18
Πίνακας 2.1: Κριτήρια και κατηγορίες προβλημάτων χωροθέτησης.....	25
Πίνακας 5.1: Σύντομη επεξήγηση και αντιστοίχιση ορολογίας ΓΑ και φυσικών συστημάτων.....	85
Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα διαφορετικών συνδυασμών παραμέτρων του Γενετικού Αλγορίθμου (λογισμικό Evolver).....	115
Πίνακας 6.2: Βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων και τιμές αντικειμενικής συνάρτησης.....	119

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Παράγοντες που επηρεάζουν την εκπομπή ρύπων από τα αυτοκίνητα	3
Σχήμα 1.2: Εσωτερικό Κέντρου Τεχνικού Ελέγχου Οχημάτων	7
Σχήμα 1.3: Κινητή μονάδα ΚΤΕΟ.....	10
Σχήμα 1.4: Διαδικασία ελέγχου με τη βοήθεια των αρχών	13
Σχήμα 1.5: Διαδικασία ελέγχου καυσαερίων οχήματος (ταξί)	13
Σχήμα 1.6: Τοποθέτηση ακροφύσιου στην εξάτμιση του οχήματος	14
Σχήμα 1.7: Ο χειριστής ελέγχει τις ενδείξεις του αναλυτή καυσαερίων	16
Σχήμα 1.8: Ο αναλυτής καυσαερίων εκδίδει αυτόματα τις μετρήσεις	16
Σχήμα 3.1: Παράδειγμα δικτύου.....	59
Σχήμα 5.1: Σχηματική απεικόνιση διασταύρωσης δύο γονέων, ώστε να προκύψουν δύο απόγονοι.....	89
Σχήμα 5.2: Αναπαράσταση μετάλλαξης.....	91
Σχήμα 5.3: Βασική δομή ενός Γενετικού Αλγορίθμου.....	93
Σχήμα 5.4: Γραμμή εργαλείων του λογισμικού Evolver	98
Σχήμα 5.5: Παράθυρο της εντολής Model Definition του Evolver.....	99
Σχήμα 5.6: Παράθυρο της επιλογής Group του λογισμικού Evolver (Καρτέλα General).....	101
Σχήμα 5.7: Παράθυρο της επιλογής Group του λογισμικού Evolver (Καρτέλα Operators)	102
Σχήμα 5.8: Παράθυρο της επιλογής Constraint του λογισμικού Evolver.....	103
Σχήμα 5.9: Παράθυρο της επιλογής Optimization Settings του λογισμικού Evolver (Καρτέλα General).....	104
Σχήμα 5.10: Παράθυρο της επιλογής Optimization Settings του λογισμικού Evolver (Καρτέλα Runtime).....	105
Σχήμα 5.11: Παράθυρο της επιλογής Optimization Settings του λογισμικού Evolver (Καρτέλα View).....	105
Σχήμα 5.12: Παράθυρο της επιλογής Optimization Settings του λογισμικού Evolver (Καρτέλα Macros).....	106
Σχήμα 5.13: Παράθυρο προόδου της επιλογής Start του λογισμικού Evolver.....	107
Σχήμα 5.14: Παράθυρο Evolver Watcher (Καρτέλα Stopping Options).....	108
Σχήμα 5.15: Καρτέλα Optimization Summary του λογισμικού Evolver.....	108

Σχήμα 5.16: Καρτέλα Log of All Trials του λογισμικού Evolver	109
Σχήμα 5.17: Καρτέλα Log of Progress Steps του λογισμικού Evolver	109
Σχήμα 6.1: Μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ανάλογα με το χρόνο για το βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων: Πληθ: 40, Βαθμ. Διαστ.: 0,6, Βαθμ. Μετάλ.: 0,05.....	120
Σχήμα 6.2: Μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ανάλογα με το χρόνο για συνδυασμό παραμέτρων: Πληθ.: 30, Βαθμ. Διαστ: 0,2, Βαθμ. Μετάλ.: 0,05.....	120
Σχήμα 6.3: Μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ανάλογα με το χρόνο για συνδυασμό παραμέτρων: Πληθ.: 30, Βαθμ. Διαστ.: 0,6, Βαθμ. Μετάλ.: 0,05.....	121
Σχήμα 6.4: Μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ανάλογα με το χρόνο για συνδυασμό παραμέτρων: Πληθ.: 40, Βαθμ. Διαστ.: 0,6, Βαθμ. Μετάλ.: 0,15.....	121
Σχήμα 6.5: Μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ανάλογα με το χρόνο για συνδυασμό παραμέτρων: Πληθ.: 60, Βαθμ. Διαστ.: 0,6, Βαθμ. Μετάλ.: 0,1.....	122
Σχήμα 7.1: Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με το ποσοστό εξυπηρέτησης (α)	127
Σχήμα 7.2: Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με το διαθέσιμο αριθμό κινητών μονάδων (p)	128
Σχήμα 7.3: Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με τον ελάχιστο αριθμό θέσεων χωροθέτησης (n)	129
Σχήμα 7.4: Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με τα βάρη w_1 και w_2	130

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 4.1: Περιοχή εφαρμογής- Οδικό δίκτυο	78
Χάρτης 6.1: Τελικές θέσεις των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων σε τμήμα της Αλεξανδρούπολης.....	123
Χάρτης 6.2: Τελικές θέσεις των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων σε τμήμα της Αλεξανδρούπολης (α).....	124
Χάρτης 6.3: Τελικές θέσεις των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων σε τμήμα της Αλεξανδρούπολης (β).....	124
Χάρτης 6.4: Τελικές θέσεις των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων σε τμήμα της Αλεξανδρούπολης (γ)	125

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί το εισαγωγικό κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση του προβλήματος της ρύπανσης που προέρχεται από τα μηχανοκίνητα οχήματα, καθώς και των μεθόδων του τεχνικού ελέγχου των οχημάτων. Έπειτα, αναλύεται η λειτουργία και η χρησιμότητα των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων και τέλος, πραγματοποιείται αναφορά στο αντικείμενο και στη δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.1 Γενική Ανασκόπηση

Είναι γεγονός ότι τα περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με την αυτοκίνηση είναι υπαρκτά και οξυμένα. Παρά τη σημαντική βελτίωση της τεχνολογίας στο συγκεκριμένο τομέα, το ρυπαντικό φορτίο των κυκλοφορούντων οχημάτων συνεχίζει να είναι υψηλό. Είναι λοιπόν απαραίτητο να παρθούν δραστικά μέτρα για την επίτευξη των στόχων μείωσης των εκλυόμενων ρύπων από τα οχήματα, προκειμένου να προστατευτεί η δημόσια υγεία αλλά και το κλίμα.

Οι οδικές μεταφορές αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης οικονομικής και κοινωνικής ζωής. Σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Ενέργειας (International Energy Agency, 2000), σχεδόν το ένα τρίτο της ενέργειας στις χώρες του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Ο.Ο.Σ.Α) καταναλώνεται στον τομέα των μεταφορών (28% για το 1997, με προοπτική να φτάσει το 31% το 2020).

Χαρακτηριστική είναι η ταξινόμηση των πηγών των ρύπων που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της συνθήκης για τη διασυνοριακή ρύπανση στη Γενεύη το 1979 (United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), 1979). Η ταξινόμηση αυτή (Selected Nomenclature for Sources of Air Pollution) περιλαμβάνει τις εξής κατηγορίες κινητών πηγών ρύπανσης:

- Οδικές μεταφορές
- Στρατός
- Σιδηροδρομικές μεταφορές
- Ποτάμιες μεταφορές
- Παράκτιες δραστηριότητες
- Αεροπορικές μεταφορές

- Γεωργικές δραστηριότητες
- Δασικές δραστηριότητες
- Βιομηχανικές δραστηριότητες
- Οικιακές δραστηριότητες (περιποίηση κήπων).

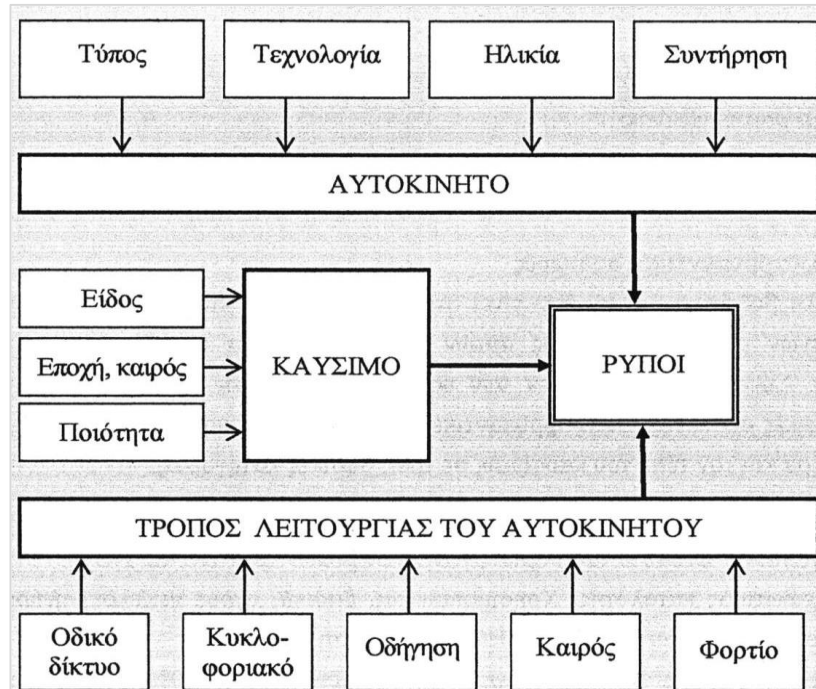
Μέσα στην πληθώρα, λοιπόν, των ρυπογόνων δραστηριοτήτων μιας πόλης, οι σύγχρονες οδικές μεταφορές, με κυρίαρχα τα μηχανοκίνητα οχήματα, συνεισφέρουν σημαντικά στη διεύρυνση του προβλήματος της ρύπανσης, αναφορικά με την ποιότητα του αέρα. Η ισχύς που είναι απαραίτητη για την κίνηση ενός μηχανοκίνητου οχήματος προέρχεται από την καύση του καυσίμου σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης (κινητήρας). Η ρύπανση δημιουργείται τόσο από τα προϊόντα της καύσης (καυσαέρια) όσο και από την εξάτμιση του καυσίμου. Κατά το χρονικό διάστημα που ο κινητήρας δεν έχει φτάσει να λειτουργεί στην κανονική του θερμοκρασία, εμφανίζονται αυξημένες εκπομπές ρύπων. Υπό το πρίσμα αυτό, οι εκπομπές που πηγάζουν από τα οχήματα μπορούν να θεωρηθούν ως εξής: εκπομπές από την κανονική λειτουργία του κινητήρα, εκπομπές ψυχρής εκκίνησης και εκπομπές λόγω εξάτμισης καυσίμου.

Οι εκπομπές ρύπων από τα οχήματα εξαρτώνται από μια μεγάλη σειρά παραγόντων (σχήμα 1.1), οι οποίοι μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες:

- ✓ Παράγοντες που έχουν σχέση με το σχεδιασμό και την κατασκευή του οχήματος (τύπος, τεχνολογία, ηλικία, συντήρηση οχήματος).
- ✓ Παράγοντες που έχουν σχέση με τον τρόπο λειτουργίας του οχήματος (οδικό δίκτυο, κυκλοφοριακό δίκτυο, οδήγηση, καιρός, φορτίο).
- ✓ Παράγοντες που έχουν σχέση με το καύσιμο που χρησιμοποιείται (είδος καυσίμου, εποχή, ποιότητα καυσίμου).

Ειδικότερα, η ποιότητα των καυσίμων έχει μεγάλη σημασία στον έλεγχο των εκπεμπόμενων ρύπων. Πέρα από την επίδραση των καυσίμων στην εκπομπή πρωτογενών ρύπων (άκαυστοι υδρογονάνθρακες, μονοξείδιο του άνθρακα, σωματίδια) και δευτερογενών ρύπων (όπως είναι το όζον), στα καύσιμα οφείλονται εκπομπές τοξικών (όπως το βενζόλιο) και επικίνδυνων ενώσεων (μόλυβδος, βαριά μέταλλα κ.ά.) (Πίτσα, 2003). Αναφέρεται ότι τα κύρια καύσιμα υλικά που χρησιμοποιούνται στις μηχανές των οχημάτων, δηλαδή η βενζίνη και το ντίζελ (diesel), αποτελούν μίγματα υδρογονανθράκων. Κατά τη διάρκεια της καύσης τους,

εκπέμπονται ρύποι από την εξάτμιση του αυτοκινήτου με σοβαρές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία αλλά και στο φαινόμενο του φωτοχημικού νέφους.



Σχήμα 1.1: Παράγοντες που επηρεάζουν την εκπομπή ρύπων από τα αυτοκίνητα

[Πηγή: Πίτσα (2003)]

Η Ελλάδα εμφανίζεται στις πρώτες θέσεις μεταξύ των χωρών της ΕΕ, αναφορικά με τα επίπεδα της φωτοχημικής ρύπανσης, με κορυφαίο παράγωγο το όζον. Την τελευταία δεκαετία, τα μέσα επίπεδα όζοντος παρουσιάζουν ανοδική τάση. Η συγκλίνουσα επιστημονική άποψη είναι ότι η κυκλοφορία των αυτοκινήτων παραμένει η κύρια γενεσιουργός αιτία του φωτοχημικού νέφους (Παρταγιάς, 2001). Ειδικότερα, στην ΕΕ οι μεταφορές ευθύνονται για το 20% των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και από αυτές το 12% προέρχεται από την κίνηση με ιδιωτικό αυτοκίνητο (Θεοπέμπτου, 2015).

Η πολιτεία, προκειμένου να προβεί σε μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος, έχει θεσμοθετήσει όρια εκπομπής ρύπων για κάθε κατηγορία οχήματος που κυκλοφορεί και υποχρεώνει τον ιδιοκτήτη να ελέγχει ετησίως το όχημά του, όπως θα αναφερθεί εκτενέστερα παρακάτω (υποκεφάλαιο 1.2). Αναλυτικότερα, στον παρακάτω πίνακα 1.1 παρουσιάζονται τα όρια εκπομπής των ρύπων των οχημάτων, σύμφωνα με τον κανονισμό του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου

(Euro 6). Ο κανονισμός αυτός αφορά τα οχήματα των οποίων η μάζα αναφοράς δεν υπερβαίνει τα 2.610 kg.

Πίνακας 1.1: Όρια εκπεμπόμενων ρύπων, Euro 6

[Πηγή: EC Regulation -EC/715/2007]

Αριθμός θέσεων οχήματος	Καύσιμο	Όρια εκπομπών							Ημ/νίες ισχύος	
		CO	THC	NMHC	NOx	THC + NOx	PM	Σωματίδια (αριθμός/χλμ)	Τύπος έγκρισης των νέων μοντέλων	Όλα τα μοντέλα
έως 9	B	1000	100	68	60	-	5,0/4,5	-	1/9/2014	1/9/2015
έως 9	N	500	-	-	80	170	5,0/4,5	6,0 x 10 ¹¹	1/9/2014	1/09/1015

Υπόμνημα: **B** = βενζίνη, **N** = ντίζελ, **CO** = μάζα μονοξειδίου του αζώτου (mg/km), **THC** = μάζα συνολικών υδρογονανθράκων (mg/km), **NMHC** = μάζα υδρογονανθράκων εκτός μεθανίου (mg/km), **NOx** = οξείδια του αζώτου (mg/km), **THC + NOx** = συνδυασμένη μάζα συνολικών υδρογονανθράκων και οξειδίων του αζώτου (mg/km), **PM** = μάζα σωματιδίων (mg/km), **Σωματίδια** = αριθμός σωματιδίων.

Παράλληλα, η ΕΕ έχει στραφεί σε εναλλακτικά προς τη βενζίνη και το πετρέλαιο καύσιμα, όπως είναι τα βιοκαύσιμα, το πεπιεσμένο φυσικό αέριο, το υγραέριο και, στο εγγύς μέλλον, το υδρογόνο. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο, απαιτούνται δραστικές αλλαγές στους παράγοντες που επηρεάζουν την εκπομπή ρύπων και επαρκέστεροι τεχνικοί έλεγχοι των οχημάτων.

1.2 Τεχνικός Έλεγχος Οχημάτων

Είναι απαραίτητο όλα τα οχήματα να υπόκεινται σε μια σειρά ελέγχων, υποχρεωτικών και μη, πριν και κατά τη διάρκεια της κυκλοφορίας τους. Οι έλεγχοι αυτοί αφορούν όλα τα συστήματα του αυτοκινήτου και ειδικότερα, αυτά που σχετίζονται με την οδική ασφάλεια και τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Όσον αφορά την οδική ασφάλεια, το κύριο πρόβλημα είναι ότι κυκλοφορεί ένας αυξημένος αριθμός οχημάτων με τεχνικά ελαττώματα. Σύμφωνα με το Δελτίο Τύπου της Ευρωπαϊκής Επιτροπής το 2012, περισσότερα από 5 άτομα πεθαίνουν κάθε μέρα σε τροχαία ατυχήματα στην Ευρώπη λόγω τεχνικών αστοχιών. Τα

τεχνικά ελαττώματα ευθύνονται για το 6% των ατυχημάτων με παντός είδους αυτοκίνητα, το οποίο μεθερμηνεύεται σε 2.000 νεκρούς και πολύ περισσότερους τραυματίες κάθε χρόνο. Το 8% των ατυχημάτων με παντός είδους δίκυκλα συνδέεται, επίσης, με τεχνικά ελαττώματα. Για το λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει εγκρίνει κανόνες για να καταστεί αυστηρότερο το καθεστώς ελέγχου και να διευρυνθεί το πεδίο εφαρμογής του.

Ωστόσο, οι τεχνικοί έλεγχοι δεν πιστοποιούν μόνο την καλή κατάσταση ενός οχήματος, αλλά, ταυτόχρονα, συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος. Η προσοχή της παρούσας εργασίας στρέφεται σε αυτήν την πτυχή των τεχνικών ελέγχων και κυρίως, στον τομέα που σχετίζεται με τον έλεγχο των καυσαερίων των αυτοκινήτων. Η ανάγκη ύπαρξης αυτών των ελέγχων συνδέεται άμεσα με την ανάγκη της προστασίας του περιβάλλοντος από τους επικίνδυνους ρύπους, οι οποίοι επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα και δημιουργούν ένα ανθυγιεινό περιβάλλον για όλους τους ανθρώπους και, ειδικά, για όσους ζουν στις μεγάλες πόλεις, όπου κυκλοφορούν καθημερινά αμέτρητα οχήματα. Οι παράγωγοι αυτοί ρύποι, εκτός από τη μόλυνση που προκαλούν στο περιβάλλον, επιβαρύνουν και τη λειτουργία του κινητήρα και της εξάτμισης, με αποτέλεσμα τα οχήματα να φθείρονται ταχέως και να εμφανίζουν συνεχείς βλάβες.

Σύμφωνα με την παράγραφο 1 του άρθρου 3 του ν.2052/1992 (ΦΕΚ 94/Α'), όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει με την παράγραφο 1 του άρθρου 5 του ν.3710/2008 (ΦΕΚ 216/Α'), «καθιερώνεται ειδικός έλεγχος καυσαερίων για όλες τις κατηγορίες των κυκλοφορούντων οχημάτων επιβατηγών, φορτηγών, λεωφορείων, μοτοσικλετών και μοτοποδηλάτων».

Γενικά, ο πλήρης και αναλυτικός έλεγχος των καυσαερίων που εκπέμπονται από ένα όχημα είναι εξαιρετικά χρονοβόρος και οικονομικά ασύμφορος, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η εφαρμογή του σε ελέγχους μεμονωμένων οχημάτων. Επιπλέον, ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι δαπανηρός και δεν μπορεί να είναι ευρέως διαθέσιμος. Έτσι, έχει αναπτυχθεί μια μεγάλη ποικιλία ειδικών ελέγχων, κατάλληλων κάθε φορά για τις συγκεκριμένες ανάγκες. Παραδείγματα τέτοιων ελέγχων, που διευκολύνουν τις εκάστοτε ανάγκες, αποτελούν οι έλεγχοι στη δυναμομετρική εξέδρα οχημάτων, οι έλεγχοι στη δυναμομετρική εξέδρα κινητήρων, ο έλεγχος με δοκιμασίες μακράς χρονικής διάρκειας και ο έλεγχος εξ' αποστάσεως (Πίτσα, 2003).

Στο πλαίσιο της συνολικής προσπάθειας συντήρησης των οχημάτων με σκοπό να παράγουν όσο το δυνατόν λιγότερες εκπομπές καυσαερίων, έχουν οριστεί αρκετές κατηγορίες ελέγχων καυσαερίων, πριν και κατά τη διάρκεια της κυκλοφορίας ενός οχήματος. Οι έλεγχοι αυτοί είναι οι ακόλουθοι:

- οι έλεγχοι για την έγκριση τύπου (Certification), προκειμένου να πιστοποιηθεί ότι, σύμφωνα με τις διατάξεις της Οδηγίας 70/156/ΕΟΚ, ένα όχημα μπορεί να τεθεί σε κυκλοφορία και πληροί τις τεχνικές απαιτήσεις,
- οι έλεγχοι για την εξασφάλιση της συμμόρφωσης παραγωγής-ανάκλησης (Selective Enforcement Audit) που γίνονται στο εργοστάσιο κατασκευής του αυτοκινήτου στο τέλος της γραμμής παραγωγής και πριν από την έγκριση τύπου,
- ο έλεγχος της εν κυκλοφορία συμμόρφωσης – απόσυρση για τη συμμόρφωση των οχημάτων σε σχέση με τις εγκρίσεις τύπου κατά τη διάρκεια της κανονικής ωφέλιμης ζωής τους υπό ομαλές συνθήκες χρήσης,
- οι έλεγχοι για τον προσδιορισμό των συντελεστών εκπομπής που χαρακτηρίζουν συγκεκριμένες κατηγορίες οχημάτων, υπολογίζονται με ποικίλες μεθόδους και απαιτείται να είναι πάντα επίκαιροι,
- οι έλεγχοι που σχετίζονται με τη χορήγηση άδειας κυκλοφορίας-ταξινόμηση και έχουν ως αποτέλεσμα το ισχύον «πιστοποιητικό συμμόρφωσης» που εκδίδει ο κατασκευαστής και συνοδεύει κάθε όχημα που έχει κατασκευαστεί σύμφωνα με τον εγκεκριμένο τύπο οχήματος,
- οι προαιρετικοί τεχνικοί έλεγχοι που διενεργούνται από τα συνεργεία επισκευής και συντήρησης αυτοκινήτων κατόπιν πρωτοβουλίας του ιδιοκτήτη του αυτοκινήτου, αν και πλέον είναι υποχρεωτικοί στο πλαίσιο της υποχρέωσης του ιδιοκτήτη (άρθρο 15 του Κ.Ο.Κ),
- ο οδικός έλεγχος των οχημάτων επαγγελματικής χρήσης που είναι μη ανακοινωθείς από τις αρχές, διενεργείται σε δημόσιο δρόμο και η διαδικασία του προβλέπεται από την Οδηγία 2000/30/ΕΚ,
- ο υποχρεωτικός τεχνικός έλεγχος των κυκλοφορούντων οχημάτων.

Σύμφωνα με τη νομοθεσία της ΕΕ, διασφαλίζεται ότι όλα τα οχήματα και τα ρυμουλκούμενα τους υπόκεινται σε υποχρεωτικό τακτικό τεχνικό έλεγχο. Έτσι, παρέχεται η βάση για τον έλεγχο των οχημάτων σε όλη την ΕΕ, ώστε αυτά να πληρούν τις ίδιες προδιαγραφές ασφάλειας καθ' όλη τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής τους.

Ο υποχρεωτικός τεχνικός έλεγχος των κυκλοφορούντων οχημάτων περιλαμβάνει δύο τύπους ελέγχων:

- Τους περιοδικούς τεχνικούς ελέγχους, όπου οι κάτοχοι πρέπει να προσέλθουν με το όχημά τους στα ειδικά κέντρα ελέγχου.
- Τους επιτόπιους ελέγχους στο δρόμο, όπου ο έλεγχος καυσαερίων διενεργείται από τις αρχές και τους τεχνικούς, τυχαία και δειγματοληπτικά στους δρόμους.

Όσον αφορά τους περιοδικούς τεχνικούς ελέγχους, οι έλεγχοι αυτοί γίνονται περιοδικά σε δημόσια ή ιδιωτικά Κέντρα Τεχνικού Ελέγχου Οχημάτων (ΚΤΕΟ ή ΙΚΤΕΟ) (σχήμα 1.2), τα οποία, με κατάλληλο έλεγχο, διαπιστώνουν εάν οι εκπομπές καυσαερίων βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων, ώστε έτσι να εφοδιάσουν τα οχήματα με το έντυπο της Κάρτας Ελέγχου Καυσαερίων (ΚΕΚ). Η Κάρτα Ελέγχου Καυσαερίων πιστοποιεί, δηλαδή, ότι το όχημα ελέγχθηκε και ότι οι ρύποι που εκπέμπει δεν ξεπερνούν τα εκάστοτε θεσμοθετημένα όρια.



Σχήμα 1.2: Εσωτερικό Κέντρου Τεχνικού Ελέγχου Οχημάτων

[Πηγή: Προσωπικό αρχείο]

Ο θεσμός της «Κάρτας Ελέγχου Κουσαερίων» (ΚΕΚ.) καθιερώθηκε κατ' εξουσιοδότηση του άρθρου 3 του Ν.2052/92 και εντάσσεται στα μέτρα για την αντιμετώπιση του νέφους στα μεγάλα αστικά κέντρα. Με βάση τα σημερινά δεδομένα, κάθε αυτοκίνητο πρέπει να είναι εφοδιασμένο με ΚΕΚ, εφόσον έχει συμπληρώσει έναν χρόνο από την πρώτη φορά που κυκλοφόρησε στους ελληνικούς δρόμους. Η κάρτα πρέπει να ανανεώνεται ανά δώδεκα μήνες για τα Ι.Χ. και ανά έξι μήνες για τα επαγγελματικά οχήματα (όπως είναι τα ταξί και τα φορτηγά).

Η διαδικασία του ελέγχου στα ΚΤΕΟ είναι απλή. Με την προσέλευση του οχήματος στο ΚΤΕΟ γίνεται αρχικά η καταγραφή του, βάσει του αριθμού κυκλοφορίας και των στοιχείων της άδειάς του και ακολουθεί η ταυτοποίησή του μέσω μιας διαδικασίας, η οποία περιλαμβάνει τη σύγκριση του αριθμού πλαισίου με εκείνον που αναγράφεται στην άδεια κυκλοφορίας. Στη συνέχεια, το όχημα περνά στο χώρο ελέγχου, ο οποίος είναι ειδικά διαμορφωμένος για τη διαδικασία. Τα διάφορα μηχανήματα και οι χώροι ελέγχου είναι διατεταγμένα σε μία η περισσότερες γραμμές, έτσι ώστε το κάθε όχημα να περνά διαδοχικά από κάθε μια διαδικασία.

Τα αντικείμενα ελέγχου των ΚΤΕΟ αφορούν αρχικά τους οπτικούς, περιμετρικούς ελέγχους των οχημάτων. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ο έλεγχος των κουσαερίων που, όπως έχει αναφερθεί, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα θεσπισμένα όρια εκπομπής ρύπων. Έπειτα, γίνεται ο έλεγχος του συστήματος ανάρτησης, που είναι η διάταξη που συνδέει το πλαίσιο του αυτοκινήτου με τους τροχούς και στη συνέχεια, ελέγχεται το σύστημα πέδησης του οχήματος, δηλαδή τα φρένα. Επιπλέον, παρακολουθούνται τα φώτα για την ορθή λειτουργία, το σωστό χρωματισμό και την ένταση των φώτων θέσης και πορείας. Τέλος, διενεργείται έλεγχος σύγκλισης-απόκλισης, ώστε να διατηρείται η ευθύγραμμη πορεία του οχήματος και να εξασφαλίζεται η μακροζωία των υποσυστημάτων και των εξαρτημάτων του. Σε κάθε στάδιο του ελέγχου, τα αποτελέσματα καταγράφονται σε κάθε σταθμό και μεταφέρονται ηλεκτρονικά στο κεντρικό σύστημα συλλογής πληροφοριών του ΚΤΕΟ.

Η παραπάνω διαδικασία αφορά τον πλήρη έλεγχο ενός οχήματος και τα αποτελέσματα καταγράφονται σε ένα επίσημο δελτίο, το οποίο ο οδηγός προμηθεύεται αποχωρώντας από το ΚΤΕΟ. Με το δελτίο αυτό, ο ιδιοκτήτης του

οχήματος έχει τη δυνατότητα να αποδείξει ότι οι υποχρεωτικοί έλεγχοι, στους οποίους πρέπει να υποβληθεί το όχημα, έχουν πραγματοποιηθεί. Αυτό το επίσημο έγγραφο ονομάζεται δελτίο τεχνικού ελέγχου ΚΤΕΟ. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί, στο σημείο αυτό, πως με τη νομοθεσία που ψηφίστηκε τον Δεκέμβριο του 2010, το δελτίο που εκδίδεται κατά τον έλεγχο ΚΤΕΟ επέχει και θέση Κάρτας Καυσαερίων. Αυτό σημαίνει ότι κάθε φορά που ένα όχημα περνάει από έλεγχο ΚΤΕΟ, δε χρειάζεται να εκδώσει ξεχωριστή Κάρτα Ελέγχου Καυσαερίων, επειδή καλύπτεται για έναν χρόνο από το δελτίο τεχνικού ελέγχου.

Σε περίπτωση σημαντικών ελλείψεων του οχήματος κατά τη διαδικασία του ελέγχου, οι οδηγοί θα πρέπει να φροντίζουν, ώστε το πρόβλημα να διορθωθεί και να προσέρχονται στα ΚΤΕΟ για επανέλεγχο μέσα σε έναν προκαθορισμένο χρόνο. Εάν δεν προσέλθουν ή αν γενικά δεν φροντίσουν να προμηθευτούν την Κάρτα Καυσαερίων, επισύρονται τα αντίστοιχα πρόστιμα.

Αναφέρεται συμπληρωματικά ότι ο έλεγχος καυσαερίων μπορεί να γίνεται τακτικά και στα εξουσιοδοτημένα συνεργεία αυτοκινήτων, στο πλαίσιο της διαδικασίας χορήγησης της Κάρτας Ελέγχου Καυσαερίων. Η εξουσιοδότηση των συνεργείων επισκευής αυτοκινήτων για την έκδοση ΚΕΚ γίνεται από τις Υπηρεσίες Μεταφορών και Επικοινωνιών (πρώην Υπηρεσίες Συγκοινωνιών) των Νομαρχιών της χώρας, εφόσον διαπιστωθεί, ύστερα από έλεγχο, ότι πληρούν τις προϋποθέσεις και έχουν τον ειδικό εξοπλισμό που έχει καθορισθεί με Κοινή Απόφαση των Υπουργών ΠΕΧΩΔΕ και Μεταφορών και Επικοινωνιών (ΚΥΑ 103079/3712/92). Τα συνεργεία που εξουσιοδοτούνται να χορηγούν ΚΕΚ έχουν ειδικό εξοπλισμό ανάλογα με τον τύπο των οχημάτων.

Ακόμη, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών έχει διαθέσει έξι μονάδες κινητών ΚΤΕΟ (σχήμα 1.3), οι οποίες έχουν τη δυνατότητα πραγματοποίησης περιοδικού τεχνικού ελέγχου σε όλες τις κατηγορίες οχημάτων (επιβατικών, φορτηγών, λεωφορείων και συρμών με μικτό βάρος μέχρι 18 τόνους ανά άξονα οχήματος). Κάθε μονάδα Κινητού ΚΤΕΟ θα πραγματοποιεί δύο ειδών τεχνικούς ελέγχους οχημάτων: έκτακτους τεχνικούς ελέγχους σε οχήματα που κυκλοφορούν στο δρόμους, με τη βοήθεια της τροχαίας, καθώς και περιοδικούς τεχνικούς ελέγχους οχημάτων που κυκλοφορούν σε ορισμένα γεωγραφικά διαμερίσματα της χώρας στα οποία είναι δύσκολη η προσέλευση πολιτών με τα οχήματά τους (πχ Δωδεκάνησα, Κυκλάδες, Βόρειες

Σποράδες). Με αυτόν τον τρόπο, καλύπτονται ικανοποιητικά ορισμένες ευαίσθητες περιοχές της χώρας και, έτσι, πραγματοποιείται ένα σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση της προστασίας του περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.3: Κινητή μονάδα ΚΤΕΟ

[Πηγή: Προσωπικό αρχείο]

Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι η αναγκαιότητα του τεχνικού ελέγχου είναι αναγνωρισμένη και παρά την υποχρεωτική πλέον φύση του, εκτιμάται ότι πάνω από το ένα τρίτο των οχημάτων που κυκλοφορούν σήμερα στη χώρα δεν έχουν πιστοποιηθεί από ΚΤΕΟ, δηλαδή δε διαθέτουν Κάρτα Ελέγχου Καυσαερίων. Σύμφωνα με το πρόγραμμα ελέγχου ρύπανσης περιβάλλοντος Αθήνας (ΠΕΡΠΑ), εκτιμάται ότι ο αριθμός των ανέλεγκτων οχημάτων παραμένει σταθερός, στα επίπεδα των περασμένων ετών, στα 2 εκατομμύρια περίπου. Παράλληλα, ακόμα και σε χώρες πιο πειθαρχημένες από τη δική μας, όπως πχ στη Δανία και στη Γερμανία, τα επίπεδα των εκλυόμενων ρύπων είναι πολύ πάνω από τις προδιαγραφές, υποδηλώνοντας μια σκληρή πραγματικότητα που δύσκολα μπορεί να ξεπεραστεί.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα κοινά ελάχιστα πρότυπα για τους τεχνικούς ελέγχους οχημάτων, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στους υπάρχοντες κανόνες της ΕΕ που χρονολογούνται από το 1977 και έκτοτε έχουν

επικαιροποιηθεί ελάχιστα (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2012). Υπάρχουν τρία κύρια νομοθετήματα:

- Η οδηγία 2009/40/EK καθορίζει ελάχιστα πρότυπα για τους περιοδικούς τεχνικούς ελέγχους των μηχανοκίνητων οχημάτων· πρόκειται για τον τακτικό τεχνικό έλεγχο των οχημάτων βάσει του νόμου. Η οδηγία εφαρμόζεται για τα επιβατικά αυτοκίνητα, τα λεωφορεία, τα πούλμαν και τα βαρέα οχήματα μεταφοράς εμπορευμάτων, καθώς και τα ρυμουλκούμενά τους, όχι όμως για τα δίκυκλα και τα μοτοποδήλατα.
- Η οδηγία 2009/40/EK συμπληρώνεται με την οδηγία 2000/30/EK, η οποία προβλέπει την απαίτηση να ελέγχεται η τεχνική κατάσταση των οχημάτων επαγγελματικής χρήσης στο μεσοδιάστημα των τεχνικών ελέγχων (με τεχνικούς οδικούς ελέγχους). Πρόκειται για πρόσθετους επιτόπιους οδικούς ελέγχους των οχημάτων επαγγελματικής χρήσης.
- Η οδηγία 1999/37/EK σχετικά με τα έγγραφα κυκλοφορίας οχημάτων καθορίζει τις απαιτήσεις για την έκδοση των πιστοποιητικών ταξινόμησης, την αμοιβαία αναγνώρισή τους και το εναρμονισμένο ελάχιστο περιεχόμενο των πιστοποιητικών ταξινόμησης των οχημάτων.

1.3 Κινητές Μονάδες Ελέγχου Καυσαερίων

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στους ελέγχους «πεδίου» που πραγματοποιούνται από κινητές μονάδες ελέγχου καυσαερίων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στους επιτόπιους ελέγχους στο δρόμο, ο έλεγχος καυσαερίων διενεργείται από τους ειδικούς τεχνικούς υπό την επίβλεψη των αρχών, τυχαία και δειγματοληπτικά σε δημόσιους δρόμους. Η μέθοδος επιλογής των οχημάτων, που υποβάλλονται στους ελέγχους, θα πρέπει να στηρίζεται σε στοχοθετημένη προσέγγιση, αποδίδοντας ιδιαίτερη σημασία στον εντοπισμό των οχημάτων που δίνουν περισσότερο την εντύπωση κακής συντήρησής τους. Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι, εκτός από τις κινητές μονάδες ελέγχου πεδίου που αφορούν τη συγκεκριμένη εργασία, οι έλεγχοι στο δρόμο μπορούν να πραγματοποιηθούν και από ειδικά ελεγκτικά κλιμάκια (ΣΔΟΕ), μικτά κλιμάκια ελέγχου και κινητά ΚΤΕΟ, τα οποία αναφέρθηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Στην παράγραφο δ' του άρθρου 2 του π.δ.363/1995 (ΦΕΚ 193 Α'), ορίζεται ότι: «Η κινητή μονάδα ελέγχου «πεδίου» δύναται να εκτελεί οδικό τεχνικό έλεγχο ο

οποίος συνίσταται στην οπτική επιθεώρηση της κατάστασης του οχήματος σε θέματα οδικής ασφάλειας και λειτουργίας. Σε περίπτωση διαπίστωσης ελλείψεων ή παραβάσεων βεβαιώνονται τα προβλεπόμενα από τον Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας (Κ.Ο.Κ.) πρόστιμα από το μέλος της κινητής μονάδας ελέγχου, που είναι όργανο της αρμόδιας Αστυνομικής Αρχής».

Σύμφωνα με τη νομοθεσία της ΕΕ, μπορούν να διενεργούνται σε όλα τα κράτη μέλη αιφνιδιαστικοί έλεγχοι οχημάτων στο δρόμο, ανεξάρτητα από το αν το όχημα είναι ταξινομημένο στην ΕΕ. Οι έλεγχοι αυτοί καλύπτουν τα φρένα, τις εκπομπές καυσαερίων και τη γενικότερη κατάσταση του οχήματος. Επίσης, μπορεί να ζητηθεί από τους οδηγούς να παρουσιάσουν το πιστοποιητικό του υποχρεωτικού τεχνικού ελέγχου που πέρασε πρόσφατα το όχημά τους.

Η υπηρεσία αυτή των κινητών μονάδων χρηματοδοτείται από το 3ο Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το κάθε κλιμάκιο διαθέτει δύο ελεγκτές, προερχόμενους από το Υπουργείο όπου ανήκει, και ένα ή δύο αστυνομικούς, προερχόμενους από τις περιοχές όπου γίνεται ο έλεγχος. Κάθε κινητή μονάδα ελέγχου διαθέτει τον εξής εξοπλισμό:

- ✓ «Φρενόμετρο» για τον έλεγχο του συστήματος των φρένων.
- ✓ «Αμορτισερόμετρο» για τον έλεγχο του συστήματος ανάρτησης.
- ✓ «Συγκλισιόμετρο» για τον έλεγχο του συστήματος διεύθυνσης.
- ✓ «Τζογόμετρο» για τους οπτικούς ελέγχους των συστημάτων διεύθυνσης – ανάρτησης.
- ✓ «Φωτόμετρο» για τον έλεγχο λειτουργίας των φώτων.
- ✓ «Αναλυτή καυσαερίων» για τον έλεγχο καυσαερίων βενζινοκίνητων και πετρελαιοκίνητων οχημάτων.
- ✓ «Νεφελόμετρο» για τη μέτρηση των εκπομπών καπνού των πετρελαιοκίνητων οχημάτων.

Όπως έχει αναφερθεί, η διαδικασία ελέγχου γίνεται με τη βοήθεια των αρχών, οι οποίες σταματούν τα οχήματα, ώστε να ελεγχθούν από τους υπαλλήλους του Υπουργείου Μεταφορών (σχήμα 1.4). Αρχικά, ελέγχονται η άδεια και το δίπλωμα του οδηγού, καθώς και η Κάρτα Ελέγχου Καυσαερίων. Έπειτα, ακολουθεί η διαδικασία ελέγχου (σχήμα 1.5) με ορισμένες διαφορές ανάμεσα στη διαδικασία και τα όρια εκπομπών για τα οχήματα με ρυθμιζόμενο τριοδικό καταλυτικό

μετατροπέα¹ και στη διαδικασία και τα όρια για τα οχήματα χωρίς ρυθμιζόμενο τριοδικό καταλυτικό μετατροπέα.



Σχήμα 1.4: Διαδικασία ελέγχου με τη βοήθεια των αρχών

[Πηγή: Προσωπικό αρχείο]



Σχήμα 1.5: Διαδικασία ελέγχου καυσαερίων οχήματος

[Πηγή: Προσωπικό αρχείο]

¹ καταλυτικός μετατροπέας (καταλύτης): μια κατασκευή που τοποθετείται στο σύστημα εξαγωγής καυσαερίων των βενζινοκίνητων και πετρελαιοκίνητων αυτοκινήτων με στόχο την μετατροπή των εκπεμπόμενων ρυπαντών σε αβλαβή για την ατμόσφαιρα καυσαέρια. Τριοδικός είναι ο καταλύτης που οξειδώνει CO, HC και ανάγει τα NO_x σε N₂.

Απαραίτητη και πιο συχνή είναι η διαδικασία μέτρησης εκπομπών καυσαερίων, η οποία γίνεται απλά και σύντομα με τη βοήθεια του αναλυτή καυσαερίων. Ο τεχνικός, δηλαδή ο υπάλληλος του υπουργείου μεταφορών, τοποθετεί ένα ακροφύσιο στην εξάτμιση του οχήματος, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.6 και μετράει το επίπεδο των ρύπων κατά τη λειτουργία του κινητήρα στο ρελαντί (850 στροφές ανά λεπτό περίπου) και σε υψηλότερες στροφές (2200-3000 στροφές ανά λεπτό). Τα όρια για κάθε μέτρηση είναι διαφορετικά ανάλογα με την ηλικία του οχήματος και, όπως αναφέρθηκε ήδη, την τεχνολογία καύσης του κινητήρα (καταλυτικό όχημα ή όχι). Είναι σημαντικό, κατά τη διάρκεια μέτρησης, ο κινητήρας να έχει αποκτήσει τη σωστή θερμοκρασία λειτουργίας του. Αναφέρεται, επίσης, ότι πριν τη μέτρηση πρέπει να έχει ελεγχθεί η ροή των καυσαερίων στον αναλυτή με συνδεδεμένο ένα σωλήνα δειγματοληψίας.



Σχήμα 1.6: Τοποθέτηση ακροφύσιου στην εξάτμιση του οχήματος

[Πηγή: Προσωπικό αρχείο]

Πιο αναλυτικά για τα όργανα ελέγχου των εκπομπών καυσαερίων των οχημάτων, οι αναλυτές καυσαερίων μετρούν την ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων και για το λόγο αυτό, υπάρχουν συσκευές μέτρησης των δύο, τεσσάρων και πέντε αερίων συστατικών στα καυσαέρια. Οι ρύποι που προκύπτουν από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης των οχημάτων είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το

διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οξείδια του θείου (SO_x), καθώς και τα μικροσωματίδια της αιθάλης. Ωστόσο, οι κυριότεροι ρυπαντές, που ελέγχονται από τις κινητές μονάδες ελέγχου καυσαερίων και των οποίων τα όρια είναι θεσμοθετημένα από το Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών, είναι το μονοξείδιο του άνθρακα, οι υδρογονάνθρακες για τους βενζινοκινητήρες και η αιθάλη για τους πετρελαιοκινητήρες, η οποία είναι και υπεύθυνη για το σκουρόχρωμο καπνό που εκπέμπουν τα πετρελαιοκίνητα οχήματα και μετριέται με τη χρήση του «αιθαλόμετρου». Επιπροσθέτως, υπολογίζεται και ο λόγος λ, ο οποίος δεν αποτελεί ρυπαντή αλλά μια ένδειξη της σωστής λειτουργίας του κινητήρα και του καταλύτη του οχήματος. Σημειώνεται, επίσης, ότι οι αναλυτές καυσαερίων είναι, πιστοποιημένα, κλάσεως I ή 0, σύμφωνα με τις συστάσεις του Διεθνούς Οργανισμού Μετρολογίας (OIML). Η πιστοποίηση υποδεικνύεται από έγκριση αναγνωρισμένου ή κοινοποιημένου φορέα της ΕΕ (άρθρο 3, ΚΥΑ Φ1/26579/3183).

Στους σύγχρονους αναλυτές καυσαερίων υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα, όπως: μέτρηση στροφών κινητήρα, θερμοκρασίας λαδιού, λόγου αέρα. Η λειτουργία των αναλυτών στηρίζεται στο ότι κάθε αέριο απορροφά ορισμένη περιοχή από το φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Οι περιοχές αυτές του φάσματος λέγονται φασματικές γραμμές και διαφέρουν για κάθε αέριο. Η περιεκτικότητα του αερίου είναι αντιστρόφως ανάλογη με το ποσοστό της απορροφούμενης από αυτό ακτινοβολίας. Οι παλαιότεροι αναλυτές βασίζονταν στη μεταβολή της αντίστασής τους λόγω της θερμικής αγωγιμότητας, η οποία ήταν ανάλογη με τη θερμοκρασία των καυσαερίων.

Κατά τη διάρκεια του ελέγχου, ο χειριστής του μηχανήματος ανάλυσης καυσαερίων κοιτάζει τις ενδείξεις (σχήμα 1.7), προκειμένου να εξάγει συμπέρασμα για την κατάσταση του αυτοκινήτου. Ο αναλυτής καυσαερίων εκδίδει, αυτόματα με τη μέτρηση, τις ενδείξεις του ελεγχόμενου αυτοκινήτου (σχήμα 1.8), ώστε οι υπάλληλοι του Υπουργείου να τις καταχωρήσουν στο αρχείο με τα ελεγχόμενα οχήματα. Αφού έχει συμπληρωθεί το χαρτί όπου αναγράφονται τα στοιχεία του αυτοκινήτου και του οδηγού, ο ιδιοκτήτης υπογράφει το χαρτί ελέγχου.



Σχήμα 1.7: Ο χειριστής ελέγχει τις ενδείξεις του αναλυτή καυσαερίων

[Πηγή: Προσωπικό αρχείο]



Σχήμα 1.8: Ο αναλυτής καυσαερίων εκδίδει αυτόματα τις μετρήσεις

[Πηγή: Προσωπικό αρχείο]

Σύμφωνα με το άρθρο 2 της ΚΥΑ Φ1/26579/3183 (ΦΕΚ Β790/18.5.2007), καθορίζονται οι επιτρεπόμενες τιμές συγκέντρωσης των εκπεμπόμενων ρύπων του μονοξειδίου του άνθρακα και των υδρογονανθράκων των βενζινοκίνητων και υγραεριοκίνητων οχημάτων, καθώς και η περιοχή στην οποία επιτρέπεται να κυμαίνεται ο συντελεστής λ. Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από την τεχνολογία

κατασκευής του οχήματος και το έτος έκδοσης της πρώτης άδειας κυκλοφορίας και καθορίζονται στους ακόλουθους πίνακες 1.2, 1.3, 1.4, 1.5.

Πίνακας 1.2: Οχήματα χωρίς καταλύτη που ταξινομήθηκαν ή τέθηκαν σε κυκλοφορία για πρώτη φορά μέχρι την 1-10-1986

[Πηγή: ΚΥΑ Φ1/26579/3183]

ΡΥΠΟΣ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	
	βραδυπορία (ρελαντί)	υψηλές στροφές
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO) %	<4,5	-
Υδρογονάνθρακες (HC) ppm	<800	<700

Πίνακας 1.3: Οχήματα χωρίς καταλύτη που ταξινομήθηκαν ή τέθηκαν σε κυκλοφορία για πρώτη φορά μετά την 1-10-1986

[Πηγή: ΚΥΑ Φ1/26579/3183]

ΡΥΠΟΣ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	
	βραδυπορία (ρελαντί)	υψηλές στροφές
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO) %	<3,5	-
Υδρογονάνθρακες (HC) ppm	<500	<400

Πίνακας 1.4: Οχήματα χωρίς καταλύτη που ταξινομήθηκαν ή τέθηκαν σε κυκλοφορία για πρώτη φορά μέχρι την 1-07-2002

[Πηγή: ΚΥΑ Φ1/26579/3183]

ΡΥΠΟΣ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	
	βραδυπορία (ρελαντί)	υψηλές στροφές
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO) %	<0,5	<0,3
Υδρογονάνθρακες (HC) ppm	<120	<100
Συντελεστής λ	-	0,97 - 1,03 ή όπως προβλέπει ο κατασκευαστής

Πίνακας 1.5: Οχήματα χωρίς καταλύτη που ταξινομήθηκαν ή τέθηκαν σε κυκλοφορία για πρώτη φορά μετά την 1-07-2002

[Πηγή: ΚΥΑ Φ1/26579/3183]

ΡΥΠΟΣ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	
	βραδυπορία (ρελαντί)	υψηλές στροφές
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO) %	<0,3	<0,2
Υδρογονάνθρακες (HC) ppm	<120	<100
Συντελεστής λ	-	0,97 - 1,03 ή όπως προβλέπει ο κατασκευαστής

Υπάρχει η περίπτωση ο έλεγχος του οχήματος να χαρακτηριστεί ανεπιτυχής ή ανέφικτος, ανάλογα με ορισμένα κριτήρια που αναφέρονται στα άρθρα 4 και 7 της ΚΥΑ Φ1/26579/3183. Στην περίπτωση αυτή, κατά τον τεχνικό έλεγχο του οχήματος από τις κινητές μονάδες ελέγχου ή από άλλες αρμόδιες αρχές ή όργανα, δε χορηγείται καταλληλότητα, απαιτείται επανέλεγχος και εφαρμόζονται οι διαδικασίες που προβλέπονται από τις οικείες διατάξεις. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι η διάθεση των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων μπορεί να ανακληθεί, αν οι υπηρεσίες δεν αποστέλλουν στοιχεία ή αν διαπιστωθεί από τα στοιχεία που αποστέλλονται ότι δε γίνεται ικανοποιητική χρήση των μονάδων.

Οι κινητές μονάδες ελέγχου καυσαερίων είναι ένας θεσμός που καλύπτει το νομό Αττικής και ορισμένες περιφερειακές ενότητες. Στο νομό Αττικής εκτιμάται ότι υπάρχουν συνολικά δώδεκα μονάδες: το Υπουργείο Μεταφορών διαθέτει εννέα κινητές μονάδες, ενώ το ΥΠΕΧΩΔΕ τρεις. Αν και μικρός ο αριθμός τους, οι κινητές μονάδες έχουν ισχυρή λειτουργία, εφόσον έχουν αναγκάσει αρκετούς οδηγούς να επισκεφτούν το συνεργείο, προκειμένου η χρήση του οχήματός τους να μη συνοδεύεται από σύννεφα καυσαερίων. Αναφέρεται ότι το 2006 διενεργήθηκαν 11.629 έλεγχοι οχημάτων, δηλαδή 21,4% περισσότεροι έλεγχοι από την προηγούμενη χρονιά. Κατά τους ελέγχους αυτούς διενεργήθηκαν 8.090 μετρήσεις μόνο σε καταλυτικά αυτοκίνητα. Το 2015 διατέθηκαν δεκατέσσερις κινητές μονάδες ελέγχου καυσαερίων, κυριότητας του υπουργείου Οικονομίας, σε δεκατρείς περιφερειακές ενότητες της χώρας και πιο συγκεκριμένα, στις περιφερειακές ενότητες Μαγνησίας και Σποράδων, Αιτωλοακαρνανίας, Ιωαννίνων, Σερρών, Κυκλάδων, Λέσβου, Ηρακλείου, Αχαΐας, Έβρου, Κοζάνης (2 κινητές μονάδες), Τρικάλων, Βοιωτίας και Ευβοίας. Οι κινητές μονάδες χρησιμοποιήθηκαν

από τις υπηρεσίες των περιφερειακών ενοτήτων αποκλειστικά και μόνο για τον έλεγχο καυσαερίων των κυκλοφορούντων οχημάτων και υποχρεούνταν να αποστέλλουν κάθε μήνα στη Διεύθυνση Ελέγχου Οχημάτων και Εγκαταστάσεων του υπουργείου τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ελέγχων πεδίου που πραγματοποιούνταν.

Οι έλεγχοι καυσαερίων από τα κινητά κλιμάκια αποδεικνύουν ότι η κατάσταση των περισσότερων οχημάτων είναι σημαντικά επιβαρυντική για το περιβάλλον αλλά και τη δημόσια υγεία και την οδική ασφάλεια. Όσον αφορά την ανταπόκριση των κινητών μονάδων που λειτουργούν στις απαιτήσεις τους, οι αρμόδιοι θεωρούν ότι σημαντικός είναι ο ρόλος της ελληνικής αστυνομίας, αφού μαζί με τα κινητά κλιμάκια είναι απαραίτητο να είναι παρόν τουλάχιστον ένας αστυνομικός. Όμως, σε κάποιες περιπτώσεις, αυτό δεν είναι δυνατό, αφού το δυναμικό της Τροχαίας δεν επαρκεί, με αποτέλεσμα να διατίθενται και τροχονόμοι στις υπηρεσίες αυτές.

Η λειτουργία των κινητών συνεργείων ελέγχου καυσαερίων αποτελεί μια σημαντική δραστηριότητα των Υπουργείων. Η επίδειξη της Κάρτας Ελέγχου Καυσαερίων (ΚΕΚ) στα αστυνομικά όργανα δεν είναι απαραίτητα αρκετή για να αποδείξει την καταλληλότητα ενός οχήματος, όπως άλλωστε αποδεικνύεται στην πράξη. Πιο συγκεκριμένα, κρίνοντας από την παρούσα κατάσταση, θα μπορούσε να ειπωθεί πως δεν υπάρχει επάρκεια ελέγχων. Τα οχήματα που κυκλοφορούν στην Αττική είναι περίπου 2,3 εκατομμύρια (επαγγελματικά και ιδιωτικής χρήσης), με το ένα εκατομμύριο να αντιστοιχεί σε οχήματα με χαλασμένο καταλύτη. Άμεση συνέπεια αποτελεί η μη ικανότητα των κινητών μονάδων να ελέγχουν όλα αυτά τα οχήματα, λόγω του πρακτικά μικρού αριθμού των μονάδων (εκτιμάται ότι καθημερινά η κάθε μονάδα ελέγχει περίπου δώδεκα με δεκαπέντε αυτοκίνητα). Η ποιότητα της δουλειάς των υπαλλήλων των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων δεν τίθεται υπό αμφισβήτηση, όμως τα συναρμόδια Υπουργεία Μεταφορών και ΠΕΧΩΔΕ είναι αναγκαίο να διαθέσουν και άλλα κονδύλια για τη δημιουργία περισσότερων κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων. Παράλληλα, είναι απαραίτητο να συμβάλλει και το Υπουργείο Δημόσιας Τάξης, εφόσον οι ήδη υπάρχουσες μονάδες θα πρέπει να συνοδεύονται, όπως αναφέρθηκε, από τουλάχιστον ένα αστυνομικό για να μπορέσουν να προχωρήσουν σε ελέγχους. Αυτό, όμως, θεωρείται πολλές φορές αδύνατο, δεδομένου ότι ο αριθμός των διαθέσιμων αστυνομικών είναι περιορισμένος.

Συμπερασματικά, ο ρόλος των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων είναι μέγιστης σημασίας και για αυτό θα πρέπει να συνεχιστούν και να ενισχυθούν οι προσπάθειες για την επιβολή αυστηρότερων ορίων εκπομπών και την εφαρμογή επαρκέστερων ελέγχων σε μεγαλύτερο εύρος περιοχής. Για το λόγο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει έμμεσα στην επέκταση του πεδίου εφαρμογής αυτών των ελέγχων.

1.4 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επίτευξη της βέλτιστης χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων σε αστικό δίκτυο με εφαρμογή στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης. Ο στόχος αυτός εντάσσεται στο πλαίσιο της συνολικής προσπάθειας ενίσχυσης των ελέγχων πεδίου, ώστε να εξετάζονται όλο και περισσότερα οχήματα και κατ' επέκταση να αμβλυνθεί, ως ένα βαθμό, το περιβαλλοντικό πρόβλημα που σχετίζεται με τη χρήση μηχανοκίνητων οχημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, στην εν λόγω εργασία αναζητούνται οι βέλτιστες θέσεις των απαιτούμενων κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων, με απώτερο σκοπό την εξασφάλιση επάρκειας ελέγχων στην περιοχή εφαρμογής αλλά και την ελαχιστοποίηση του κόστους χωροθέτησης, λαμβάνοντας υπόψη τους κατάλληλους περιορισμούς. Για το σκοπό αυτό, προβλέπεται η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης, ώστε να προσεγγιστεί ρεαλιστικά το εξεταζόμενο πρόβλημα χωροθέτησης και να εξυπηρετηθούν κατάλληλα οι ανάγκες του.

Αφού καταστρωθεί το μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης, επιλέγεται για την επίλυσή του η χρήση των μεθευρετικών αλγορίθμων και συγκεκριμένα των Γενετικών Αλγορίθμων. Έτσι, ορίζονται οι κατάλληλες παράμετροι του Γενετικού Αλγορίθμου και, έπειτα από μια σειρά επαναλήψεων, στόχος είναι να επιλεγεί εκείνος ο συνδυασμός παραμέτρων που δίνει τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Με βάση αυτόν τον συνδυασμό, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας, με σκοπό να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα του Γενετικού Αλγορίθμου που εφαρμόζεται.

Με τη δημιουργία και την επίλυση του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου, λοιπόν, επιδιώκεται η διαμόρφωση μιας προσέγγισης του προβλήματος που προσαρμόζεται εύκολα σε ρεαλιστικά δεδομένα, καθώς επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του κόστους χωροθέτησης και, ταυτόχρονα, η χωροθέτηση των

κινητών μονάδων σε σημεία της περιοχής εφαρμογής από όπου διέρχονται τα περισσότερα οχήματα.

1.5 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η εν λόγω διπλωματική εργασία έχει διαμορφωθεί σε εννέα επιμέρους κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένης της εισαγωγής. Στα κεφάλαια αυτά περιγράφονται οι απαραίτητες θεωρητικές έννοιες για την κατανόηση του προβλήματος που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, τα δεδομένα που χρειάστηκαν να συλλεχθούν, οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τη διαμόρφωση και την επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του προβλήματος και, τέλος, παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν. Πιο αναλυτικά:

Κεφάλαιο 1^ο: αποτελεί το εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας, στο οποίο αναφέρονται το περιβαλλοντικό πρόβλημα που δημιουργείται από τα μηχανοκίνητα οχήματα, οι βασικές μέθοδοι του τεχνικού ελέγχου των οχημάτων, καθώς και η λειτουργία και συμβολή των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων. Τέλος, πραγματοποιείται αναφορά στο αντικείμενο και στη δομή της διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2^ο: παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό και μεθοδολογικό πλαίσιο, στο οποίο θα βασιστεί η ανάπτυξη του προβλήματος μελέτης της διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, εισάγεται η έννοια του προβλήματος χωροθέτησης των μονάδων εξυπηρέτησης, περιγράφονται συνοπτικά η ιστορική αναδρομή και εξέλιξη των προβλημάτων χωροθέτησης αλλά και η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται σε τέτοια προβλήματα.

Κεφάλαιο 3^ο: παρατίθενται τα βασικά πρότυπα χωροθέτησης, τα οποία περιλαμβάνουν τα μοντέλα μέσης ή συνολικής απόστασης, τα μοντέλα μέγιστης απόστασης και τα μοντέλα κάλυψης.

Κεφάλαιο 4^ο: αναλύονται οι συνιστώσες του προβλήματος χωροθέτησης που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική. Πιο αναλυτικά, αναφέρονται τα κριτήρια χωροθέτησης των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων και, έπειτα, πραγματοποιείται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Επιπρόσθετα, επιλέγεται το καταλληλότερο μοντέλο χωροθέτησης που προσεγγίζει το εξεταζόμενο πρόβλημα και διατυπώνεται μαθηματικά. Τέλος, γίνεται αναφορά

στην περιοχή εφαρμογής της εργασίας και στα δεδομένα που απαιτήθηκαν για το πρόβλημα.

Κεφάλαιο 5^ο: αφορά την τεχνική επίλυσης του μοντέλου του εξεταζόμενου προβλήματος. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η μέθοδος επίλυσης που βασίζεται στους Γενετικούς Αλγορίθμους και η χρήση του λογισμικού Emler, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 6^ο: εφαρμόζεται η τεχνική επίλυσης του προβλήματος που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, εισάγοντας τις κατάλληλες παραμέτρους και τα κατάλληλα δεδομένα. Έπειτα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή σε αναλυτικούς πίνακες και διαγράμματα.

Κεφάλαιο 7^ο: πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για ορισμένες παραμέτρους του προβλήματος που μελετάται, δημιουργούνται σχήματα που απεικονίζουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης και, τέλος, σχολιάζονται οι μεταβολές που προκύπτουν.

Κεφάλαιο 8^ο: πραγματοποιείται η σύνοψη της μελέτης και των αποτελεσμάτων της και παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν. Τέλος, γίνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα σχετικά με το πρόβλημα της μελέτης.

Κεφάλαιο 9^ο: παρατίθεται η λίστα με τις πηγές τεκμηρίωσης της εν λόγω εργασίας.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια εισαγωγή στην έννοια της χωροθέτησης. Αρχικά, αναλύεται το πρόβλημα της χωροθέτησης εγκαταστάσεων και αναφέρονται οι σημαντικότερες διακρίσεις των προβλημάτων χωροθέτησης. Έπειτα, ακολουθεί μια σύντομη ιστορική αναδρομή σχετικά με τις ρίζες και την εξέλιξη των προβλημάτων χωροθέτησης και, τέλος, παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση κάθε προβλήματος.

2.1. Εισαγωγή στη Χωροθέτηση Εγκαταστάσεων

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της επιστήμης της λήψης αποφάσεων είναι η, κατά δυνατόν με αντικειμενικά κριτήρια, χωροθέτηση εγκαταστάσεων (facility location). Αντικείμενο των προβλημάτων τέτοιου τύπου είναι η επιλογή της βέλτιστης θέσης μιας ή περισσότερων μονάδων παροχής εξυπηρέτησης σε δεδομένο χωρικό σύστημα, έτσι ώστε να καλύπτεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η ζήτηση, να ικανοποιείται ο ανεφοδιασμός ή η κάλυψη περιοχών ή ακόμη και να επιτυγχάνεται η αλληλεπίδραση με την ύπαρξη άλλων εγκαταστάσεων (Klose & Drexl, 2005). Η σημασία της λέξης «βέλτιστη» εξαρτάται από τη φύση του εκάστοτε εξεταζόμενου προβλήματος, ήτοι από τους περιορισμούς και τα βέλτιστα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη.

Τα προβλήματα χωροθέτησης πηγάζουν από αρκετά παλαιά, όπου οι άνθρωποι, προκειμένου να εγκαταστήσουν κέντρα παροχής υπηρεσιών, βελτιστοποιούσαν χαρακτηριστικά, όπως την απόσταση ή το χρόνο μετακίνησης των πολιτών έως τα κέντρα αυτά. Ωστόσο, οι άνθρωποι αυτοί τότε δε στηρίζονταν σε κάποια επιστημονική προσέγγιση του προβλήματος χωροθέτησης και, συνεπώς, η τοποθέτηση των κέντρων παροχής υπηρεσιών γινόταν με βάση τη διαίσθησή τους. Με το πέρασμα των χρόνων, τη διατύπωση του προβλήματος WEBER, το οποίο αναφέρεται με περισσότερες λεπτομέρειες στη συνέχεια (υποκεφάλαιο 2.2), και τις προσπάθειες επίλυσής του, δημιουργήθηκαν τα πρώτα επιστημονικά μοντέλα επίλυσης του προβλήματος χωροθέτησης εγκαταστάσεων.

Τα μοντέλα αυτά είναι σχεδιασμένα να απαντούν σε μια σειρά ερωτημάτων όπως: 1) πόσες εγκαταστάσεις θα πρέπει να χωροθετηθούν, 2) σε ποιο σημείο θα χωροθετηθεί κάθε εγκατάσταση, 3) ποιο πρέπει να είναι το μέγεθος της εγκατάστασης και 4) πώς θα κατανομηθεί η ζήτηση στις επιμέρους εγκαταστάσεις.

Οι απαντήσεις στα ερωτήματα αυτά αλληλοσχετίζονται με τους αντικειμενικούς σκοπούς και με το ευρύτερο πλαίσιο μέσα στο οποίο επιλύονται τα προβλήματα χωροθέτησης. Με άλλα λόγια, οι αντικειμενικοί σκοποί, το ευρύτερο πλαίσιο και τα κριτήρια της χωροθέτησης διαφέρουν ανάλογα με τη φύση του προβλήματος, δηλαδή ανάλογα με το είδος της μονάδας που θα χωροθετηθεί και τις ανάγκες που θα προκύψουν. Μια διάκριση των προβλημάτων χωροθέτησης με διαφορετικούς σκοπούς και ανάγκες μπορεί να γίνει σε προβλήματα ιδιωτικού και δημόσιου τομέα. Οι μονάδες εξυπηρέτησης στον ιδιωτικό τομέα, όπως πχ μια αποθήκη ή ένα κατάστημα, συνήθως, χωροθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε να ικανοποιούνται στόχοι, όπως η μεγιστοποίηση του κέρδους ή η ελαχιστοποίηση του κόστους. Αντίθετα, η χωροθέτηση εγκαταστάσεων δημόσιου τομέα, όπως πχ η χωροθέτηση ενός αστυνομικού τμήματος ή μιας βιβλιοθήκης, είναι πιο πολύπλοκη, καθώς υπεισέρχονται πολιτικές και κοινωνικοοικονομικές συνιστώσες, ενώ ο αντικειμενικός στόχος εδώ είναι η μεγιστοποίηση του δημόσιου οφέλους.

Μια άλλη σημαντική διάκριση των προβλημάτων χωροθέτησης σχετίζεται με τον τρόπο ορισμού του δομικού στοιχείου «χώρος», δηλαδή με την εφικτή περιοχή τοποθέτησης των εγκαταστάσεων (Αλεξανδρή, 2009). Έτσι, τα προβλήματα μπορούν να διακριθούν σε συνεχή (continuous) και διακριτά (discrete).

Στην περίπτωση των συνεχών προβλημάτων, το πρόβλημα δεν περιγράφεται σαν μια λίστα με πιθανές τοποθεσίες αλλά με την ύπαρξη ενός «συνεχούς χώρου», ο οποίος αποτελείται από μεταβλητές που αντιστοιχούν σε συντεταγμένες. Η τελική επιλογή χωροθέτησης πρέπει να ανήκει σε εφικτή περιοχή και η ζήτηση μπορεί να εμφανίζεται σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου. Η επίλυση τέτοιων προβλημάτων βασίζεται στη γεωμετρική προσέγγιση, την κυρτή ανάλυση και στο μη γραμμικό προγραμματισμό.

Αντίθετα, στην περίπτωση των διακριτών προβλημάτων χωροθέτησης, το σύνολο των υποψήφιων θέσεων αποτελείται από ένα ορισμένο σύνολο σημείων στο επίπεδο, δηλαδή συνιστά ένα δίκτυο σημείων με τις διαθέσιμες τοποθεσίες στο πλαίσιο μιας ευρύτερης περιοχής, από τις οποίες επιλέγεται κάποια ή κάποιες με βάση ορισμένα κριτήρια επιλογής. Η λύση αυτών των προβλημάτων υπολογίζεται συνήθως με ακέραιο προγραμματισμό. Η εφικτή περιοχή είναι ένας αντιπροσωπευτικός αριθμός εναλλακτικών θέσεων αλλά μπορεί να είναι ακόμη και ένα δίκτυο, όπου οι κόμβοι ή τα σημεία κατά μήκος των πλευρών του γραφήματος

είναι πιθανές θέσεις. Στην τελευταία περίπτωση, η μελέτη και η επίλυση τέτοιων προβλημάτων σχετίζεται με τη θεωρία των γραφημάτων ή μπορούν και να εξεταστούν και σαν προβλήματα διακριτού τύπου, περιορίζοντας, όμως, τις πιθανές θέσεις εγκατάστασης σε ένα πεπερασμένο αριθμό τοποθεσιών.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι τα διακριτά προβλήματα χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες προβλημάτων (Daskin, 1995): στα κάθετα και στα δικτυακά προβλήματα χωροθέτησης. Το βασικότερο στοιχείο των κάθετων προβλημάτων είναι ότι υπάρχει ένας ορισμένος αριθμός κέντρων εξυπηρέτησης που μπορούν να τοποθετηθούν στις υποψήφιες θέσεις με βασικό σκοπό την εξυπηρέτηση της ζήτησης και κάθε σημείο ή περιοχή ζήτησης εξυπηρετείται πάντα απευθείας από το ίδιο συγκεκριμένο κέντρο εξυπηρέτησης. Όσον αφορά τα δικτυακά προβλήματα, η ζήτηση στο εκάστοτε σημείο ή περιοχή ζήτησης δεν εξυπηρετείται πάντα απευθείας και άμεσα από το ίδιο κέντρο εξυπηρέτησης, αλλά υπεισέρχονται συναρτήσεις κατανομής εξυπηρέτησης της ζήτησης και κάθε σημείο/ περιοχή ζήτησης μπορεί να εξυπηρετηθεί από ένα σύνολο κέντρων εξυπηρέτησης. Τέτοια προβλήματα αναφέρονται συνήθως και ως προβλήματα χωροθέτησης-δρομολόγησης.

Γενικά, τα προβλήματα χωροθέτησης είναι δυνατόν να κατηγοριοποιηθούν με πολλούς τρόπους, όπως πχ ανάλογα με τα κριτήρια βελτιστοποίησης, με τον τύπο του δικτύου, για το αν πρόκειται για χωροθέτηση ενός ή πολλών κέντρων παροχής υπηρεσιών κ.ά. Ενδεικτικά, οι Handler και Mirchandani (1979) πρότειναν τις εξής κατηγορίες, όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 2.1):

Πίνακας 2.1: Κριτήρια και κατηγορίες προβλημάτων χωροθέτησης

[Πηγή: Handler & Mirchandani (1979)]

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ
Αντικειμενική συνάρτηση	Minisum ή Διαμέσων προβλήματα Minimax ή Διακέντρων προβλήματα Πολυκριτηριακά προβλήματα
Αριθμός υπηρεσιών	Προβλήματα με μία ή πολλές υπηρεσίες προς χωροθέτηση
Τύπος δικτύου	Προβλήματα με δίκτυο προκαθορισμένο ή πιθανολογικό, προσανατολισμένο ή όχι, κυκλικό ή δέντρο
Σημεία ζήτησης (χρήστες)	Προβλήματα με σημεία ζήτησης μόνο στους κόμβους ή παντού στο δίκτυο
Θέσεις κέντρων παροχής υπηρεσιών	Προβλήματα με θέσεις κέντρων μόνο στους κόμβους ή παντού στο δίκτυο

Στον παραπάνω πίνακα 2.1 παρατηρείται ότι μια βασική κατηγοριοποίηση των προβλημάτων της χωροθέτησης είναι με βάση την αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή τον στόχο κάθε προβλήματος. Τα προβλήματα *minisum* ή προβλήματα διαμέσων έχουν ως στόχο, όπως θα αναφερθεί σε επόμενο κεφάλαιο αναλυτικά, την ελαχιστοποίηση του συνόλου των αποστάσεων των χρηστών (σημεία ζήτησης) από το πλησιέστερο προς αυτά κέντρο παροχής υπηρεσιών (σημείο προσφοράς). Τα προβλήματα *minimax* ή διακέντρων έχουν ως στόχο την ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόστασης που υπάρχει στο δίκτυο ενός χρήστη από το κέντρο παροχής υπηρεσιών για αυτόν. Επιπλέον, για τη χωροθέτηση κέντρων παροχής υπηρεσιών έχουν προταθεί μαθηματικά πρότυπα πολυκριτηριακής ανάλυσης. Συνήθως, τα πολυκριτηριακά πρότυπα χρησιμοποιούν στην αντικειμενική συνάρτηση ένα συνδυασμό κριτηρίων από αυτά που αναφέρονται στα προβλήματα *minisum* και *minimax*.

Η έρευνα των προβλημάτων της χωροθέτησης άπτεται πολλών πεδίων, όπως τις εφαρμογές σε Ερευνητικές και Διοικητικές επιστήμες, τη Μηχανολογία Μηχανών σε βιομηχανίες, τη Γεωγραφία, τα Οικονομικά, την Επιστήμη των Υπολογιστών, τα Μαθηματικά, το Marketing, την Ηλεκτρολογία Μηχανικών κλπ. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι το πεδίο της ανάλυσης της χωροθέτησης είναι πολύ ενεργό στην έρευνα, παρατηρείται έλλειψη ως προς τις εφαρμογές της. Μία από τις αιτίες είναι ότι πολλά πρακτικά προβλήματα περιλαμβάνουν πολλαπλούς αντικειμενικούς σκοπούς και δομές, οι οποίες δεν απεικονίζονται στις απλές μορφές των προβλημάτων χωροθέτησης (κυρίως του δημόσιου τομέα). Συνεπώς, τα βασικά μειονεκτήματα των λύσεων των προβλημάτων χωροθέτησης μπορεί να αφορούν τις μετρήσεις, την εύρεση συναίνεσης μεταξύ των ληπτών της απόφασης κ.ά.

Η ανάλυση χωροθέτησης (*location analysis*) αναφέρεται στην ανάπτυξη μαθηματικών προτύπων και αλγορίθμων τοποθέτησης εγκαταστάσεων ή κέντρων εξυπηρέτησης κάθε τύπου σε ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό ή άλλο περιβάλλον. Δηλαδή, η ανάλυση χωροθέτησης είναι μια διαδικασία κατά την οποία, σε κάποιο περιβάλλον, επιδιώκεται να εγκατασταθούν μονάδες εξυπηρέτησης, έτσι ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες των χρηστών των μονάδων αυτών (ζήτηση) κατά τον «καλύτερο δυνατό τρόπο». Αυτός ο «καλύτερος δυνατός τρόπος» επιτυγχάνεται βελτιστοποιώντας μια αντικειμενική συνάρτηση, η οποία περιγράφει ακριβέστερα τους στόχους του προβλήματος. Με τη βελτιστοποίηση της αντικειμενικής

συνάρτησης επιτυγχάνεται είτε η μεγιστοποίηση του οφέλους είτε η ελαχιστοποίηση του κόστους των εν λόγω κέντρων παροχής υπηρεσιών. Το περιβάλλον αποτελεί το χωρικό σύστημα ζήτησης, στο οποίο οι μονάδες εξυπηρέτησης και οι πελάτες είναι τοποθετημένοι. Το περιβάλλον αυτό μπορεί να είναι συνεχές ή διακριτό ή ένα δίκτυο (πλήρες ή διακριτό). Αυτό το περιβάλλον, σε κάθε πρόβλημα στην ανάλυση χωροθέτησης, αποτελεί κριτήριο για την κατηγοριοποίηση του κάθε προβλήματος.

Οι διάφορες μονάδες παροχής εξυπηρέτησης τοποθετούνται στις υποψήφιες θέσεις, οι οποίες αποτελούν υποσύνολα του περιβάλλοντος. Η τοποθέτηση μιας εγκατάστασης δεν εξετάζεται μόνο με βάση τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της (facility layout), αλλά σχετίζεται με την ανάπτυξη και το σχεδιασμό ευρύτερων συστημάτων με βάση την κατανομή των πόρων που εξυπηρετεί. Οι πόροι αυτοί είναι τα σταθερά σημεία του συστήματος όπου, ανάλογα με το πρόβλημα, αντιπροσωπεύουν άλλες εγκαταστάσεις, αγορές ή καταναλωτές, αφετηρίες ή προορισμούς με τους οποίους αλληλεπιδρά ή μία ή περισσότερες εγκαταστάσεις που πρόκειται να χωροθετηθούν (Plastria, 1995). Ο γενικευμένος όρος που περιγράφει αυτήν τη διαδικασία αναζήτησης θέσεων για εγκαταστάσεις μέσα σε δίκτυα εξυπηρέτησης είναι προβλήματα χωροθέτησεων-κατανομών (location-allocation problems).

Τα κλασικά προβλήματα χωροθέτησεων διατυπώνονται, συνήθως, ως προβλήματα γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού. Η επίλυση μεγάλων προβλημάτων πραγματοποιείται συχνά με τη βοήθεια προσεγγιστικών ή ευρετικών μεθόδων, δηλαδή με τη βοήθεια μαθηματικών προτύπων ή αλλιώς μοντέλων χωροθέτησης που έχουν χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες εφαρμογές από κλάδους, όπως η γεωγραφία, η οικονομία, ο αστικός και περιφερειακός προγραμματισμός, η επιχειρησιακή έρευνα κ.α. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να αναφερθεί πως τα μοντέλα χωροθέτησης είναι αρκετά δύσκολο να επιλυθούν κατά το βέλτιστο τρόπο και το επίπεδο δυσκολίας αυξάνεται με την ύπαρξη πολλών μεταβλητών. Επιπλέον, η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου διαφέρει για κάθε πρόβλημα χωροθέτησης ανάλογα με τη δομική του μορφή, η οποία θα αναφερθεί αναλυτικά παρακάτω. Δηλαδή, δεν υπάρχει ένα γενικότερο μοντέλο χωροθέτησης ικανό να επιλύει κάθε εφαρμογή. Έτσι, είναι απαραίτητη η προσεκτική επιλογή του μοντέλου

χωροθέτησης ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος, ώστε να διεξαχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Για την επίλυση των υποδειγμάτων χωροθέτησης κατανομής, χρησιμοποιούνται τρεις εναλλακτικές μέθοδοι: οι ακριβείς αριθμητικές λύσεις ή προγραμματιστικές τεχνικές, οι ευρετικοί αλγόριθμοι (heuristics) και οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι (meta heuristics). Οι ακριβείς τεχνικές επίλυσης έχουν το πλεονέκτημα ότι καταλήγουν πάντοτε στη βέλτιστη λύση (Church & Garfinkel, 1978). Οι τεχνικές αυτές δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα σε προβλήματα με λίγα δεδομένα και λίγες αριθμητικές πράξεις, απαιτούν, όμως, μεγάλη υπολογιστική ισχύ και πόρους. Οι αλγόριθμοι παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις ακριβείς αριθμητικές λύσεις. Με τη χρήση τους, προβλήματα με μεγάλο αριθμό κόμβων μπορούν να επιλυθούν με σχετικά χαμηλό κόστος, ενώ παράλληλα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πληθώρα αντικειμενικών συναρτήσεων. Όμως, το βασικό μειονέκτημα των αλγορίθμων αυτών είναι ότι δεν εγγυώνται τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης.

2.2. Ιστορική Αναδρομή και Εξέλιξη

Το πρώτο μοντέλο της θεωρίας χωροθέτησης θεωρείται ότι ανήκει στον Alfred Weber (1909). Ωστόσο, τα πράγματα δεν είναι και τόσο ξεκάθαρα για την προέλευση του βασικού προβλήματος χωροθέτησης. Από τη μία υποστηρίζεται ότι ο Pierre de Fermat (1601-1665) πρότεινε μια πρώτη βασική τοποθέτηση, ενώ ο ιταλός μαθηματικός και μαθητής του Galileo, Evangelista Toricelli (1608-1647) πρότεινε μια αρχική γεωμετρική λύση. Από την άλλη, θεωρείται ότι ο Ιταλός μαθηματικός Battista Cavalieri (1558-1647) ασχολήθηκε πρώτος με τη διατύπωση και τη λύση του προβλήματος και στη συνέχεια διατυπώθηκε από τον Pierre de Fermat και επιλύθηκε από τον Evangelista Toricelli. Επίσης, όπως υπογράμμισαν οι Loesch (1944) και Pinto (1977), ο Carl Friedrich Launhardt (1900) ανακάλυψε πρώτος το γεωμετρικό πρόβλημα, το οποίο αποτελεί τη ρίζα της σύγχρονης επιστήμης της χωροθέτησης. Παρόλα αυτά, ο Weber δέκα χρόνια μετά παρουσίασε μια πιο βαθιά ανάλυση του προβλήματος, η οποία θεωρείται ότι αποτέλεσε την αρχή για μια σειρά από μελέτες ερευνητών, προερχόμενων από διαφορετικούς τομείς για την επίλυση του αρχικού προβλήματος και των προεκτάσεων.

Το πρόβλημα λοιπόν, όπως διατυπώθηκε από τον Weber, αποσκοπούσε να βρει, σε ένα χωρικό σύστημα αναζήτησης και προσφοράς, εκείνο το σημείο, στο οποίο

θα τοποθετηθεί το κέντρο παροχής υπηρεσιών (για τον Weber βιομηχανία), ώστε η απαιτούμενη ενέργεια σε αυτήν τη διαδικασία της παροχής αγαθών να ελαχιστοποιείται.

Το μοντέλο του Weber, στην περίπτωση ενός κέντρου υπηρεσιών, θα μπορούσε να διατυπωθεί ως εξής: με δοσμένο ένα σύνολο χρηστών μιας υπηρεσίας που οι θέσεις τους είναι γνωστές στο χώρο, να βρεθεί η θέση αυτής της υπηρεσίας, γι' αυτούς τους χρήστες, έτσι ώστε το συνολικό κόστος προσιτότητας να είναι το ελάχιστο δυνατό. Το συνολικό κόστος είναι το άθροισμα του κόστους που καταβάλλεται από κάθε χρήστη και μπορεί να εκφραστεί σε χρόνο, χρήμα ή απόσταση που είναι οι συνηθέστεροι τρόποι μέτρησής του. Σε κάθε περίπτωση, το κόστος προσιτότητας για κάθε επίσκεψη και για κάθε μονάδα απόστασης θεωρείται γνωστό (Σατρατζέμη, 1991).

Στην πιο απλή μορφή του το πρόβλημα, λαμβάνοντας την απόσταση ως κόστος, μπορεί να οριστεί ως εξής (Αλεξανδρής, 2009):

$$\text{Min} \{ W(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i d_i(x, y) \}$$

όπου αντικειμενικός στόχος της παραπάνω σχέσης είναι να βρεθεί η θέση ενός σημείου (x, y) , το οποίο να ελαχιστοποιεί το σταθμισμένο άθροισμα των Ευκλείδειων αποστάσεων μεταξύ του σημείου (x, y) και n σταθερών σημείων με συντεταγμένες $P_i = (a_i, b_i)$ για $i = 1, 2, \dots, n$. Οι σταθμίσεις σχετίζονται με τα σταθερά n σημεία και δηλώνονται με το σύμβολο w_i . Ακόμη, όπου d_i η Ευκλείδειος απόσταση μεταξύ του (x, y) και του (a_i, b_i) :

$$d_i(x, y) = \sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2} \quad \text{για } i = 1, 2, \dots, n.$$

Κάτω από τις σημερινές συνθήκες, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι δυνατότητες του μοντέλου του Weber για τη λύση προβλημάτων χωροθέτησης είναι περιορισμένες, καθώς υπάρχει έλλειψη περιορισμών σε σχέση με τις πιθανές θέσεις που μπορούν να καταλάβουν οι μονάδες προς εγκατάσταση. Για παράδειγμα, παράγοντες που σχετίζονται με τις χρήσεις γης επηρεάζουν και περιορίζουν δραστικά τον αριθμό των επιτρεπόμενων θέσεων. Ακόμη, ο Weber μιλούσε για κάθε σημείο στο χώρο, ενώ σήμερα, σε πολλές περιπτώσεις, η φύση των προβλημάτων και οι ανάγκες επίλυσής τους απαιτούν τον περιορισμό των σημείων που μπορούν να δεχτούν τις προς χωροθέτηση εγκαταστάσεις. Επιπλέον, ο Weber αναφερόταν σε θέσεις σταθερές στο χώρο, ενώ σήμερα μελετάται και η χωροθέτηση κινητών εγκαταστάσεων, όπως είναι οι κινητές μονάδες ελέγχου καυσαερίων που

εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική, τα κινητά ιατρεία, τα ταχυδρομεία κ.α. Παράλληλα, ο Weber έλυσε το πρόβλημα, κυρίως, από την πλευρά των ιδιωτών που απέβλεπαν σε προσωπικό όφελος, ενώ οι σημερινές συνθήκες επίλυσης προβλημάτων σχετίζονται περισσότερο με τα κοινωνικά οφέλη. Τέλος, ο Weber ενδιαφερόταν αποκλειστικά για την αποτελεσματικότητα της χωροθέτησης και αγνοούσε το πρόβλημα ισότητας ως προς την παροχή υπηρεσιών (Σατρατζέμη, 1991).

Λόγω αυτών περιορισμών και λόγω της αύξησης των αναγκών με την πάροδο του χρόνου, επήλθαν σημαντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις στη διατύπωση και την επίλυση του προβλήματος του Weber. Ορισμένες επεκτάσεις έγιναν τον 20^ο αιώνα και αφορούσαν την τροποποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του αρχικού προβλήματος, κυρίως, με την ενσωμάτωση διαφορετικών συναρτήσεων απόστασης (Hansen et al., 1985). Οι Tellier και Polanski (1989) και οι Drezner και Wesolowsky (1990) αφαίρεσαν τον περιορισμό των μη αρνητικών βαρών από το κλασικό πρόβλημα. Έτσι, δημιουργήθηκε μια νέα σχέση, η οποία μεγιστοποιεί το άθροισμα των αποστάσεων μεταξύ των κέντρων εξυπηρέτησης και των σημείων ζήτησης. Σε άλλες γενικές προσεγγίσεις, το αρχικό μοντέλο του Weber αντιμετωπίστηκε ως στοχαστικό ή δυναμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα ο Cooper (1974) περιέγραψε την τοποθεσία των σημείων ζήτησης με τη χρήση κατανομών πιθανότητας. Ο Erlenkotter (1981) παρουσίασε διαφορετικές τεχνικές προσέγγισης σε περίπτωση δυναμικής χωροθέτησης. Ακόμη, πολυκριτηριακά προβλήματα του Weber με δύο ή περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις έχουν αναλυθεί από τους Hamacher και Nickel (1996), καθώς και από τους Puerto και Fernandez (1998). Γενικά, με την εξέλιξη των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών δόθηκε μια νέα ώθηση στην ανάπτυξη ποικίλων μεθόδων επίλυσης τέτοιων και παρόμοιων προβλημάτων.

2.3. Μεθοδολογική Προσέγγιση

Κάθε πρόβλημα χωροθέτησης είναι διαφορετικό και χρειάζεται τη δική του προσέγγιση προκειμένου να επιλυθεί ικανοποιητικά. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την πολυπλοκότητα και τις ανάγκες του εκάστοτε προβλήματος, ωστόσο σε κάθε περίπτωση προϋποθέτει α) την επιλογή ενός συνόλου υποψήφιων θέσεων για τις μονάδες εγκατάστασης προς

χωροθέτηση με βάση ορισμένες προϋποθέσεις, καθώς και β) την επιλογή συγκεκριμένων μετρήσιμων κριτηρίων, τα οποία πρόκειται να βελτιστοποιηθούν. Πιο συγκεκριμένα, το γενικότερο μεθοδολογικό πλαίσιο που προτείνεται για την ανάλυση των προβλημάτων χωροθέτησης αποτελείται από τα εξής στάδια (Rahman & Smith, 2000):

- ✓ Κατανόηση και καθορισμός του προβλήματος.
- ✓ Ανάπτυξη του αντίστοιχου μοντέλου (εννοιολογική και ποσοτική).
- ✓ Ανάλυση του μοντέλου.
- ✓ Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.
- ✓ Εκτέλεση των αποτελεσμάτων.

Ειδικότερα, το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση του προβλήματος είναι υψίστης σημασίας. Ένα μοντέλο ή πρότυπο χωροθέτησης περιγράφει τη συμπεριφορά ενός φυσικού ή μη συστήματος και αποτελεί μια μαθηματική μέθοδο, όπου μια ενέργεια ή απόφαση ελέγχεται από τις επιπτώσεις της στους αντικειμενικούς σκοπούς. Δηλαδή, ένα μοντέλο χωροθέτησης επιτρέπει την εκτίμηση του αποτελέσματος μιας ενέργειας και συνήθως, περιλαμβάνει περιορισμούς στις ενέργειες που μπορούν να λάβουν χώρα.

Τα μοντέλα χωροθέτησης διακρίνονται, κυρίως, σε περιγραφικά (descriptive) ή επιτακτικά (normative, prescriptive) (Τσιχριντζής, 2015). Τα περιγραφικά μοντέλα αναπαριστούν φυσικά φαινόμενα αλλά δεν προτείνουν κάποια ενέργεια που πρέπει να γίνει ή κάποια απόφαση που πρέπει να ληφθεί. Αυτά τα μοντέλα είναι ως επί το πλείστον μαθηματικά μοντέλα και περιέχουν και επιλύουν διαφορικές ή άλλες εξισώσεις που περιγράφουν φυσικά φαινόμενα.

Από την άλλη, τα επιτακτικά μοντέλα (ή κανονιστικά μοντέλα ή μοντέλα βελτιστοποίησης) υποδεικνύουν τι ενέργειες πρέπει να γίνουν προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερα ένας αντικειμενικός σκοπός. Με άλλα λόγια, αν και είναι πιθανό να έχουν ορισμένα περιγραφικά τμήματα, τα μοντέλα αυτά συντελούν στην υπόδειξη των βέλτιστων ή προτιμητέων ενεργειών που δίνουν τη μεγαλύτερη ικανοποίηση των αντικειμενικών σκοπών. Ακόμη, αξίζει να αναφερθεί ότι τα επιτακτικά μοντέλα βασίζονται στα μαθηματικά της θεωρίας λήψης αποφάσεων και της επιχειρησιακής έρευνας. Έτσι, ενώ τα περιγραφικά μοντέλα απαντούν στην ερώτηση «Εάν κάνω αυτήν την ενέργεια, τι θα γίνει;», τα επιτακτικά μοντέλα

απαντούν στην ερώτηση «Τί πρέπει να κάνω για να επιτευχθεί ο αντικειμενικός σκοπός;».

Τα μοντέλα διακρίνονται, ακόμη, σε καθοριστικά (deterministic) και στοχαστικά (stochastic) (Τσιχριντζής, 2015). Τα καθοριστικά περιέχουν στοιχεία τα οποία είναι ορισμένες, σταθερές ποσότητες και οι διαδικασίες μεταξύ των στοιχείων παράγουν μόνο αποτελέσματα. Αντίθετα, τα στοχαστικά μοντέλα περιέχουν στοιχεία που δεν είναι ακριβώς γνωστά αλλά χαρακτηρίζονται από ένα μέσο όρο και διασπορά. Οι διαδικασίες μεταξύ των στοιχείων μπορούν να καταλήξουν σε διάφορα αποτελέσματα.

Τα πρότυπα χωροθέτησης χρησιμοποιούνται στη λήψη αποφάσεων σε τομείς που σχετίζονται, κυρίως, με τη βέλτιστη χωροθέτηση των εγκαταστάσεων σε μια νέα περιοχή, τον υπολογισμό της αποδοτικότητας προηγούμενων αποφάσεων χωροθέτησης και τη βελτίωση των υπάρχοντων σχεδίων χωροθέτησης (Μητρόπουλος, 2007). Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός της αντικειμενικής συνάρτησης που, όπως έχει αναφερθεί, εξαρτάται από τη φύση του οργανισμού που ασχολείται με το πρόβλημα και από τη φύση των μονάδων εξυπηρέτησης. Ακόμη, για τη χρήση των προτύπων χωροθέτησης, απαιτείται η επιλογή των κατάλληλων κριτηρίων που θα βελτιστοποιούνται από την αντικειμενική συνάρτηση.

Προτού πραγματοποιηθεί η ανάλυση των βασικών προτύπων χωροθέτησης (κεφάλαιο 3) που χρησιμοποιούνται ευρέως για την προσέγγιση πολλών προβλημάτων και την κάλυψη των εκάστοτε απαιτήσεων, κρίνεται χρήσιμο να αναφερθεί η βασική δομή που κατέχουν όλα τα μοντέλα χωροθέτησης, ανεξαρτήτως χρήσης. Η βασική δομική τους μορφή, λοιπόν, περιλαμβάνει τα παρακάτω (Αλεξανδρής, 2009):

➤ **Αντικειμενική συνάρτηση**

Κάθε μοντέλο χωροθέτησης περιλαμβάνει μια ή περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις, οι οποίες επιδιώκεται να ελαχιστοποιηθούν ή να μεγιστοποιηθούν. Κάθε αντικειμενική συνάρτηση εκφράζει τα κριτήρια που πρέπει να βελτιστοποιηθούν για την επιλογή της τοποθεσίας των κέντρων εξυπηρέτησης και για το λόγο αυτό, αποτελεί το μέτρο σύγκρισης για τις διαφορετικές επιλογές που αποτιμούνται και συγκρίνονται. Συνήθως, τα χαρακτηριστικά που βελτιστοποιούνται είναι η απόσταση, ο χρόνος μετακίνησης και το κόστος. Ακόμη,

είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι είναι δυνατό δύο διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις να έχουν την ίδια βέλτιστη λύση, γιατί το σημείο αυτό προσδιορίζεται ακριβώς από το σύνολο των περιορισμών. Τέλος, αναφέρεται ότι η περίπτωση ανυπαρξίας αντικειμενικής συνάρτησης συνεπάγεται την εύρεση απλώς εφικτής και όχι βέλτιστης λύσης.

➤ **Σύνολο εφικτών λύσεων**

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η προσέγγιση ενός προβλήματος χωροθέτησης προϋποθέτει την επιλογή ενός συνόλου υποψήφιων θέσεων για τις μονάδες εξυπηρέτησης με βάση ορισμένες προϋποθέσεις. Το σύνολο εφικτών λύσεων, λοιπόν, αφορά το σύνολο των εφικτών τοποθεσιών για την τοποθέτηση των κέντρων εξυπηρέτησης και αυτές οι εφικτές περιοχές πληρούν κάποιες προϋποθέσεις σχετικά με τη δυνατότητα πρόσβασης, συνόρων κτλ. Από αυτές τις εφικτές θέσεις θα βρεθεί η βέλτιστη θέση χωροθέτησης που θα ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς και θα βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση.

➤ **Περιορισμοί**

Κάθε αντικειμενική συνάρτηση συνοδεύεται από τους περιορισμούς της. Οι περιορισμοί αποτελούν κάποιες συνθήκες που σχηματίζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος και πρέπει να συμπεριληφθούν στο μοντέλο χωροθέτησης και να ικανοποιούνται κατά τη βέλτιστη λύση του. Οι περιορισμοί προκύπτουν από διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα από παράγοντες τοπολογίας, οικονομικούς παράγοντες και, γενικά, από ένα σύνολο πολύπλοκων παραγόντων που εξαρτώνται από τη φύση του εκάστοτε προβλήματος. Ορισμένοι κοινοί τύποι περιορισμών που εφαρμόζονται στα μοντέλα χωροθέτησης είναι οι περιορισμοί τοποθεσίας, οι περιορισμοί κάλυψης, οι περιορισμοί ικανοποίησης της ζήτησης και οι περιορισμοί μέγιστου αριθμού κέντρων εξυπηρέτησης.

3. ΒΑΣΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται εννέα βασικά μοντέλα χωροθέτησης, τα οποία αποτέλεσαν τη βάση πάνω στην οποία οικοδομήθηκαν πολλά μεταγενέστερα μοντέλα. Σε αυτά τα μοντέλα, η απόσταση ή κάποιο άλλο μέγεθος άμεσα συσχετιζόμενο με αυτήν (πχ κόστος ή χρόνος μετακίνησης, ικανοποίηση ζήτησης) αποτελούν την πεμπουσία της επίλυσης και έτσι, ταξινομούνται με βάση αυτό το χαρακτηριστικό τους, όπως πρότειναν και οι Current, Daskin και Schilling (2002). Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται 1) *τα μοντέλα μέσης ή συνολικής απόστασης*: μοντέλα p- διαμέσων (The p- median problem), μοντέλα σταθερού κόστους (The fixed-charge facility location problem), μοντέλα δρομολόγησης ή χωροθέτησης πλήμνης (The hub location problem), μοντέλα χωροθέτησης μέγιστου αθροίσματος (The maxisum location problem), 2) *τα μοντέλα μέγιστης απόστασης*: μοντέλο p- κέντρων (The p-center problem), μοντέλο p- διασποράς (The p-dispersion problem) και 3) *τα μοντέλα κάλυψης*: μοντέλο συνόλου κάλυψης (Set covering location problem), μοντέλο μέγιστης κάλυψης (Maximal covering location problem) και το μοντέλο επιπρόσθετης κάλυψης (Backup covering location model).

Αντικείμενο όλων των παραπάνω μοντέλων είναι η επιλογή της βέλτιστης θέσης μιας ή περισσότερων μονάδων παροχής εξυπηρέτησης, όπως πχ ενός αεροδρομίου, ενός νοσοκομείου, πολλών σταθμών λεωφορείων ή κινητών μονάδων ελέγχου κουσαερίων. Σε γενικές γραμμές, μπορεί να θεωρηθεί πως τα παραπάνω μοντέλα προσπαθούν να απαντήσουν σε δύο ερωτήματα: α) ποιος είναι ο βέλτιστος αριθμός κέντρων παροχής εξυπηρέτησης που πρέπει να χωροθετηθούν και β) ποιες θέσεις ζήτησης πρέπει να εξυπηρετεί κάθε κέντρο παροχής υπηρεσιών (Σαρατζέμη, 1991). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτά τα μοντέλα, τα σημεία ζήτησης που πρέπει να καλυφθούν είναι εκ των προτέρων προσδιορισμένα με ακρίβεια.

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

Σκοπός των συγκεκριμένων προτύπων αποτελεί η εύρεση της βέλτιστης λύσης της συνολικής ή μέσης διανυόμενης απόστασης μεταξύ των εγκαταστάσεων και των σημείων ζήτησης για την πλήρη εξυπηρέτηση της ζήτησης. Ένα παράδειγμα του ιδιωτικού τομέα μπορεί να θεωρηθεί η χωροθέτηση μονάδων παραγωγής που λαμβάνουν τις εισροές τους από καθιερωμένες πηγές, μέσω παραδόσεων που

διεξάγονται από φορτηγά. Στο δημόσιο τομέα, παράδειγμα αποτελεί η χωροθέτηση ενός δικτύου παροχών εξυπηρέτησης, όπως γραφεία χορήγησης αδειών, με αντικειμενικό σκοπό την ελαχιστοποίηση της συνολικής απόστασης που καλούνται να διανύσουν οι πελάτες προκειμένου να φτάσουν στην πιο κοντινή τους εγκατάσταση (Current et al., 2002). Αυτή η προσέγγιση, ίσως, θεωρηθεί ως ένας περισσότερο αποτελεσματικός στόχος σε σχέση με τον «δίκαιο» στόχο της ελαχιστοποίησης της μέγιστης απόστασης στα μοντέλα μέγιστης απόστασης που θα αναλυθούν παρακάτω (υποκεφάλαιο 3.2).

❖ Μοντέλα P- Διαμέσων (The P- Median Problem)

Το μοντέλο p- διάμεσος έχει ως αντικειμενικό σκοπό τη χωροθέτηση δοθέντος αριθμού p εγκαταστάσεων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική ή μέση απόσταση σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση μεταξύ των κόμβων ζήτησης και των πιο κοντινών από τις επιλεγμένες εγκαταστάσεις (Laporte et al., 2015). Με άλλα λόγια, το πρόβλημα p-διάμεσος αφορά τη χωροθέτηση μιας μονάδας εξυπηρέτησης σε κορυφή ενός δοσμένου γραφήματος με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιείται το άθροισμα όλων των συντομότερων αποστάσεων των κορυφών του από αυτήν τη μονάδα. Η άριστη χωροθέτηση της μονάδας παροχής υπηρεσιών ονομάζεται διάμεσος (median) του γραφήματος. Ωστόσο, υπάρχει και η γενικότερη διατύπωση του προβλήματος, όταν p εγκαταστάσεις μπορούν να χωροθετηθούν οπουδήποτε στο γράφημα, είτε στις κορυφές είτε στις ακμές του. Στη μαθηματική διατύπωση που ακολουθεί, όμως, θεωρείται ότι οι υποψήφιες εγκαταστάσεις προς χωροθέτηση αποτελούν κόμβους πάνω σε ένα δίκτυο.

Το μοντέλο αυτό χρονολογείται στις αρχές του 1960 ως προσπάθεια επέκτασης του προβλήματος Weber σε πολλαπλά σημεία τροφοδοσίας (Δικτυακά προβλήματα). Οι πρώτες προσπάθειες επίλυσης τέτοιων προβλημάτων χωροθετήσεων κατανομών στηρίχθηκαν στον αλγόριθμο του Hakimi (1964, 1965), ο οποίος προσπάθησε να δώσει λύση στο πρόβλημα της χωροθέτησης κέντρων σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα.

Για τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι αναγκαίο να οριστούν τα παρακάτω δεδομένα και σύνολα:

I: το σύνολο των κόμβων ζήτησης που συμβολίζονται με i

J: το σύνολο των υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης που συμβολίζονται με j

h_i : η ζήτηση στον κόμβο i

d_{ij} : η απόσταση (ή άλλο σχετιζόμενο με την απόσταση μέγεθος) ανάμεσα στους κόμβους ζήτησης i και στις υποψήφιες θέσεις j

p : ο αριθμός των μονάδων εξυπηρέτησης που θα χωροθετηθούν και οι μεταβλητές απόφασης:

$$x_j: \begin{cases} 1, \text{ εάν γίνεται η χωροθέτηση στην πιθανή θέση } j \\ 0, \text{ εάν όχι.} \end{cases}$$

$$y_{ij}: \begin{cases} 1, \text{ εάν η ζήτηση στον κόμβο } i \text{ εξυπηρετείται από τη μονάδα εξυπηρέτησης} \\ \text{στη θέση } j \\ 0, \text{ εάν όχι.} \end{cases}$$

Με τους παραπάνω συμβολισμούς, το πρόβλημα p -median μορφοποιείται ως εξής:

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (3.1)$$

$$\text{s.t: } \sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.3)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.4)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.5)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.6)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.1) είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής ή μέσης απόστασης σταθμισμένης ως προς τη ζήτηση μεταξύ κάθε κόμβου ζήτησης i και της κοντινότερης εγκατάστασης στη θέση j . Ο περιορισμός (3.2) ορίζει ότι πρόκειται να χωροθετηθούν p εγκαταστάσεις. Ο περιορισμός (3.3) εξασφαλίζει ότι κάθε κόμβος ζήτησης i θα ανατεθεί σε μία ακριβώς εγκατάσταση j , ενώ ο περιορισμός (3.4) περιορίζει τις αναθέσεις των κόμβων ζήτησης μόνο σε εγκαταστάσεις που έχουν δυνατότητα εξυπηρέτησης. Ο περιορισμός (3.5) ορίζει τη μεταβλητή χωροθέτησης ως δυαδική και τέλος, ο περιορισμός (3.6) εξασφαλίζει πως η ζήτηση σε έναν κόμβο μπορεί να ανατεθεί μόνο σε μία εγκατάσταση και μπορεί να αντικατασταθεί με $y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J$, εφόσον ο περιορισμός (3.4)

εγγυάται ότι $y_{ij} \leq 1$. Στην περίπτωση που κάποιες μεταβλητές y_{ij} είναι κλασματικές, μπορεί, απλά, ο κόμβος i να ανατεθεί στην πλησιέστερη εγκατάσταση με δυνατότητα εξυπηρέτησης.

Λόγω της φύσης της αντικειμενικής συνάρτησης, τα προβλήματα αυτής της κατηγορίας ονομάζονται *minsum* προβλήματα χωροθέτησης (*minsum location problems*). Μερικές από τις περιοχές εφαρμογής του προβλήματος *minsum* είναι η χωροθέτηση κέντρων διακοπών σε τηλεφωνικά δίκτυα, η χωροθέτηση υποσταθμών ηλεκτρικής ενέργειας σε κατάλληλα δίκτυα, η χωροθέτηση αποθηκών διανομής σε οδικά δίκτυα (όπου οι κορυφές παριστάνουν τους πελάτες) κ.ά. (Σαρατζέμη, 1991). Γενικά, οι εφαρμογές του παραπάνω μοντέλου ποικίλουν και αφορούν μια σειρά από προβλήματα στο χώρο της βέλτιστης τοποθεσίας κέντρων υγείας, επιχειρήσεων τροφίμων, τραπεζών, βιβλιοθηκών, ταχυδρομικών οργανισμών κτλ. Τέλος, αναφέρεται ότι το *p*-median πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο για σταθερές τιμές του *p* και είναι NP-hard (non deterministic polynomial time-hard) για μεταβλητές τιμές του *p*, δηλαδή είναι πρόβλημα τόσο «δύσκολο» όσο οποιοδήποτε πρόβλημα της κλάσης NP (Garey & Johnson, 1979). Η κλάση NP περιλαμβάνει όλα τα προβλήματα των οποίων η λύση μπορεί να επαληθευτεί εντός πολυωνυμικού χρόνου (*verifiable problems*).

Η έκφραση του μοντέλου που παρουσιάστηκε παραπάνω αποτελεί μια από τις πολλές εκφράσεις αυτού. Διαφορετικοί περιορισμοί ή αντικειμενικές συναρτήσεις δίνουν διαφορετικές εκφράσεις στο μοντέλο και μπορούν να βοηθήσουν στην επίλυση αρκετών διαφορετικών προβλημάτων χωροθέτησης. Για παράδειγμα, ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος, μπορούν να συμπεριληφθούν περιορισμοί χωρητικότητας, προϋπολογισμού, μέγιστου κόστους κ.α. Ακόμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το μοντέλο *Simple Plant Location Problem* ή *SPLP* που αποτελεί μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή του *p*-median προβλήματος. Το *SPLP* δημιουργήθηκε για τη χωροθέτηση, κυρίως, αποθηκών και εργοστασίων και χρησιμοποιείται αντί του *p*-median, όταν το κόστος κατασκευής είναι σημαντικό και πρέπει να συμπεριληφθεί στο κόστος προσιτότητας (Σαρατζέμη, 1991). Ουσιαστικά, η διαφορά αυτού του μοντέλου από το μοντέλο *p*-median είναι ότι το κόστος κατασκευής, αντί να είναι ένας από τους περιορισμούς, εμφανίζεται κατευθείαν στην αντικειμενική συνάρτηση.

❖ **Μοντέλα Σταθερού Κόστους (The Fixed - Charge Facility Location Problem)**

Το μοντέλο σταθερού κόστους είναι ανάμεσα στα πιο βασικά μοντέλα της επιστήμης της χωροθέτησης. Σε αντίθεση με τα μοντέλα p -median που παρουσιάστηκαν παραπάνω και τα p -center και maximal covering location μοντέλα που θα αναλυθούν παρακάτω (υποκεφάλαια 3.2 και 3.3 αντίστοιχα), στα μοντέλα σταθερού κόστους δεν είναι γνωστός εκ των προτέρων ο αριθμός των εγκαταστάσεων που πρόκειται να χωροθετηθούν. Παράλληλα, το μοντέλο αυτό υποθέτει ότι κάθε πιθανή περιοχή δεν έχει το ίδιο σταθερό κόστος εγκατάστασης και ότι τα κέντρα εξυπηρέτησης μπορούν να έχουν περιορισμούς σχετικά με τη ζήτηση που μπορούν να εξυπηρετήσουν (Current et al., 2002). Λόγω αυτής της ικανότητας εξυπηρέτησης των εγκαταστάσεων, δίνεται η δυνατότητα η ζήτηση να μην ανατεθεί απαραίτητα στην πλησιέστερη εγκατάσταση.

Στόχος του προβλήματος αυτού είναι η, όσο το δυνατόν, μεγαλύτερη μείωση του κόστους που αφορά τις μονάδες που θα χωροθετηθούν αλλά και του κόστους μετακίνησης. Πιο συγκεκριμένα, δύο ειδών αποφάσεις πρέπει να παρθούν στο πλαίσιο αυτού του προβλήματος (Laporte et al., 2015): οι αποφάσεις χωροθέτησης (Location decisions) και οι αποφάσεις κατανομής (Allocation decisions) Οι αποφάσεις χωροθέτησης καθορίζουν τις θέσεις όπου θα χωροθετηθούν οι εγκαταστάσεις και το βέλτιστο αριθμό αυτών, ενώ οι αποφάσεις κατανομής υπαγορεύουν πως θα ικανοποιηθεί η ζήτηση των χρηστών από τις εγκαθιδρυμένες εγκαταστάσεις, δηλαδή ορίζουν τις αναθέσεις της ζήτησης σε κάθε εγκατάσταση. Κάθε πιθανή απόφαση υφίσταται σταθερά κόστη για τις εγκαταστάσεις που έχουν ιδρυθεί, καθώς επίσης και κόστη ανάθεσης ζήτησης στην περίπτωση των αποφάσεων κατανομής.

Υπάρχουν δύο βασικές διαφοροποιήσεις του προβλήματος, ανάλογα με την ύπαρξη του περιορισμού ή όχι της δυνατότητας εξυπηρέτησης της ζήτησης από ένα κέντρο εξυπηρέτησης. Για το λόγο αυτό προκύπτουν δύο διαφορετικά προβλήματα (Laporte et al., 2015):

✓ *Πρόβλημα Σταθερού Κόστους Χωρίς Περιορισμούς (Uncapacitated Fixed Charge Facility Location Problem)*

Σε περίπτωση που θεωρηθεί ότι ένα κέντρο εξυπηρέτησης δεν έχει περιορισμούς, αναφορικά με τη ζήτηση που μπορεί να εξυπηρετήσει, προκύπτει το πρόβλημα

σταθερού κόστους χωρίς περιορισμούς. Βασικό χαρακτηριστικό αυτού του προβλήματος είναι ότι η ζήτηση σε κάθε κόμβο μπορεί να εξυπηρετηθεί εξ' ολοκλήρου από την πλησιέστερη σε αυτήν εγκατάσταση.

Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα δεδομένα και σύνολα ορίζονται οι παρακάτω επιπρόσθετες παράμετροι και μεταβλητές:

f_j : το πάγιο κόστος εγκατάστασης

a : το κόστος ανά μονάδα απόστασης ανά μονάδα ζήτησης

και η γνωστή μεταβλητή απόφασης για τις αποφάσεις χωροθέτησης που σχετίζονται με κάθε $j \in J$:

$$x_j: \begin{cases} 1, & \text{εάν γίνεται η χωροθέτηση στην πιθανή θέση } j \\ 0, & \text{εάν όχι.} \end{cases}$$

ενώ για τις αποφάσεις κατανομής που σχετίζονται με $i \in I, j \in J$:

$$y_{ij}: \begin{cases} 1, & \text{εάν η ζήτηση στον κόμβο } i \text{ εξυπηρετείται από τη μονάδα εξυπηρέτησης} \\ & \text{στη θέση } j \\ 0, & \text{εάν όχι.} \end{cases}$$

Με τους παραπάνω συμβολισμούς, το uncapacitated fixed charge location πρόβλημα τυποποιείται ως εξής:

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} f_j x_j + a \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (3.7)$$

$$\text{s.t: } \sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.8)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.9)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.10)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.11)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.7) ελαχιστοποιεί το άθροισμα του σταθερού κόστους χωροθέτησης των εγκαταστάσεων και του συνολικού κόστους μετακίνησης. Πιο συγκεκριμένα, ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης αναφέρεται σε απόσταση σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση. Ο περιορισμός (3.8) ορίζει ότι κάθε κόμβος ζήτησης i εξυπηρετείται, ενώ ο περιορισμός (3.9)

εξασφαλίζει ότι κάθε κόμβος ζήτησης μπορεί να ανατεθεί σε μια υποψήφια θέση j , εφόσον έχει εγκατασταθεί στη θέση αυτή ένα κέντρο εξυπηρέτησης. Οι περιορισμοί (3.10) και (3.11) αποτελούν τους περιορισμούς ακεραιότητας και λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο με αυτόν των αντίστοιχων περιορισμών στο προηγούμενο πρόβλημα p -median. Με χαλάρωση του περιορισμού (3.11) είναι δυνατή η ανάθεση της ζήτησης σε πολλαπλές εγκαταστάσεις.

Αναφορικά με την επίλυση του προβλήματος, οι Al- Sultan και Al- Fawzan (1999) εφάρμοσαν την τεχνική «tabu search» (Glover 1989, Glover & Laguna 1997) στο πρόβλημα χωρίς περιορισμούς και ο αλγόριθμος τους δοκιμάστηκε με επιτυχία σε προβλήματα μικρής και μέτριας χωρητικότητας. Οι Galvao (2004) και Daskin (1995) χρησιμοποίησαν τεχνικές χαλάρωσης γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση του προβλήματος, ενώ ο Geoffrion (1974) επίλυσε βέλτιστα το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο «κλάδος και φράγμα» (Branch and bound) σε συνδυασμό με τεχνικές χαλάρωσης. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις μαθηματικές διατυπώσεις και επιλύσεις αυτού του προβλήματος, οι αναγνώστες μπορούν να ανατρέξουν στους Krarup και Pruzan (1983), Cornuejols, Nemhauser και Wolsey (1990).

✓ *Πρόβλημα Σταθερού Κόστους Με Περιορισμούς (Capacitated Fixed Charge Facility Location Problem)*

Αντίθετα με το προηγούμενο πρόβλημα, σε περίπτωση που υπάρχει περιορισμός στη ζήτηση που μπορεί κάποιο κέντρο εξυπηρέτησης να ικανοποιήσει, προκύπτει το πρόβλημα σταθερού κόστους με περιορισμούς. Βασικό χαρακτηριστικό εδώ είναι ότι η ζήτηση σε κάθε κόμβο μπορεί να εξυπηρετηθεί από μια εγκατάσταση που δεν είναι απαραίτητα η πλησιέστερή της, λόγω της ύπαρξης των παραγωγικών ικανοτήτων των εγκαταστάσεων.

Ορίζεται, λοιπόν, η εξής επιπρόσθετη παράμετρος:

c_j : η χωρητικότητα μιας εγκατάστασης στην υποψήφια θέση j

Έτσι, το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} f_j x_j + \alpha \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (3.12)$$

$$\text{s.t: } \sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.13)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.14)$$

$$\sum_{j \in J} h_i y_{ij} \leq c_j x_j \quad \forall i \in I \quad (3.15)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.16)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.17)$$

Όπως παρατηρείται, είναι παρόμοιο με το uncapacitated fixed charge location problem, εκτός από τον περιορισμό της χωρητικότητας (3.15). Ο επιπλέον αυτός περιορισμός απαγορεύει η συνολική ζήτηση που θα ανατεθεί σε μια εγκατάσταση να υπερβαίνει τη χωρητικότητα της εγκατάστασης (c_j). Επίσης, μπορεί να θεωρηθεί ότι, επειδή ο περιορισμός (3.15) θα αναγκάσει τη ζήτηση να ανατεθεί μόνο σε εγκαταστάσεις με δυνατότητα εξυπηρέτησης, ο περιορισμός (3.14) δεν είναι αναγκαίος. Παρόλα αυτά, με τη συμπερίληψη του περιορισμού (3.14), ενισχύεται σημαντικά η «χαλάρωση» του γραμμικού προγραμματισμού του μοντέλου.

Όσον αφορά την επίλυση του προβλήματος, έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ευρετικές μέθοδοι. Συνήθως, μια εφικτή λύση κατασκευάζεται από απλούς ευρετικούς αλγορίθμους με την προσθήκη ή απόσυρση κέντρων εξυπηρέτησης στη λύση, έτσι ώστε να μην μπορεί να βρεθεί κάποια άλλη λύση που να βελτιώνει την υπάρχουσα.

Εφαρμογές του προβλήματος σταθερού κόστους, γενικά, έχουν παρατηρηθεί σε μια ευρεία ποικιλία περιεχομένων. Το βιβλίο των Drezner και Hamacher (2004) μελετάει διαφορετικές εφαρμογές του προβλήματος σε τέτοιες περιοχές έρευνας, όπως είναι ο δημόσιος τομέας, το λογισμικό για GIS ή η ρομποτική. Ακόμη, το μοντέλο σταθερού κόστους παίζει κρίσιμο ρόλο και σε πολλά άλλα πεδία, όπως στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, στα συστήματα κατανομής, στα συστήματα έκτακτης ανάγκης, στα προβλήματα χωροθέτησης – δρομολόγησης, στη μεταφορά φορτίων κ.α. Οι Melo et al. (2009) μελέτησαν το πρόβλημα στο πλαίσιο της διαχείρισης εφοδιαστικής αλυσίδας μέχρι το 2009. Οι Klose και Drexl (2005) αναφέρουν περιληπτικά εφαρμογές του προβλήματος σταθερού κόστους μέσα σε κατανομημένα συστήματα σχεδιασμού. Περισσότερα παραδείγματα εφαρμογών του συγκεκριμένου προβλήματος μπορούν να βρεθούν στους Owen και Daskin (1998), Daskin et al. (2002), Nagy και Salhi (2007) και Jiaa et al. (2007).

❖ **Μοντέλα Δρομολόγησης ή Χωροθέτησης Πλήμνης (The Hub Location Problem)**

Πολλά μεταφορικά, τηλεπικοινωνιακά και πληροφοριακά δίκτυα χρησιμοποιούν συχνά «hub and spoke» συστήματα, έτσι ώστε να κατευθύνουν αποτελεσματικά τις ροές μεταφορών ανάμεσα σε πολλαπλές πηγές και προορισμούς (Current et al., 2002). Το χαρακτηριστικό-κλειδί αυτών των συστημάτων είναι ότι χρησιμοποιούν ένα σύνολο από σημεία μεταφόρτωσης ή αλλιώς συγκέντρωσης, τα οποία ονομάζονται κόμβοι πλήμνης ή απλώς πλήμνες (hub facilities). Ένα δίκτυο κόμβων πλήμνης συνδέει ένα μεγάλο αριθμό ζευγαριών προέλευσης – προορισμού, χρησιμοποιώντας μόνο ένα μικρό αριθμό συνδέσεων (Bryan et al., 1999). Ροές μεταφορών που έχουν την ίδια προέλευση αλλά διαφορετικούς προορισμούς συγκεντρώνονται όταν δρομολογούνται στις πλήμνες και τότε, συνδυάζονται με άλλες ροές που προέρχονται από διαφορετικές πηγές αλλά έχουν τον ίδιο προορισμό. Μια τέτοια προσέγγιση στο σχεδιασμό ενός δικτύου οδηγεί στη μείωση του κόστους εγκατάστασης, στη συγκέντρωση και στον πιο εύκολο χειρισμό των εμπορευμάτων και, επιπλέον, επιτρέπει στους μεταφορείς να επωφεληθούν από τις οικονομίες κλίμακας μέσω της ενοποίησης των ροών.

Η μελέτη των μοντέλων δρομολόγησης ξεκίνησε με την πρωτοποριακή δουλειά του O'Kelly (1986a) για περιπτώσεις συνεχών μοντέλων και του O'Kelly (1986b, 1987) για περιπτώσεις διακριτών μοντέλων και από τότε έχει εξελιχθεί σε μια πλούσια περιοχή έρευνας. Στη βιβλιογραφία της επιχειρησιακής έρευνας, η έννοια της πλήμνης φαίνεται να ταυτίζεται με μια κεντρική εγκατάσταση η οποία τοποθετείται σε κεντρικό σημείο ενός συνόλου περιοχών, έτσι ώστε να εξυπηρετούνται όλες οι ροές ζήτησης. Το 1969 ο Goldman ανέφερε την πλήμνη ως ένα «κέντρο» και, όπως σημειώθηκε από τον Campbell (1990), χωροθέτησε εγκαταστάσεις σε θέσεις «κέντρα» με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς για ένα σύνολο ζευγαριών προέλευσης – προορισμού, δημιουργώντας, έτσι, τη γενική μαθηματική διατύπωση του προβλήματος. Γενικά, υπάρχουν ποικίλες μελέτες σχετικά με το πρόβλημα χωροθέτησης πλήμνης και κάθε μια επικεντρώνει το ενδιαφέρον της σε διαφορετικές πτυχές του προβλήματος. Ενδεικτικά, αναφέρονται οι πρόσφατες, σχετικά, κριτικές και μελέτες των Campbell (1994a), Klincewicz (1998), Bryan και O'Kelly (1999), Campbell et al.

(2001), Alumur και Kara (2008), Campbell και O'Kelly (2012), Zanjirani Farahani et al. (2013).

Όπως παρουσιάστηκε από τον O'Kelly (1986), το πρόβλημα χωροθέτησης πλημνών και σχεδιασμού δικτύων (Hub location problem and network design) ή πιο απλά το πρόβλημα χωροθέτησης πλημνών είναι ένα σύνθετο μίγμα της ανάλυσης χωροθέτησης και της χωρικής θεωρίας αλληλεπίδρασης. Βασικός σκοπός του προβλήματος είναι να αποφασιστεί ποιοι κόμβοι θα παρέχουν δρομολόγηση, πως θα κατανεμηθούν οι απλοί κόμβοι που δεν αποτελούν πλήμνες, πως θα συνδεθούν οι πλήμνες μεταξύ τους και ποιες είναι οι διαφορετικές πορείες μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων μέσω των δρομολογητών- πλημνών κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί πως τα προβλήματα δρομολόγησης ή χωροθέτησης πλημνών ανήκουν στην κατηγορία των προβλημάτων κατανομής.

Τρία κύρια στοιχεία συνιστούν ένα δίκτυο με πλήμνες: οι απλοί κόμβοι εξυπηρέτησης, οι πλήμνες και οι συνδέσεις (Campbell et al., 2001). Ένας απλός κόμβος είναι ένα σημείο από όπου οι ροές μπορούν να δημιουργηθούν και στο οποίο οι ροές που προορίζονται για αυτό το σημείο μπορούν να εισαχθούν. Μια πλήμνη έχει τα χαρακτηριστικά ενός απλού κόμβου αλλά, επίσης, επιτρέπει και το πέρασμα ροών ή των ροών μεταφόρτωσης που δεν προορίζονται για αυτή τη θέση. Όλη η κίνηση που εισάγεται σε μια πλήμνη θα πρέπει και να εξέλθει. Οι συνδέσεις ή τόξα που συνδέουν τους απλούς κόμβους με τις πλήμνες θα πρέπει να έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες: κάθε απλός κόμβος θα πρέπει να συνδέεται τουλάχιστον με μια πλήμνη και μια έγκυρη διαδρομή θα πρέπει να πραγματοποιείται ανάμεσα σε όλες τις πλήμνες. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι υπάρχει μια εφικτή διαδρομή ανάμεσα σε όλες τις πηγές και τους προορισμούς στο δίκτυο. Ακόμη, σημειώνεται ότι ένας απλός κόμβος που είναι άμεσα συνδεδεμένος με άλλους απλούς κόμβους δεν επηρεάζει το πρόβλημα σχεδιασμού ενός δικτύου με πλήμνες. Έτσι, δεν λαμβάνεται υπόψη ένας απλός κόμβος ως κομμάτι ενός δικτύου πλημνών αν παρακάμπτει, ουσιαστικά, το δίκτυο.

Το βασικό πρόβλημα χωροθέτησης p- πλημνών (p-hub location problem) μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα δευτεροβάθμιο πρόγραμμα ακέραιου προγραμματισμού. Έστω n ξεχωριστές τοποθεσίες ή απλοί κόμβοι. Για οποιουδήποτε απλούς κόμβους i και j ορίζονται :

h_{ij} : ο αριθμός των μονάδων κίνησης που δρομολογούνται από τον κόμβο i στον j

c_{ij} : το κόστος μονάδος μεταφοράς μεταξύ των κόμβων i και j

a : εκπτώτικος παράγοντας για μεταφορά μεταξύ δρομολογητών ($a \leq 1$)

και οι ακόλουθες μεταβλητές απόφασης:

$$x_j: \begin{cases} 1, \text{ εάν η πλήμνη χωροθετείται στον κόμβο } j \\ 0, \text{ εάν όχι.} \end{cases}$$

$$y_{ij}: \begin{cases} 1, \text{ εάν η ζήτηση στον κόμβο } i \text{ έχει ανατεθεί σε μια πλήμνη που βρίσκεται} \\ \text{ στον κόμβο } j \\ 0, \text{ εάν όχι.} \end{cases}$$

Έτσι, το μοντέλο αναπαρίσταται με την παρακάτω μαθηματική έκφραση:

$$\text{Minimize } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} h_{ij} (\sum_{k \in N} c_{ik} y_{ik} + \sum_{m \in N} c_{jm} y_{jm} + a \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} c_{kl} y_{kl} y_{lm}) \quad (3.18)$$

$$\text{s.t: } \sum_{j \in N} x_j = p \quad (3.19)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.20)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.21)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.22)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.23)$$

Στόχος των μοντέλων χωροθέτησης πλήμνης είναι η χωροθέτηση του κέντρου διακίνησης εμπορευμάτων (πλήμνη), καθώς και η ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς εμπορευμάτων από και προς το κέντρο διακίνησης. Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση (3.18) ελαχιστοποιεί το άθροισμα του κόστους των μετακινούμενων αντικειμένων μεταξύ ενός απλού κόμβου και μιας πλήμνης με την οποία συνδέεται, το κόστος μετακίνησης από την τελική πλήμνη στον προορισμό της ροής και τις μετακινήσεις μεταξύ των πλημνών, οι οποίες έχουν έναν συντελεστή μείωσης a . Ο περιορισμός (3.19) προσδιορίζει τον αριθμό των κέντρων εξυπηρέτησης-πλημνών προς τοποθέτηση. Ο περιορισμός (3.20) δηλώνει ότι κάθε σημείο ζήτησης θα συνδεθεί με μία ακριβώς πλήμνη και μπορεί να «χαλαρώσει», ώστε να είναι δυνατόν οι ροές από μεγάλους κόμβους να ανατίθενται σε δύο ή

περισσότερες πλήμνες. Ο περιορισμός (3.21) περιορίζει τη σύνδεση σημείων ζήτησης μόνο με διαθέσιμες ανοικτές πλήμνες. Οι περιορισμοί (3.22) και (3.23) είναι οι γνωστοί περιορισμοί δυαδικότητας και ακεραιότητας.

Όπως παρατηρείται, οι περιορισμοί (3.19) έως (3.23) είναι ίδιοι με τους περιορισμούς του μοντέλου p -median (3.2) έως (3.6) που αναλύθηκαν παραπάνω. Ωστόσο, παρά τις ομοιότητες, τα δύο αυτά προβλήματα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές (Current et al., 2002). Πιο συγκεκριμένα, η ζήτηση στο μοντέλο χωροθέτησης hub δεν αναπαρίσταται απλώς ως ζήτηση σε ένα συγκεκριμένο κόμβο αλλά ως ροή από κόμβο σε κόμβο. Ακόμη, η αντικειμενική συνάρτηση είναι διαφορετική, καθώς στο πρόβλημα χωροθέτησης πλήμνης είναι δευτέρου βαθμού (quadratic) σε σχέση με τις μεταβλητές ανάθεσης.

Γενικά, τα κύρια διακριτά χαρακτηριστικά του προβλήματος χωροθέτησης πλήμνης είναι τα ακόλουθα: 1) η εξυπηρέτηση της ζήτησης είναι συνδεδεμένη με ροές μεταξύ ζευγαριών προέλευσης-προορισμού, 2) οι πλήμνες αποτελούν ενδιάμεσους κόμβους στη διαδρομή προέλευσης-προορισμού και δρουν ως σημεία μεταφόρτωσης ή ενοποίησης, 3) υπάρχει ένα κέρδος (ή απαίτηση) από τη δρομολόγηση ροών μέσω πλημνών, 4) υπάρχει ένας αντικειμενικός σκοπός βασισμένος στο κόστος (cost based) ή στην εξυπηρέτηση (service based) που εξαρτάται από το σχεδιασμό του εκάστοτε δικτύου πλημνών και τη δρομολόγηση των ροών.

Αναφορικά με το τελευταίο χαρακτηριστικό του αντικειμενικού σκοπού, οι περισσότερες εφαρμογές στον τομέα των μεταφορών επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους, κυρίως, στο κόστος μετακίνησης και χρόνο μετακίνησης των ροών, ενώ στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, ο αντικειμενικός σκοπός σχετίζεται με τα κόστη εγκατάστασης ενός δικτύου πλημνών. Ανάλογα, λοιπόν, με το είδος του αντικειμενικού σκοπού, τα προβλήματα χωροθέτησης πλήμνης ταξινομούνται σε ορισμένες υποκατηγορίες, σύμφωνα με την εργασία του Campbell (1990):

i) το πρόβλημα διαμέσου p -πλημνών (p -hub median problem):

Αντικειμενικός σκοπός αποτελεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους δρομολόγησης ροών μέσω του δικτύου πλημνών και εφαρμογές του προβλήματος υπάρχουν σε δίκτυα μεταφορών και τηλεπικοινωνιών.

ii) το πρόβλημα χωροθέτησης πλήμνης άνευ χωρητικότητας (*uncapacitated hub location problem*)

Αντικειμενικός σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του σταθερού κόστους πλήμνης και του κόστους της ζήτησης ροών. Διαφέρει από το προηγούμενο πρόβλημα στο ό,τι ο αριθμός των πλημνών δεν είναι γνωστός εκ των προτέρων και ένα μη αρνητικό σταθερό κόστος σχετίζεται με κάθε πιθανή θέση πλήμνης.

iii) το πρόβλημα κέντρου p -πλημνών (*p-hub center problem*)

Αποτελεί $\min\max$ πρόβλημα και στόχος του είναι η ελαχιστοποίηση μιας μέγιστης εξυπηρέτησης ή ενός μέτρου του κόστους μεταξύ ζευγαριών προέλευσης-προορισμού. Αυτό το μέτρο μπορεί να είναι ο μέγιστος χρόνος μετακίνησης ή το μέγιστο κόστος ροής για όλα τα ζευγάρια προέλευσης-προορισμού, ο μέγιστος χρόνος μετακίνησης ή το μέγιστο κόστος ροής για όλα τα τόξα του δικτύου πλημνών και ο μέγιστος χρόνος μετακίνησης ή το μέγιστο κόστος ροής που σχετίζεται με ένα τόξο πρόσβασης στο δίκτυο. Το πρόβλημα αυτό εφαρμόζεται σε πολύ σημαντικά δίκτυα, όπως η χωροθέτηση εγκαταστάσεων και οχημάτων αμέσου ανάγκης.

iv) το πρόβλημα κάλυψης πλήμνης (*hub covering problem*)

Το πρόβλημα αυτό επιβάλλει ένα μέγιστο κατώφλι στο επίπεδο εξυπηρέτησης (χρόνος μετακίνησης) και επικεντρώνεται στην ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης του δικτύου πλήμνης. Υποθέτει ότι η ζήτηση καλύπτεται, εάν και οι κόμβοι προέλευσης και οι κόμβοι προορισμού βρίσκονται μέσα σε μια συγκεκριμένη απόσταση από έναν κόμβο πλήμνης.

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες το πρόβλημα της χωροθέτησης πλήμνης έχει μελετηθεί από ερευνητές από όλο τον κόσμο και από διαφορετικά πεδία, όπως είναι η επιστήμη της χωροθέτησης, η γεωγραφία, η περιφερειακή επιστήμη, η βελτιστοποίηση δικτύων, οι μεταφορές, οι τηλεπικοινωνίες και η επιστήμη των υπολογιστών (Laporte et al., 2015). Μια κύρια εφαρμογή δικτύων πλήμνης είναι οι αεροπορικές μεταφορές, όπου ο όρος «κόμβος πλήμνη» λαμβάνεται για να σημάνει μια γεωγραφική περιοχή, ταξινομημένη ως προς το ποσοστό των συνολικών επιβατών σε εκείνη την περιοχή. Μια δεύτερη εφαρμογή αποτελούν τα συστήματα και οι υπηρεσίες παράδοσης δεμάτων, όπου ο όρος «κόμβος πλήμνη» χρησιμοποιήθηκε για να δηλωθούν σχεδόν όλα τα σημαντικά κέντρα ταξινόμησης

των δεμάτων. Άλλες εφαρμογές έχουν να κάνουν με το χώρο των τηλεπικοινωνιών, όπου η ζήτηση αντιστοιχεί σε ηλεκτρονικά δεδομένα που δρομολογούνται μέσω μιας ποικιλίας φυσικών συνδέσμων (πχ. συνδέσεις οπτικών ινών και ομοαξονικά καλώδια).

Όσον αφορά την επίλυση προβλημάτων χωροθέτησης πλήμνης, λαμβάνοντας υπόψη τις δυσκολίες για την επίλυση ακόμα και ενός μεσαίου μεγέθους hub location problem με βέλτιστο τρόπο, οι Ernst και Krishnamoorthy (1996) προτείνουν ευρετικούς (ή κατά προσέγγιση ευρετικούς) αποτελεσματικούς αλγόριθμους για να αντιμετωπίσουν τέτοιου είδους προβλήματα, ενώ οι Kuby και Gray (1993) ανέλυσαν ένα δίκτυο αερομεταφορών με ένα hub μοντέλο χωροθέτησης.

Τέλος, αναφέρεται ότι τα μοντέλα χωροθέτησης πλήμνης αποτελούν μια ενδιαφέρουσα τάξη των NP- hard προβλημάτων και η βασική τους δυσκολία πηγάζει από την εγγενή αλληλεξάρτηση μεταξύ δύο επιπέδων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Laporte et al., 2015). Το πρώτο επίπεδο θεωρεί μια συλλογή συνόλων από κόμβους που προορίζονται για τη χωροθέτηση των πλημνών, ενώ το δεύτερο επίπεδο πραγματεύεται τη δρομολόγηση ροών μέσω του δικτύου πλήμνης και το σχεδιασμό αυτού του δικτύου, επιλέγοντας τους κατάλληλους συνδέσμους που ενώνουν πηγές, προελεύσεις και πλήμνες.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα μοντέλα και τη μαθηματική έκφραση των προβλημάτων χωροθέτησης – δρομολόγησης, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει και στους Campell (2001) και C’anos et al. (2007).

❖ Μοντέλα Χωροθέτησης Μέγιστου Αθροίσματος (The Maxisum Location Problem)

Υπάρχουν ορισμένες εγκαταστάσεις που είναι επιθυμητό να τοποθετηθούν όσο το δυνατόν μακρύτερα από τα σημεία διαμονής του πληθυσμού, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μοντέλα που ήδη έχουν αναφερθεί και θα αναφερθούν στη συνέχεια, των οποίων σκοπός είναι η τοποθέτηση των κέντρων εξυπηρέτησης κοντά στα σημεία ζήτησης.

Το maxisum μοντέλο (Church & Garfinkel 1978, Ting 1984) αφορά τη χωροθέτηση αυτών των εγκαταστάσεων, όπως είναι για παράδειγμα τα κτίρια φυλακών, οι ΧΥΤΑ, τα κέντρα παραγωγής ενέργειας κ.α. Στόχος, δηλαδή, είναι η

εύρεση της βέλτιστης λύσης για τη χωροθέτηση μονάδων παροχής εξυπηρέτησης, ώστε να μεγιστοποιείται η μέση σταθμισμένη διανυόμενη απόσταση μεταξύ των σημείων ζήτησης και των εγκαταστάσεων.

Το πρόβλημα αυτό έχει εκτεταμένα απασχολήσει τη διεθνή βιβλιογραφία, κυρίως, σε σχέση με τις μεθόδους επίλυσης του. Υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές και αλγόριθμοι επίλυσης, ανάλογα με το αν πρόκειται για μια ή περισσότερες εγκαταστάσεις, αν βρίσκονται σε δίκτυα ή αν εντάσσονται σε συνεχή ή διακριτό χώρο, ενώ η επιλογή της συνάρτησης προσδιορισμού της απόστασης αποτελεί στοιχείο διαφοροποίησης του προβλήματος. Μια ενδιαφέρουσα μελέτη από τους Ergut και Neuman (1989) παρουσιάζει αναλυτικά τα κριτήρια χωροθέτησης ανεπιθύμητων εγκαταστάσεων, καθώς και τα μαθηματικά υποδείγματα που έχουν αναπτυχθεί για αυτούς τους σκοπούς.

Το μοντέλο maxisum μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (3.24)$$

$$\text{s.t: } \sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.25)$$

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

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.27)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{i[k]i} - x_{[m]i} \geq 0 \quad \forall i \in I, m=1, \dots, N-1 \quad (3.28)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.29)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.30)$$

Η διατύπωση του παραπάνω προβλήματος είναι όμοια με αυτήν του p-median προβλήματος με δύο όμως αξιοσημείωτες διαφορές. Η πρώτη προφανής διαφορά εντοπίζεται στην αντικειμενική συνάρτηση (3.24), όπου αντικειμενικός στόχος είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής απόστασης σταθμισμένης ως προς τη ζήτηση και όχι η ελαχιστοποίηση, όπως συμβαίνει στο p-median πρόβλημα. Επιπλέον, έχει προστεθεί ο περιορισμός (3.28) που εξασφαλίζει τη σύνδεση της ζήτησης με το κοντινότερο κέντρο εξυπηρέτησης. Αυτός ο περιορισμός προκύπτει από την άμεση επίπτωση της αντικειμενικής συνάρτησης, που έχει ως αποτέλεσμα τη σύνδεση της ζήτησης με τις περισσότερο απομακρυσμένες περιοχές. Στον περιορισμό αυτόν

(3.28), $[k]_i$ είναι ο δείκτης από την k πιο απομακρυσμένη υποψήφια θέση από τον κόμβο ζήτησης i . Ακόμη, ο (3.28) περιορισμός δηλώνει ότι αν η m πλησιέστερη εγκατάσταση στον κόμβο ζήτησης i έχει δυνατότητα εξυπηρέτησης, τότε η ζήτηση του κόμβου i πρέπει να συνδεθεί με αυτήν την εγκατάσταση ή με την πιο κοντινή σε αυτήν (Current et al., 2002).

Αναφορικά με την επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης μέγιστου αθροίσματος, οι Hansen et al. (1981) χρησιμοποίησαν φθίνουσες συνεχείς συναρτήσεις της απόστασης και πρότειναν μια μέθοδο παρόμοιου τύπου με τη μέθοδο φράγμα και κλάδος (Branch and bound,) την οποία αναφέρουν ως «Big-square-small-square» για την επίλυση του.

3.2. Μοντέλα Μέγιστης Απόστασης (Maximum Distance Models)

Στα μοντέλα μέγιστης απόστασης λαμβάνεται υπόψη, εξ αρχής (a priori), ο περιορισμός μέγιστης απόστασης (maximum distance). Η απόσταση, δηλαδή, μεταξύ δύο εγκαταστάσεων δεν πρέπει να υπερβαίνει μια μέγιστη τιμή. Μια βασική υπόθεση του μέτρου της μέγιστης απόστασης είναι ότι η ζήτηση ικανοποιείται πλήρως, εάν η πιο κοντινή εγκατάσταση βρίσκεται εντός μιας καλυπτόμενης απόστασης και δεν ικανοποιείται, αν η πιο κοντινή εγκατάσταση βρίσκεται εκτός αυτής της απόστασης. Σύμφωνα με τους Drezner και Hamacher (2002), οι a priori αποστάσεις αναφέρονται ως «καλυπτόμενες» αποστάσεις (covering distances) και η ζήτηση μέσα στην καλυπτόμενη απόσταση της πιο κοντινής της εγκατάστασης θεωρείται ως «καλυμμένη» (covered).

Ένα παράδειγμα του ιδιωτικού τομέα μπορεί να θεωρηθεί η εξυπηρέτηση που εγγυώνται ορισμένες εταιρείες διανομής αγαθών μέσα σε έναν προκαθορισμένο χρόνο. Στόχος αυτών των εταιρειών είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των πελατών τους, δηλαδή το κέρδος (Current et al., 2002). Στο δημόσιο τομέα, παράδειγμα αποτελεί η χωροθέτηση σχολείων με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των μαθητών που θα αναγκαστούν να χρησιμοποιήσουν κάποιο μέσο μαζικής μεταφοράς για τη μετάβασή τους στο σχολείο. Πιο συγκεκριμένα, οι μαθητές που μένουν εντός μιας ακτίνας ενός χιλιομέτρου από το σχολείο, πηγαίνουν στο σχολείο με πεζή μετακίνηση. Αντίθετα, οι μαθητές που μένουν εκτός αυτής της ακτίνας, θα αναγκαστούν να χρησιμοποιήσουν τη δημόσια συγκοινωνία.

Αυτή η προσέγγιση της μέγιστης απόστασης ίσως θεωρηθεί, απλώς, ως ένας «δίκαιος» και επεικής στόχος σε σχέση με τον πιο πρακτικό και αποτελεσματικό στόχο στα μοντέλα συνολικής ή μέσης απόστασης που αναλύθηκαν προηγουμένως (υποκεφάλαιο 3.1). Αυτό γιατί ελαχιστοποιώντας τη συνολική ή μέση απόσταση, την οποία οι χρήστες πρέπει να διανύσουν για να φτάσουν σε μια εγκατάσταση, ίσως να μην είναι το πιο σωστό κριτήριο λήψης απόφασης για τη χωροθέτηση μιας δημόσιας εγκατάστασης. Με άλλα λόγια, η ελαχιστοποίηση της συνολικής ή μέσης απόστασης τείνει να εξυπηρετεί, κυρίως, πελάτες που είναι συγκεντρωμένοι σε πληθυσμιακά κέντρα εις βάρος των πελατών που είναι χωρικά διεσπαρμένοι. Μια τέτοια, λοιπόν, διάκριση σχετικά με την προσβασιμότητα, μπορεί να έχει αρνητική επιρροή σε πελάτες που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές σε περίπτωση ανάγκης για άμεση και έκτακτη εξυπηρέτηση (πχ ασθενοφόρα, αστυνομικά τμήματα, πυροσβεστικά σώματα κτλ). Ως αποτέλεσμα, πρέπει να συμπεριληφθεί ένα κριτήριο που να επικεντρώνεται και στους πελάτες που αντιμετωπίζουν «φτωχή» εξυπηρέτηση.

❖ Μοντέλο P- Κέντρων (The P-Center Problem)

Το μοντέλο p-κέντρων ασχολείται με το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της μέγιστης απόστασης που απέχει κάθε κόμβος ζήτησης από την πλησιέστερη εγκατάσταση, με την προϋπόθεση ότι χωροθετείται ένας συγκεκριμένος αριθμός εγκαταστάσεων (Hakimi, 1964,1965).

Η πρώτη αναφορά στο πρόβλημα έγινε από τον Sylvester (1857) υπό τη μορφή της εύρεσης του κέντρου ενός κύκλου με τη μικρότερη ακτίνα για την κάλυψη όλων των επιθυμητών σημείων ζήτησης. Ακόμη, οι Garfinkel et al. (1977) εξέτασαν τις θεμελιώδεις αρχές του προβλήματος p-center προκειμένου να γίνει χωροθέτηση ενός συγκεκριμένου αριθμού κέντρων εξυπηρέτησης κατά μήκος ενός οδικού δικτύου. Το πρόβλημα p-center μορφοποιήθηκε και από τους ReVelle και Hogan (1989b) για τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων έκτακτης ανάγκης με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιείται η μέγιστη απόσταση μέσα στην οποία μια υπηρεσία έκτακτης ανάγκης μπορεί να είναι διαθέσιμη με μία πιθανότητα α . Ο Talmar (2002) όρισε ένα p-center πρόβλημα για τη χωροθέτηση και ανταπόκριση τριών ελικοπτέρων διάσωσης για την εξυπηρέτηση έκτακτων αναγκών που προκύπτουν από ατυχήματα από τουριστικές δραστηριότητες. Τέλος, αναφέρεται

ότι για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα μοντέλα αυτά οι αναγνώστες μπορούν να ανατρέξουν και στους Handler (1990), Daskin (2000) και Current et al.(2002).

Πολλές είναι οι παραλλαγές του μοντέλου αυτού (Current et al., 2002). Το vertex p-center πρόβλημα περιορίζει το σύνολο των υποψήφιων χώρων εγκατάστασης στους κόμβους του δικτύου, ενώ το absolute p-center πρόβλημα επιτρέπει στις εγκαταστάσεις να βρίσκονται οπουδήποτε στις ακμές του. Και στις δύο εκδόσεις, μπορεί να υπάρχουν ή όχι βάρη. Όταν υπάρχει προσθήκη βαρών (πχ η σπουδαιότητα ενός κόμβου ή το επίπεδο ζήτησης του), οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων ζήτησης και των εγκαταστάσεων εξυπηρέτησης πολλαπλασιάζονται με ένα βάρος που συνδέεται με τον κόμβο ζήτησης (σταθμισμένο μοντέλο). Όταν δεν υπάρχουν βάρη, όλοι οι κόμβοι ζήτησης αντιμετωπίζονται ισοδύναμα (μη σταθμισμένο μοντέλο).

Για τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι αναγκαίο να οριστούν τα παρακάτω δεδομένα και σύνολα:

I: το σύνολο των κόμβων ζήτησης που συμβολίζονται με i

J: το σύνολο των υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης που συμβολίζονται με j

h_i : η ζήτηση στον κόμβο i

d_{ij} : η απόσταση (ή άλλο σχετιζόμενο με την απόσταση μέγεθος) ανάμεσα στους κόμβους ζήτησης i και στις υποψήφιες θέσεις j

p : ο αριθμός των μονάδων εξυπηρέτησης που θα χωροθετηθούν

W : η μέγιστη απόσταση ανάμεσα στον κόμβο ζήτησης και στην εγκατάσταση στην οποία έχει ανατεθεί η εξυπηρέτηση του

και οι μεταβλητές απόφασης:

x_j : $\begin{cases} 1, \text{ εάν γίνεται η χωροθέτηση στην πιθανή θέση } j \\ 0, \text{ εάν όχι.} \end{cases}$

y_{ij} : $\begin{cases} 1, \text{ εάν η ζήτηση στον κόμβο } i \text{ εξυπηρετείται από τη μονάδα εξυπηρέτησης} \\ \text{στη θέση } j \\ 0, \text{ εάν όχι.} \end{cases}$

Με τους παραπάνω συμβολισμούς, το πρόβλημα p-center μορφοποιείται ως εξής:

$$\text{Minimize } W \quad (3.31)$$

$$\text{s.t:} \quad \sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.32)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.33)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.34)$$

$$W - \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (3.35)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.36)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.37)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.31) είναι η ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόστασης σταθμισμένης ως προς τη ζήτηση μεταξύ κάθε κόμβου ζήτησης i και της κοντινότερης ανοιχτής εγκατάστασης στη θέση j . Οι περιορισμοί (3.32), (3.33), (3.34), (3.36) και (3.37) είναι ακριβώς ίδιοι με τους περιορισμούς (3.2), (3.3), (3.4), (3.5) και (3.6) αντίστοιχα, που περιγράφηκαν για τη διατύπωση του προβλήματος p -median. Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στο p -median πρόβλημα για τον περιορισμό (3.6), έτσι κι εδώ ο περιορισμός (3.37) μπορεί να παραλειφθεί. Ο περιορισμός (3.35) ορίζει, σε σχέση με τη ζήτηση, ένα κατώτατο όριο της μέγιστης σταθμισμένης απόστασης που ελαχιστοποιείται.

Λόγω της φύσης της αντικειμενικής συνάρτησης, αυτή η κατηγορία μοντέλων ονομάζεται $\min\max$ μοντέλα χωροθέτησης (Σαρατζέμη, 1991). Τα μοντέλα p -center, με όλες τις παραλλαγές τους, έχουν εφαρμοστεί τα τελευταία χρόνια, κυρίως, σε προβλήματα χωροθέτησης εγκαταστάσεων έκτακτων υπηρεσιών, νοσοκομείων, πυροσβεστικών σταθμών κ.ά., όπου η απόσταση από τις εγκαταστάσεις, στις οποίες θα ανατεθεί κάποιος πελάτης, πρέπει να είναι ελάχιστη.

Όσον αφορά την επίλυση τέτοιων μοντέλων, σημειώνεται ότι θεωρείται NP-hard και μπορεί να επιλυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο για σταθερές τιμές του p . Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει κάποια αρκετά ικανοποιητική, ακριβής ή ευρετική μέθοδος που να προσφέρει λύση σε περιπτώσεις πολλών μεταβλητών. Επίσης, αναφέρεται ότι το μοντέλο p -center είναι πιο δύσκολο να επιλυθεί από το μοντέλο p -median (Laporte et al., 2015).

Μια πρώτη μέθοδος επίλυσης του absolute p -center προβλήματος παρουσιάστηκε από τον Hakimi (1964). Οι Garfinkel et al. (1977) μοντελοποίησαν το πρόβλημα χωροθέτησης κέντρων εξυπηρέτησης κατά μήκος ενός οδικού δικτύου και

προχώρησαν σε επιτυχή επίλυσή του με τη χρήση μιας δυαδικής τεχνικής αναζήτησης (binary search) σε συνδυασμό με ευρετικές τεχνικές. Έπειτα, οι Hochbaum και Pathria (1998) χρησιμοποίησαν ένα στοχαστικό μοντέλο και πρότειναν την επίλυση ενός προβλήματος χωροθέτησης έκτακτων υπηρεσιών που θα έπρεπε να ελαχιστοποιεί τη μέγιστη απόσταση σε ένα δίκτυο σε όλες τις χρονικές περιόδους. Ακόμη, μπορεί κανείς να βρει ποικίλες πρόσφατες μεθόδους και αποτελέσματα για τα p-center προβλήματα στον Tansel (2011), όπως επίσης και στον Calik (2013), όπου παρουσιάζονται ευρετικές μέθοδοι για τα p-center προβλήματα αλλά και για μια ξεχωριστή υποκατηγορία p-center προβλημάτων, τα capacitated p-center problems. Επίσης, ο Daskin (2013) πρότεινε έναν αλγόριθμο βασισμένο στο set covering model (υποκεφάλαιο 3.3), ο οποίος μπορεί να επιλύσει το μη σταθμισμένο vertex p-center πρόβλημα. Τέλος, στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται και η χρήση μεθευρετικών (meta-heuristic) και μιμητικών (memetic) αλγορίθμων και, πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται στους Mladenovic' et al. (2003), Pullan (2008), Salhi και Al-Khedhairi (2010), Martinich (1988), Bozkaya και Tansel (1998).

❖ Μοντέλο P- Διασποράς (The P- Dispersion Problem)

Το πρόβλημα διασποράς p εγκαταστάσεων διαφοροποιείται από τα περισσότερα μοντέλα με δύο τρόπους (Kuby, 1987). Αρχικά, ασχολείται μόνο με την απόσταση μεταξύ των προς χωροθέτηση μονάδων παροχής εξυπηρέτησης και έπειτα, στόχος του προβλήματος είναι η μεγιστοποίηση της ελάχιστης απόστασης μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους των υπό μελέτη μονάδων παροχής εξυπηρέτησης.

Σχετικά με τη διεθνή βιβλιογραφία, εκτενείς πληροφορίες για τα μοντέλα p-διασποράς και τις μαθηματικές μορφοποιήσεις τους μπορούν να βρεθούν στους Garfinkel και Church (1978), Erkut, Baptie et al. (1990), Erkut και Neuman, (1992), Erkut, ReVelle et al. (1996), Eiselt et al. (2008), Giannikos και Polychroniou (2009) κ.ά.

Για τη μορφοποίηση του παραπάνω μοντέλου απαιτείται μια επιπρόσθετη μεταβλητή M και μια μεταβλητή απόφασης D:

M: ένας μεγάλος σταθερός θετικός αριθμός

D: η ελάχιστη απόσταση μεταξύ κάθε ζεύγους εγκαταστάσεων

Με τους παραπάνω συμβολισμούς, το πρόβλημα μοντελοποιείται ως εξής:

$$\text{Maximize } D \quad (3.38)$$

$$\text{s.t: } \sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.39)$$

$$D + (M - d_{ij}) x_i + (M - d_{ij}) x_j \leq 2M - d_{ij} \quad \forall i, j \in J, i < j \quad (3.40)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.41)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.38) μεγιστοποιεί την απόσταση μεταξύ των δύο πλησιέστερων εγκαταστάσεων. Ο περιορισμός (3.39) ορίζει τον αριθμό των μονάδων παροχής εξυπηρέτησης προς τοποθέτηση. Ο περιορισμός (3.40) ορίζει τον ελάχιστο διαχωρισμό μεταξύ κάθε ζεύγους των ανοιχτών εγκαταστάσεων. Παρατηρείται ότι, εάν η μεταβλητή x_i ή η x_j είναι μηδέν, ο περιορισμός (3.40) δεν είναι δεσμευτικός. Όμως, εάν και οι δύο αυτές μεταβλητές είναι ίσες με 1, τότε ο περιορισμός είναι ισοδύναμος με το $D \leq d_{ij}$. Έτσι, η μεγιστοποίηση του D αναγκάζει τη μικρότερη απόσταση μεταξύ των εγκαταστάσεων να γίνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη.

Σε επίπεδο διευρυμένου χώρου, εφαρμογές του μοντέλου p -διασποράς συναντώνται, κυρίως, στη χωροθέτηση ραδιοτηλεοπτικών αναμεταδοτών, κεραιών κινητής τηλεφωνίας, αλυσίδων franchise, αμυντικών εγκαταστάσεων και άλλων εγκαταστάσεων κοινής ανταγωνιστικότητας (Αλεξανδρή, 2009). Παράλληλα, άλλες κοινές εφαρμογές αποτελούν η χωροθέτηση ορισμένων ανεπιθύμητων εγκαταστάσεων, όπως είναι για παράδειγμα οι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή ραδιενεργών υλικών ή οι εγκαταστάσεις αποτεφρωτήρων κτλ. Ακόμη, το συγκεκριμένο πρόβλημα εφαρμόζεται και για εγκαταστάσεις που μπορούν να δημιουργήσουν δυσμενή οικονομικά και κοινωνικά αποτελέσματα, τα οποία σχετίζονται με την τοποθεσία και τη λειτουργία τους. Τέτοια παραδείγματα εγκαταστάσεων είναι οι εγκαταστάσεις παραγωγής δυνατών θορύβων, τα κέντρα απεξάρτησης ναρκωτικών ουσιών, οι σωφρονιστικές εγκαταστάσεις κ.ά.

3.3. Μοντέλα Κάλυψης (Covering Location problems)

Στο πλαίσιο της λήψης μιας απόφασης για τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων που παρέχουν μια υπηρεσία, συμβαίνει συχνά ένας πελάτης να μπορεί να λάβει αυτήν την υπηρεσία μόνο εάν βρίσκεται εντός μιας συγκεκριμένης απόστασης από την πλησιέστερη εγκατάσταση. Τα μοντέλα που σχετίζονται με αυτό το χαρακτηριστικό ονομάζονται προβλήματα κάλυψης (Laporte et al., 2015). Δηλαδή,

όλα τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνουν την έννοια της κάλυψης και χρησιμοποιούν μια συγκεκριμένη απόσταση, μέσα στα όρια της οποίας, εάν βρίσκεται ένα σημείο ζήτησης, θα θεωρείται ότι μπορεί να καλυφθεί.

Οι πρώτες αναφορές στα προβλήματα κάλυψης μπορούν να βρεθούν στον Berge (1957), όπου παρουσιάζεται το πρόβλημα εύρεσης μιας ελάχιστης κάλυψης σε ένα γράφημα, καθώς και ένα θεώρημα που παρέχει έναν αλγόριθμο για την επίλυση του προβλήματος. Έπειτα, αναφορές βρίσκονται στον Hakimi (1965), όπου αποφασίζεται ο ελάχιστος αριθμός περιπολιών της αστυνομίας που απαιτείται για να προστατεύσει ένα οδικό δίκτυο. Ωστόσο, το πρόβλημα μορφοποιήθηκε μαθηματικά για πρώτη φορά στο πλαίσιο της επιστήμης της χωροθέτησης από τους Toregas et al. (1971), παρόλο που -εκτός του περιεχομένου της χωροθέτησης- είχε ήδη μορφοποιηθεί από τον Roth (1969).

Τα προβλήματα κάλυψης έχουν εφαρμοστεί σε ποικίλες περιοχές όπως: ανάλυση των αγορών (Storbeck, 1988), ανάπτυξη υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης (Toregas et al., 1971), αρχαιολογία (Bell & Church, 1985), προγραμματισμός πληρώματος (Ceria et al. 1998), μεταλλουργία (Vasko et al., 1989), επιλογή φυσικών καταφύγιων (Church et al., 1996), μήτρες Steiner (Feo & Resende, 1989) κ.ά.

Σε γενικές γραμμές, διακρίνονται τρεις κατηγορίες μοντέλων κάλυψης που παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο αυτό: τα μοντέλα συνόλου κάλυψης, τα μοντέλα μέγιστης κάλυψης και τα μοντέλα επιπρόσθετης κάλυψης. Τα χαρακτηριστικά αυτών και οι διαφορές μεταξύ τους αναλύονται παρακάτω.

❖ Μοντέλο Συνόλου Κάλυψης (Set Covering Location Problem)

Το μοντέλο αυτό θεωρείται ένα απλό και εύχρηστο μοντέλο ανάλυσης χωροθέτησης, το οποίο μοντελοποιήθηκε από τους Toregas et al. (1971), στο πλαίσιο της χωροθέτησης υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης. Σκοπός του μοντέλου είναι η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης χωροθέτησης ενός ελάχιστου αριθμού εγκαταστάσεων ή αλλιώς η ελαχιστοποίηση του κόστους τοποθέτησης τους, ώστε να καλυφθεί η δεδομένη ζήτηση εντός ενός δικτύου. Με άλλα λόγια, στην πλήρη κάλυψη το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην κάλυψη όλων των σημείων ζήτησης με, όσο το δυνατόν, μικρότερη διανυθείσα απόσταση μεταξύ του πελάτη και της μονάδας εξυπηρέτησης. Το μοντέλο αυτό έχει αρκετές εφαρμογές στην

καθημερινότητα, όπως στη στελέχωση των αερογραμμών με ιπτάμενο προσωπικό, στην εγκατάσταση αποθηκών, στη χωροθέτηση υπηρεσιών άμεσης ανάγκης κ.ά.

Για τη μαθηματική τυποποίηση του προβλήματος ορίζουμε τα παρακάτω:

I: το σύνολο των κόμβων ζήτησης που συμβολίζονται με i

J: το σύνολο των υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης που συμβολίζονται με j

d_{ij} : η απόσταση ανάμεσα στους κόμβους ζήτησης i και τις υποψήφιες θέσεις j

S: η απόσταση κάλυψης

$N_i = \{j \mid d_{ij} \leq S\}$: το σύνολο όλων των υποψήφιων θέσεων που μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση στο σημείο i

f_j : το κόστος τοποθέτησης μιας μονάδας εξυπηρέτησης στην υποψήφια θέση j

και οι μεταβλητές απόφασης:

$$x_j: \begin{cases} 1, \text{ εάν γίνεται η χωροθέτηση στην πιθανή θέση } j \\ 0, \text{ εάν όχι.} \end{cases}$$

$$a_{ij}: \begin{cases} 1, \text{ εάν η υποψήφια θέση } j \text{ μπορεί να καλύψει τη ζήτηση στον κόμβο } i \\ \text{(δηλαδή αν } d_{ij} \leq S) \\ 0, \text{ εάν όχι.} \end{cases}$$

Έτσι, το πρόβλημα συνόλου κάλυψης (set covering location problem) μπορεί να τυποποιηθεί ως εξής:

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} f_j x_j \quad (3.42)$$

$$\text{s.t: } \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (3.43)$$

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

Σκοπός της αντικειμενικής συνάρτησης (3.42) είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους τοποθέτησης των μονάδων εξυπηρέτησης που έχουν επιλεγεί. Ο περιορισμός (3.43) δηλώνει ότι κάθε κόμβος ζήτησης i πρέπει να καλύπτεται από τουλάχιστον μια εγκατάσταση, ενώ ο περιορισμός (3.44) είναι ο ακέραιος περιορισμός των μεταβλητών απόφασης, δηλαδή ενισχύει την απόφαση χωροθέτησης με ένα ναι ή με ένα όχι.

Στο σημείο αυτό, είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι ο παραπάνω σχηματισμός της αντικειμενικής συνάρτησης (3.42) προκύπτει από την υπόθεση ότι τα κόστη εγκατάστασης των μονάδων εξυπηρέτησης δεν είναι ίδια σε όλες τις θέσεις, οπότε

πρέπει να συμπεριληφθούν ως συντελεστές των μεταβλητών απόφασης (Laporte et al., 2015). Εάν, όμως, τα κόστη τοποθέτησης είναι ίδια για όλες τις υποψήφιες τοποθεσίες ή απλά επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση του αριθμού των επιλεγμένων κέντρων εξυπηρέτησης, η αντικειμενική συνάρτηση (3.42) παίρνει την ακόλουθη μορφή: $\text{Minimize } \sum_{j \in J} x_j$.

Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι περιορισμοί (3.43), (3.44) προϋποθέτουν ότι κάθε σημείο ζήτησης εξυπηρετείται – καλύπτεται από μια αντίστοιχη εγκατάσταση, πράγμα το οποίο, συνήθως, αποδίδει μη οικονομικά βιώσιμες λύσεις. Αυτό γιατί, στις περισσότερες περιπτώσεις, η παραπάνω υπόθεση απαιτεί τη χωροθέτηση πάρα πολλών εγκαταστάσεων. Έτσι, μια ποικιλία κανόνων μείωσης γραμμών και στηλών έχει αναπτυχθεί για την ουσιαστική μείωση του μεγέθους του προβλήματος (Daskin, 1995).

Μια εξίσου σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι η διατύπωση (3.42) – (3.44) θεωρεί ότι οι υποψήφιες τοποθεσίες των εγκαταστάσεων βρίσκονται στους κόμβους ενός δικτύου. Ένα σχέδιο χωροθέτησης χαμηλότερου κόστους θα μπορούσε να ήταν εφικτό, αν οι εγκαταστάσεις μπορούσαν να τοποθετηθούν κατά μήκος των συνδέσμων του δικτύου, όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 3.1 ως παράδειγμα. Αν οι εγκαταστάσεις μπορούν να τοποθετηθούν μόνο στους κόμβους και η απόσταση κάλυψης είναι ίση με 10 μονάδες, τότε είναι αναγκαίες δύο εγκαταστάσεις: μία στον κόμβο A και μία στον κόμβο B ή στον κόμβο C. Αν ήταν δυνατό να τοποθετήσουμε τις εγκαταστάσεις κατά μήκος των συνδέσμων (ή αλλιώς τόξων), καθώς και στους κόμβους, τότε μια εγκατάσταση τοποθετημένη 10 μονάδες δεξιά του κόμβου A θα κάλυπτε τη ζήτηση και των τριών κόμβων. Οι Church και Meadows (1979) παρουσίασαν μια μέθοδο για να τροποποιήσουν το αρχικό δίκτυο, έτσι ώστε να επιτρέπεται η χωροθέτηση κατά μήκος των συνδέσμων αλλά να εξακολουθούν να λύνουν το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τη διατύπωση (3.42) – (3.44). Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να αυξήσει το μέγεθος του αρχικού δικτύου με ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων που τοποθετούνται κατά μήκος των συνδέσμων του δικτύου. Η συμπερίληψη αυτών των επιπλέον κόμβων στο σύνολο J θα επιφέρει μια αρκετά ικανοποιητική λύση (Current et al., 2002).



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα δικτύου

[Πηγή : *Current, Daskin & Schilling (2002)*]

Γενικά, το μοντέλο πλήρους κάλυψης, ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, αποτελεί ένα κλασικό πρόβλημα. Αξίζει, όμως, να αναφερθεί ότι στην περίπτωση που $I = J$ είναι το σύνολο των κόμβων ενός γραφήματος χωρίς διεύθυνση και $a_{ij} = 1$, αν και μόνο αν το άκρο (i, j) υπάρχει, συνήθως το πρόβλημα ονομάζεται πρόβλημα κομβικής κάλυψης (Node Covering Problem) και είναι ένα πρόβλημα που έχει μελετηθεί βαθιά τον τελευταίο αιώνα. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με αυτό, ο αναγνώστης μπορεί να συμβουλευτεί την έρευνα του Balinski (1965). Άλλες ενδιαφέρουσες καρποφόρες έρευνες αποτελούν και αυτές των Norman και Rabin (1959) και Hohn (1955).

Αναφορικά με την επίλυση του προβλήματος συνόλου κάλυψης, σημειώνεται ότι αποτελεί ένα NP-πλήρες (NP-complete) πρόβλημα (Garey & Johnson, 1979), δηλαδή ανήκει στα πιο δύσκολα προβλήματα της κλάσης NP και δεν έχει γνωστό αποδοτικό (πολυωνυμικό) αλγόριθμο. Ακόμη, αναφέρεται ότι κάθε άλλο πρόβλημα της κλάσης NP μετασχηματίζεται πολυωνυμικά σε ένα πρόβλημα NP-complete. Παρόλα αυτά, συμβαίνει συχνά η μέθοδος της γραμμικής «χαλάρωσης» προγραμματισμού να παρέχει μια ακέραια λύση στο πρόβλημα συνόλου κάλυψης. Συνήθως, μόνο λίγοι κλάδοι σε έναν branch and bound αλγόριθμο είναι αναγκαίοι για την επίτευξη μιας βέλτιστης ακέραιης λύσης. Ένα άλλο χαρακτηριστικό σχετικό με την επίλυση που πρέπει να υπογραμμιστεί είναι το γεγονός ότι το πρόβλημα αυτό, συνήθως, παρουσιάζει πολλές διαφορετικές βέλτιστες λύσεις πχ σύνολα από κέντρα με την ίδια ελάχιστη πληθικότητα (cardinality: ο αριθμός στιγμιότυπων ενός τύπου οντοτήτων που μπορούν να αντιστοιχίζονται με μία οντότητα ενός άλλου τύπου σε μια συσχέτιση) που καλύπτει όλα τα σημεία ζήτησης (Laporte et al., 2015).

❖ Μοντέλο Μέγιστης Κάλυψης (Maximal Covering Location Problem)

Το μοντέλο τη μέγιστης κάλυψης παρουσιάστηκε πρώτη φορά από τους Church και ReVelle (1974) και εμπεριέχει μια σημαντική διαφορά, αναφορικά με τον στόχο του προηγούμενου μοντέλου (set covering model). Στη συγκεκριμένη κατηγορία, ο αριθμός των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν περιορίζεται σε έναν προκαθορισμένο αριθμό p και η ικανοποίηση του συνόλου της ζήτησης, εντός ενός δικτύου, θεωρείται ανέφικτη. Δηλαδή, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην κάλυψη όχι όλης της ζήτησης, όπως πριν, αλλά στην κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου μέρους της ζήτησης.

Ο σημαντικός ρόλος αυτού του μοντέλου γίνεται κατανοητός, εάν σκεφτεί κανείς ότι η υπόθεση του μοντέλου συνόλου κάλυψης που αναλύθηκε παραπάνω δεν είναι ρεαλιστική. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από το γεγονός ότι το μοντέλο συνόλου κάλυψης υποθέτει πως όλοι οι κόμβοι ζήτησης πρέπει να εξυπηρετηθούν, χωρίς, όμως, να υπάρχει κάποιος περιορισμός στον προϋπολογισμό (budget). Έτσι, υπάρχει κίνδυνος ο αριθμός των κέντρων παροχής υπηρεσιών που χρειάζονται για να καλύψουν όλα τα σημεία ζήτησης να υπερβαίνει τον αριθμό των κέντρων που πρακτικά μπορούν να τοποθετηθούν. Επιπλέον, το μοντέλο πλήρους κάλυψης αντιμετωπίζει όλα τα σημεία ζήτησης με πανομοιότυπο τρόπο, με αποτέλεσμα να μη λαμβάνονται υπόψη σημαντικές και καθοριστικές πληροφορίες για τη βέλτιστη επίλυση του προβλήματος, όπως είναι για παράδειγμα το μέγεθος της ζήτησης κάθε σημείου (Current et al., 2002). Όλα αυτά τα θέματα οδήγησαν στη θεώρηση του μοντέλου μέγιστης κάλυψης.

Για τη διατύπωση του μοντέλου μέγιστης κάλυψης προστίθενται στους ορισμούς που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο συνόλου κάλυψης τα εξής:

h_i : η ζήτηση στον κόμβο i

p : ο αριθμός των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν

και η μεταβλητή απόφασης:

$$z_i: \begin{cases} 1, \text{ εάν η ζήτηση στον κόμβο } i \text{ καλύπτεται} \\ 0, \text{ εάν όχι.} \end{cases}$$

Οπότε το πρόβλημα μέγιστης κάλυψης (maximal covering location problem) μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} h_i z_i \quad (3.45)$$

$$\text{s.t: } \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq z_i \quad \forall i \in I \quad (3.46)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad (3.47)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.48)$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (3.49)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.45) έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση του ποσού της καλυπτόμενης ζήτησης. Ο περιορισμός (3.46) δηλώνει ότι η ζήτηση στον κόμβο i δεν υπολογίζεται ως καλυπτόμενη, εκτός και αν επιλεγθεί έστω και μία θέση τοποθέτησης μονάδας εξυπηρέτησης, η οποία καλύπτει τον κόμβο i . Ακόμη, παρατηρείται ότι το αριστερό μέλος του περιορισμού (3.46) είναι πανομοιότυπο με το αριστερό μέλος του (3.43) περιορισμού στο μοντέλο συνόλου κάλυψης και δίνει τον αριθμό των επιλεγμένων θέσεων τοποθέτησης κέντρων παροχής υπηρεσιών που καλύπτουν τον κόμβο i . Ο περιορισμός (3.47) καθορίζει ότι δεν μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερα από p κέντρα παροχής υπηρεσιών. Οι περιορισμοί (3.48) και (3.49) είναι οι περιορισμοί δυαδικότητας και ακεραιότητας των μεταβλητών απόφασης. Τέλος, σύμφωνα με τους Current et al. (2002), οι περιορισμοί (3.46) και (3.48) επιτρέπουν την αντικατάσταση του περιορισμού (3.49) με $z_i \leq 1, \forall i \in I$, χωρίς απώλεια της γενικότητας.

Μια παραλλαγή αυτού του προβλήματος προτάθηκε από τους Church και ReVelle (1974) και αφορούσε το συνδυασμό της υποχρεωτικής κάλυψης ορισμένων σημείων ζήτησης και τη μεγιστοποίηση της κάλυψης των υπόλοιπων σημείων. Ακόμη, οι Church και Meadows (1979), πρότειναν μια τροποποίηση του δικτύου στην περίπτωση που οι εγκαταστάσεις μπορούν να τοποθετηθούν και κατά μήκος των συνδέσμων του δικτύου. Σύμφωνα με τους Current et al. (2002), σε συστηματικές αλλαγές του p από 1 έως k , όπου k ο ελάχιστος αριθμός εγκαταστάσεων που απαιτούνται για να καλυφθεί ολόκληρη η ζήτηση, τότε είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι τύποι (3.45) έως (3.49), προκειμένου να προσδιοριστούν τα οριστικά οφέλη που σχετίζονται με επιπλέον εγκαταστάσεις. Ακόμη, μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική του προβλήματος παρουσιάζεται στους Carrizosa και Plastria (1998b), όπου αναφέρεται το Maximal Quantile Location Problem. Τέλος, μια πρόσφατη προσέγγιση του maximal covering location problem

αναφέρεται στον Niaki (2016), όπου παρουσιάζεται η γενική μορφή του capacitated maximal covering location problem.

Το πρόβλημα μέγιστης κάλυψης είναι NP-hard (Mediggo, Zemel & Hakimi, 1983), αλλά γενικά μπορεί να επιλυθεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας ευρετικούς αλγόριθμους. Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η Lagrangian «χαλάρωση» που ενσωματώνεται μέσα στον branch and bound αλγόριθμο (Daskin 1995, Galvao & ReVelle 1996).

❖ Μοντέλο Επιπρόσθετης Κάλυψης (Backup Covering Location Model)

Τα δύο παραπάνω μοντέλα υποθέτουν ότι η μονάδα παροχής εξυπηρέτησης που πρόκειται να χωροθετηθεί είναι πάντα διαθέσιμη. Υπάρχει όμως η πιθανότητα, ενώ η μονάδα εξυπηρετεί μια περιοχή / περιστατικό, να προκύψει ταυτόχρονα η ανάγκη εξυπηρέτησης μιας νέας περιοχής / περιστατικού (πχ έναρξη μιας νέας εστίας πυρκαγιάς σε κοντινή περιοχή). Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε το μοντέλο επιπρόσθετης κάλυψης, το οποίο, ουσιαστικά, αποτελεί επέκταση του μοντέλου συνόλου κάλυψης. Το μοντέλο επιπρόσθετης κάλυψης έχει δύο φυσικούς στόχους: την ελαχιστοποίηση του αριθμού των ανοικτών μονάδων εξυπηρέτησης και, ταυτόχρονα, τη μεγιστοποίηση της δευτερογενούς κάλυψης (Laporte et al., 2015).

Οι προσεγγίσεις αυτού του προβλήματος από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι ποικίλες και ενδιαφέρουσες. Αρχικά, οι Daskin και Stern (1981) πρότειναν το hierarchical objective set covering model, το οποίο αποσκοπούσε στη χωροθέτηση κέντρων παροχής υπηρεσιών, μεγιστοποιώντας τη δευτερογενή κάλυψη. Έτσι, η δευτερογενής κάλυψη θεωρείται ενδεχόμενη υπηρεσία, πέραν του ενός κέντρου παροχής υπηρεσιών. Οι Hogan και ReVelle (1986) γενίκευσαν την ιδέα και διατύπωσαν το πρόβλημα της επιπρόσθετης κάλυψης, δημιουργώντας δύο παρόμοια μοντέλα που ονομάστηκαν BACOP1 και BACOP2 αντίστοιχα. Έπειτα, μια άλλη σχετική σημαντική εφαρμογή αποτελεί αυτή των Storbeck και Vohra (1988). Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσέγγιση των Batta και Mannur (1990) αλλά και η πιο πρόσφατη εφαρμογή των Curtin et al. (2010), οι οποίοι ανέπτυξαν ένα μοντέλο επιπρόσθετης κάλυψης για τη χωροθέτηση των περιπολιών της αστυνομίας.

Για τη διατύπωση του μοντέλου επιπρόσθετης κάλυψης ορίζονται τα ακόλουθα:

h_i : η ζήτηση στον κόμβο i

p : ο αριθμός των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν

η μεταβλητή απόφασης:

$$z_i: \begin{cases} 1, \text{ εάν η ζήτηση στον κόμβο } i \text{ καλύπτεται} \\ 0, \text{ εάν όχι.} \end{cases}$$

και η επιπρόσθετη μεταβλητή απόφασης:

$$u_i: \begin{cases} 1, \text{ εάν η ζήτηση στον κόμβο } i \text{ καλύπτεται από δύο ή περισσότερα κέντρα} \\ 0, \text{ εάν όχι} \end{cases}$$

Το μοντέλο επιπρόσθετης κάλυψης (backup covering location model) μπορεί να διατυπωθεί πλέον ως εξής:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in I} h_i z_i \quad (3.50)$$

$$\sum_{i \in I} h_i u_i \quad (3.51)$$

$$\text{s.t: } \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq z_i + u_i \quad \forall i \in I \quad (3.52)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.53)$$

$$z_i \geq u_i \quad \forall i \in I \quad (3.54)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.55)$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (3.56)$$

$$u_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (3.56)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.50) αποτελεί η μεγιστοποίηση του ποσού της καλυπτόμενης ζήτησης, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση (3.51) αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της συνολικής καλυπτόμενης ζήτησης από δύο ή περισσότερες εγκαταστάσεις. Ο περιορισμός (3.52) συνδέει τις αποφάσεις εγκατάστασης του κέντρου με την πρωτεύουσα και δευτερεύουσα κάλυψη της περιοχής ζήτησης i , ενώ ο περιορισμός (3.53) ορίζει ότι πρόκειται να χωροθετηθούν p εγκαταστάσεις. Ο περιορισμός (3.54) προϋποθέτει ότι η αρχική κάλυψη της περιοχής ζήτησης i θα παρέχεται πριν από τη δευτερεύουσα κάλυψη. Με άλλα λόγια, η παροχή δευτερεύουσας κάλυψης προϋποθέτει την παροχή αρχικής

κάλυψης. Τέλος, οι περιορισμοί (3.55)-(3.57) είναι οι γνωστοί περιορισμοί δυαδικότητας των μεταβλητών απόφασης.

4. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται εκείνα τα στοιχεία που αφορούν στη διατύπωση του προβλήματος χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων. Αρχικά, πραγματοποιείται η παρουσίαση των κριτηρίων χωροθέτησης των κινητών μονάδων και, έπειτα, αναφέρεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στην οποία στηρίχθηκε το εν λόγω πρόβλημα χωροθέτησης. Στη συνέχεια, αναλύεται το μοντέλο χωροθέτησης που επιλέχθηκε και παρουσιάζεται η μορφοποίηση του προβλήματος. Τέλος, ορίζεται η περιοχή εφαρμογής και αναφέρονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

4.1. Κριτήρια Χωροθέτησης Κινητών Μονάδων Ελέγχου Καυσαερίων

Στο σύνολο των γενικών κέντρων παροχής υπηρεσιών περιλαμβάνονται και τα κινητά (mobile) κέντρα. Ένα παράδειγμα κινητών κέντρων παροχής υπηρεσιών είναι οι κινητές μονάδες ελέγχου καυσαερίων, η χωροθέτηση των οποίων είναι το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συνήθως, ένα κινητό κέντρο παροχής υπηρεσιών μετακινείται σε μια περιοχή και σταματά σε διάφορα σημεία, όπου οι χρήστες χρησιμοποιούν τις ανάλογες υπηρεσίες. Δηλαδή, στα κινούμενα κέντρα εξυπηρέτησης η υπηρεσία προσφέρεται όπου υπάρχει ζήτηση και τα σημεία ζήτησης βρίσκονται σε όλο το δίκτυο. Ακόμη, ενώ στα σταθερά κέντρα εξυπηρέτησης το κόστος θεωρείται το κόστος προσιτότητας, στα κινητά κέντρα ισοδυναμεί, κυρίως, με το κόστος εξυπηρέτησης (Σαρατζέμη, 1991).

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά λαμβάνονται υπόψη στο πρόβλημα χωροθέτησης των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων, το οποίο είναι ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα. Προτού, όμως, αναφερθούν τα κριτήρια χωροθέτησης των εν λόγω μονάδων, είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι το εξεταζόμενο πρόβλημα διαφέρει από τα συνηθισμένα προβλήματα χωροθέτησης κινητών μονάδων υπηρεσιών, όπως είναι για παράδειγμα η χωροθέτηση ασθενοφόρων ή πυροσβεστικών οχημάτων. Η αρχική βασική διαφορά είναι ότι οι κινητές μονάδες ελέγχου καυσαερίων δεν παρέχουν υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και, έτσι, λειτουργούν διαφορετικά. Συγκεκριμένα, το προσωπικό των μονάδων ελέγχου καυσαερίων που είναι χωροθετημένες σταματάει ορισμένα από τα κυκλοφορούντα οχήματα και τα ελέγχει, χωρίς να υπάρχει το σύστημα της «κλήσης ανάγκης», όπως στα

ασθενοφόρα ή τα πυροσβεστικά οχήματα. Για αυτόν, κυρίως, το λόγο, η χωροθέτηση των κινητών μονάδων γίνεται με κάποια διαφορετικά κριτήρια. Παρόλα αυτά, και τα μεν και τα δε είδη θεωρείται ότι παρουσιάζουν ορισμένες ομοιότητες, εφόσον αποτελούν κινητά κέντρα παροχής υπηρεσιών και έχουν παρόμοιους στόχους σχετικά με την κάλυψη της ζήτησης.

Ο προσδιορισμός των θέσεων των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων εντός ενός δικτύου πραγματοποιείται με βάση ορισμένα κριτήρια, τα οποία προσπαθούν να καλύψουν τις διαφορετικές ανάγκες και τους ειδικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη χωροθέτηση των συγκεκριμένων μονάδων.

Ένα βασικό κριτήριο χωροθέτησης των κινητών μονάδων αποτελεί η κατανομή της ζήτησης. Πιο συγκεκριμένα, είναι σκόπιμη η χωροθέτηση των μονάδων κατά μήκος συνδέσμων που χαρακτηρίζονται από υψηλούς φόρτους. Αυτό γιατί έτσι, θα υπάρχει η δυνατότητα να ελέγχεται μεγαλύτερος αριθμός οχημάτων συγκριτικά με τον αριθμό των οχημάτων που θα ελέγχονταν εάν οι μονάδες χωροθετούνταν σε συνδέσμους με χαμηλούς φόρτους. Το κριτήριο αυτό είναι αρκετά καθοριστικό, αφού βασικός στόχος της λειτουργίας των κινητών μονάδων είναι η τοποθέτησή τους όπου υπάρχει αυξημένη ζήτηση, με απώτερο σκοπό την επίτευξη ελέγχου όσο το δυνατόν περισσότερων κυκλοφορούντων οχημάτων.

Ένας άλλος παράγοντας που συμβάλλει στην επιλογή της θέσης των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων είναι η ύπαρξη διαθέσιμου χώρου για την εγκατάστασή τους. Κρίνεται σημαντικό να υπάρχει η κατάλληλη έκταση κατά μήκος των συνδέσμων για την τοποθέτηση των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων. Με την εξασφάλιση επαρκούς χώρου για τη χωροθέτησή τους, αποφεύγονται φαινόμενα κυκλοφοριακής συμφόρησης στο οδικό δίκτυο από τη λειτουργία των μονάδων. Παράλληλα, όμως, το προσωπικό των κινητών μονάδων και οι ιδιοκτήτες των ελεγχόμενων οχημάτων θα διευκολυνθούν, διότι η εξυπηρέτηση θα γίνεται πιο άνετα και γρήγορα και, έτσι, θα μειωθεί και ο χρόνος αναμονής των προς έλεγχο οχημάτων.

Σημαντικό, επίσης, κριτήριο αποτελεί το οικονομικό κριτήριο, δηλαδή το κόστος χωροθέτησης των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων. Το κόστος αυτό αποτελείται, αρχικά, από το κόστος εγκατάστασης, δηλαδή από το κόστος διάθεσης κάθε κινητής μονάδας σε κάθε σύνδεσμο, το οποίο εξαρτάται από τον αριθμό των κινητών μονάδων που απαιτείται σε κάθε θέση. Παράλληλα, το συνολικό κόστος

χωροθέτησης συνίσταται, κυρίως, και από το κόστος λειτουργίας των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων ή αλλιώς από το κόστος εξυπηρέτησης των οχημάτων από τις κινητές μονάδες και περιλαμβάνει, για παράδειγμα, τις ανάγκες εξοπλισμού που θα προκύψουν, τις αμοιβές προσωπικού κ.ά. Αναφέρεται ότι και τα δύο είδη κόστους εξαρτώνται άμεσα (για το κόστος εξυπηρέτησης) ή έμμεσα (για το κόστος εγκατάστασης) από τον αριθμό των οχημάτων που θα ελέγχονται από τις κινητές μονάδες ελέγχου καυσαερίων, δηλαδή από τη ζήτηση, η οποία αποτελεί ένα κριτήριο χωροθέτησης από μόνη της, όπως αναφέρθηκε. Πρωταρχικό παράγοντα, λοιπόν, ανάμεσα στα υπόλοιπα κριτήρια χωροθέτησης, αποτελεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους χωροθέτησης και πάνω σε αυτόν τον παράγοντα βασίζεται εν μέρει η επίλυση του προβλήματος της εν λόγω εργασίας.

4.2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Καθοριστικό ρόλο για την επίτευξη του στόχου της παρούσας εργασίας ασκεί η πραγματοποίηση ολοκληρωμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης, προκειμένου να επιλεγθούν με ορθολογικό και τεκμηριωμένο τρόπο σημαντικές συνιστώσες και μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος που πραγματεύεται η εργασία. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση περιλαμβάνει, κυρίως, δημοσιεύσεις μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί διεθνώς και είναι, όσο το δυνατόν, σχετικές με τη χωροθέτηση κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων.

Το πρόβλημα της χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων δεν έχει ερευνηθεί έως τώρα, στο βαθμό που γνωρίζουμε, αυτό καθεαυτό ως προς τα μοντέλα βελτιστοποίησης και τους ευρετικούς αλγορίθμους που μπορούν να το προσεγγίσουν. Ωστόσο, μελέτες παρόμοιων προβλημάτων χωροθέτησης μπορεί να βρεθούν στη διεθνή βιβλιογραφία και πάνω σε αυτές στηρίζεται η προσέγγιση της παρούσας διπλωματικής. Έτσι, η απόφαση για τον τρόπο χωροθέτησης των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων πάρθηκε μετά από τον καθορισμό και την ανάλυση των στόχων του προβλήματος και επιπλέον, μετά από το συσχετισμό αυτών των στόχων με τους στόχους άλλων προβλημάτων χωροθέτησης, παρόμοιου αντικειμένου στη διεθνή βιβλιογραφία.

Πιο αναλυτικά, η προσέγγιση του προβλήματος στηρίχθηκε περισσότερο σε δύο προηγούμενες σχετικές μελέτες που αφορούσαν τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων – σταθμών όπου πραγματοποιούνται έλεγχοι των εκπομπών των οχημάτων («*Vehicle*

Emissions Testing Stations»). Η μία από τις δύο έρευνες που βρέθηκαν, με συγγραφείς τους Arthur και Lakshman (1995), είχε τίτλο «An Integer Programming Model for Locating Vehicle Emissions Testing Stations» και ασχολούταν με τη χωροθέτηση αυτών των σταθμών, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ακέραιου προγραμματισμού και, συγκεκριμένα, το μοντέλο συνόλου κάλυψης (Set Covering Location Problem). Σκοπός του συγκεκριμένου προβλήματος ήταν να βρεθεί μια, ελάχιστου κόστους, λύση σχετικά με τον αριθμό, το μέγεθος και την τοποθεσία χωροθέτησης αυτών των σταθμών στη βορειοανατολική πολιτεία των ΗΠΑ, το Κονέκτικατ. Οι περιορισμοί του προβλήματος σχετίζονταν με τη μέγιστη απόσταση μετακίνησης από κάθε πόλη στον κοντινότερό της σταθμό, καθώς και με το μέσο χρόνο αναμονής σε κάθε εγκατάσταση, δεδομένου ότι κάθε μια αποτελούταν από δύο έως πέντε παράλληλες λωρίδες έλεγχου. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε χρήση ενός μοντέλου προσομοίωσης, ώστε να υπολογιστούν οι μέγιστοι επιτρεπόμενοι ρυθμοί αφίξεων (οχήματα ανά ώρα), λαμβάνοντας ως δεδομένα τους χρόνους εξυπηρέτησης που είχαν συλλεχθεί από δύο διαφορετικές μέρες σε έναν συγκεκριμένο σταθμό. Με λίγα λόγια, οι Arthur και Lakshman επέκτειναν το μοντέλο συνόλου κάλυψης σε ένα στοχαστικό περιβάλλον αφίξεων, κάτι το οποίο δεν είχε συμβεί ξανά μέχρι τότε.

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η προσέγγιση των Arthur και Lakshman, παρουσιάζονται παρακάτω οι παράμετροι, οι μεταβλητές και η μαθηματική διατύπωση του μοντέλου που χρησιμοποίησαν:

C_k : τα σταθερά και μεταβλητά κόστη κάθε εγκατάστασης

r : ο μέγιστος αριθμός λωρίδων ελέγχου σε κάθε σταθμό (εδώ $r = 5$)

n : το σύνολο των κεντροειδών των πόλεων που θεωρούνται υποψήφιες θέσεις χωροθέτησης

$N_{ik} = \{j \mid \text{η πόλη } i \text{ καλύπτεται από έναν σταθμό } k \text{ λωρίδων στη θέση } j\}$

και η μεταβλητή απόφασης:

$$x_{jk} : \begin{cases} 1, & \text{εάν ο σταθμός } k \text{ λωρίδων χωροθετείται στην πόλη } j \\ 0, & \text{εάν όχι.} \end{cases}$$

Έτσι, προκύπτει η ακόλουθη διατύπωση:

$$\text{Minimize } \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^n C_k x_{jk}$$

$$\text{s.t: } \sum_{k=1}^r \sum_{j \in N_{ik}} x_{jk} \geq 1, \quad i = 1, \dots, n$$

Όπως παρατηρείται, το παραπάνω πρόβλημα αποτελεί παραλλαγή του μοντέλου συνόλου κάλυψης, εφόσον στο μοντέλο συνόλου κάλυψης οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης είναι ίσοι με 1, σε αντίθεση με εδώ που αυτό δεν ισχύει.

Μια άλλη προσέγγιση που συμπεριλαμβάνεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση του προβλήματος χωροθέτησης εγκαταστάσεων ελέγχου εκπομπών καυσαερίων των οχημάτων αναφέρεται από την Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission (1980). Η μελέτη αυτή αποσκοπούσε στην αύξηση της αποδοχής αυτών των εγκαταστάσεων από το κοινό, ελαχιστοποιώντας τις όποιες δυσκολίες μπορεί να αντιμετώπιζαν οι ιδιοκτήτες των οχημάτων σχετικά με το χρόνο και την απόσταση μετακίνησης προς τους σταθμούς ελέγχου καυσαερίων, καθώς και με το χρόνο αναμονής σε αυτούς. Με άλλα λόγια, στόχος ήταν να προταθεί μια αποτελεσματική κατανομή και ένας αποδοτικός σχεδιασμός των απαιτούμενων εγκαταστάσεων στο νοτιοανατολικό Ουισκόνσιν, ώστε αυτές να έχουν την κατάλληλη χωρητικότητα για να ικανοποιήσουν τη ζήτηση σε περιόδους αιχμής.

Για το λόγο αυτό, συλλέχθηκαν τα κατάλληλα δεδομένα, όπως είναι ο αριθμός και η κατανομή των προς έλεγχο οχημάτων, καθώς και η διαμόρφωση και η χωρητικότητα των εγκαταστάσεων, ώστε να διευκολυνθεί και να ικανοποιηθεί η ζήτηση. Πιο συγκεκριμένα, έπρεπε, αρχικά, να προσδιοριστούν ο αριθμός των απαιτούμενων λωρίδων ελέγχου των οχημάτων και η χωρητικότητα και το μέγεθος κάθε λωρίδας ελέγχου. Για να υπολογιστούν τα παραπάνω, απαιτήθηκε ο προηγούμενος καθορισμός του αριθμού των θέσεων ελέγχου σε κάθε λωρίδα, του αριθμού των ωρών εργασίας, του μέσου χρόνου εκτέλεσης ενός ελέγχου και η εκτίμηση ενός γενικού αποδοτικού παράγοντα βασισμένου πάνω στο χρόνο παύσης δραστηριοτήτων αλλά και σε τυχαίες αφίξεις στο σύστημα ελέγχου. Παράλληλα, κρίθηκε αναγκαία η εκτίμηση του αριθμού, της χωρικής και χρονικής κατανομής των οχημάτων που υφίστανται έλεγχο κάθε χρόνο, ώστε να υπολογιστεί η ζήτηση σε περιόδους αιχμής. Τέλος, σημαντικό ρόλο άσκησε και ο προσδιορισμός του ετήσιου αλλά και μηνιαίου (σε περιόδους αιχμής) αριθμού των ελέγχων που διεξάγονται αλλά και του αριθμού των οχημάτων που πιθανόν να χρειαστεί να επανεξεταστούν.

Αφού, λοιπόν, εκτιμήθηκαν ο αριθμός των ετήσιων ελέγχων και ο αριθμός των απαραίτητων λωρίδων ελέγχου που μπορεί να εξυπηρετήσει τη ζήτηση, πραγματοποιήθηκαν αναλυτικές διαδικασίες συνάθροισης των λωρίδων σε εγκαταστάσεις ελέγχου των δύο ή περισσότερων λωρίδων και προσδιορίστηκε η χωρική κατανομή αυτών των εγκαταστάσεων. Σκοπός, επαναλαμβάνεται πως ήταν, η μεγιστοποίηση της ζήτησης που εξυπηρετείται και η μείωση των συνιστωσών της διαδρομής κάθε πελάτη, δηλαδή του χρόνου, της απόστασης και του κόστους.

Για την προσέγγιση αυτού του προβλήματος χωροθέτησης-κατανομής (location-allocation problem), χρησιμοποιήθηκε από την Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission μια παραλλαγή του μοντέλου p- κέντρων (p-center problem). Η δομή του υπέθετε ότι δίνονται τα εξής: α) ένα σύνολο n σημείων κατανεμημένων στο επίπεδο, β) ένα αριθμητικό βάρος που συνδέεται με κάθε σημείο αντιπροσωπεύοντας τη ζήτηση και γ) ένα σύνολο m κεντροειδών και η κατανομή κάθε σημείου σε κάποιο κεντροειδές, ώστε να βελτιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση. Επιπλέον, προστέθηκαν και περιορισμοί χωρητικότητας στα κεντροειδή. Πιο συγκεκριμένα, ορίστηκαν τα παρακάτω:

x_{ij} : το μέγεθος της ζήτησης από τον κόμβο j στον i

$[U_i^*, V_i^*]$: οι συντεταγμένες της κεντρικής εγκατάστασης i

$[u_j, v_j]$: οι συντεταγμένες του σημείου πηγής j

q_i : η χωρητικότητα της κάθε εγκατάστασης i

r_j : η ζήτηση σε κάθε σημείο πηγής j

Έτσι, το μοντέλο μορφοποιήθηκε ως εξής:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} [(U_i^* - u_j)^2 + (V_i^* - v_j)^2]^{1/2}$$

$$\text{s.t: } \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq q_i \quad (i= 1, 2, \dots, m)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq r_j \quad (j= 1, 2, \dots, m)$$

$$x_{ij} \geq 0$$

Όπως παρατηρείται, στην τελική μορφή του προβλήματος, προστέθηκε και μια σημαντική θεώρηση, εφόσον η ζήτηση που προέρχεται από τα σημεία πηγής μπορούσε να ανατεθεί σε κλασματικές μονάδες σε παραπάνω από μια κεντρικές εγκαταστάσεις. Εξαιτίας αυτής της «κλασματικής» κατανομής, η μορφή του παραπάνω προβλήματος ήταν δύσκολο να επιλυθεί σε σχέση με άλλα, πιο απλά, προβλήματα χωροθέτησης – κατανομής, όπως είναι πχ τα προβλήματα γραμμικού

προγραμματισμού. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε ένας ευρετικός αλγόριθμος (L. Cooper, 1963), ο οποίος έδινε συνεχώς ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ, ταυτόχρονα, ελαχιστοποιούσε τον απαιτούμενο αριθμό υπολογισμών. Το αποτέλεσμα αυτού του αλγορίθμου, το οποίο περιείχε τη γεωγραφική θέση κάθε εγκατάστασης κατά Χ και Υ συντεταγμένες και μια μήτρα με όλες τις αναθέσεις της ζήτησης στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργηθεί ένας χάρτης όλων των περιοχών εξυπηρέτησης από κάθε εγκατάσταση.

Εκτός από τις δύο παραπάνω, αρκετά σχετικές, περιπτώσεις της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, υπάρχουν και άλλες διαφορετικές προσεγγίσεις πάνω στις οποίες βασίστηκε η παρούσα διπλωματική. Οι προσεγγίσεις αυτές μπορεί να έχουν διαφορετικό αντικείμενο χωροθέτησης από αυτό του εξεταζόμενου προβλήματος αλλά προσφέρουν σημαντική τροφή για σκέψη και διαφωτίζουν διάφορες πτυχές της μελέτης. Αυτό γιατί, τα μοντέλα που χρησιμοποιούν παρουσιάζουν παρόμοιους γενικούς στόχους με το εξεταζόμενο πρόβλημα και ως αποτέλεσμα, συμβάλλουν στην προσπάθεια διαμόρφωσής του.

Οι μελέτες που βρέθηκαν σχετίζονται, κυρίως, με τη χωροθέτηση μονάδων που αντιμετωπίζουν περιστατικά έκτακτης ανάγκης αλλά και άλλων δημόσιων εγκαταστάσεων. Ειδικότερα, οι Toregas et al. (1971) μορφοποίησαν ένα πρόβλημα χωροθέτησης πυροσβεστικών σταθμών ως ένα πρόβλημα συνόλου κάλυψης (set covering location problem), όπως έκαναν και οι Plane και Hendrick (1977), ενώ ο Walker (1974) χρησιμοποίησε αυτό το μοντέλο για να χωροθετήσει έναν ειδικό πυροσβεστικό εξοπλισμό.

Στο μοντέλο συνόλου κάλυψης, το πρόβλημα είναι η χωροθέτηση του ελάχιστου αριθμού των εξυπηρετητών, έτσι ώστε να κάθε σημείο ζήτησης να βρίσκεται εντός μιας προκαθορισμένης απόστασης ή εντός ενός προκαθορισμένου χρόνου μετακίνησης. Οι Church και ReVelle (1974) επέκτειναν αυτό το μοντέλο συνόλου κάλυψης και δημιούργησαν το μοντέλο μέγιστης κάλυψης (maximal covering location problem).

Οι Schilling et al. (1979) επέκτειναν το τελευταίο μοντέλο και το εφάρμοσαν στη χωροθέτηση πυροσβεστικών σταθμών στη Βαλτιμόρη, ενώ οι Charman και White (1974) ανέπτυξαν μια πιθανολογική εκδοχή του μοντέλου κάλυψης. Οι Daskin και Stern (1981) τροποποίησαν το μοντέλο συνόλου κάλυψης χρησιμοποιώντας μια αντικειμενική συνάρτηση σχεδιασμένη να επιλέγει, από ένα σύνολο εναλλακτικών

λύσεων που ελαχιστοποιούν τον αριθμό των απαιτούμενων μονάδων προς χωροθέτηση, εκείνη τη λύση που μεγιστοποιεί το ποσό της καλυπτόμενης ζήτησης.

Ο Daskin (1982, 1983) σχημάτισε το πρόβλημα μεγίστου ορίου αναμενόμενης κάλυψης (maximal expected covering problem) που μεγιστοποιεί την αναμενόμενη τιμή της κάλυψης εντός χρονικών περιορισμών. Το πρόβλημα αυτό εφαρμόστηκε το 1987 στην πόλη της Μπανγκόκ από τους Fujiwara, Makjamoen, και Gupta (1987) για τη χωροθέτηση οχημάτων άμεσης επέμβασης. Ακόμη, οι Hogan και ReVelle (1986) εφάρμοσαν μια ντετερμινιστική προσέγγιση του ίδιου προβλήματος και οι Daskin et al. (1988) έδειξαν τη σχέση μεταξύ των δυο προσεγγίσεων (των Daskin (1982, 1983) και των Hogan και ReVelle (1986)). Οι Batta et al. (1989) επέκτειναν το πρόβλημα μεγίστου ορίου αναμενόμενης κάλυψης, ενώ περαιτέρω επεκτάσεις πραγματοποιήθηκαν από τους Repede και Bernardo (1994) και τους Goldberg, Dietrich, Chen και Mitwasi (1990b).

Τέλος, ο Niaki (2016) αναφέρεται σε μια προσέγγιση του maximal covering location problem, όπου παρουσιάζεται η γενική μορφή του capacitated maximal covering location problem. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί μια παραλλαγή του maximal covering location problem και εφαρμόστηκε για τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων έκτακτης ανάγκης, έχοντας ως στόχο τη μέγιστη κάλυψη της ζήτησης, λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς σχετικούς με τον προϋπολογισμό, τη χωρητικότητα και τον διαθέσιμο χώρο. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του μοντέλου που ανέπτυξε ο Niaki (2016) είναι ότι καθορίζει -εκτός από τις θέσεις- και τους τύπους των εγκαταστάσεων μαζί με τα οχήματα άμεσης ανάγκης που τις συνοδεύουν, χρησιμοποιώντας κατάλληλους δείκτες και περιορισμούς για το μέγεθος και τη χωρητικότητα αυτών. Επειδή επρόκειτο για ένα πρόβλημα που ανήκει στην N-P κλάση, επιλέχθηκε να επιλυθεί με τη χρήση ενός Γενετικού Αλγορίθμου.

4.3. Επιλογή Μοντέλου Χωροθέτησης

Το μαθηματικό μοντέλο που κρίθηκε κατάλληλο και επιλέχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δηλαδή του προβλήματος χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων, είναι μια παραλλαγή του προβλήματος συνόλου κάλυψης (Set Covering Location Problem).

Η επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων βασίζεται στην ικανοποίηση δύο στόχων: α) στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους χωροθέτησης των κινητών μονάδων, ώστε να καλυφθεί ικανοποιητικά η ζήτηση εντός του δικτύου μελέτης και β) στη χωροθέτηση των κινητών μονάδων όπου μεγιστοποιείται η ζήτηση, δηλαδή σε θέσεις από όπου διέρχονται τα περισσότερα οχήματα.

Ο πρώτος στόχος είναι ο γνωστός στόχος του μοντέλου συνόλου κάλυψης με την υπόθεση ότι υπάρχουν διαφορετικές τιμές κόστους χωροθέτησης ανά θέση. Ο δεύτερος, όμως, στόχος, καθώς και οι περιορισμοί οι οποίοι σχετίζονται με αυτόν και αναλύονται παρακάτω, αποτελούν προσπάθεια επέκτασης του γενικού προβλήματος συνόλου κάλυψης με απώτερο σκοπό να συμπεριληφθούν οι ειδικότερες ανάγκες του προβλήματος χωροθέτησης των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι η αντικειμενική συνάρτηση θα αποτελέσει έναν συνδυασμό δύο όρων που εκφράζουν τους στόχους του εξεταζόμενου προβλήματος.

Για τη διατύπωση του μοντέλου του εξεταζόμενου προβλήματος, οι παραδοχές που γίνονται είναι οι εξής:

- όλες οι κινητές μονάδες ελέγχου δεν έχουν το ίδιο κόστος χωροθέτησης,
- οι κινητές μονάδες που θα χωροθετηθούν έχουν συγκεκριμένη ικανότητα εξυπηρέτησης σε σχέση με τη ζήτηση που πρέπει να εξυπηρετήσουν,
- είναι γνωστός εκ των προτέρων (a priori) ο αριθμός των κινητών μονάδων προς χωροθέτηση,
- κάθε ένας από τους δύο στόχους του προβλήματος έχει ένα βάρος στο συνολικό αποτέλεσμα.

Ακόμη, είναι απαραίτητο να αναφερθούν οι επιπλέον ειδικές παραδοχές:

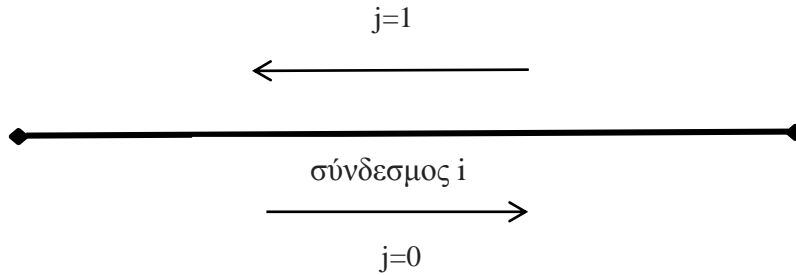
- οι κινητές μονάδες τοποθετούνται κατά μήκος των συνδέσμων του δικτύου,
- κάθε σύνδεσμος αποτελείται από δύο κατευθύνσεις κυκλοφορίας,
- σε κάθε σύνδεσμο ή και σε κάθε κατεύθυνση μπορεί να χωροθετηθούν πάνω από μία κινητές μονάδες ανάλογα με τις ανάγκες της ζήτησης.

Με βάση τα παραπάνω, για τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος αυτού, καθορίζονται οι παρακάτω δείκτες, παράμετροι και μεταβλητές, καθώς και τα παρακάτω σύνολα:

i: δείκτης υποψήφιου συνδέσμου όπου πρόκειται να γίνει η χωροθέτηση

j: δείκτης κατεύθυνσης κυκλοφορίας συνδέσμου όπου θα γίνει η χωροθέτηση με τιμές:

$$\begin{cases} 0 & \text{για τη δεξιά κατεύθυνση του συνδέσμου } i \\ 1 & \text{για την αριστερή κατεύθυνση συνδέσμου } i \end{cases}$$



I: σύνολο όλων των υποψήφιων συνδέσμων της περιοχής

N: σύνολο ακέραιων αριθμών

h_{ij}: η συνολική ζήτηση στο σύνδεσμο *i* στην κατεύθυνση *j*

y_{ij}: ο αριθμός των εξυπηρετητών – κινητών μονάδων στο σύνδεσμο *i*, στην κατεύθυνση *j*

f(y_{ij}): συνάρτηση που αποδίδει το κόστος εγκατάστασης και εξυπηρέτησης κάθε κινητής μονάδας ελέγχου καυσαερίων στο σύνδεσμο *i*, στην κατεύθυνση *j*

c(y_{ij}): συνάρτηση που αποδίδει την παραγωγική ικανότητα της κινητής μονάδας, δηλαδή τον αριθμό των εξυπηρετούμενων – ελεγχόμενων οχημάτων ανά ώρα στο σύνδεσμο *i*, στην κατεύθυνση *j*

s(y_{ij}): συνάρτηση που αποδίδει το χώρο που απαιτείται αν χωροθετηθεί στο σύνδεσμο *i* στην κατεύθυνση *j* κάποια κινητή μονάδα

α: η απόδοση - το ποσοστό εξυπηρέτησης που απαιτείται να εξυπηρετηθεί σε κάθε κατεύθυνση σε κάθε σύνδεσμο από τις κινητές μονάδες

p: ο διαθέσιμος αριθμός κινητών μονάδων που θα χωροθετηθούν συνολικά

m: ο μέγιστος αριθμός κινητών μονάδων που μπορεί να χωροθετηθεί σε μία κατεύθυνση

n: ο ελάχιστος αριθμός των θέσεων χωροθέτησης

S_{ij} : ο διαθέσιμος χώρος για χωροθέτηση στο σύνδεσμο i στην κατεύθυνση j

w_1 : το βάρος που αντιστοιχεί στον πρώτο όρο της αντικειμενικής συνάρτησης

w_2 : το βάρος που αντιστοιχεί στο δεύτερο όρο της αντικειμενικής συνάρτησης

και, τέλος, η μεταβλητή απόφασης:

$$x_{ij}: \begin{cases} 1, & \text{εάν γίνεται η χωροθέτηση στην κατεύθυνση } j \text{ του συνδέσμου } i \\ 0, & \text{εάν όχι} \end{cases}$$

Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ορίζεται με την παρακάτω μορφή:

$$\text{Maximize } z = w_1 \sum_{i \in I, j \in \{0,1\}} h_{ij} x_{ij} - w_2 \sum_{i \in I, j \in \{0,1\}} f(y_{ij}) x_{ij} \quad (4.1)$$

$$\text{s.t.: } x_{ij} \leq y_{ij}, \quad \forall i \in I, j \in \{0,1\} \quad (4.2)$$

$$c(y_{ij}) \geq \alpha h_{ij}, \quad \forall i \in I, j \in \{0,1\} \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in I, j \in \{0,1\}} y_{ij} \leq p \quad (4.4)$$

$$\sum_{i \in I, j \in \{0,1\}} x_{ij} \geq n \quad (4.5)$$

$$s(y_{ij}) \leq S_{ij}, \quad \forall i \in I, j \in \{0,1\} \quad (4.6)$$

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

$$y_{ij} \in \{0,1, \dots, N\}, \quad \forall i \in I, j \in \{0,1\} \quad (4.8)$$

$$y_{ij} \leq m, \quad \forall i \in I, j \in \{0,1\} \quad (4.9)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (4.1) αποτελεί ο εντοπισμός των θέσεων από όπου διέρχεται ο μεγαλύτερος αριθμός των οχημάτων, ώστε να γίνει κατάλληλα η χωροθέτηση και, ταυτόχρονα, η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους χωροθέτησης των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων. Πιο αναλυτικά, ο πρώτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης αναφέρεται στη συνολική ζήτηση που υπάρχει σε κάθε κατεύθυνση j του κάθε συνδέσμου i και επιδιώκει να εντοπίσει τις θέσεις όπου υπάρχει η περισσότερη ζήτηση σε οχήματα. Ο δεύτερος όρος συμβολίζει το κόστος χωροθέτησης των εγκαταστάσεων που παρουσιάζεται

με τη μορφή συνάρτησης, εφόσον εξαρτάται, κυρίως, από τον αριθμό των κινητών μονάδων σε κάθε θέση αλλά και, έμμεσα, από τον αριθμό των οχημάτων που εξυπηρετεί κάθε κινητή μονάδα. Δηλαδή, ο δεύτερος όρος υποδεικνύει τον έναν στόχο του προβλήματος που είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους χωροθέτησης των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων που έχουν επιλεγεί να χωροθετηθούν και δηλώνει την υπόθεση που έχει παρθεί ότι οι τιμές του κόστους χωροθέτησης είναι διαφορετικές σε κάθε υποψήφια θέση. Εάν όμως οι τιμές του κόστους χωροθέτησης ήταν ίδιες ανά θέση, ο δεύτερος όρος θα έπαιρνε την ακόλουθη μορφή: $\sum_{i \in I, j \in \{0,1\}} x_{ij}$ και στόχος του θα ήταν απλώς η κατάλληλη ελαχιστοποίηση του αριθμού των θέσεων όπου θα γίνει η χωροθέτηση των μονάδων που θα λειτουργήσουν.

Επίσης, αναφέρεται ότι οι δύο αυτοί όροι της αντικειμενικής συνάρτησης (4.1) συνοδεύονται από τα αντίστοιχα βάρη που τους αναλογούν. Με άλλα λόγια, το μοντέλο που δημιουργήθηκε αποτελεί ένα σταθμισμένο μοντέλο χωροθέτησης. Τα εν λόγω βάρη δείχνουν την προτεραιότητα των στόχων που έχουν τεθεί και συμβάλλουν ανάλογα στο τελικό αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα, έχει γίνει η αρχική υπόθεση ότι η συμβολή του πρώτου όρου είναι ισοδύναμη με αυτή του δεύτερου όρου. Δηλαδή, ο στόχος της ελαχιστοποίησης του κόστους εξυπηρέτησης των κινητών μονάδων είναι ίσης σημασίας με τον στόχο της εύρεσης των θέσεων με την υψηλότερη ζήτηση.

Ο περιορισμός (4.2) αναφέρεται στη δυνατότητα χωροθέτησης περισσότερων από μία κινητών μονάδων σε κάθε κατεύθυνση κάθε συνδέσμου. Ο περιορισμός (4.3) δηλώνει ότι οι κινητές μονάδες έχουν συγκεκριμένη ικανότητα εξυπηρέτησης σε σχέση με τη ζήτηση που πρέπει να εξυπηρετήσουν, δηλαδή πρέπει να εξυπηρετούν πάνω από ένα ελάχιστο ποσοστό κυκλοφορούντων οχημάτων ανά ώρα. Ο περιορισμός (4.4) καθορίζει ότι δεν μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερες από p κινητές μονάδες συνολικά. Σημειώνεται στο σημείο αυτό, ότι ο περιορισμός αυτός θα μπορούσε να αντικατασταθεί από έναν ισοδύναμο περιορισμό που δηλώνει το μέγιστο μέγεθος προϋπολογισμού που μπορεί να διατεθεί για τη λειτουργία των μονάδων εξυπηρέτησης. Η επιλογή του ενός από τους δύο περιορισμούς εξαρτάται, κυρίως, από τα διαθέσιμα δεδομένα.

Συνεχίζοντας, ο περιορισμός (4.5) αποτελεί τον περιορισμό ελάχιστων θέσεων χωροθέτησης των κινητών μονάδων, δηλαδή καθορίζει ότι ο ελάχιστος αριθμός

θέσεων χωροθέτησης θα πρέπει να είναι n . Ο περιορισμός (4.6) εξασφαλίζει ότι οι κινητές μονάδες θα τοποθετηθούν μόνο όπου υπάρχει διαθέσιμος χώρος για τη χωροθέτησή τους, ενώ ο περιορισμός (4.7) ορίζει τη μεταβλητή χωροθέτησης ως δυαδική. Οι περιορισμοί (4.8) και (4.9) σχετίζονται με τον περιορισμό (4.2), καθώς ορίζουν αντίστοιχα ότι ο αριθμός των κινητών μονάδων που πρόκειται να χωροθετηθούν είναι ακέραιος και δεν πρέπει να ξεπερνάει τις m κινητές μονάδες στην ίδια τοποθεσία.

Μια σημαντική παρατήρηση και ένα επιπλέον δείγμα της προσπάθειας τροποποίησης του αρχικού μοντέλου συνόλου κάλυψης αποτελεί το γεγονός ότι η διατύπωση (4.1) – (4.9) θεωρεί ότι οι υποψήφιες τοποθεσίες των κινητών μονάδων βρίσκονται κατά μήκος των συνδέσμων του δικτύου και όχι στους κόμβους του. Μπορεί, δηλαδή, να θεωρηθεί ότι πρόκειται για ένα σχέδιο χωροθέτησης χαμηλότερου κόστους σε σχέση με ένα σχέδιο που θεωρεί εφικτή τη χωροθέτηση των εγκαταστάσεων μόνο στους κόμβους του δικτύου.

4.4. Περιοχή Εφαρμογής – Δεδομένα

Ως περιοχή εφαρμογής επιλέχθηκε ένα τμήμα της πρωτεύουσας του νομού Έβρου, δηλαδή της Αλεξανδρούπολης. Η Αλεξανδρούπολη έχει έκταση 1.220 km² και πλούσιο οδικό δίκτυο, καθώς αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους συγκοινωνιακούς κόμβους.

Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι στην περιφέρεια Έβρου, όπου ανήκει η περιοχή εφαρμογής, ένα από τα τμήματα που απαρτίζουν τη Διεύθυνση Μεταφορών και Επικοινωνιών είναι το τμήμα ΚΤΕΟ. Στις αρμοδιότητες του τμήματος αυτού, συγκαταλέγονται και η διενέργεια ειδικών ελέγχων και η έκδοση σχετικών πιστοποιητικών και βεβαιώσεων, όπως είναι η μέτρηση των κουσαερίων των κυκλοφορούντων οχημάτων με κινητές μονάδες ελέγχου. Όμως, όπως έχει παρατηρηθεί, ο υφιστάμενος αριθμός των κινητών μονάδων είναι αρκετά μικρός και η λειτουργία τους στην περιοχή θεωρείται ανεπαρκής, καθώς δεν έχει γίνει σχεδιασμός για τη σωστή και την αποτελεσματική χωροθέτησή τους.

Η περιοχή εφαρμογής και, πιο συγκεκριμένα, το εσωτερικό οδικό δίκτυο της περιοχής εφαρμογής, που εξετάζεται στην εν λόγω εργασία με στόχο τη χωροθέτηση κινητών μονάδων ελέγχου κουσαερίων, φαίνεται στον παρακάτω χάρτη (χάρτης 4.1).



Χάρτης 4.1: Περιοχή εφαρμογής- Οδικό δίκτυο

[Πηγή: *Ιδία επεξεργασία σε περιβάλλον QGIS*]

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες του υπό μελέτη προβλήματος αφορούν το εσωτερικό οδικό δίκτυο της Αλεξανδρούπολης και δίνουν πληροφορίες, αρχικά, για τους φόρτους αιχμής σε κάθε κατεύθυνση κάθε συνδέσμου. Τα στοιχεία αυτά είναι υψίστης σημασίας για το πρόβλημα, εφόσον οι φόρτοι συνιστούν σημαντικά κριτήρια χωροθέτησης, όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 4.1.

Παράλληλα, στο εξεταζόμενο πρόβλημα θεωρήθηκε ότι το κόστος χωροθέτησης διαφέρει από τοποθεσία σε τοποθεσία, ανάλογα με τον αριθμό των κινητών μονάδων και, κατ' επέκταση, ανάλογα με τον αριθμό των οχημάτων που θα ελέγχονται από αυτές. Για το λόγο αυτό, το κόστος παρουσιάζεται με τη μορφή συνάρτησης (υποκεφάλαιο 4.3) σε σχέση με τον αριθμό των κινητών μονάδων που λειτουργούν σε κάθε θέση και ο τύπος της είναι ο εξής: $f(y_{ij}) = 20000 + 1000 y_{ij}$.

Ακόμη, είναι γνωστός ο τύπος της συνάρτησης που αποδίδει το χώρο που θα απαιτηθεί σε κάθε κατεύθυνση κάθε συνδέσμου και σχηματίστηκε από την παραδοχή ότι ο χώρος αυτός αποτελεί συνάρτηση (υποκεφάλαιο 4.3) του αριθμού

των κινητών μονάδων που πρόκειται να χωροθετηθούν αλλά και, έμμεσα, του αριθμού των οχημάτων που θα ελέγχονται ανά ώρα. Η τιμή της συγκεκριμένης συνάρτησης μεταβάλλεται ως εξής: $s(y_{ij}) = 25 + 20y_{ij}$. Παράλληλα, βρέθηκαν δεδομένα για το χώρο που είναι εκ των προτέρων διαθέσιμος σε κάθε θέση (πριν τη χωροθέτηση), ώστε να συγκριθεί έπειτα με το χώρο που θα προκύψει ότι θα χρειαστεί για την εγκατάσταση των μονάδων εξυπηρέτησης.

Επιπλέον, ο αριθμός των εξυπηρετούμενων οχημάτων ανά ώρα θεωρήθηκε ότι δίνεται με βάση μια συνάρτηση (υποκεφάλαιο 4.3) που σχετίζεται πάλι με τον αριθμό των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων που τοποθετούνται σε κάθε θέση και διαμορφώθηκε ως εξής: $c(y_{ij}) = 10 + 5(y_{ij} - 1)$.

Επιπρόσθετα, απαραίτητα δεδομένα αποτέλεσαν το ποσοστό εξυπηρέτησης που απαιτείται να καλυφθεί σε κάθε τοποθεσία, ο αριθμός των διαθέσιμων κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων που πρόκειται να χωροθετηθούν, ο ελάχιστος αριθμός των θέσεων προς χωροθέτηση αλλά και ο μέγιστος αριθμός των κινητών μονάδων σε μια θέση. Και τα τέσσερα παραπάνω στοιχεία προέκυψαν από εύλογες παραδοχές που εξυπηρετούν το σκοπό της εργασίας και, έτσι, το ποσοστό εξυπηρέτησης θεωρήθηκε ίσο με 1%, ο αρχικός διαθέσιμος αριθμός των κινητών μονάδων ορίστηκε να είναι 20 (για λόγους καλής προσαρμογής του αλγορίθμου επίλυσης), ο ελάχιστος αριθμός των θέσεων προς χωροθέτηση έλαβε την τιμή 2 και, τέλος, θεωρήθηκε ότι οι κινητές μονάδες μπορούν να φτάσουν το πολύ τις 2 σε κάθε θέση.

Κλείνοντας, αναφέρεται ότι οι τιμές των βαρών των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης προήλθαν από υποθέσεις σχετικά με τη σημαντικότητα των στόχων που αντιπροσωπεύει κάθε όρος. Πιο συγκεκριμένα, τα βάρη των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης ορίστηκαν ίσα με 1 το κάθε ένα, όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 4.3.

5. ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων. Πιο συγκεκριμένα, δοκιμάζεται η επίλυση του προβλήματος με τη χρήση Γενετικού Αλγορίθμου. Έτσι, αρχικά, αναλύεται η φιλοσοφία και οι ιδιότητες των Γενετικών Αλγορίθμων και, στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή του λογισμικού Eolver.

5.1. Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους

Η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης γίνεται δυσκολότερη όσο το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνει και, ως αποτέλεσμα, η επιδίωξη της εύρεσης μιας βέλτιστης λύσης σε κάποιο λογικό χρόνο μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά αδύνατη. Έτσι, η επιστήμη των υπολογιστών στρέφεται ολοένα και περισσότερο στον κόσμο της βιολογίας για να αναζητήσει λύσεις και να εμπνευσθεί ιδέες. Αν και, αρχικά, φαινόταν παράξενο ότι μια τέτοια ερευνητική κατεύθυνση θα μπορούσε να ήταν αποδοτική, σήμερα, σε μια διαρκώς διογκούμενη ομάδα επιστημόνων και ερευνητών διαφόρων επιστημονικών πεδίων, έχει πλέον εμπειρωθεί το αίσθημα ότι η αναζήτηση προς αυτήν την κατεύθυνση, εκτός της γοητείας που ασκεί, μπορεί να προσφέρει λύσεις σε ποικίλα προβλήματα (Back 1996, Back et al. 1997).

Δεν είναι λίγα τα προβλήματα των οποίων η επίλυση προϋποθέτει την εξαντλητική διερεύνηση ενός τεράστιου αριθμού υποψήφιας λύσεων, εκ των οποίων είναι αναγκαίο να εντοπισθεί η βέλτιστη λύση ή μια άλλη, σχεδόν κοντά στη βέλτιστη. Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων απαιτείται η ανάπτυξη ισχυρών εργαλείων λογισμικού που θα επιτρέπουν το συνδυασμό των ωφελειών της παράλληλης επεξεργασίας με την ύπαρξη έξυπνων μηχανισμών και στρατηγικών για την επιλογή λύσεων. Δηλαδή, απαιτείται η χρήση διαφορετικών τεχνικών που οδηγούν σε μια σχεδόν βέλτιστη αλλά ικανοποιητική λύση. Μια τέτοια τεχνική είναι οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι που αποτελούν εξέλιξη των ευρετικών και όπου υιοθετούνται σχετικά απλοί μηχανισμοί και διαδικασίες που βασίζονται στη θεωρία της εξέλιξης που διατυπώθηκε από τον Charles Darwin (Darwin 1859, Dawkins 1982, 1986) λίγο μετά τον 19^ο αιώνα. Πιο συγκεκριμένα, οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι δε βρίσκουν απευθείας τη βέλτιστη λύση αλλά

βελτιώνουν την τρέχουσα λύση με τη χρησιμοποίηση δευτερευόντων ευρετικών μεθόδων.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της εν λόγω διπλωματικής εργασίας υλοποιείται και χρησιμοποιείται ένα παράδειγμα μεθευρετικών αλγορίθμων, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, οι οποίοι αποτελούν αλγόριθμους ανίχνευσης που βασίζονται στο μηχανισμό της φυσικής επιλογής (Goldberg, 1989). Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Γ.Α), μαζί με τον Εξελεγκτικό Προγραμματισμό (Evolutionary Programming), τις Εξελεγκτικές Στρατηγικές (Evolutionary Strategies), τα Συστήματα Ταξινόμησης (Classifier Systems) και το Γενετικό Προγραμματισμό (Genetic Programming) αποτελούν επιμέρους κατηγορίες ενός ευρύτερου πεδίου επίλυσης προβλημάτων, γνωστού με τον όρο Εξελεγκτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms) που στοχεύει, κυρίως, στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης και βασίζεται στην αρχή της φυσικής εξέλιξης (Holland 1975, Fogel 1995, 1999, Michalewicz & Fogel 2000).

Αναφέρεται, στο σημείο αυτό, ότι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι ανήκουν στην κατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων, όπου η αναζήτηση του βέλτιστου σημείου πραγματοποιείται μέσω διαδοχικών, τυχαίων μεταβάσεων, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν και σε χειρότερη τιμή, ώσπου να καταλήξουν στη βέλτιστη. Σύμφωνα με τους Καρλαύτης και Λαγαρός (2010), στους Γενετικούς Αλγορίθμους βέλτιστη είναι η λύση που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Ωστόσο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι δε δύναται να εγγυηθούν απαραίτητα την εύρεση μιας βέλτιστης λύσης αλλά μιας ικανοποιητικής λύσης.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι επιστήμονες του χώρου της βιολογίας αποφάσισαν να αναπτύξουν υπολογιστικά συστήματα με σκοπό να προσομοιώσουν την εξέλιξη πολύπλοκων βιολογικών συστημάτων. Η βασική, όμως, έρευνα που οδήγησε στη σημερινή μορφή των Γενετικών Αλγορίθμων διεξήχθη από τον John Holland και τους φοιτητές του στο πανεπιστήμιο του Michigan κατά τη δεκαετία του 1960-1970. Τα αποτελέσματα αυτής της πολυετούς έρευνας παρουσιάζονται στο βιβλίο του Holland, «Adaptation in Natural and Artificial Systems» (Holland 1975, 1992).

Πίσω από τη σύλληψη του Holland, βρίσκεται η ιδέα της μελέτης των μηχανισμών της προσαρμογής μέσα από τους μηχανισμούς της φυσικής, της

βιολογικής εξέλιξης των ειδών και της ενσωμάτωσης των μηχανισμών αυτών στα υπολογιστικά συστήματα του μέλλοντος. Σκοπός, δηλαδή, ήταν οι μηχανισμοί αυτοί να μην αποτελούν εξειδικευμένους αλγορίθμους για τη λύση συγκεκριμένων προβλημάτων αλλά να μπορούν να ανταποκριθούν σε ευρύτερες κατηγορίες προβλημάτων.

Στο σημείο αυτό, είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι οι Goldberg και Lingle (1985), Bean (1994) και Schmitt (1995) ανέπτυξαν επίσης σημαντικούς γενετικούς αλγορίθμους, ενώ οι Colomi et al. (1991) δημιούργησαν τον αλγόριθμο των μυρμηγκιών, όπου αποτύπωσαν αλγοριθμικά και προσομοίωσαν τον τρόπο με τον οποίο τα μυρμήγκια εξερευνούν το περιβάλλον. Ακόμη, σημαντικές είναι οι έρευνες των Schumann και Retzko (1995) και Ghaziri (1996), οι οποίοι βασίστηκαν στα νευρωνικά δίκτυα.

5.2. Βασικές Έννοιες και Χαρακτηριστικά Γενετικών Αλγορίθμων

Οι Γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ) χρησιμοποιούν λεξιλόγιο δανεισμένο από το χώρο της φυσικής γενετικής, το οποίο πρόκειται να περιγραφεί παρακάτω. Έτσι, τυπικά (Goldberg, 1989), οι στοιχειοσειρές ή συμβολοσειρές των ΓΑ αντιστοιχούν στα χρωμοσώματα (chromosomes) των βιολογικών συστημάτων, δηλαδή στα σωματίδια των κυττάρων τα οποία είναι φορείς της γενετικής δομής των οργανισμών. Στα φυσικά βιολογικά συστήματα ένα ή περισσότερα χρωμοσώματα συνδυάζονται για να δημιουργήσουν τη γενετική περιγραφή ενός οργανισμού. Στους ΓΑ, ουσιαστικά, το χρωμόσωμα κωδικοποιεί ένα σύνολο παραμέτρων ή αλλιώς το σύνολο των λύσεων, δηλαδή αναπαριστά την κωδικοποίηση μιας λύσης. Μια διαδικασία εξέλιξης που δρα πάνω σε έναν πληθυσμό από χρωμοσώματα αντιστοιχεί στην «εξερεύνηση» ή «ανίχνευση» ενός χώρου από δυνατές λύσεις. Η εξερεύνηση αυτή έχει στόχο την αξιοποίηση των καλύτερων δυνατών λύσεων και τη διερεύνηση του χώρου ανίχνευσης του προβλήματος.

Συνεχίζοντας, το σύνολο των χρωμοσωμάτων, δηλαδή το συνολικό γενετικό πακέτο στα φυσικά συστήματα, ονομάζεται γονότυπος (genotype) ή άτομο (individual) ενός πληθυσμού (population), ο οποίος αποτελείται από πολλά χρωμοσώματα και αντιστοιχεί σε ένα σύνολο λύσεων. Στους ΓΑ ο γονότυπος αντιστοιχεί στο συνολικό πακέτο των στοιχειοσειρών και ονομάζεται δομή (structure). Με άλλα λόγια, η δομή αναπαριστά μια κωδικοποιημένη ομάδα

παραμέτρων ή, καλύτερα, αναπαριστά μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα. Στο σχεδιασμό και την κωδικοποίηση των ατόμων ενός ΓΑ, ωστόσο, τα άτομα συνήθως αποτελούνται από ένα μόνο χρωμόσωμα, οπότε σε αυτήν την περίπτωση οι έννοιες του γονότυπου και του χρωμοσώματος θεωρούνται ταυτόσημες. Αναφέρεται, επίσης, ότι στα φυσικά συστήματα, η αλληλεπίδραση του συνολικού γενετικού πακέτου με το περιβάλλον δημιουργεί έναν άλλον οργανισμό, ο οποίος καλείται φαινότυπος (phenotype). Στους ΓΑ αυτός ο οργανισμός αντιστοιχεί στην αποκωδικοποίηση των δομών με σκοπό τη δημιουργία ενός συνόλου εναλλακτικών λύσεων στο χώρο ανίχνευσης του προβλήματος. Δηλαδή, ο φαινότυπος αποδίδει τη σημασία που δείχνει ο χρήστης του ΓΑ στη μορφή μιας στοιχειοσειράς ή αλλιώς μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί το «αποκωδικοποιημένο» περιεχόμενο, την έκφραση ενός συγκεκριμένου γονότυπου.

Ακόμη, στα φυσικά συστήματα τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια (genes) που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε ένα γονίδιο ελέγχει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Ένα γονίδιο μπορεί να πάρει διάφορα χαρακτηριστικά και καταστάσεις (επιτρεπτές τιμές), οι οποίες καλούνται «αλληλόμορφα» (alleles: επιτρεπτές τιμές ενός χαρακτηριστικού γνωρίσματος). Στους κλασικούς ΓΑ, το γονίδιο αντιστοιχεί σε ένα δυαδικό ψηφίο (bit) στη στοιχειοσειρά και αλληλόμορφα είναι οι πιθανές καταστάσεις στις οποίες το δυαδικό ψηφίο μπορεί να βρεθεί, δηλαδή '0' ή '1'. Τα γονίδια, δηλαδή, αποτελούν πιθανές τιμές των μεταβλητών μιας συνάρτησης και επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου. Επιπρόσθετα, είναι χαρακτηριστικό ότι βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις σε ένα χρωμόσωμα, κάθε μία από τις οποίες ονομάζεται τόπος (locus) στα φυσικά συστήματα, ενώ στους ΓΑ τόπος είναι η θέση (position).

Παράλληλα, εξίσου σημαντικοί όροι είναι η γενιά (generation), η οποία αποτελεί ένα σύνολο χρωμοσωμάτων συγκεκριμένου πλήθους στα οποία καταλήγει ο ΓΑ μετά από ένα σύνολο πράξεων, οι γονείς (parents), δηλαδή το ζεύγος χρωμοσωμάτων που συντελεί στον κύκλο δημιουργίας νέου πληθυσμού και, τέλος, οι απόγονοι (offspring) που προκύπτουν από διασταύρωση των γονέων και, ουσιαστικά, αποτελούν τις νέες λύσεις που προέρχονται από τις προηγούμενες που έχουν επιλεγθεί. Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 5.1) παρουσιάζονται συνοπτικά

όλοι οι παραπάνω όροι, δηλαδή η αντιστοίχιση και επεξήγηση μεταξύ της φυσικής και τεχνητής ορολογίας των ΓΑ.

Πίνακας 5.1: Σύντομη επεξήγηση και αντιστοίχιση ορολογίας ΓΑ και φυσικών συστημάτων

[Πηγή: *Ιδία επεξεργασία*]

ΦΥΣΙΚΗ ΓΕΝΕΤΙΚΗ	ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ - ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
Χρωμόσωμα	Στοιχειοσειρά - η αναπαράσταση κωδικοποίησης της λύσης/ υπογήφια λύση
Γονίδιο	Δυαδικό ψηφίο - τα μικρότερα μέρη από τα οποία αποτελούνται τα χρωμοσώματα/ πιθανές τιμές των μεταβλητών μιας συνάρτησης
Αλληλόμορφο	Τιμή δυαδικού ψηφίου - οι επιτρεπτές τιμές ενός χαρακτηριστικού γνωρίσματος
Τόπος	Θέση στη στοιχειοσειρά - η θέση γονιδίου σε ένα χρωμόσωμα
Γονότυπος	Δομή – το σύνολο των στοιχειοσειρών
Φαινότυπος	Αποκωδικοποιημένη δομή - το αποτέλεσμα της κωδικοποίησης πολλών παραμέτρων
Πληθυσμός	Ένα σύνολο στοιχειοσειρών - το σύνολο των πιθανών λύσεων
Γενιά	Ένα σύνολο στοιχειοσειρών συγκεκριμένου πλήθους
Γονείς	Ένα ζεύγος στοιχειοσειρών
Απόγονοι	Προκύπτουν από διασταύρωση γονέων - αναπαριστούν τις νέες λύσεις

Μετά την περιγραφή των βασικών εννοιών που σχετίζονται με τους ΓΑ, είναι απαραίτητο να αναφερθούν τα κυριότερα χαρακτηριστικά που διαθέτουν και που τους διαφοροποιούν θεμελιωδώς από άλλες παραδοσιακές μεθόδους επίλυσης προβλημάτων. Οι χαρακτηριστικές αυτές ιδιότητες των ΓΑ είναι οι ακόλουθες (Goldberg, 1989):

- i. Δε δουλεύουν με τις ίδιες τις πραγματικές παραμέτρους του φυσικού προβλήματος αλλά επεξεργάζονται μια κωδικοποίηση του συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι παράμετροι του προβλήματος. Δηλαδή,

- οι ΓΑ απαιτούν την κωδικοποίηση των πραγματικών παραμέτρων του προβλήματος βελτιστοποίησης σε μια στοιχειοσειρά πεπερασμένου μεγέθους, επιτρέποντας, έτσι, την παράλληλη επεξεργασία δεδομένων.
- ii. Αναζητούν τη λύση μέσα από ένα σύνολο σημείων και όχι από ένα μοναδικό σημείο. Με άλλα λόγια, οι ΓΑ εργάζονται με ένα πλήθος από σημεία (πληθυσμός από συμβολοσειρές), ταυτόχρονα, ανιχνεύοντας παράλληλα πολλά τοπικά βέλτιστα και αποφεύγοντας την πιθανότητα εύρεσης λανθασμένου γενικού βέλτιστου. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τον τρόπο που λειτουργούν άλλες μέθοδοι βελτιστοποίησης, όπου η αναζήτηση λύσης γίνεται προσεκτικά και βήμα προς βήμα, πηγαίνοντας από σημείο σε σημείο στο χώρο ανίχνευσης και χρησιμοποιώντας κανόνες μετάβασης, ώστε να καθοριστεί κάθε επόμενο σημείο. Λόγω αυτού του τρόπου επεξεργασίας που ενδέχεται να οδηγήσει σε περίπλοκα τοπικά βέλτιστα, οι μέθοδοι αυτές θεωρούνται ακατάλληλες για πολύπλοκα προβλήματα με χώρους ανίχνευσης που χαρακτηρίζονται από ασυνέχειες και μη γραμμικότητες.
 - iii. Χρησιμοποιούν πιθανοτικούς κανόνες μετάβασης και όχι ντετερμινιστικούς, όπως ορισμένες άλλες μέθοδοι. Αυτό το γνώρισμα είναι αρκετά σημαντικό και είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι η χρήση πιθανοτικών κανόνων μετάβασης δε σημαίνει χρήση απλών τυχαίων διαδικασιών ανίχνευσης.
 - iv. Δεν απαιτούν προηγούμενη γνώση του χώρου που ανιχνεύουν, σε αντίθεση με άλλες τεχνικές (πχ οι τεχνικές κλίσης) που χρειάζονται επιμέρους βοηθητικές πληροφορίες για τη λειτουργία τους. Δηλαδή, οι ΓΑ χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία άλλη επιπρόσθετη πληροφορία.

5.3. Δομή Γενετικών Αλγορίθμων

Τα βασικότερα τμήματα που αποτελούν τη διαδικασία λειτουργίας ενός Γενετικού Αλγορίθμου, προκειμένου να επιλυθεί ένα πρόβλημα, είναι τα εξής (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999):

- Κωδικοποίηση της λύσης

Η κωδικοποίηση αφορά ένα σύνολο πιθανών λύσεων του προβλήματος και αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες μιας αποτελεσματικής βελτιστοποίησης ενός προβλήματος. Κύριος στόχος της κωδικοποίησης είναι η αναπαράσταση των επιμέρους χαρακτηριστικών των λύσεων με ικανοποιητικό τρόπο, ώστε να διευκολύνονται οι επόμενες λειτουργίες του αλγορίθμου (κυρίως, η λειτουργία της επιλογής που θα παρουσιαστεί παρακάτω). Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αναπαράστασης είναι η γενετική αναπαράσταση των υποψήφιων λύσεων, η οποία είναι δυαδική, δηλαδή μετατρέπει τις μεταβλητές σχεδιασμού σε μια σειρά δυαδικών ψηφίων (bits) καθορισμένου μήκους (bit string). Η ακρίβεια της αναπαράστασης εξαρτάται από τον αριθμό των δυαδικών ψηφίων και, μάλιστα, όσο αυξάνονται τα δυαδικά ψηφία που χρησιμοποιούνται, αυξάνεται και η ακρίβεια. Με τη λειτουργία της κωδικοποίησης πρέπει να επέρχεται η ύπαρξη ομοιοτήτων μεταξύ των ατόμων, με απώτερο σκοπό την καλύτερη εκμετάλλευσή τους, δεδομένου ότι οι ομοιότητες είναι αυτές που κατευθύνουν την αναζήτηση λύσεων.

- Καταρτισμός αρχικού πληθυσμού

Στη διαδικασία αυτή, που είναι αρκετά απλή, δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός πάνω στον οποίο θα λάβουν χώρα οι λειτουργίες του ΓΑ. Ο πληθυσμός αυτός αποτελείται από ένα σύνολο από πιθανές υποψήφιες λύσεις, δηλαδή από χρωμοσώματα (ή γονότυπο), με κάθε χρωμόσωμα να περιλαμβάνει έναν αριθμό δυαδικών ψηφίων. Τα ψηφία αυτά κάθε μέλους του αρχικού πληθυσμού δημιουργούν μια σειρά, η οποία αποτελεί τη συνολική κωδικοποίηση που επιλέγεται για το σύνολο των παραμέτρων σχεδιασμού του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η συνηθέστερη μέθοδος αρχικοποίησης είναι η δημιουργία των χρωμοσωμάτων του αρχικού πληθυσμού με τυχαίο τρόπο ανάμεσα σε όλες τις δυνατές τιμές των μεταβλητών του προβλήματος και το μέγεθός του καθορίζεται από το χρήστη ή εξαρτάται από τους πόρους που αυτός έχει στη διάθεσή του. Παρόλα αυτά, η τεχνική αρχικοποίησης μπορεί να είναι διαφορετική σε ορισμένα προβλήματα. Για παράδειγμα, με εκ των προτέρων γνωστές κάποιες λύσεις στο πρόβλημα, μπορεί να πραγματοποιηθεί ένας κατευθείαν τρόπος δημιουργίας χρωμοσωμάτων. Μάλιστα, αυτό μπορεί να επιφέρει σημαντική μείωση στον υπολογιστικό χρόνο.

- Αποτίμηση πληθυσμού μέσω συνάρτησης καταλληλότητας

Για την αποτίμηση του πληθυσμού, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η συνάρτηση καταλληλότητας ή προσαρμοστικότητας για κάθε χρωμόσωμα. Στο σημείο αυτό, αναφέρεται ότι η προσαρμοστικότητα ή καταλληλότητα (fitness), από τη στενή γενετική έννοια, σημαίνει «σχετική αναπαραγωγική ικανότητα» και είναι μια παράμετρος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της φυσικής επιλογής, δηλαδή της διαδικασίας σύνδεσης των χρωμοσωμάτων και της απόδοσης των κωδικοποιημένων δομών τους. Έτσι, η τιμή της συνάρτησης προσαρμοστικότητας ή καταλληλότητας καθορίζει την ικανότητα ενός χρωμοσώματος για αναπαραγωγή και αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα για την απόδοση ενός ΓΑ. Με άλλα λόγια, η συνάρτηση καταλληλότητας αξιολογεί τα μέλη του πληθυσμού και συντελεί έμμεσα στο διαχωρισμό τους σε καλές και κακές λύσεις του προβλήματος. Έτσι, η συνάρτηση αυτή σχετίζεται άμεσα με το περιβάλλον μέσα στο οποίο τα χρωμοσώματα πρέπει να προσαρμόζονται κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του ΓΑ, αποδίδοντας τελικά ικανοποιητικές λύσεις. Μιλώντας για προβλήματα βελτιστοποίησης, η συνάρτηση προσαρμοστικότητας ισοδυναμεί με την αντικειμενική συνάρτηση, η οποία πρέπει να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί και μπορεί να υπολογίσει την απόδοση κάθε χρωμοσώματος (στοιχειοσειράς) του πληθυσμού σε σχέση με τα άλλα. Για την ορθή λειτουργία του ΓΑ, η εν λόγω συνάρτηση είναι απαραίτητο να είναι θετική για όλες τις τιμές των μεταβλητών του φυσικού προβλήματος.

- Επιλογή (Selection)

Αφού ολοκληρωθεί η αποτίμηση όλων των μελών του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός μέσω της διαδικασίας της επιλογής των πιο κατάλληλων στοιχείων της προηγούμενης γενιάς. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στο νόμο της «επιβίωσης του καταλληλότερου» (survival of the fittest). Χρωμοσώματα με μεγαλύτερη τιμή προσαρμοστικότητας έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα συνεισφοράς ενός ή περισσότερων απογόνων στις επόμενες γενιές, δηλαδή λαμβάνουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγθούν για αναπαραγωγή. Αυτό οδηγεί στην επικράτηση, προσαρμοσμένων στο περιβάλλον, λύσεων ενός πληθυσμού αλλά μπορεί και να καταλήξει, εάν δε διατηρηθούν οι κατάλληλες ισορροπίες, στον κατακλυσμό του πληθυσμού από ιδιαίτερα ικανά και όχι βέλτιστα χρωμοσώματα. Η διαδικασία της επιλογής εφαρμόζεται με διάφορους τελεστές επιλογής, οι οποίοι

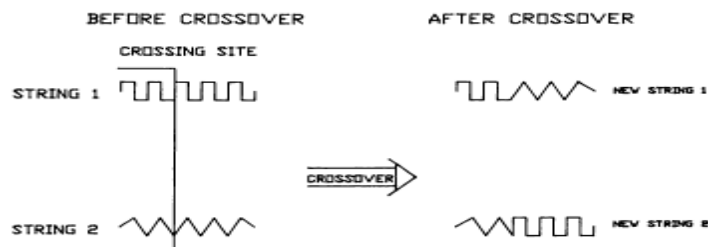
επιλέγουν τα χρωμοσώματα που πρόκειται να αναπαραχθούν από την πληθυσμό. Μια καλή συγκριτική μελέτη των τελεστών επιλογής δίνεται, ενδεικτικά, στους Back και Hoffmeister (1991), Bramlette (1991), Eshelman και Schaffer (1991), Goldberg και Deb (1991), Goldberg και Segrest (1987), Hancock (1994) και μια επισκόπηση και αναλυτική παρουσίαση στους Back et al. (1997).

- Διασταύρωση (Crossover)

Ο πληθυσμός που προέκυψε από τη διαδικασία της επιλογής πρέπει να περάσει από τη διαδικασία ζευγαρώματος, ώστε να πραγματοποιηθεί ένα είδος γονιμοποίησης, όπως συμβαίνει και στη φύση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διασταύρωση και συνδυάζει τα στοιχεία των χρωμοσωμάτων δύο (ή στην πιο γενική περίπτωση περισσότερων) γονέων για να δημιουργηθούν δύο νέοι απόγονοι που προκύπτουν από την ανταλλαγή και το συνδυασμό τμημάτων των γενετικών πληροφοριών των γονέων από τους οποίους προήλθαν. Με άλλα λόγια, στη διαδικασία της διασταύρωσης συνδυάζονται χαρακτηριστικά από τις καλές λύσεις (κατάλληλα χρωμοσώματα), με σκοπό την παραγωγή ακόμα καλύτερων λύσεων. Η διαδικασία της διασταύρωσης θεωρείται ότι περιλαμβάνει τρία βήματα:

- ✓ Οι στοιχειοσειρές που πρόσφατα αναπαράχθηκαν σχετίζονται σε ζευγάρια με τυχαίο τρόπο.
- ✓ Ένας ακέραιος αριθμός που αναπαριστά τη θέση στοιχειοσειράς επιλέγεται τυχαία για κάθε ζευγάρι στοιχειοσειρών.
- ✓ Με βάση την πιθανότητα διασταύρωσης, τα ζεύγη διασταυρώνονται, αλλάζοντας μεταξύ τους ομάδα από δυαδικά ψηφία γύρω από την επιλεγθείσα θέση και κατά μήκος των στοιχειοσειρών.

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 5.1) φαίνονται οι συμβολοσειρές (απόγονοι) που προκύπτουν μετά τη διασταύρωση των γονέων:



Σχήμα 5.1: Σχηματική απεικόνιση διασταύρωσης δύο γονέων, ώστε να προκύψουν δύο απόγονοι

[Πηγή: Goldberg (1989)]

Η διασταύρωση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του τελεστή διασταύρωσης, ο οποίος δημιουργεί νέα μέλη που προκύπτουν από την ανταλλαγή γενετικών πληροφοριών των γονέων τους. Πιο συγκεκριμένα, ο τελεστής αυτός επιλέγει τυχαία μια θέση και ανταλλάσσει τις αλυσίδες των γονέων, πριν ή και μετά από αυτή τη θέση ανάμεσα στα δύο χρωμοσώματα για να παράξει δύο απογόνους.

Η διαδικασία της διασταύρωσης αποτελεί το βασικότερο διαχωριστικό μεταξύ των γενετικών αλγορίθμων και υπόλοιπων εξελεγκτικών αλγορίθμων. Μέσω της διασταύρωσης, διευρύνεται το πεδίο δράσης του αλγορίθμου και αυξάνουν οι πιθανότητες επιτυχίας του. Αυτό γιατί τα νέα μέλη, όπως έχει αναφερθεί, περιλαμβάνουν συνδυασμούς χαρακτηριστικών των γονέων τους και με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προκύψουν συνδυασμοί υψηλότερης ικανότητας, χωρίς, βέβαια, αυτό να σημαίνει ότι δεν μπορούν να προκύψουν και χειρότερα αποτελέσματα.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι παρά το ό,τι η λειτουργία της διασταύρωσης είναι ένα τυχαίο γεγονός, όταν συνδυάζεται με τη λειτουργία της επιλογής παρέχει στο ΓΑ το μεγαλύτερο μέρος της δυναμικότητάς του για ανίχνευση. Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση ενός ΓΑ, έχουν αναπτυχθεί πιο σύνθετες μέθοδοι διασταύρωσης από τους ερευνητές, όπως η διασταύρωση δύο σημείων, πολλαπλών σημείων, η ομοιόμορφη διασταύρωση, η ευρετική διασταύρωση, η αριθμητική διασταύρωση, η διασταύρωση δέντρου και η διασταύρωση μερικού ταιριάσματος.

- Μετάλλαξη (Mutation)

Η τελευταία διαδικασία που προσομοιώνει ένας ΓΑ είναι αυτή της μετάλλαξης (Jones 1995, Spears 1993), όπου κάποιο γονίδιο αλλάζει την τιμή που έχει με κάποια άλλη επιτρεπτή τιμή. Η διαδικασία της μετάλλαξης υλοποιείται με τον τελεστή μετάλλαξης, ο οποίος μιμείται τη διαδικασία της γενετικής μετάλλαξης στη φύση. Στους ΓΑ, όπως και στη φύση, ο τελεστής αυτός ασκεί έναν ουσιαστικό αλλά σχετικό μικρό ρόλο, αφού σπάνια εμφανίζεται στη διαδικασία εξέλιξης των πληθυσμών. Ο τελεστής μετάλλαξης λαμβάνει υπόψη του τη μορφή κωδικοποίησης και αναπαράστασης του χρωμοσώματος των ατόμων του πληθυσμού και εφαρμόζεται σε, ένα προς ένα, τα γονίδια του πληθυσμού. Η λειτουργία του συνίσταται στη μετατροπή ενός ή περισσότερων δυαδικών ψηφίων μιας στοιχειοσειράς από τη μια κατάσταση στην άλλη, δηλαδή από '0' σε '1' και αντίστροφα, με βάση μια πιθανότητα μετάλλαξης. Ενδεικτικά, αν το κριτήριο για

τη μετάλλαξη ενεργοποιηθεί για το έβδομο πχ ψηφίο του ενός απογόνου, τότε αυτό αντιστρέφεται, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2: Αναπαράσταση μετάλλαξης

[Πηγή: Βλαχάβας κ.ά. (2006)]

Ο τελεστής μετάλλαξης, σε συνδυασμό με την επιλογή και τη διασταύρωση, βελτιώνει σημαντικά την ικανότητα του ΓΑ για ανίχνευση στα πρότυπα της φύσης. Πιο συγκεκριμένα, λειτουργεί ως ασφαλιστική δικλείδα, καθώς βοηθάει το ΓΑ, ώστε αυτός να μην εκλαμβάνει λανθασμένα ένα τοπικό βέλτιστο σε γενικό βέλτιστο, εισάγοντας νέα, ανεξερεύνητα χαρακτηριστικά λύσεων. Η μετάλλαξη, λοιπόν, είναι απαραίτητη, εφόσον χωρίς την εφαρμογή της, ένας ΓΑ θα μπορούσε να βρει τη βέλτιστη λύση μόνο εάν τα χαρακτηριστικά της λύσης αυτής είχαν εμφανιστεί στον αρχικό πληθυσμό. Λόγω της εξαιρετικής σπουδαιότητας της μετάλλαξης, η επίδραση των διαφόρων γενετικών τελεστών και, ιδιαίτερα, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης στη σύγκλιση των Γενετικών Αλγορίθμων έχει μελετηθεί τόσο σε θεωρητικές όσο και σε πειραματικές μελέτες, όπως στους Bramlette (1991), De Jong (1975), Eshelman και Schaffer (1991), Janikow και Michalewicz (1991), Jones (1995), Muhlenbein (1992), Rawlins (1991), Spears (1993), Stender et al. (1994), Syswenda (1991), Whitley και Vose (1995).

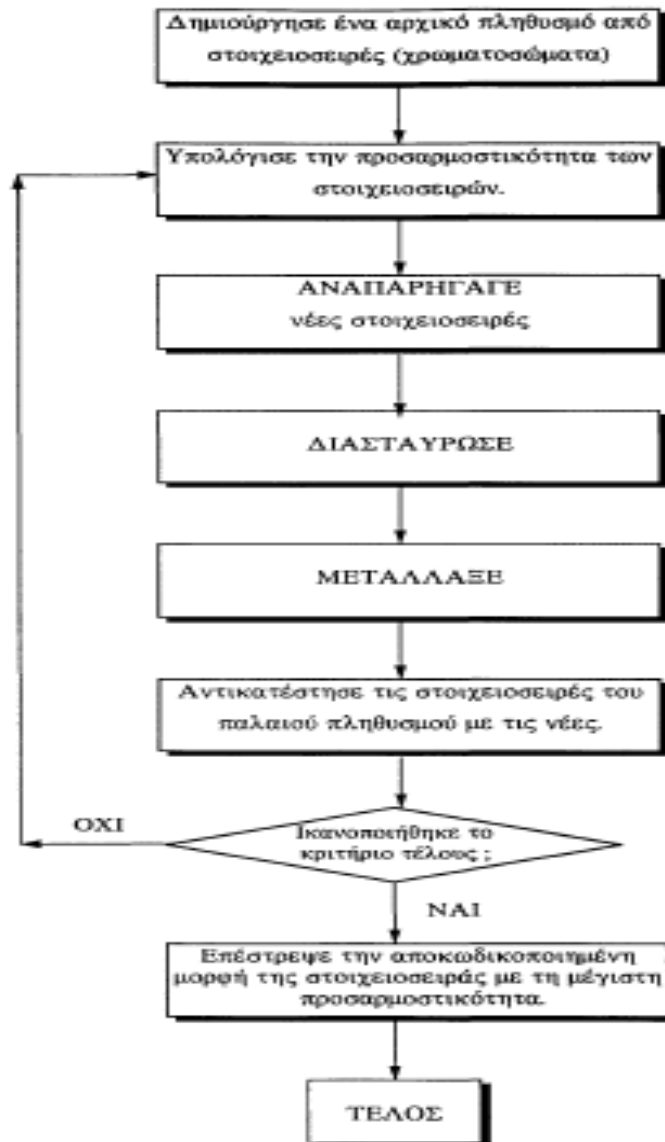
Συνοψίζοντας, στη γενική του μορφή, ένας Γενετικός Αλγόριθμος πρέπει να αποτελείται από πέντε βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία επηρεάζουν σημαντικά την απόδοσή του και είναι καθοριστικά για την ορθή λειτουργία του (Goldberg 1989, Michalewicz 1994):

- Κατάλληλη κωδικοποίηση και αναπαράσταση των ατόμων-πιθανών λύσεων του προβλήματος (codification, representation).
- Αρχικοποίηση, δηλαδή δημιουργία του αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων (initialization).

- Κατάλληλη συνάρτηση αξιολόγησης των μελών του πληθυσμού, η οποία λαμβάνει υπόψη τα κριτήρια και τις συνθήκες που θέτει το πρόβλημα (fitness or objective function).
- Κατάλληλους γενετικούς τελεστές για επιλογή, διασταύρωση και μετάλλαξη, οι οποίοι αποτελούν μια φόρμουλα με την οποία μεταβάλλεται η σύνθεση των απογόνων (selection, crossover, mutation operators). Αναφέρεται, επιπλέον, ότι η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη συνθέτουν τη διαδικασία της Αναπαραγωγής, η οποία είναι ιδιαζόντως σημαντική για τη λειτουργία του ΓΑ.
- Τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο ΓΑ, όπως μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητα διασταύρωσης, πιθανότητα μετάλλαξης, συνθήκες τερματισμού (termination conditions).

Συμπερασματικά, οι παραπάνω βασικές αρχές λειτουργίας ενός ΓΑ που παρουσιάστηκαν μαρτυρούν ότι οι ΓΑ έχουν ισχυρό, στοχαστικό και μη αιτιοκρατικό χαρακτήρα και η επιλογή παραμέτρων, όπως ο βαθμός διασταύρωσης ή μετάλλαξης, έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει σημαντικά την απόδοση και το σημείο σύγκλισης των ΓΑ. Πιο αναλυτικά για το σημείο σύγκλισης, αναφέρεται ότι αν ένας ΓΑ σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε ορθώς, τότε η εξέλιξη του πληθυσμού των χρωμοσωμάτων μεταξύ διαδοχικών γενεών θα είναι τέτοια, ώστε η προσαρμοστικότητα του καλύτερου και η μέση τιμή των προσαρμοστικότητων σε κάθε γενεά να αυξάνονται οδηγούμενες προοδευτικά προς το γενικό βέλτιστο. Ένα χρωμόσωμα –και κατ’ επέκταση και κάθε γονίδιο του- συγκλίνει, εάν το 95% του πληθυσμού του μοιράζεται την ίδια περίπου περιοχή (De Jong, 1975).

Τέλος, είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι κάθε ΓΑ χρειάζεται τις τιμές των παραμέτρων που αναφέρθηκαν, όπως η πιθανότητα μετάλλαξης και η πιθανότητα διασταύρωσης, καθώς επίσης και ορισμένες συνθήκες τερματισμού, η εφαρμογή των οποίων θα τερματίσει την εκτέλεση του αλγορίθμου. Τέτοιες συνθήκες τερματισμού μπορεί να είναι για παράδειγμα η εξέλιξη του πληθυσμού για συγκεκριμένο αριθμό γενεών και η επίτευξη τιμών καταλληλότητας πέρα από μια προκαθορισμένη τιμή. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2 η βασική δομή, δηλαδή το διάγραμμα ροής ενός ΓΑ.



Σχήμα 5.3: Βασική δομή ενός Γενετικού Αλγορίθμου

[Πηγή: Νεάρχου (1996)]

5.4. Πλεονεκτήματα και Λόγοι Χρήσης Γενετικών Αλγορίθμων

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ), όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελούν μια μέθοδο αναζήτησης βέλτιστων λύσεων σε ποικίλα μαθηματικά προβλήματα με σκοπό την εύρεση αποδεκτών λύσεων. Υπερέχουν σε σχέση με άλλες μεθόδους, διότι διαθέτουν τα χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 5.2 και λόγω αυτών, θεωρούνται πιο «εύρωστοι» από τις υφιστάμενες μεθόδους άμεσης αναζήτησης. Επιπλέον, οι ΓΑ θεωρείται ότι παρουσιάζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999):

- i) Έχουν την ικανότητα να επιλύουν δύσκολα και πολύπλοκα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Οι ΓΑ είναι αρκετά αποδοτικοί, όταν πρόκειται για προβλήματα με πολλές και δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις. Ακόμη, η αποδοτικότητα τους επεκτείνεται και σε προβλήματα με συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις, όπου είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν άλλες μέθοδοι για την αποτελεσματική εύρεση των ακρότατων τους.
- ii) Είναι εύκολα εξελίξιμοι και επεκτάσιμοι. Οι ΓΑ δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Παραλλαγές στο βασικό σχήμα των λειτουργιών ενός ΓΑ είναι ευπρόσδεκτες και, σε ορισμένες περιπτώσεις, επιβάλλονται προς όφελος της απόδοσης.
- iii) Μπορούν να συνδυαστούν (σε υβριδικές μορφές) με άλλες μεθόδους, δηλαδή είναι αρκετά προσαρμοστικοί και ευέλικτοι. Αν και η ισχύς των ΓΑ είναι έντονη, σε ορισμένες περιπτώσεις προβλημάτων, όπου συμβαίνει άλλες μέθοδοι να έχουν υψηλότερη αποδοτικότητα λόγω εξειδίκευσης, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ενός υβριδικού σχήματος ΓΑ με άλλη μέθοδο.
- iv) Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο, λόγω της ύπαρξης ελευθερίας επιλογής κριτηρίων που καθορίζουν τη διαδικασία επιλογής στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, οι ΓΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην οικονομία, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων, στο σχεδιασμό μηχανών κ.ά.
- v) Παρουσιάζουν τη δυνατότητα εύκολης συνεργασίας με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Ένα σημαντικό τους πλεονέκτημα, δηλαδή, αποτελεί το γεγονός ότι μπορούν να εφαρμοστούν με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, χωρίς να απαιτείται η επανασχεδίαση τους. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί οι ΓΑ χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της διαδικασίας ή συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, χωρίς να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της μέσα στο σύστημα ή η όλη δομή του συστήματος.

- vi) Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους, όπου απαιτούνται αρκετοί περιορισμοί (πχ ύπαρξη παραγώγων, συνέχεια, όχι «θορυβώδεις» συναρτήσεις κ.ά.). Με άλλα λόγια, οι ΓΑ αντέχουν το θόρυβο ή την αβεβαιότητα. Έτσι, αποδεικνύεται και η γενική φύση τους, δηλαδή η ικανότητά τους να εφαρμόζονται σε οποιοδήποτε πρόβλημα.
- vii) Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού και, άρα, προσφέρονται για παράλληλη υλοποίηση. Η ιδιότητα αυτή των ΓΑ αυξάνει ακόμη περισσότερο την απόδοσή τους, αφού μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών. Πιο συγκεκριμένα, οι ΓΑ σε κάθε τους βήμα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, επειδή κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Προκύπτει, έτσι, ότι οι ΓΑ μπορούν να καλύψουν με αποδοτική αναζήτηση μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.
- viii) Αποτελούν μια μέθοδο που πραγματοποιεί, ταυτόχρονα, εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Συνήθως, τα δύο αυτά χαρακτηριστικά, δηλαδή η καλή εξερεύνηση του χώρου και η εκμετάλλευση της πληροφορίας, είναι ανταγωνιστικά και το επιθυμητό είναι να συνυπάρχουν προς όφελος της όλης διαδικασίας. Οι ΓΑ επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό αυτών των χαρακτηριστικών και για αυτό, θεωρούνται ιδιαίτερα ελκυστικοί και αποδοτικοί σε σχέση με άλλες μεθόδους.
- ix) Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η μόνη «δίοδος» επικοινωνίας των ΓΑ με το περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι θα επέλθει επιτυχία, ανεξάρτητα από τη σημασία του προβλήματος. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι δεν υπονοείται πως δεν υπάρχουν άλυτα προβλήματα για τους ΓΑ. Απλώς, η ευθύνη για τέτοιες περιπτώσεις, όπου οι ΓΑ δεν τα καταφέρνουν, επιρρίπτεται στη φύση του χώρου που ερευνούν και όχι στο πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.

Παρόλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα των ΓΑ, αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες που, ίσως, αποτελέσουν τροχοπέδη στην εξάπλωση της τεχνολογίας των ΓΑ. Ένας τέτοιος παράγοντας αφορά τα προβλήματα εξοικείωσης

με τη Γενετική. Για τους περισσότερους ανθρώπους που ασχολούνται με την επιστήμη των υπολογιστών, οι έννοιες της εξέλιξης και της φυσικής επιλογής δεν είναι από τις πιο οικείες. Όμως, αυτός ο δανεισμός ορολογίας από τη βιολογία συμβάλλει στην καλύτερη αντίληψη της λογικής των ΓΑ, εφόσον τους καθιστά κατανοητούς, εύχρηστους και ευέλικτους. Ακόμη, ένας άλλος λόγος-εμπόδιο μπορεί να θεωρηθεί το πρόβλημα του χρόνου. Στη φύση, ως γνωστό, η εξέλιξη λειτουργεί με ρυθμούς εξαιρετικά αργούς και χρειάζεται να περάσουν χιλιάδες γενιές για να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά των ειδών και να διαφοροποιηθούν οι ικανότητες και οι συμπεριφορές τους. Οπότε, προκύπτει ο προβληματισμός αναφορικά με τη δυνατότητα ενός μοντέλου αναζήτησης λύσεων, που είναι εμπνευσμένο από αυτήν την αργή φυσική εξέλιξη, να επιτύχει καλές επιδόσεις χρόνου. Αυτός, όμως, ο προβληματισμός μπορεί να αναιρεθεί, αν σκεφτεί κανείς ότι, στο πεδίο των υπολογιστών, τα άτομα κωδικοποιούνται ως συμβολοσειρές και οι συνθήκες του περιβάλλοντος μοντελοποιούνται με απλές μαθηματικές σχέσεις. Δηλαδή, το μοντέλο με το οποίο δουλεύει ο υπολογιστής δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο υπολογιστικό φόρτο, συγκρινόμενο πάντα με τις αντίστοιχες διαδικασίες. Οι ταχύτητες, λοιπόν, που μπορούν να αποκτήσουν οι ΓΑ θεωρούνται πολύ υψηλές, λόγω της ιδιαίτερης λειτουργίας τους.

Ύστερα από την ανάλυση των πλεονεκτημάτων των ΓΑ και την αναίρεση ορισμένων προβληματισμών γύρω από αυτούς, μπορεί να γίνει κατανοητός ο λόγος που το πρόβλημα χωροθέτησης της παρούσας διπλωματικής επιλέχθηκε να επιλυθεί με τη μέθοδο των ΓΑ. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή των ΓΑ για την επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων στην Αλεξανδρούπολη μπορεί να στηριχθεί στους εξής λόγους:

- Οι ΓΑ έχουν αυξημένη πιθανότητα να εντοπίσουν το καθολικό βέλτιστο, αποφεύγοντας τον κίνδυνο παγίδευσης σε τοπικά βέλτιστα, αφού ανιχνεύουν το χώρο των δυνατών λύσεων από πολλά σημεία ταυτόχρονα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για το εν λόγω πρόβλημα χωροθέτησης των κινητών μονάδων που είναι αρκετά πολύπλοκο.
- Οι ΓΑ δεν ενδιαφέρονται για το είδος και τη μορφή του προβλήματος που επιλύουν, δηλαδή θεωρούνται «τυφλοί» και δεν απαιτούν καμιά επιπρόσθετη πληροφορία, γεγονός που διευκολύνει κατά πολύ την όλη διαδικασία επίλυσης.

- Κατ' επέκταση του προηγούμενου λόγου, αναφέρεται ότι η ρύθμιση και η προσαρμογή ενός ΓΑ στις απαιτήσεις ενός συγκεκριμένου προβλήματος είναι σχετικά εύκολη διαδικασία που απαιτεί μόνο μερικά χαρακτηριστικά για την επίτευξη των στόχων του προβλήματος.
- Οι ΓΑ είναι ικανοί να προσφέρουν μια καλής ποιότητας λύση σε αποδεκτό χρόνο (Saez et al., 2008) και, συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι οι υπολογιστικοί χρόνοι δεν υπερβαίνουν τα 30 λεπτά.
- Οι ΓΑ επιτρέπουν, με μεγάλη ευκολία, τον ορισμό επιπρόσθετων περιορισμών στο πρόβλημα και υποστηρίζουν την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.
- Οι ΓΑ αποτελούν μια μέθοδο βελτιστοποίησης με ικανοποιητική απόδοση και υπερτερούν σε σχέση με άλλες παραδοσιακές μεθόδους, κυρίως σε περιπτώσεις, όπου το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του προβλήματος είναι μεγάλα.

5.5. Επίλυση με Χρήση του Λογισμικού Evolver

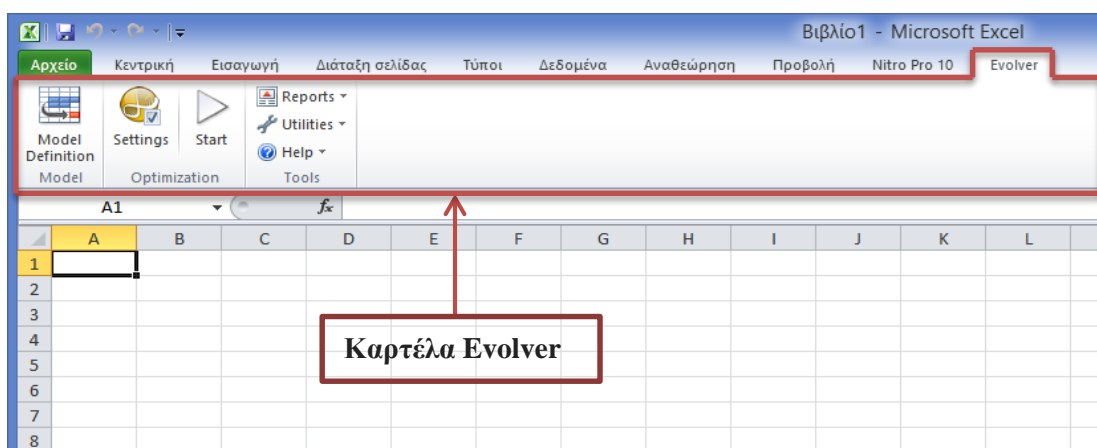
Το λογισμικό Evolver™ αποτελεί ένα πρόσθετο πρόγραμμα (add-in) της δημοφιλούς εφαρμογής Υπολογιστικών Φύλλων, Microsoft Office Excel. Πρόκειται για ένα λογισμικό πακέτο, το οποίο παρέχει στους χρήστες του έναν εύκολο τρόπο εύρεσης βέλτιστων λύσεων για κάθε τύπο προβλήματος που μπορεί να μοντελοποιηθεί.

Το λογισμικό Evolver θεωρείται ένα ταχύτατο και εξελιγμένο λογισμικό βελτιστοποίησης, το οποίο λειτουργεί χρησιμοποιώντας ένα σύνολο Γενετικών Αλγορίθμων, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση σε ένα μοντέλο. Το λογισμικό αυτό κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 1990, ως το πρώτο πακέτο βασισμένο σε Γενετικούς Αλγορίθμους και εμπορικά διαθέσιμο σε προσωπικούς υπολογιστές. Ενώ, αρχικά, το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε από την εταιρεία Axcelis, Inc., σήμερα βρίσκεται υπό την αιγίδα της εταιρείας Palisade Corporation. Αξίζει να αναφερθεί πως, πλέον, το Evolver χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση προβλημάτων σε ένα μεγάλο εύρος βιομηχανιών, από οικονομικές έως αεροπορικές και κατασκευαστικές βιομηχανίες, λόγω της αυξημένης αποτελεσματικότητας, ευελιξίας, ακρίβειας, ταχύτητας και ευκολίας που διαθέτει η χρήση του.

Βασική προϋπόθεση για τη χρήση του λογισμικού Evolver αποτελεί πρώτα η μοντελοποίηση του εκάστοτε προβλήματος στο Excel από το χρήστη. Το Excel παρέχει τα κατάλληλα εργαλεία, όπως τύπους, συναρτήσεις, διαγράμματα, μακροδυνατότητες, ώστε ο χρήστης να δημιουργήσει ρεαλιστικά μοντέλα προβλημάτων. Μετά τη διαμόρφωση του προβλήματος στο Excel, ακολουθεί η χρήση του Evolver, το οποίο προσφέρει τη διασύνδεση, ώστε να περιγραφεί η αβεβαιότητα που εμπεριέχεται στο μοντέλο του προβλήματος και παρέχει τις κατάλληλες μηχανές αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Με άλλα λόγια, η χρήση και των δύο επιφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα σε κυριολεκτικά οποιοδήποτε πρόβλημα βελτιστοποίησης που είναι αναγκαίο να επιλυθεί.

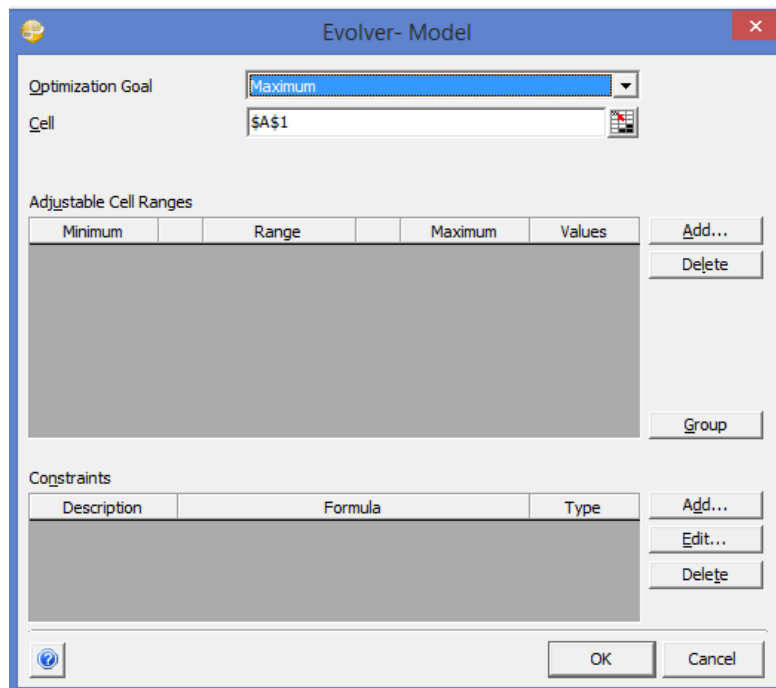
Η διαδικασία, λοιπόν, επίλυσης ενός προβλήματος ξεκινάει με τη μορφοποίηση ενός μοντέλου, που αντιπροσωπεύει με ακρίβεια το πρόβλημα, στο Excel. Το μοντέλο αυτό θα πρέπει να είναι ικανό να εκτιμήσει τις τιμές των μεταβλητών που εισάγονται, καθώς και τη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησής του. Έπειτα, μπορεί να εγκατασταθεί το λογισμικό Evolver, ώστε να αρχίσει η διαδικασία προσδιορισμού της λύσης του προβλήματος.

Μετά την εγκατάσταση του εν λόγω λογισμικού από την ιστοσελίδα της εταιρείας Palisade, εμφανίζεται μια επιπλέον καρτέλα, δίπλα στις υπάρχουσες, στο Excel, η οποία συνοδεύεται από μια γραμμή εργαλείων, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 5.4):



Σχήμα 5.4: Γραμμή εργαλείων του λογισμικού Evolver

Όπως παρατηρείται, η γραμμή εργαλείων του λογισμικού αποτελείται από τρεις επιλογές (*Model, Optimization, Tools*), με κάθε μια από τις οποίες να εμπεριέχει επιπλέον επιλογές. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή **Model** (Μοντέλο) δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να περιγράψει το μοντέλο του προβλήματος, δηλαδή να καθορίσει το στόχο, τις μεταβλητές και τους περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης μέσω της εντολής Model Definition. Με την επιλογή της εντολής Model Definition εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο διαλόγου (σχήμα 5.5):



Σχήμα 5.5: Παράθυρο της εντολής Model Definition του Evolver

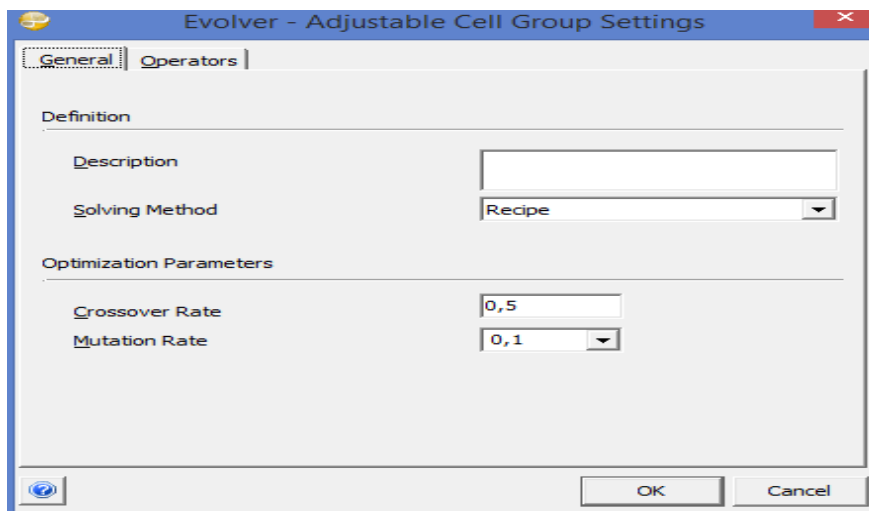
Το παράθυρο αυτό διαθέτει επιλογές, με βάση τις οποίες περιγράφεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Πιο αναλυτικά, οι επιλογές αυτές περιλαμβάνουν τα παρακάτω (Palisade Corporation, 2010):

- **Optimization Goal** (Στόχος της Βελτιστοποίησης): η επιλογή αυτή καθορίζει το είδος της απάντησης που αναζητάει το λογισμικό Evolver. Με άλλα λόγια, καθορίζει το στόχο της βελτιστοποίησης, δηλαδή εάν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος πρέπει να μεγιστοποιηθεί (*Maximum*) ή να ελαχιστοποιηθεί (*Minimum*). Υπάρχει και ο στόχος που εκφράζεται ως *Target Value*, όπου το Evolver αναζητάει εκείνη την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που

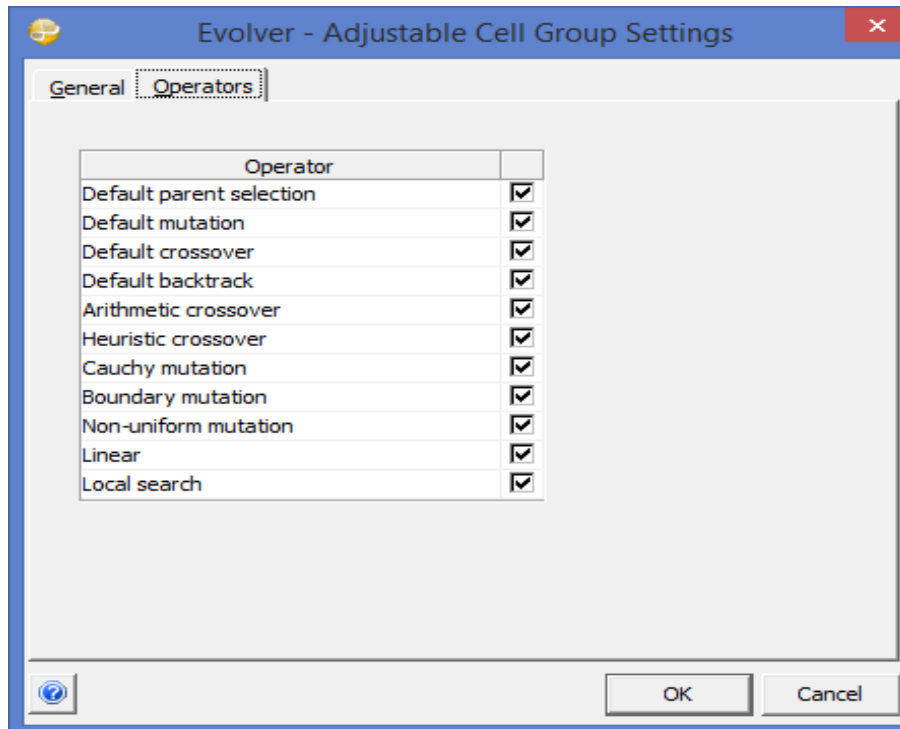
προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο μια συγκεκριμένη τιμή-στόχο που καθορίζεται από το χρήστη. Αναφέρεται, στο σημείο αυτό, ότι στο πρόβλημα χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων που εξετάζεται, ο στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησής του.

- **Cell** (Κελί): Το κελί ή αλλιώς κελί προσδιορισμού εμπεριέχει το αποτέλεσμα, την «έξοδο» του μοντέλου του προβλήματος, δηλαδή τη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Το κελί αυτό περιλαμβάνει έναν μαθηματικό τύπο που εξαρτάται από τα ρυθμιζόμενα κελιά που θα περιγραφούν παρακάτω. Για κάθε δοκιμή εύρεσης λύσης του Evolver θα παράγεται και μια τιμή για αυτό το κελί, μέχρι να βρεθεί η μοναδική βέλτιστη λύση στο πλαίσιο αξιολόγησης κάθε πιθανού σεναρίου. Δηλαδή, καθώς το Evolver αναζητά αυτή τη βέλτιστη λύση, χρησιμοποιεί τον τύπο του κελιού προσδιορισμού ως συνάρτηση αξιολόγησης, ώστε να εκτιμήσει ποιες τιμές των μεταβλητών πρέπει να συνεχίσουν να διασταυρώνονται και ποιες να απορριφτούν.
- **Adjustable Cell Ranges** (Εύρος Ρυθμιζόμενων Κελιών): η επιλογή αυτή καθορίζει σε ένα πίνακα τα κελιά τα οποία ρυθμίζονται από το Evolver κατά τη διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος. Τα κελιά αυτά περιλαμβάνουν τις μεταβλητές του προβλήματος και ο ορισμός τους πραγματοποιείται με την εντολή *Add*, η οποία δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει ένα κελί ή ένα εύρος κελιών, το οποίο θα εμφανιστεί στο πεδίο *Range* του πίνακα. Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τα μέγιστα και κατώτατα όρια των μεταβλητών (*Maximum, Minimum*), δηλαδή τις επιτρεπόμενες τιμές των ρυθμιζόμενων κελιών, οι οποίες λαμβάνονται αυστηρά υπόψη από το πρόγραμμα κατά τη διαδικασία επίλυσης. Παράλληλα, κάθε κελί παίρνει ως τιμή έναν πραγματικό αριθμό με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων, ενώ στο πεδίο *Values* δίνεται η δυνατότητα αντιμετώπισης ορισμένων μεταβλητών από το Evolver ως ακέραιων αριθμών και όχι ως πραγματικών. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι η τελευταία επιλογή είναι διαθέσιμη μόνο σε δύο μεθόδους επίλυσης που θα αναφερθούν και παρακάτω: την «Recipe solving method» και την

«Budget solving method». Όσον αφορά την επιλογή *Group* (Ομάδα) (σχήμα 5.6), ένα ή περισσότερα εύρη κελιών μπορούν να συμπεριληφθούν σε ένα Adjustable Cell Group. Όλα τα κελιά στο Adjustable Cell Group μοιράζονται μια κοινή μέθοδο επίλυσης (solving method), έναν κοινό βαθμό διασταύρωσης (crossover rate) και μετάλλαξης (mutation rate) που ορίζονται στην καρτέλα *General*, καθώς και κοινούς γενετικούς τελεστές (genetic operators) που ορίζονται στην καρτέλα *Operators* (σχήμα 5.7) και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία νέων μελών του πληθυσμού από πρόσφατα μέλη. Το πρόγραμμα Evolver χρησιμοποιεί τις εξής έξι διαφορετικές μεθόδους επίλυσης: Recipe solving method, Order solving method, Group solving method, Budget solving method, Project solving method και Schedule solving method. Κάθε μια από αυτές τις μεθόδους αποτελεί έναν διαφορετικό γενετικό αλγόριθμο και επιλύει ένα διαφορετικό τύπο προβλήματος. Στο πεδίο *description* υπάρχει η δυνατότητα περιγραφής μιας ομάδας μεταβλητών σε διαλόγους και αναφορές. Αναφορικά με το βαθμό διασταύρωσης (crossover rate), αυτός μπορεί να πάρει τιμές από 0,01 έως 1,0 και αντιπροσωπεύει την πιθανότητα τα μελλοντικά σενάρια να εμπεριέχουν ένα συνδυασμό πληροφοριών από τα προηγούμενα. Τέλος, ο βαθμός μετάλλαξης κυμαίνεται μεταξύ 0,00 και 1,0 και αντανάκλα την πιθανότητα τα μελλοντικά σενάρια να εμπεριέχουν κάποιες τυχαίες τιμές.



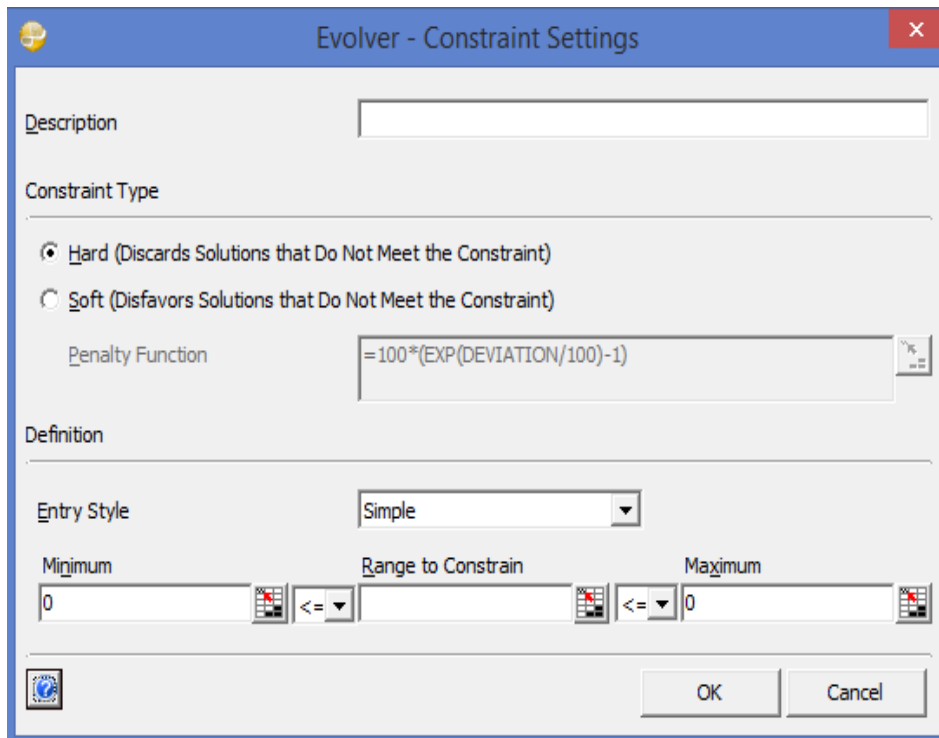
Σχήμα 5.6: Παράθυρο της επιλογής Group του λογισμικού Evolver (Καρτέλα General)



Σχήμα 5.7: Παράθυρο της επιλογής Group του λογισμικού Evolver (Καρτέλα Operators)

- **Constraints** (Περιορισμοί): η επιλογή αυτή παρέχει τη δυνατότητα καθορισμού των περιορισμών ή των συνθηκών που πρέπει να ικανοποιούνται, ώστε μια λύση να θεωρηθεί έγκυρη. Η προσθήκη των περιορισμών του μοντέλου πραγματοποιείται με την εντολή *Add* στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται (σχήμα 5.8) και όπου καθορίζονται οι σχετικές ρυθμίσεις (Constraint Settings). Τα χαρακτηριστικά των περιορισμών που ορίζονται είναι η περιγραφή, ο τύπος και η μορφή τους. Όσον αφορά τον τύπο των περιορισμών (Constraint type), μπορούν να οριστούν δύο είδη: *hard* και *soft*. Οι *hard* περιορισμοί πρέπει οπωσδήποτε να πληρούνται προκειμένου μια λύση να θεωρείται έγκυρη και σε περίπτωση που δεν ικανοποιούνται, η λύση απορρίπτεται. Οι *soft* περιορισμοί είναι πιο ευέλικτοι και αποτελούν συνθήκες που θα ήταν επιθυμητό να πληρούνται όσο περισσότερο γίνεται αλλά μπορεί να γίνει ένας συμβιβασμός για μια βελτίωση στην καταλληλότητα ή στο αποτέλεσμα του κελιού προσδιορισμού. Όταν ένας *soft* περιορισμός δεν πληρείται, αλλάζει αρκετά το αποτέλεσμα στο κελί προσδιορισμού. Αυτό το ποσό της αλλαγής, που προκαλείται από τη μη ικανοποίηση

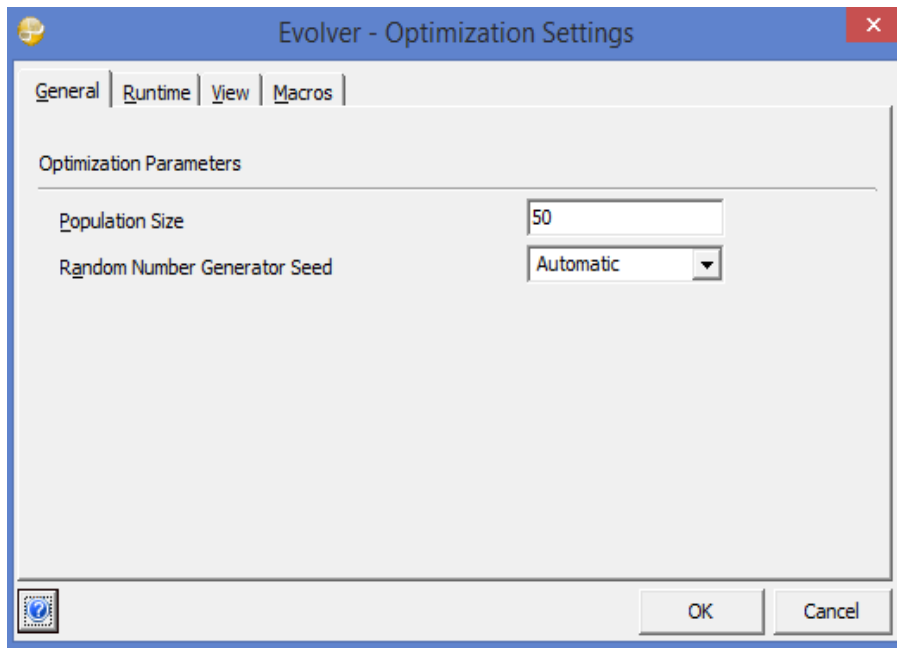
ενός soft περιορισμού, υπολογίζεται από μια συνάρτηση ποινής (penalty function) που είναι απαραίτητο να οριστεί, εάν επιλεγεί αυτό το είδος περιορισμού. Ακόμη, ένας περιορισμός μπορεί να διατυπωθεί σε simple ή formula μορφή. Στη simple μορφή ο περιορισμός μπορεί να εισαχθεί χρησιμοποιώντας τις απλές γνωστές σχέσεις, όπου ένα κελί συγκρίνεται με έναν εισαγόμενο αριθμό. Η formula μορφή επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει οποιονδήποτε έγκυρο τύπο από το Excel και το Evolver ελέγχει την εγκυρότητά του, ενημερώνοντας με το κατάλληλο μήνυμα (TRUE OR FALSE).



Σχήμα 5.8: Παράθυρο της επιλογής Constraint του λογισμικού Evolver

Δεύτερη στη γραμμή εργαλείων του λογισμικού Evolver, μετά την επιλογή Model, είναι η επιλογή **Optimization** (Βελτιστοποίηση) με την οποία καθορίζονται οι γενικές ρυθμίσεις για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Πατώντας την εντολή Settings, εμφανίζεται το παράθυρο ρυθμίσεων της βελτιστοποίησης (σχήμα 5.9), το οποίο αποτελείται από τέσσερις καρτέλες: *General*, *Runtime*, *View*, *Macros*. Στην πρώτη καρτέλα (*General*) ορίζονται το μέγεθος του πληθυσμού (population size) ή αλλιώς το μέγεθος των συνόλων των

μεταβλητών που πρέπει να αποθηκεύονται στη μνήμη σε κάθε δοσμένο χρόνο. Συνήθως, επιλέγονται τιμές μεταξύ 30 και 100 και όχι παραπάνω από 100, ώστε να μην γίνει αρκετά χρονοβόρα η διαδικασία εύρεσης λύσης αργότερα. Στην ίδια καρτέλα υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί η αρχική τιμή για τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιείται στο Evolver (Random Number Generator Seed) είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα.

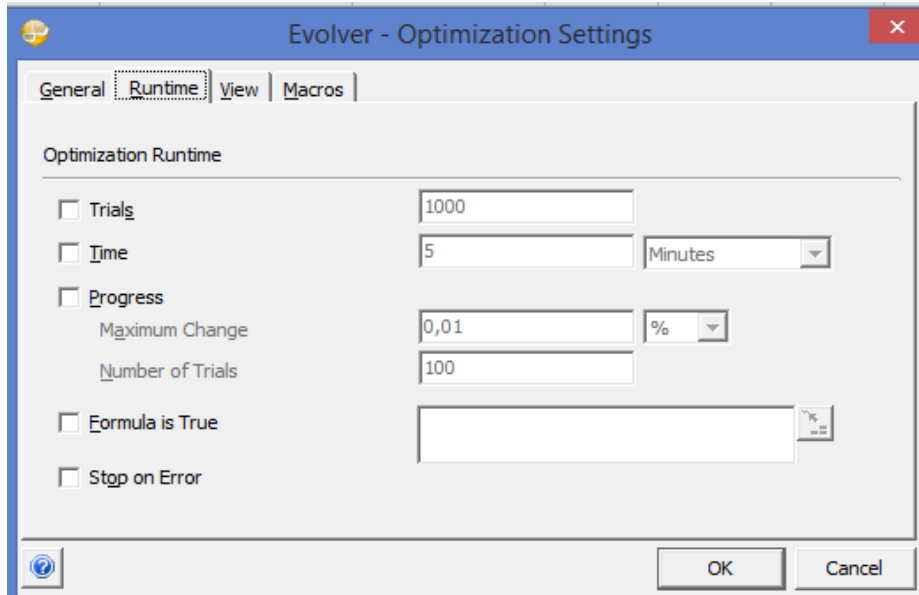


Σχήμα 5.9: Παράθυρο της επιλογής Optimization Settings του λογισμικού Evolver (Καρτέλα General)

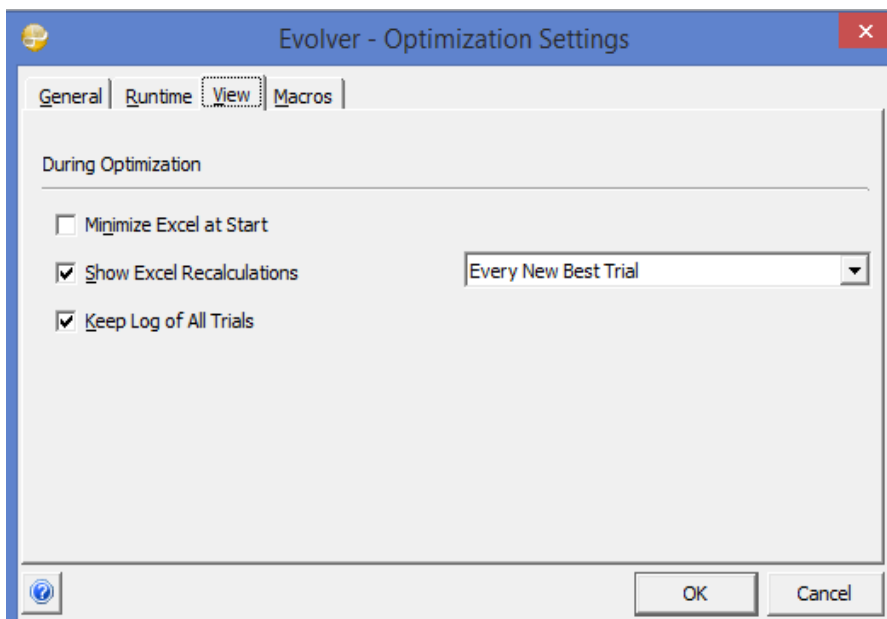
Στην καρτέλα *Runtime* (σχήμα 5.10) ορίζεται ο χρόνος της διαδικασίας βελτιστοποίησης, δηλαδή οι συνθήκες τερματισμού (πως και πότε) της προσπάθειας εύρεσης της βέλτιστης λύσης από όταν αυτή ξεκινήσει. Οι συνθήκες αυτές καθορίζονται από το χρήστη και αφορούν είτε το μέγιστο αριθμό δοκιμών επίλυσης είτε το μέγιστο χρόνο της διαδικασίας βελτιστοποίησης είτε το ποσοστό βελτίωσης της συνάρτησης καταλληλότητας μετά το πέρας ορισμένων δοκιμών είτε την ικανοποίηση μιας συνθήκης είτε απλώς τη διακοπή της διαδικασίας μόλις υπολογιστεί μια λανθασμένη τιμή για το κελί προσδιορισμού.

Η τέταρτη καρτέλα της επιλογής Optimization Settings (Καρτέλα *View*) (σχήμα 5.11) καθορίζει ποια στοιχεία θα φαίνονται κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης (ελαχιστοποίηση του Excel στην αρχή της διαδικασίας, επαναυπολογισμοί του

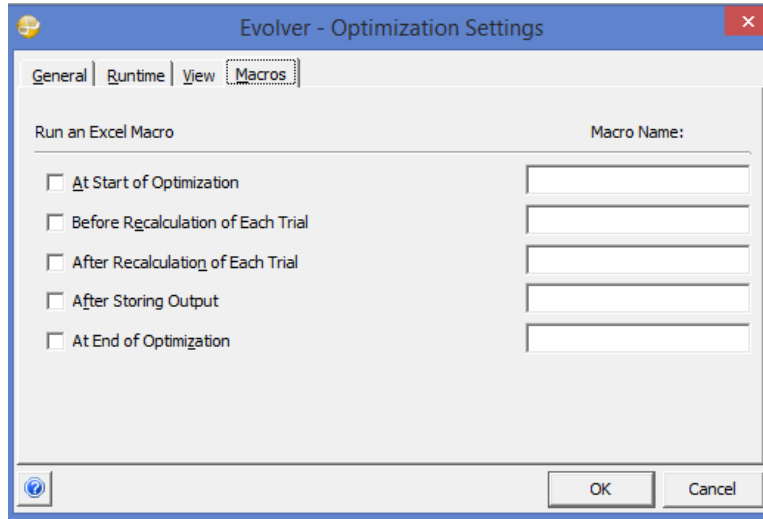
Excel, καταγραφή των δοκιμών). Τέλος, στην καρτέλα *Macros* (σχήμα 5.12), ορίζεται η χρονική στιγμή στην οποία θα εκτελεστούν οι μακροεντολές του προβλήματος κατά τη διάρκεια μιας βελτιστοποίησης και κατά τη διάρκεια κάθε δοκιμής επίλυσης.



Σχήμα 5.10: Παράθυρο της επιλογής Optimization Settings του λογισμικού Evolver (Καρτέλα Runtime)



Σχήμα 5.11: Παράθυρο της επιλογής Optimization Settings του λογισμικού Evolver (Καρτέλα View)



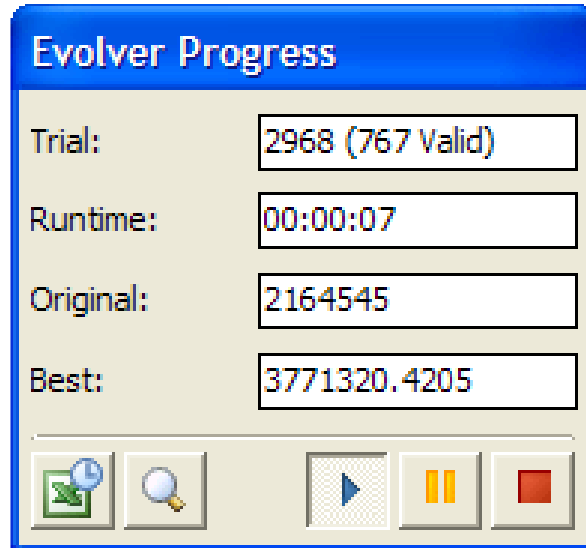
Σχήμα 5.12: Παράθυρο της επιλογής Optimization Settings του λογισμικού Evolver (Καρτέλα Macros)

Ύστερα από την ρύθμιση όλων των παραπάνω, μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία βελτιστοποίησης, επιλέγοντας την εντολή *Start* της επιλογής Optimization. Ακολούθως, θα εμφανιστεί το παράθυρο προόδου (Evolver Progress) της διαδικασίας βελτιστοποίησης του Evolver (σχήμα 5.13), όπου φαίνονται οι ενδείξεις:

- ✓ Trial: αναφέρεται στο συνολικό αριθμό των δοκιμών που έχουν εκτελεστεί και η ένδειξη « #Valid » δείχνει τον αριθμό εκείνων των δοκιμών, όπου όλοι οι περιορισμοί ικανοποιούνται.
- ✓ Runtime: αναφέρεται στο χρόνο που έχει περάσει από την εκκίνηση της διαδικασίας.
- ✓ Original: αναφέρεται στην αρχική τιμή του κελιού προσδιορισμού ή στόχου.
- ✓ Best: αναφέρεται στη βέλτιστη λύση που έχει βρεθεί μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή για το κελί προσδιορισμού, η τιμή του οποίου μεγιστοποιείται ή ελαχιστοποιείται.

Παράλληλα, στο παράθυρο αυτό, υπάρχουν οι επιλογές της παύσης της διαδικασίας, του τερματισμού της διαδικασίας, της εμφάνισης διαγραμμάτων σχετικών με την πρόοδο της διαδικασίας, της εμφάνισης ενημέρωσης των ρυθμίσεων του Excel και της αναζήτησης από το Evolver εκείνης της λύσης που

βασίζεται στην πιο πρόσφατη περιγραφή στο παράθυρο της εντολής Model Definition.



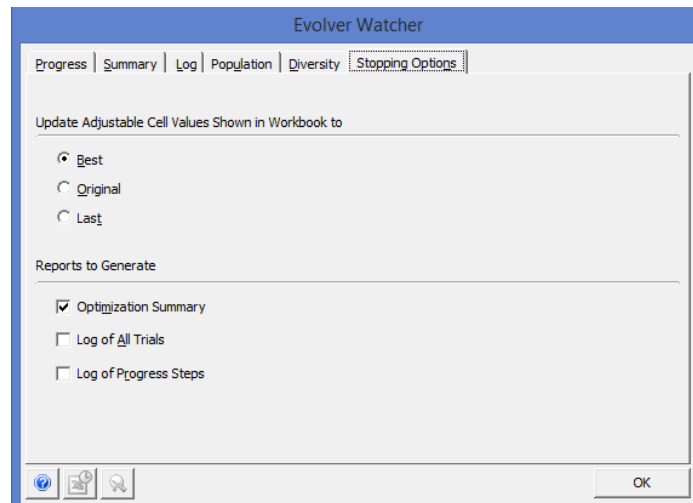
Σχήμα 5.13: Παράθυρο προόδου της επιλογής Start του λογισμικού Evolver

Μετά την ικανοποίηση κάποιας από τις συνθήκες τερματισμού, μπορούν να εμφανιστούν τρεις καρτέλες αναφορών αποτελεσμάτων στο Excel ανάλογα με το ποιος έχει επιλέξει να εμφανιστούν ο χρήστης σε ένα παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται με την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης (Evolver Watcher-καρτέλα Stopping Options) (σχήμα 5.14). Αναφέρεται ότι το παράθυρο αυτό δίνει, επίσης, τη δυνατότητα στο χρήστη να διαλέξει ποια λύση θα κρατήσει (βέλτιστη, αρχική ή τελική).

Οι καρτέλες αναφορών (Reports) που θα εμφανιστούν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαδοχικών βελτιστοποιήσεων και είναι οι εξής:

- ✓ Optimization Summary: αποτελεί μια συνοπτική έκθεση βελτιστοποίησης με πληροφορίες, όπως η ώρα και η ημερομηνία της διαδρομής, οι ρυθμίσεις βελτιστοποίησης που ορίστηκαν, η τιμή του κελιού προσδιορισμού και οι τιμές όλων των ρυθμιζόμενων κελιών (σχήμα 5.15).
- ✓ Log of All Trials: περιέχει πληροφορίες σχετικές με τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκαν (σχήμα 5.16).

- ✓ Log of Progress Steps: περιλαμβάνει τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών που βελτίωσαν το αποτέλεσμα στο κελί προσδιορισμού (σχήμα 5.17).



Σχήμα 5.14: Παράθυρο Evolver Watcher (Καρτέλα Stopping Options)

Evolver: Optimization Summary		
Performed By: Test		
Date: Monday, February 16, 2009 2:34:24 PM		
Model: library.xls		
Goal		
Cell to Optimize	Sheet1!\$G\$11	
Type of Goal	Maximum	
Results		
Valid Trials	6291	
Total Trials	26249	
Original Value	\$2,164,545	
+ soft constraint penalties	\$0	
= result	\$2,164,545	
Best Value Found	\$3,645,767	
+ soft constraint penalties	\$0	
= result	\$3,645,767	
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		
Original	20,405	
Best	13,403	
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	1,728	

Σχήμα 5.15: Καρτέλα Optimization Summary του λογισμικού Evolver

Trial	Elapsed Time	Result	Adjustable Cells						Hard Constraints		
			B4	C4	D4	E4	F4	G4	Acceptable High Fiber to Low-Calorie Ratio	Acceptable S-Grain to Low-Calorie Bread Ratio	Acceptable Total Working Hours
1	0:00:00	\$2,184,546	20,426	50,144	38,968	1,980	2,495	3,001	Met	Met	Met
2	0:00:02	\$2,186,829	20,426	50,144	38,968	1,980	2,611	3,001	Met	Met	Met
3	0:00:02	\$3,377,437	20,426	50,144	38,968	1,980	69,878	3,001	Met	Met	Met
4	0:00:02	N/A	20,426	50,144	38,968	66,779	2,495	3,001	Met	Met	Not Met
5	0:00:02	\$3,379,267	20,426	50,144	38,968	8,480	63,140	3,001	Met	Met	Met
6	0:00:02	\$2,550,488	20,426	50,144	38,409	1,980	2,495	3,001	Met	Met	Met
7	0:00:02	N/A	47,118	50,144	38,968	1,980	2,495	3,001	Not Met	Not Met	Met
8	0:00:02	\$3,324,570	23,074	50,144	38,968	7,812	57,075	3,001	Met	Met	Met
9	0:00:02	\$3,504,683	20,426	50,144	38,968	1,980	76,947	3,001	Met	Met	Met
10	0:00:02	\$1,970,540	20,426	38,733	38,968	1,980	2,495	3,001	Met	Met	Met

Σχήμα 5.16: Καρτέλα Log of All Trials του λογισμικού Evolver

Trial	Elapsed Time	Result	Adjustable Cells						Hard Constraints		
			B4	C4	D4	E4	F4	G4	Acceptable High Fiber to Low-Calorie Ratio	Acceptable S-Grain to Low-Calorie Bread Ratio	Acceptable Total Working Hours
1	0:00:00	\$2,184,546	20,426	50,144	38,968	1,980	2,495	3,001	Met	Met	Met
2	0:00:02	\$2,186,829	20,426	50,144	38,968	1,980	2,611	3,001	Met	Met	Met
3	0:00:02	\$3,377,437	20,426	50,144	38,968	1,980	69,878	3,001	Met	Met	Met
5	0:00:02	\$3,379,267	20,426	50,144	38,968	8,480	63,140	3,001	Met	Met	Met
8	0:00:02	\$3,504,683	20,426	50,144	38,968	1,980	76,947	3,001	Met	Met	Met
18	0:00:02	\$3,536,348	20,426	50,144	38,968	20,700	69,502	3,001	Met	Met	Met
20	0:00:02	\$3,709,085	20,426	50,144	38,968	1,980	68,302	3,001	Met	Met	Met
36	0:00:02	\$3,750,740	20,426	52,144	38,968	1,980	90,818	3,001	Met	Met	Met
42	0:00:02	\$3,835,077	20,426	54,180	38,968	1,980	91,519	3,001	Met	Met	Met
51	0:00:02	\$3,846,367	20,882	54,130	38,968	1,980	91,583	3,001	Met	Met	Met

Σχήμα 5.17: Καρτέλα Log of Progress Steps του λογισμικού Evolver

Όσον αφορά την τρίτη βασική επιλογή **Tools** της καρτέλας του Evolver, με την εντολή *Reports* δίνεται η δυνατότητα να παρουσιαστεί κάποια από τις καρτέλες αναφορών αποτελεσμάτων που έχουν αποθηκευτεί για ένα μοντέλο, ενώ η εντολή *Utilities* εμφανίζει ένα παράθυρο ρυθμίσεων εφαρμογών του προγράμματος, όπου μπορούν να οριστούν προεπιλεγμένες τιμές για τις παραμέτρους του αλγορίθμου, κάθε φορά που το Evolver ξεκινάει μια διαδικασία βελτιστοποίησης. Τέλος, με την εντολή *Help* παρουσιάζεται ένα χρήσιμο εγχειρίδιο του λογισμικού Evolver, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες λεπτομέρειες της χρήσης του.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται η εφαρμογή της τεχνικής επίλυσης στο πρόβλημα μελέτης που διατυπώθηκε στο κεφάλαιο 4. Αρχικά, γίνεται μια μικρή εισαγωγή, ώστε να υπενθυμισθούν τα δεδομένα και οι διαδικασίες που χρειάζονται για την επίλυση του προβλήματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η εφαρμογή με τη χρήση του λογισμικού Eolver και γίνεται η εισαγωγή των παραμέτρων του Γενετικού Αλγορίθμου. Έπειτα, εμφανίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε αναλυτικούς πίνακες και διαγράμματα και, τέλος, τα αποτελέσματα αυτά σχολιάζονται και αναλύονται.

6.1. Υπόβαθρο Εφαρμογής

Η τεχνική επίλυσης που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο εφαρμόζεται για τη χωροθέτηση των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων σε ένα τμήμα της Αλεξανδρούπολης (κεφάλαιο 4). Πριν τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, ήταν αναγκαίο να συλλεχθούν τα απαραίτητα δεδομένα, τα οποία έχουν αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 4.4 και έχουν προκύψει, κυρίως, από εύλογες παραδοχές και απλουστεύσεις για τις ανάγκες του συγκεκριμένου προβλήματος. Επαναλαμβάνεται, στο σημείο αυτό, ότι τα δεδομένα αυτά αφορούν:

- ✓ τους φόρτους (ζήτηση) σε κάθε κατεύθυνση κάθε συνδέσμου του εξεταζόμενου οδικού δικτύου της περιοχής εφαρμογής,
- ✓ τον τύπο της συνάρτησης του κόστους χωροθέτησης των κινητών μονάδων,
- ✓ τον τύπο της συνάρτησης του χώρου που θα απαιτηθεί για χωροθέτηση,
- ✓ τον τύπο της συνάρτησης του αριθμού των εξυπηρετούμενων οχημάτων,
- ✓ το διαθέσιμο χώρο για χωροθέτηση σε κάθε θέση,
- ✓ το ποσοστό εξυπηρέτησης των οχημάτων σε κάθε θέση,
- ✓ το συνολικά διαθέσιμο αριθμό κινητών μονάδων προς χωροθέτηση,
- ✓ το μέγιστο αριθμό κινητών μονάδων σε κάθε θέση,
- ✓ τον ελάχιστο αριθμό θέσεων προς χωροθέτηση,
- ✓ τα βάρη των δύο όρων της αντικειμενικής συνάρτησης.

Μετά τη συλλογή δεδομένων, ακολούθησε η κατάλληλη διαμόρφωση του προβλήματος στο Excel και, έπειτα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Eolver με

σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Η βέλτιστη λύση θα είναι αυτή που μεγιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 4.3, δηλαδή θα ικανοποιεί τον διπλό στόχο του προβλήματος: τον εντοπισμό των θέσεων από όπου διέρχεται ο μεγαλύτερος αριθμός των οχημάτων και, ταυτόχρονα, την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εξυπηρέτησης των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων.

Επιπλέον, είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι, πριν τη διαδικασία βελτιστοποίησης, πραγματοποιήθηκε κανονικοποίηση (normalization) των δύο όρων της αντικειμενικής συνάρτησης, με βάση δύο μέγιστες τιμές. Η κανονικοποίηση αυτή επιλέχθηκε να γίνει, εφόσον οι δύο όροι της αντικειμενικής συνάρτησης εκφράζονται σε διαφορετικές μονάδες και σε άλλες τάξεις μεγέθους. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη αναγωγής αυτών των παραγόντων σε μια κοινή βάση, ώστε να ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$ και να διατηρείται μια ομοιομορφία. Οι μέγιστες τιμές, με τις οποίες πραγματοποιήθηκε η κανονικοποίηση, είναι ο συνολικός φόρτος όλου του δικτύου για τον πρώτο όρο της αντικειμενικής συνάρτησης και το συνολικό κόστος, εάν σε όλες τις θέσεις τοποθετούνταν 2 κινητές μονάδες ελέγχου, για τον δεύτερο όρο.

Ο καθορισμός των παραμέτρων για το πρόγραμμα επίλυσης πραγματοποιήθηκε με βάση τις οδηγίες του κεφαλαίου 5 και, παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω, ακολουθούμενος από τα αποτελέσματα των διαδικασιών.

6.2. Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου

Προκειμένου να επιλυθεί το εξεταζόμενο πρόβλημα χωροθέτησης με τη χρήση Γενετικών Αλγορίθμων, κρίνεται απαραίτητο να καθοριστούν οι κατάλληλες παράμετροι στο λογισμικό Evolver. Οι παράμετροι αυτές είναι, κυρίως, το μέγεθος του πληθυσμού, ο βαθμός διασταύρωσης και ο βαθμός μετάλλαξης. Η βέλτιστη λύση θα αποφασιστεί μετά από αρκετές δοκιμές και συνδυασμούς τιμών των παραπάνω παραμέτρων.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, το μέγεθος του πληθυσμού (population size) λαμβάνει τις τιμές 30, 40, 50 και 60. Οι τιμές αυτές βρίσκονται εντός των συνηθισμένων τιμών του πληθυσμού, όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 5.5, δηλαδή μεταξύ 30 και 100. Παρόλο που το βέλτιστο μέγεθος πληθυσμού είναι ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα, η κοινή άποψη είναι να χρησιμοποιείται ένα μέγεθος

πληθυσμού ανάλογο με το μέγεθος του προβλήματος (μεγαλύτερος πληθυσμός για μεγάλα προβλήματα). Θεωρείται, ακόμη, ότι ένας πληθυσμός μεγαλύτερος από 100 οργανισμούς χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να βρει μια λύση αλλά είναι περισσότερο πιθανό να βρει μια -ευρέος φάσματος- απάντηση, λόγω της ποικιλίας των γονιδίων που διαθέτει.

Για το βαθμό διασταύρωσης (crossover rate) επιλέγονται οι τιμές 0,2, 0,4 και 0,6 για κάθε τιμή του πληθυσμού. Οι επιτρεπόμενες τιμές για το βαθμό διασταύρωσης κυμαίνονται, όπως έχει αναφερθεί, μεταξύ 0,01 και 1, και είναι καθοριστικής σημασίας, εφόσον ο βαθμός αυτός δηλώνει το ποσοστό των χαρακτηριστικών που δέχεται ένας απόγονος από κάθε γονέα. Για παράδειγμα, ένας βαθμός διασταύρωσης 0,2 σημαίνει ότι σχεδόν το 20% των χαρακτηριστικών του οργανισμού ενός απογόνου προέρχεται από τον πρώτο γονέα, ενώ το 80% προκύπτει από το δεύτερο γονέα.

Αντίστοιχα, ο βαθμός μετάλλαξης (mutation rate) λαμβάνει διαδοχικά τις τιμές 0,05, 0,1 και 0,15, με επιτρεπόμενες τιμές από 0,0 έως 1,0. Αναφέρεται ότι ένας υψηλός βαθμός μετάλλαξης σημαίνει ότι περισσότερες μεταλλάξεις ή τυχαίες «τιμές γονιδίων» θα εισαχθούν στον πληθυσμό. Επειδή η μετάλλαξη συμβαίνει μετά τη διασταύρωση, θέτοντας το βαθμό μετάλλαξης ίσο με 1 για παράδειγμα, θα εμποδίσει το αποτέλεσμα της διασταύρωσης και το Evolver θα παράγει συνεχώς εντελώς τυχαία σενάρια. Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι προτιμώνται μικρότερες τιμές στο βαθμό μετάλλαξης, προκειμένου η τυχειότητα να μην επηρεάσει σημαντικά την κάθε παραγόμενη λύση.

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος εκτελείται συνολικά 180 φορές και για κάθε συνδυασμό παραμέτρων (36 συνολικά συνδυασμοί) λαμβάνονται 5 τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, με σκοπό τον υπολογισμό του μέτρου καταλληλότητας. Σημειώνεται, επιπλέον, ότι η μέθοδος επίλυσης που χρησιμοποιείται είναι η Recipe solving method, η οποία αποτελεί την πιο απλή και δημοφιλή μέθοδο, ενώ παράλληλα παρέχει τη δυνατότητα στα σύνολα των μεταβλητών του προβλήματος να μπορούν να μεταβάλλονται ανεξάρτητα μεταξύ τους, ώστε να παραχθεί ο καλύτερος συνδυασμός.

Ακόμη, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ως συνθήκη τερματισμού στην καρτέλα Runtime, επιλέγεται η επιλογή Time. Δηλαδή, ο αλγόριθμος σταματάει να εκτελείται μετά το πέρας ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος που ορίζεται.

Ο ορισμός αυτού του χρονικού διαστήματος έγινε μετά από παρατήρηση των διάφορων μεταβολών της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή μετά από παρατήρηση της ανταπόκρισης του Γενετικού Αλγορίθμου στη διαδικασία βελτιστοποίησης με το πέρασμα του χρόνου. Επισημαίνεται, στο σημείο αυτό, ότι η συνθήκη τερματισμού κρίθηκε, κυρίως, από το παράθυρο Evolver Progress, στο οποίο, αν επιλεγθεί η επιλογή Evolver Watcher, εμφανίζονται τα διαγράμματα προόδου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν τη σύγκλιση του αλγορίθμου σε κάποιο βέλτιστο και αξίζει να αναφερθεί ότι όταν η συνάρτηση παρατηρείται να είναι παράλληλη στον άξονα x και σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα, έχει βρεθεί ουσιαστικά η βέλτιστη λύση και δε θα υπάρξει περαιτέρω βελτίωση.

Πριν από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητο να αναφερθεί, επιπρόσθετα, ότι οι περιορισμοί του προβλήματος μελέτης ορίζονται ως hard, εκτός από τους περιορισμούς που σχετίζονται με τα εξυπηρετούμενα οχήματα και τον ελάχιστο αριθμό θέσεων προς χωροθέτηση, οι οποίοι ορίζονται ως soft, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία. Η συνάρτηση ποινής που χρησιμοποιείται είναι η εξής: $100 * (\text{EXP}(\text{DEVIATION}/100) - 1)$.

6.3. Αποτελέσματα

Μετά τον καθορισμό των απαραίτητων παραμέτρων, λοιπόν, ξεκινάει η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Στον παρακάτω πίνακα 6., εμφανίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών της διαδικασίας για κάθε συνδυασμό παραμέτρων. Πιο αναλυτικά, οι πρώτες στήλες του πίνακα αντιστοιχούν στις τιμές των παραμέτρων που επιλέγονται, ενώ, έπειτα, εμφανίζεται η τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε ένα συνδυασμό σε κάθε δοκιμή, ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση για κάθε συνδυασμό, ο μέσος όρος αυτών των τιμών για κάθε συνδυασμό και, τέλος, η τυπική απόκλιση του συνόλου των δοκιμών που έγιναν για κάθε συνδυασμό. Είναι, ακόμη, απαραίτητο να αναφερθεί ότι οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης στον παρακάτω πίνακα είναι οι τιμές που προέκυψαν χωρίς τη συμπερίληψη των συναρτήσεων ποινής.

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα διαφορετικών συνδυασμών παραμέτρων του Γενετικού Αλγορίθμου (λογισμικό Evolver)

ID	Πληθυσμός (Population)	Βαθμός Διασταύρωσης (crossover rate)	Βαθμός Μετάλλαξης (mutation rate)	Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης (fitness)	Υπολογιστικοί χρόνοι (running time)	Μέσος Όρος (average fitness)	Τυπική Απόκλιση (standard deviation)
1A	30	0,2	0,05	0,068	14:34	0,0642	0,003563706
B				0,067	11:07		
C				0,06	14:40		
D				0,065	14:27		
E				0,061	14:28		
2A	30	0,2	0,1	0,035	6:03	0,0368	0,003193744
B				0,039	8:40		
C				0,039	13:59		
D				0,032	1:13		
E				0,039	6:58		
3A	30	0,2	0,15	0,031	6:33	0,0332	0,00248998
B				0,033	11:15		
C				0,037	9:12		
D				0,031	5:58		
E				0,034	0:49		
4A	30	0,4	0,05	0,06	13:57	0,067	0,005958188
B				0,065	14:00		
C				0,065	14:51		
D				0,069	14:56		
E				0,076	10:34		
5A	30	0,4	0,1	0,047	6:40	0,0436	0,003507136
B				0,044	14:51		
C				0,04	3:45		
D				0,04	5:44		
E				0,047	10:02		
6A	30	0,4	0,15	0,043	2:07	0,0442	0,002949576
B				0,047	6:20		
C				0,04	2:46		
D				0,047	9:11		
E				0,044	8:06		
7A	30	0,6	0,05	0,069	14:05	0,0652	0,003898718
B				0,065	13:53		
C				0,06	14:32		
D				0,069	11:42		
E				0,063	14:40		
8A	30	0,6	0,1	0,046	11:56	0,0444	0,001341641
B				0,045	7:07		
C				0,045	1:00		
D				0,043	13:46		
E				0,043	5:17		
9A	30	0,6	0,15	0,044	7:18	0,0444	0,003209361
B				0,049	5:54		
C				0,04	6:52		
D				0,045	14:53		
E				0,044	5:38		

ID	Πληθυσμός (Population)	Βαθμός Διασταύρωσης (crossover rate)	Βαθμός Μετάλλαξης (mutation rate)	Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης (fitness)	Υπολογιστικοί χρόνοι (running time)	Μέσος Όρος (average fitness)	Τυπική Απόκλιση (standard deviation)
1A	40	0,2	0,05	0,06	14:31	0,0616	0,002302173
B				0,06	14:13		
C				0,06	13:29		
D				0,063	14:06		
E				0,065	14:39		
2A	40	0,2	0,1	0,041	10:21	0,042	0,002
B				0,043	11:56		
C				0,041	4:51		
D				0,04	9:02		
E				0,045	8:31		
3A	40	0,2	0,15	0,044	9:56	0,0438	0,00334664
B				0,041	10:59		
C				0,046	11:38		
D				0,048	9:15		
E				0,04	10:05		
4A	40	0,4	0,05	0,066	13:24	0,064	0,003162278
B				0,06	14:44		
C				0,062	14:52		
D				0,064	14:42		
E				0,068	12:56		
5A	40	0,4	0,1	0,044	8:22	0,0442	0,00303315
B				0,043	9:23		
C				0,04	2:46		
D				0,048	8:15		
E				0,046	3:49		
6A	40	0,4	0,15	0,04	2:55	0,0424	0,002607681
B				0,046	9:00		
C				0,044	4:22		
D				0,042	8:54		
E				0,04	11:18		
7A	40	0,6	0,05	0,071	10:12	0,0702	0,000447214
B				0,07	13:31		
C				0,07	11:10		
D				0,07	12:52		
E				0,07	14:04		
8A	40	0,6	0,1	0,049	9:44	0,0456	0,002607681
B				0,047	9:08		
C				0,042	7:01		
D				0,045	8:05		
E				0,045	12:24		
9A	40	0,6	0,15	0,05	7:38	0,0506	0,000894427
B				0,05	11:12		
C				0,05	9:17		
D				0,052	10:22		
E				0,051	9:05		

ID	Πληθυσμός (Population)	Βαθμός Διασταύρωσης (crossover rate)	Βαθμός Μετάλλαξης (mutation rate)	Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης (fitness)	Υπολογιστικοί χρόνοι (running time)	Μέσος Όρος (average fitness)	Τυπική Απόκλιση (standard deviation)
1A	50	0,2	0,05	0,052	10:56	0,0542	0,004024922
B				0,059	13:29		
C				0,058	9:40		
D				0,052	12:50		
E				0,05	14:37		
2A	50	0,2	0,1	0,045	3:13	0,045	0,001224745
B				0,043	13:56		
C				0,045	11:18		
D				0,046	7:42		
E				0,046	12:33		
3A	50	0,2	0,15	0,047	14:14	0,0442	0,002683282
B				0,044	13:41		
C				0,04	10:23		
D				0,044	11:28		
E				0,046	9:36		
4A	50	0,4	0,05	0,053	14:04	0,0542	0,001788854
B				0,054	12:20		
C				0,056	13:50		
D				0,052	12:15		
E				0,056	11:44		
5A	50	0,4	0,1	0,04	7:17	0,0426	0,003714835
B				0,04	11:07		
C				0,049	11:13		
D				0,042	9:26		
E				0,042	9:28		
6A	50	0,4	0,15	0,049	2:57	0,0458	0,002387467
B				0,043	10:13		
C				0,044	12:48		
D				0,046	10:48		
E				0,047	3:46		
7A	50	0,6	0,05	0,056	13:12	0,0546	0,003130495
B				0,05	13:52		
C				0,058	14:47		
D				0,053	12:18		
E				0,056	13:25		
8A	50	0,6	0,1	0,041	14:47	0,0436	0,003361547
B				0,048	14:18		
C				0,043	11:41		
D				0,04	5:47		
E				0,046	4:47		
9A	50	0,6	0,15	0,04	14:42	0,042	0,002
B				0,044	4:08		
C				0,04	14:16		
D				0,042	10:29		
E				0,044	12:07		

ID	Πληθυσμός (Population)	Βαθμός Διασταύρωσης (crossover rate)	Βαθμός Μετάλλαξης (mutation rate)	Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης (fitness)	Υπολογιστικοί χρόνοι (running time)	Μέσος Όρος (average fitness)	Τυπική Απόκλιση (standard deviation)
1A	60	0,2	0,05	0,061	14:43	0,0624	0,002701851
B				0,06	12:34		
C				0,062	14:02		
D				0,062	14:32		
E				0,067	14:22		
2A	60	0,2	0,1	0,044	10:48	0,043	0,002828427
B				0,046	11:24		
C				0,04	14:26		
D				0,04	14:26		
E				0,045	13:19		
3A	60	0,2	0,15	0,045	14:14	0,045	0,001581139
B				0,046	14:46		
C				0,044	13:10		
D				0,043	4:43		
E				0,047	13:50		
4A	60	0,4	0,05	0,056	10:03	0,0566	0,00250998
B				0,053	14:12		
C				0,057	13:56		
D				0,057	14:07		
E				0,06	13:38		
5A	60	0,4	0,1	0,045	14:50	0,0444	0,003361547
B				0,047	4:35		
C				0,042	6:12		
D				0,048	11:22		
E				0,04	12:54		
6A	60	0,4	0,15	0,03	7:30	0,034	0,003082207
B				0,033	5:58		
C				0,036	4:26		
D				0,038	5:34		
E				0,033	14:51		
7A	60	0,6	0,05	0,061	14:49	0,0602	0,000447214
B				0,06	14:06		
C				0,06	9:39		
D				0,06	12:12		
E				0,06	11:22		
8A	60	0,6	0,1	0,05	14:27	0,0516	0,002607681
B				0,056	10:50		
C				0,052	9:04		
D				0,05	13:14		
E				0,05	9:26		
9A	60	0,6	0,15	0,041	13:51	0,043	0,00254951
B				0,046	12:51		
C				0,043	13:20		
D				0,04	13:25		
E				0,045	14:34		

Όπως παρατηρείται στον παραπάνω πίνακα 6.1, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζει διακυμάνσεις σε διαφορετικές επαναλήψεις. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα είναι αρκετά διαφορετικά για διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων, με συναρτήσεις καταλληλότητας που διαφέρουν μέχρι και 0,046 μονάδες. Ακόμα και με τον ίδιο συνδυασμό, προκύπτουν διαφορετικές τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, κατά τη διάρκεια των δοκιμών, με τη μέγιστη διαφορά να φτάνει τις 0,016 μονάδες. Η μέγιστη αυτή διαφορά παρουσιάζεται στο συνδυασμό με πληθυσμό: 30, βαθμό διασταύρωσης: 0,4 και βαθμό μετάλλαξης: 0,05.

Ακόμη, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ο βαθμός μετάλλαξης ασκεί ιδιαίτερα καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία βελτιστοποίησης και με τιμή 0,05 δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα σε κάθε πληθυσμό. Οι βαθμοί μετάλλαξης με τιμές 0,1 και 0,15 δίνουν λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα και οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, που προκύπτουν από αυτούς, παρουσιάζουν, γενικά, σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους. Αναφορικά με το βαθμό διασταύρωσης, παρατηρείται ότι η τιμή 0,6 οδηγεί σε καλύτερες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Τέλος, ο πληθυσμός που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα είναι ο πληθυσμός με τιμή 40.

Οι υπολογιστικοί χρόνοι της διαδικασίας κυμαίνονται από περίπου 1 έως 15 λεπτά, ενώ ο συνδυασμός που δίνει κατά μέσο όρο την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης συμπεραίνεται ότι είναι ο ακόλουθος, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα 6.2:

- Πληθυσμός: 40
- Βαθμός διασταύρωσης: 0,6
- Βαθμός μετάλλαξης: 0,05

Πίνακας 6.2: Βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων και τιμές αντικειμενικής συνάρτησης

Πληθυσμός (Population)	Βαθμός Διασταύρωσης (crossover rate)	Βαθμός Μετάλλαξης (mutation rate)	Τιμές αντικειμενικής συνάρτησης (fitness)	Υπολογιστικοί χρόνοι (running time)	Μέσος Όρος (average fitness)	Τυπική Απόκλιση (standard deviation)
40	0,6	0,05	0,071	10:12	0,0702	0,000447214
			0,07	13:31		
			0,07	11:10		
			0,07	12:52		
			0,07	14:04		

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένα διαγράμματα –τα σχήματα 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 και 6.5- στα οποία απεικονίζονται οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης (χωρίς τη συμπερίληψη των συναρτήσεων ποινής) σε συνάρτηση με το χρόνο για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων από τον προηγούμενο πίνακα.



Σχήμα 6.1: Μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ανάλογα με το χρόνο για το βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων: Πληθ: 40, Βαθμ. Διαστ.: 0,6, Βαθμ. Μετάλ.: 0,05



Σχήμα 6.2: Μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ανάλογα με το χρόνο για συνδυασμό παραμέτρων: Πληθ.: 30, Βαθμ. Διαστ: 0,2, Βαθμ. Μετάλ.: 0,05



Σχήμα 6.3: Μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ανάλογα με το χρόνο για συνδυασμό παραμέτρων: Πληθ.: 30, Βαθμ. Διαστ.: 0,6, Βαθμ. Μετάλ.: 0,05



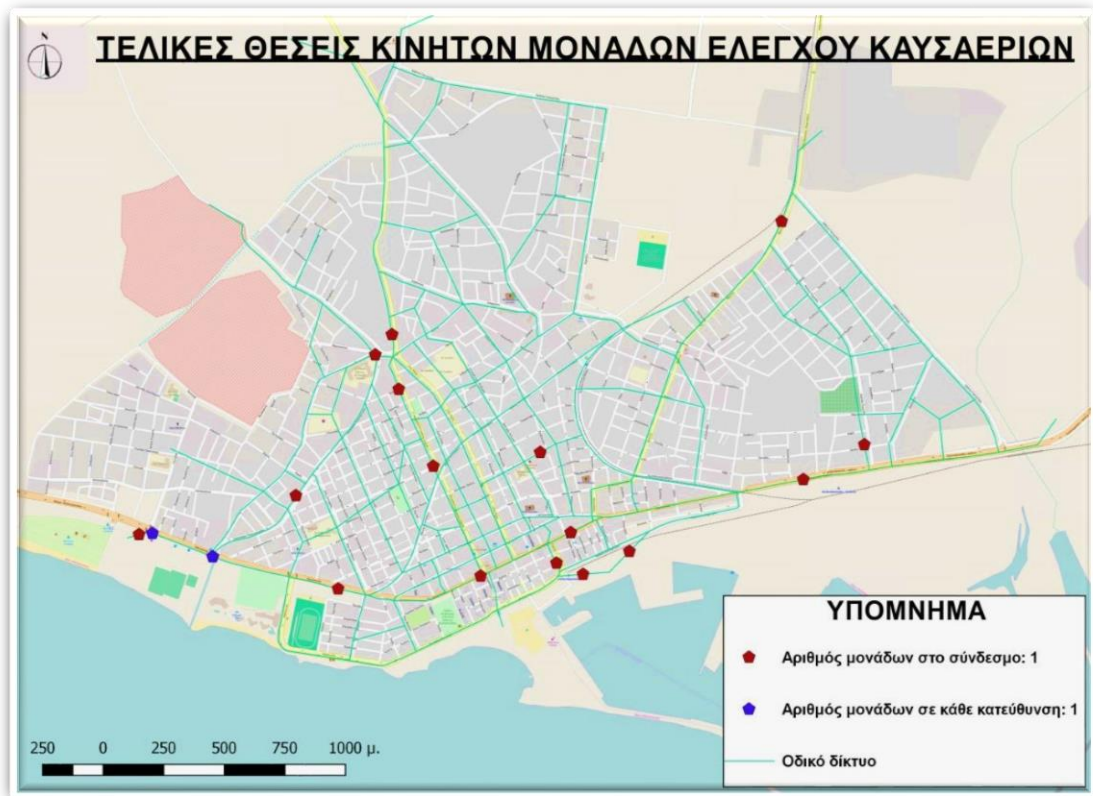
Σχήμα 6.4: Μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ανάλογα με το χρόνο για συνδυασμό παραμέτρων: Πληθ.: 40, Βαθμ. Διαστ.: 0,6, Βαθμ. Μετάλ.: 0,15



Σχήμα 6.5: Μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ανάλογα με το χρόνο για συνδυασμό παραμέτρων: Πληθ.: 60, Βαθμ. Διαστ.: 0,6, Βαθμ. Μετάλ.: 0,1

Από τα πέντε παραπάνω σχήματα συμπεραίνεται ότι, στην πλειοψηφία των συνδυασμών, μετά το 8^ο περίπου λεπτό η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται βέλτιστη και παραμένει σταθερή, έπειτα από κάποιες διακυμάνσεις. Πιο συγκεκριμένα, καθώς περνούν τα λεπτά και μέχρι πριν το 8^ο περίπου λεπτό, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αυξάνεται συνεχώς, με εξαίρεση κάποιες αυξομειώσεις που υφίσταται ορισμένες χρονικές στιγμές. Ειδικότερα, στα πρώτα δευτερόλεπτα η τιμή της συνάρτησης αυξάνεται κατακόρυφα από περίπου -2 μονάδες σε 0 και, έπειτα, πιο αργά ανά περίπου 0,01 μονάδες. Μετά το 8^ο, όμως, λεπτό η συνάρτηση γίνεται παράλληλη στον άξονα x, δηλαδή η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται βέλτιστη και σταθεροποιείται κατά τη διάρκεια όλων των επόμενων λεπτών. Τέλος, αναφέρεται πως από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι, ανάλογα με το συνδυασμό παραμέτρων που επιλέγεται, η μεταβολή των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης ενδέχεται να είναι, γενικά, πιο απότομη ή πιο ήπια με το πέρασμα των λεπτών.

Επομένως, οι τελικές θέσεις των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης που μελετήθηκε προκύπτουν από το συνδυασμό παραμέτρων που δίνει τη βέλτιστη λύση και απεικονίζονται λεπτομερώς στον παρακάτω χάρτη 6.1.



Χάρτης 6.1: Τελικές θέσεις των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων σε τμήμα της Αλεξανδρούπολης

[Πηγή: Ιδία επεξεργασία σε περιβάλλον QGIS]

Όπως απεικονίζεται στον παραπάνω χάρτη 6.1, απαιτήθηκε η χωροθέτηση και των 20 διαθέσιμων κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων. Ενώ, αρχικά, είχε γίνει η υπόθεση ότι οι κινητές μονάδες μπορεί να φτάσουν τις δύο σε αριθμό σε μία κατεύθυνση ενός συνδέσμου (υποκεφάλαιο 4.4), κρίνοντας από τα αποτελέσματα, δε χωροθετείται σε καμία κατεύθυνση πάνω από μία κινητή μονάδα. Επίσης, αναφέρεται ότι προέκυψε σε δύο μόνο θέσεις (σημεία χρώματος μπλε) η τοποθέτηση μιας κινητής μονάδας σε κάθε κατεύθυνση των αντίστοιχων συνδέσμων.

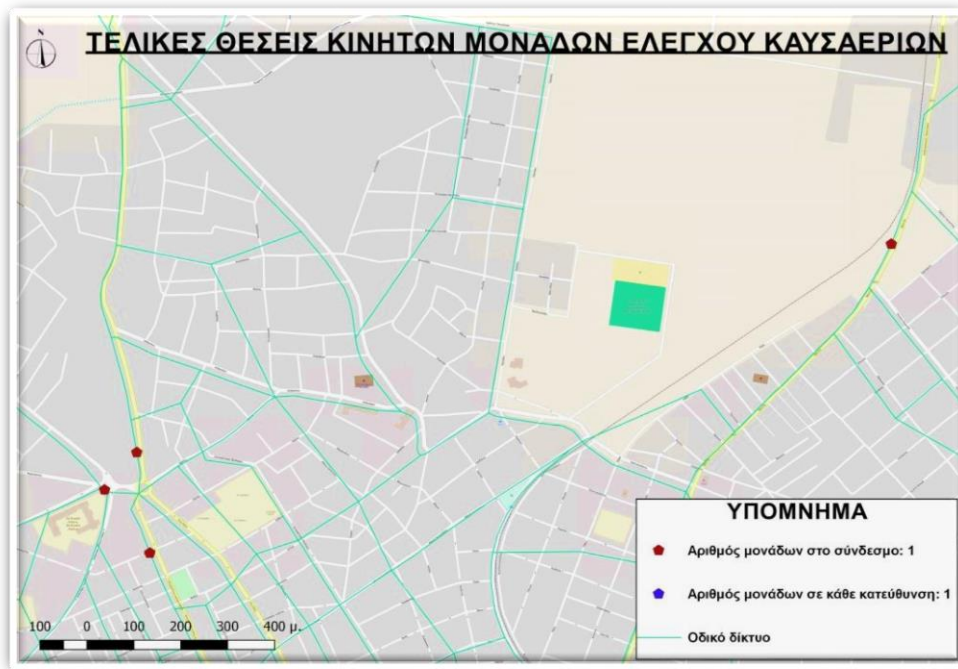
Για λόγους καλύτερης ευκρίνειας, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τμηματικά στους παρακάτω χάρτες 6.2, 6.3, 6.4, κλίμακας 1:9000, που δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον QGIS.



Χάρτης 6.2: Τελικές θέσεις των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων σε τμήμα της Αλεξανδρούπολης (α)



Χάρτης 6.3: Τελικές θέσεις των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων σε τμήμα της Αλεξανδρούπολης (β)



Χάρτης 6.4: Τελικές θέσεις των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων σε τμήμα της Αλεξανδρούπολης (γ)

Συμπερασματικά, οι απαιτούμενες κινητές μονάδες ελέγχου καυσαερίων χωροθετούνται στο τμήμα του οδικού δικτύου της Αλεξανδρούπολης που μελετήθηκε ως εξής:

- Μία κινητή μονάδα στη δεξιά κατεύθυνση της λεωφόρου Δημοκρατίας στο ύψος της συμβολής της με την οδό Χαλκηδόνας.
- Μία κινητή μονάδα στη δεξιά κατεύθυνση της οδού Τζαβέλλα.
- Μία κινητή μονάδα στην αριστερή κατεύθυνση της οδού Άβαντος στο τμήμα μεταξύ των οδών Αγγέλου Ποιμενίδη και Χρήστου Γιαννούτσου.
- Μία κινητή μονάδα στη δεξιά κατεύθυνση της οδού Αγίου Δημητρίου στο ύψος της συμβολής της με τις οδούς Δήμητρας και Αλεξάνδρου Παπαναστασίου.
- Μία κινητή μονάδα στη δεξιά κατεύθυνση της οδού Καβύρη στο τμήμα μεταξύ των οδών Βελισσαρίου και Φειδίου.
- Μία κινητή μονάδα στην αριστερή κατεύθυνση της οδού Ηροδότου στο ύψος της συμβολής της με την οδό Θράκης.
- Μία κινητή μονάδα στη δεξιά κατεύθυνση της λεωφόρου Δημοκρατίας στο ύψος του Δημαρχείου της Αλεξανδρούπολης.

- Μία κινητή μονάδα στην αριστερή κατεύθυνση της λεωφόρου Δημοκρατίας στο τμήμα μεταξύ των οδών Διονύσιου Σολωμού και Νικομήδειας.
- Μία κινητή μονάδα στην αριστερή και μία στη δεξιά κατεύθυνση της λεωφόρου Δημοκρατίας στο ύψος της συμβολής της με τη λεωφόρο Μάκρης.
- Μία κινητή μονάδα στην αριστερή και μία στη δεξιά κατεύθυνση της λεωφόρου Δημοκρατίας στο τμήμα μεταξύ των οδών Αλεξάνδρου Παπαναστασίου και Δήμητρας.
- Μία κινητή μονάδα στην αριστερή κατεύθυνση της οδού Αγγέλου Ποιμενίδη στο τμήμα μεταξύ της οδού Μακαρίου και της λεωφόρου Δημοκρατίας.
- Μία κινητή μονάδα στην αριστερή κατεύθυνση της λεωφόρου Δημοκρατίας στο τμήμα μεταξύ των οδών Αίνου και Κων/νου Παλαιολόγου.
- Μία κινητή μονάδα στην αριστερή κατεύθυνση της οδού Ηροδότου στο τμήμα μεταξύ των οδών Θράκης και Σπύρου Λούη.
- Μία κινητή μονάδα στην αριστερή κατεύθυνση της οδού Νέστορος στο τμήμα κάτω από τη λεωφόρο Δημοκρατίας.
- Μία κινητή μονάδα στη δεξιά κατεύθυνση της ανώνυμης οδού που αποτελεί συνέχεια της οδού Τζαβέλλα στο τμήμα κάτω από την οδό Δημ. Καραολή και οδηγεί στο Λιμεναρχείο της Αλεξανδρούπολης.
- Μία κινητή μονάδα στη δεξιά κατεύθυνση της ανώνυμης οδού που αποτελεί συνέχεια της οδού Σουνίου στο τμήμα κάτω από την οδό Δημ. Καραολή και οδηγεί στο Λιμεναρχείο της Αλεξανδρούπολης.
- Μία κινητή μονάδα στην αριστερή κατεύθυνση της οδού Αλεξάνδρου Παπαναστασίου στο τμήμα μεταξύ των οδών Κίρκης και Ήρας.
- Μία κινητή μονάδα στην αριστερή κατεύθυνση της οδού Ανατολικής Θράκης στο τμήμα μεταξύ των οδών Διονύσιου Σολωμού και Ζυμβρακάκη.

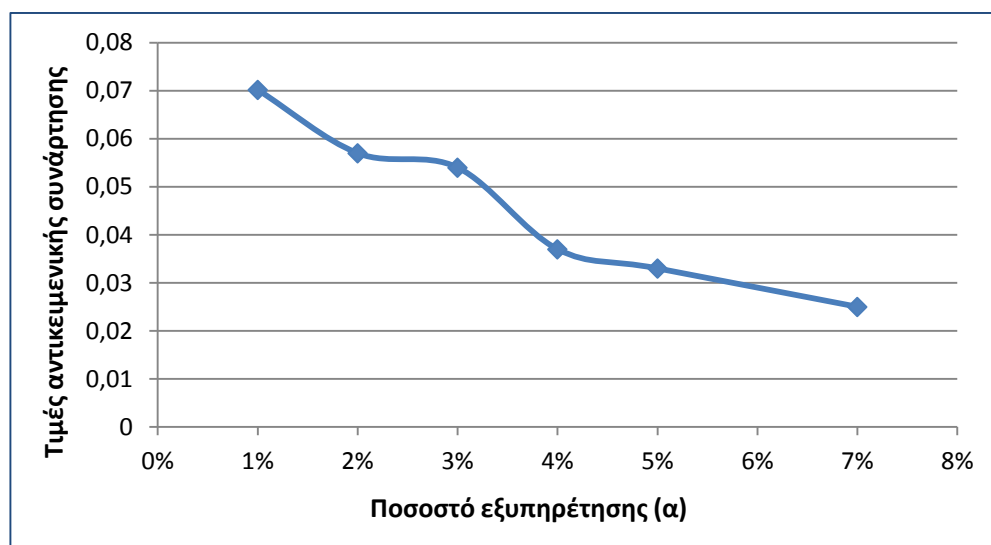
7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας, μεταβάλλοντας ορισμένες παραμέτρους του μοντέλου του προβλήματος, ώστε να γίνει πιο ρεαλιστικό, δεδομένου ότι στην πραγματικότητα οι καταστάσεις μεταβάλλονται λόγω εσωτερικών ή εξωτερικών παραγόντων. Στόχος, λοιπόν, είναι να εκτιμηθεί η επίδραση των μεταβολών των παραμέτρων στη βέλτιστη λύση που βρέθηκε, δηλαδή στην βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Έτσι, για τις ανάγκες του εν λόγω προβλήματος, η μέθοδος της ανάλυσης ευαισθησίας (sensitivity analysis) έγινε για το ποσοστό εξυπηρέτησης των οχημάτων (α), το διαθέσιμο αριθμό κινητών μονάδων (p), τον ελάχιστο αριθμό θέσεων χωροθέτησης (n), καθώς και για τα βάρη των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης (w_1, w_2). Στο πλαίσιο της μεθόδου αυτής, διατηρείται ο συνδυασμός παραμέτρων που έδωσε τη βέλτιστη λύση του προβλήματος στο προηγούμενο κεφάλαιο. Υπενθυμίζεται ότι ο συνδυασμός αυτός είναι: Πληθυσμός: 40, Βαθμός Διασταύρωσης: 0,6, Βαθμός Μετάλλαξης: 0,05 και η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για αυτόν τον συνδυασμό προέκυψε ίση με 0,071 μονάδες.

- Ανάλυση ευαισθησίας ως προς το ποσοστό εξυπηρέτησης (α)

Στην περίπτωση αυτή επιλέχθηκε να δοκιμασθεί να αυξηθεί από 1%, που ήταν η αρχική υπόθεση, σε 2%, 3%, 4%, 5% και 7%. Η επίδραση αυτών των μεταβολών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 7.1.

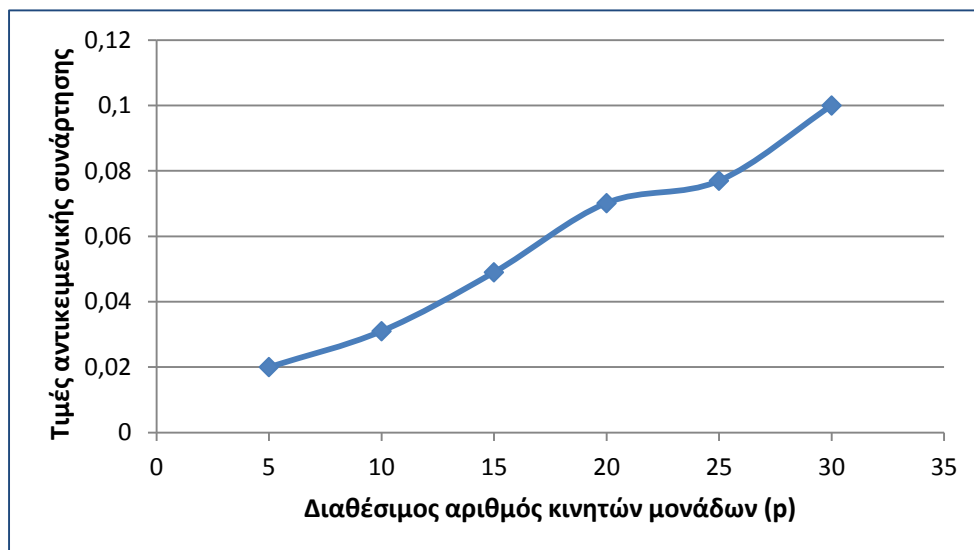


Σχήμα 7.1: Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με το ποσοστό εξυπηρέτησης (α)

Από τη συγκεκριμένη ανάλυση ευαισθησίας προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό εξυπηρέτησης οχημάτων, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μειώνεται σημαντικά, λαμβάνοντας τιμές από την αρχική τιμή που είχε βρεθεί, δηλαδή την τιμή 0,071 για ποσοστό εξυπηρέτησης 1% έως 0,025 για ποσοστό εξυπηρέτησης 7%. Με άλλα λόγια, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι αρκετά ευαίσθητη ως προς το ποσοστό εξυπηρέτησης. Αυτό ήταν αναμενόμενο, διότι το ποσοστό εξυπηρέτησης οχημάτων επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό, κυρίως, το κόστος εξυπηρέτησης. Δηλαδή, όσο αυξάνεται το ποσοστό εξυπηρέτησης, αυξάνεται και το κόστος εξυπηρέτησης, αφού εξυπηρετούνται περισσότερα οχήματα από τις κινητές μονάδες. Έτσι, μεγαλώνει ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης, με άμεση συνέπεια να μειώνεται το συνολικό αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης.

• Ανάλυση ευαισθησίας ως προς το διαθέσιμο αριθμό κινητών μονάδων (p)

Οι εναλλακτικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας ως προς το διαθέσιμο αριθμό των κινητών μονάδων είναι, από 20 μονάδες που είχε τεθεί, σε 5, 10, 15, 25 και 30. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μεταβάλλεται, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 7.2.



Σχήμα 7.2: Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με το διαθέσιμο αριθμό κινητών μονάδων (p)

Όπως παρατηρείται στο παραπάνω σχήμα 7.2, η αύξηση του διαθέσιμου αριθμού των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων οδηγεί σε αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, ενώ η μείωση του διαθέσιμου αριθμού κινητών

μονάδων οδηγεί σε μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Γίνεται κατανοητό ότι τα ποσά αύξησης και μείωσης είναι σημαντικά -ακόμα και με μια αύξηση κατά 5 μονάδες-, με αποτέλεσμα να καθιστούν σημαντικά ευαίσθητη την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Έτσι, συμπεραίνεται ότι με την αύξηση του αριθμού των κινητών μονάδων, η επίλυση του Γενετικού Αλγορίθμου δίνει όλο και καλύτερες τιμές αντικειμενικής συνάρτησης συγκριτικά με το αρχικό σενάριο των 20 διαθέσιμων κινητών μονάδων, ενώ με τη μείωση των κινητών μονάδων ο Γενετικός Αλγόριθμος δεν αποδίδει αρκετά ικανοποιητικά. Το αποτέλεσμα αυτό, αναφορικά με την ευαισθησία της βέλτιστης λύσης ως τη συγκεκριμένη παράμετρο του προβλήματος, αποδεικνύει ότι ο περιορισμός που σχετίζεται με το διαθέσιμο αριθμό κινητών μονάδων προς χωροθέτηση είναι εξαιρετικά καθοριστικός στην επίτευξη του στόχου του προβλήματος και ικανός να επηρεάσει αρκετά και τους δύο όρους της αντικειμενικής συνάρτησης.

- Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τον ελάχιστο αριθμό θέσεων χωροθέτησης (n)

Επιλέχθηκε να μεταβληθεί ο ελάχιστος αριθμός θέσεων χωροθέτησης του προβλήματος και, συγκεκριμένα, δοκιμάστηκε να μειωθεί από 2 σε 1, καθώς και να αυξηθεί σε 3, 4 και 5. Στο παρακάτω σχήμα 7.3, φαίνονται τα τελικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση αυτού του σεναρίου.

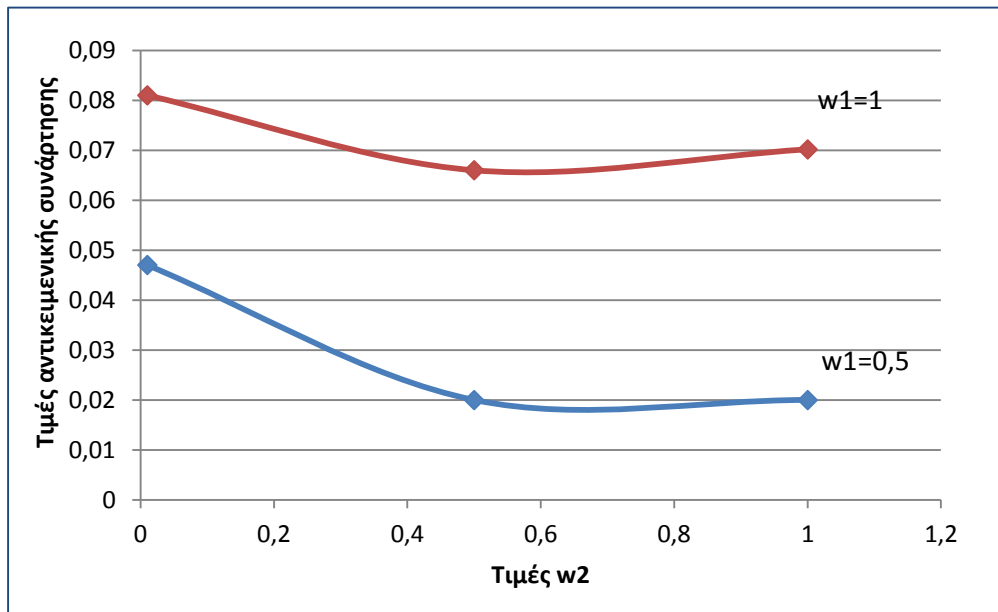


Σχήμα 7.3: Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με τον ελάχιστο αριθμό θέσεων χωροθέτησης (n)

Από το παραπάνω σχήμα, γίνεται αντιληπτό ότι με την αύξηση του ελάχιστου αριθμού θέσεων χωροθέτησης προκύπτει μείωση στις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Δηλαδή, η επίλυση του Γενετικού Αλγορίθμου δίνει χειρότερες τιμές όσο αυξάνεται ο ελάχιστος αριθμός των θέσεων. Πιο αναλυτικά, όπως παρατηρείται, μειώνοντας τις θέσεις χωροθέτησης από δύο, που θεωρήθηκε αρχικά, σε μία, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης παραμένει σταθερή στις 0,071 μονάδες περίπου. Μετά τις δύο θέσεις χωροθέτησης, όμως, κάθε αύξηση του ελάχιστου αριθμού των θέσεων χωροθέτησης μειώνει όλο και περισσότερο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτή η μείωση, βέβαια, δεν είναι τόσο σημαντική και απότομη, γεγονός που υποδηλώνει ότι η βέλτιστη λύση δεν είναι αρκετά ευαίσθητη ως προς τον ελάχιστο αριθμό θέσεων χωροθέτησης.

- Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τα βάρη των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης ($w1$, $w2$)

Τα βάρη των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης μεταβλήθηκαν με διάφορους συνδυασμούς προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδρασή τους στο τελικό αποτέλεσμα. Οι τιμές που έλαβαν τα βάρη και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μεταβολή τους απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 7.4.



Σχήμα 7.4: Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με τα βάρη $w1$ και $w2$

Στο παραπάνω διάγραμμα, δεν ακολουθείται κάποια συγκεκριμένη τάση, εφόσον έχουν απεικονιστεί οι συνδυασμοί (σημεία) των τιμών των βαρών $w1$ και $w2$ που

επιλέχθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, στον άξονα των x μεταβάλλεται το w_2 με επιλεγμένες τιμές 0,01, 0,5 και 1, ενώ στον άξονα των y παρουσιάζονται, όπως στα άλλα διαγράμματα, οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης σε συνάρτηση με το w_2 αλλά και με το w_1 που παίρνει τιμές 0,5 (μπλε γραμμή) και 1 (κόκκινη γραμμή).

Η ανάλυση ευαισθησίας ως προς τα βάρη w_1 και w_2 επιβεβαιώνει ότι όταν το w_1 είναι μεγαλύτερο από το w_2 , η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει μεγαλύτερες, δηλαδή καλύτερες, τιμές συγκριτικά με την περίπτωση όπου το w_1 είναι μικρότερο από το w_2 . Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς το w_1 συνοδεύει τον πρώτο όρο της αντικειμενικής συνάρτησης που σχετίζεται με τη ζήτηση που εξυπηρετείται και το w_2 το δεύτερο όρο της αντικειμενικής συνάρτησης που σχετίζεται με το κόστος χωροθέτησης. Όταν το w_1 , λοιπόν, είναι μεγαλύτερο από το w_2 , σημαίνει ότι επιτυγχάνεται ο διπλός στόχος του προβλήματος, δηλαδή μεγιστοποιείται ο πρώτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης και ελαχιστοποιείται ο δεύτερος όρος. Ακόμη, είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι όσο πιο μεγάλο είναι το βάρος w_1 (και μεγαλύτερο από το w_2) τόσο πιο ικανοποιητικές τιμές έχει η αντικειμενική συνάρτηση, όπως φαίνεται και από τις τιμές της κόκκινης γραμμής ($w_1=1$) σε σχέση με αυτές της μπλε γραμμής ($w_1=0,5$). Όσον αφορά την περίπτωση που τα w_1 και w_2 είναι ίσα, παρατηρείται, γενικά, ότι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιώνεται όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των δύο βαρών. Για παράδειγμα, για w_1 και w_2 ίσα με 1 η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι καλύτερη από την περίπτωση όπου τα w_1 και w_2 είναι ίσα με 0,5. Εν κατακλείδι, παρατηρώντας τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που προέκυψαν, το αποτέλεσμα επηρεάζεται αρκετά από τη μεταβολή των τιμών των βαρών της αντικειμενικής συνάρτησης.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται μια σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της, καθώς και συζητούνται τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν από τη μελέτη και την τεχνική επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων. Τέλος, διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για την επέκταση ή τη βελτίωση της έρευνας σχετικά με το εξεταζόμενο πρόβλημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

8.1. Ανασκόπηση Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η επίτευξη της βέλτιστης χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων σε ένα τμήμα της Αλεξανδρούπολης. Για το σκοπό αυτό, προβλέφθηκε η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης, ώστε να προσεγγιστεί ρεαλιστικά το εξεταζόμενο πρόβλημα χωροθέτησης και να εξυπηρετηθούν κατάλληλα οι ανάγκες του.

Πιο συγκεκριμένα, στην εν λόγω εργασία αναζητήθηκαν οι βέλτιστες θέσεις των απαιτούμενων κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων, με απώτερο σκοπό την εξασφάλιση επάρκειας ελέγχων στην περιοχή εφαρμογής αλλά και την ελαχιστοποίηση του κόστους χωροθέτησης. Το μαθηματικό μοντέλο που κρίθηκε κατάλληλο για την ικανοποίηση του παραπάνω στόχου της εργασίας είναι μια παραλλαγή του μοντέλου συνόλου κάλυψης (Set Covering Location Model). Αφού έγινε η κατάστρωση του μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης που επιλέχθηκε και αφού λήφθηκαν υπόψη οι κατάλληλοι περιορισμοί, το πρόβλημα επιλύθηκε με την εφαρμογή των Γενετικών Αλγορίθμων και τη χρήση του λογισμικού Evolver. Έτσι, ορίστηκαν οι απαραίτητες παράμετροι του Γενετικού Αλγορίθμου και, έπειτα από μια σειρά επαναλήψεων, επιλέχθηκε εκείνος ο συνδυασμός παραμέτρων που δίνει τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Με βάση αυτόν τον συνδυασμό, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση των μεταβολών των παραμέτρων στο αποτέλεσμα και να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα του Γενετικού Αλγορίθμου που εφαρμόστηκε.

Ανατρέχοντας στα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, αναφέρεται συνοπτικά ότι τα τρία πρώτα κεφάλαια αποτέλεσαν το υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίχθηκε η εν

λόγω διπλωματική. Τα πρώτα αυτά κεφάλαια περιλάμβαναν μια κατάλληλη εισαγωγή που περιγράφει τη χρησιμότητα και τη λειτουργία του τεχνικού ελέγχου οχημάτων και, κυρίως, των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων, καθώς και τις απαραίτητες θεωρητικές έννοιες για την κατανόηση των προβλημάτων χωροθέτησης.

Στα κεφάλαια 4 έως 7 αναλύθηκε και επιλύθηκε το πρόβλημα χωροθέτησης των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων που πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Ειδικότερα, αναφέρθηκαν τα κριτήρια χωροθέτησης των κινητών μονάδων, έγινε μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση, διατυπώθηκε το μαθηματικό μοντέλο χωροθέτησης που χρησιμοποιήθηκε (Set Covering Location Model) και παρουσιάστηκαν η περιοχή εφαρμογής και τα δεδομένα που συλλέχθηκαν. Έπειτα, έγινε μια εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγόριθμους και στο λογισμικό Evolver, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του Γενετικού Αλγορίθμου. Τέλος, εφαρμόστηκε ο Γενετικός Αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας και σχολιάστηκαν όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω διαδικασίες.

8.2. Συμπεράσματα

Η εν λόγω διπλωματική εργασία συνιστά, στο βαθμό που αυτό είναι γνωστό από τη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία, την πρώτη εργασία με θέμα τη χωροθέτηση κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων. Με τη δημιουργία και την επίλυση του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου που επιλέχθηκε, επιδιώχθηκε η διαμόρφωση μιας λεπτομερούς προσέγγισης του προβλήματος που προσαρμόζεται εύκολα σε ρεαλιστικά δεδομένα. Έτσι, επιτεύχθηκε ο στόχος του προβλήματος, δηλαδή η ελαχιστοποίηση του κόστους χωροθέτησης και, ταυτόχρονα, η χωροθέτηση των κινητών μονάδων σε σημεία του δικτύου της περιοχής εφαρμογής από όπου διέρχονται τα περισσότερα οχήματα, λαμβάνοντας υπόψη τους κατάλληλους περιορισμούς. Ο στόχος αυτός εντάσσεται στο πλαίσιο της συνολικής προσπάθειας ενίσχυσης των ελέγχων πεδίου, ώστε να εξετάζονται όλο και περισσότερα οχήματα και, ως αποτέλεσμα να ελαφρυνθεί, ως ένα βαθμό, το περιβαλλοντικό πρόβλημα που σχετίζεται με τη χρήση μηχανοκίνητων οχημάτων.

Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το πρόβλημα τοποθέτησης των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων, εφαρμόστηκε η μέθοδος των Γενετικών

Αλγορίθμων, η οποία αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη. Αυτό γιατί, με αυτόν τον τρόπο προσεγγίστηκε το βέλτιστο του προβλήματος, χωρίς να γίνει έλεγχος όλων των πιθανών λύσεων. Εξάλλου, τα τελευταία χρόνια οι Γενετικοί Αλγόριθμοι έχουν κερδίσει σημαντικό έδαφος λόγω της ευρωστίας (robustness) που προσφέρουν. Η ευρωστία τους αυτή συντελεί στην ικανοποιητικότερη και ταχύτερη επίλυση των προβλημάτων χωροθέτησης, όπως του εξεταζόμενου, αποφεύγοντας τον εγκλωβισμό των λύσεων σε τοπικά ακρότατα. Με άλλα λόγια, η συγκεκριμένη μέθοδος επίλυσης διαπιστώθηκε ότι μπορεί να παράγει ικανοποιητικές λύσεις σε αποδεκτό χρόνο.

Κατά την εφαρμογή του Γενετικού Αλγορίθμου καθορίστηκαν οι βασικές παράμετροί του, δηλαδή το μέγεθος του πληθυσμού, ο βαθμός διασταύρωσης και ο βαθμός μετάλλαξης. Μετά από την εξέταση διαφορετικών συνδυασμών των παραμέτρων αυτών, τα αποτελέσματα που προέκυψαν καταδεικνύουν ότι οι συνδυασμοί αυτοί, γενικά, παρουσιάζουν ορισμένες αποκλίσεις μεταξύ τους ανάλογα με τις επιμέρους τιμές των παραμέτρων που εισάγονται. Ακόμα και στον ίδιο συνδυασμό παραμέτρων υπάρχουν διαφορές στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, γεγονός που δικαιολογείται από την περίπτωση που υπάρχει ο αλγόριθμος να συγκλίνει πρώιμα, δηλαδή να «παγιδεύεται» σε κάποιο τοπικό ακρότατο.

Πιο αναλυτικά για τα αποτελέσματα, ο βαθμός μετάλλαξης με τιμή 0,05 δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα σε κάθε πληθυσμό, ενώ οι βαθμοί μετάλλαξης με τιμές 0,1 και 0,15 δίνουν λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο βαθμός διασταύρωσης που δίνει τις καλύτερες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης έχει τιμή 0,06, ενώ ο πληθυσμός που οδηγεί σε πιο επιθυμητά αποτελέσματα είναι ο πληθυσμός με τιμή 40. Έτσι, προέκυψε ότι ο συνδυασμός που δίνει, κατά μέσο όρο, το βέλτιστο αποτέλεσμα είναι εκείνος που περιλαμβάνει βαθμό μετάλλαξης: 0,05, βαθμό διασταύρωσης: 0,6 και πληθυσμό: 40. Η καλύτερη τιμή που έδωσε ο συγκεκριμένος συνδυασμός είναι ίση με 0,071 μονάδες και βρέθηκε, έπειτα από διακυμάνσεις, μετά το 10^ο περίπου λεπτό της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Η τιμή αυτή που βρέθηκε αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ του πρώτου όρου της αντικειμενικής συνάρτησης και του δεύτερου όρου. Υπενθυμίζεται, στο σημείο αυτό, ότι έχει προηγηθεί κανονικοποίηση των όρων (υποκεφάλαιο 6.1), δηλαδή τα αποτελέσματα αποτελούν θεωρητικά ποσοστά επί μιας μέγιστης τιμής. Όπως έχει

ήδη αναφερθεί, ο πρώτος όρος στοχεύει στη χωροθέτηση των κινητών μονάδων σε θέσεις από όπου διέρχεται ο μεγαλύτερος αριθμός οχημάτων και βρέθηκε ίσος με 0,102 περίπου. Αυτό σημαίνει ότι η χωροθέτηση των κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων πραγματοποιήθηκε σε θέσεις από όπου, συνολικά, διέρχεται το 10,2% περίπου του συνολικού φόρτου του εξεταζομένου δικτύου. Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφερθεί ότι ο αριθμός των οχημάτων που θα ελέγχονται προκύπτει ίσος με 200 οχήματα την ώρα σε όλο το δίκτυο και, πιο συγκεκριμένα, ισούται με 10 οχήματα την ώρα σε κάθε κατεύθυνση. Ο αριθμός αυτός των οχημάτων που προκύπτει σε κάθε θέση είναι αρκετά ικανοποιητικός αλλά και ρεαλιστικός ταυτόχρονα. Όσον αφορά το δεύτερο όρο της αντικειμενικής συνάρτησης, που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους χωροθέτησης, προέκυψε ίσος με 0,032. Δηλαδή, το τελικό κόστος χωροθέτησης αποτελεί μόνο το 3,2% του μέγιστου κόστους που θεωρήθηκε ή, πιο αναλυτικά, του κόστους που προκύπτει από την τοποθέτηση 2 κινητών μονάδων ελέγχου σε όλες τις υποψήφιες θέσεις.

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων (χάρτης 6.1, υποκεφάλαιο 6.3), απαιτήθηκε η χωροθέτηση και των 20 διαθέσιμων κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων. Ενώ, αρχικά, είχε γίνει η υπόθεση ότι οι κινητές μονάδες μπορεί να φτάσουν τις δύο στον αριθμό σε μία κατεύθυνση ενός συνδέσμου, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, δε χωροθετείται σε καμία κατεύθυνση πάνω από μία κινητή μονάδα. Ακόμη, προέκυψε σε δύο θέσεις η τοποθέτηση μιας κινητής μονάδας σε κάθε κατεύθυνση των αντίστοιχων συνδέσμων.

Από τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας, συμπεραίνεται ότι η βέλτιστη τιμή που προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος είναι σημαντικά ευαίσθητη ως προς το διαθέσιμο αριθμό κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων, το ποσοστό εξυπηρέτησης και τα βάρη των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης και λιγότερο ευαίσθητη ως προς τον ελάχιστο αριθμό θέσεων χωροθέτησης.

Αναλυτικότερα, η αύξηση του διαθέσιμου αριθμού των κινητών μονάδων επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το αποτέλεσμα, βελτιώνοντας την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Αντίθετα, με την αύξηση του ποσοστού εξυπηρέτησης προκύπτει μείωση των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης, λόγω αύξησης του δεύτερου όρου της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή του κόστους χωροθέτησης. Επιπλέον, η επίλυση του Γενετικού Αλγορίθμου δίνει χειρότερες τιμές

αντικειμενικής συνάρτησης καθώς αυξάνεται ο ελάχιστος αριθμός θέσεων χωροθέτησης· όμως, η μεταβολή που επέρχεται δεν είναι αρκετά σημαντική. Τέλος, η μεταβολή των βαρών των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης επιδρά σε μεγάλο βαθμό στο τελικό αποτέλεσμα, ανάλογα με τους συνδυασμούς τιμών που επιλέγονται για τα βάρη. Παρατηρήθηκε ότι όταν το w_1 είναι μεγαλύτερο από το w_2 , η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιώνεται αισθητά, συγκριτικά με το αντίθετο σενάριο. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερο είναι το w_1 σε σχέση με το w_2 τόσο περισσότερο μεγαλώνει η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Από όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, διαπιστώθηκε ότι το πρόβλημα χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων που καταστρώθηκε μπόρεσε να επιλυθεί με επιτυχία. Η επιτυχία αυτή οφείλεται στο αρκετά ρεαλιστικό μοντέλο που διατυπώθηκε για να προσεγγίσει το πρόβλημα αλλά και στη χρήση της μεθόδου των Γενετικών Αλγορίθμων. Έτσι, καθίσταται δυνατή η πρακτική εφαρμογή της προσέγγισης του προβλήματος που πραγματεύθηκε η παρούσα εργασία, δίνοντας, παράλληλα, το έναυσμα για περαιτέρω έρευνα.

8.3. Προτάσεις

Στο υποκεφάλαιο αυτό συζητούνται ορισμένες μελλοντικές προεκτάσεις της παρούσας εργασίας. Είναι γεγονός ότι η εν λόγω διπλωματική εργασία θα μπορούσε να δεχτεί διάφορες επιμέρους βελτιώσεις ή επεκτάσεις που αφορούν τόσο τον τρόπο διαμόρφωσης του εξεταζόμενου προβλήματος όσο και τη μέθοδο επίλυσής του.

Στη συγκεκριμένη εργασία, για τη διαμόρφωση του προβλήματος χωροθέτησης κινητών μονάδων ελέγχου καυσαερίων, επιλέχθηκε η χρήση ενός μοντέλου που αποτελεί παραλλαγή του μοντέλου συνόλου κάλυψης. Ως πρώτο σημείο για τη συνέχιση της έρευνας, λοιπόν, θα μπορούσε να αποτελέσει η χρήση ενός *διαφορετικού μοντέλου*. Αυτό γιατί, η εφαρμογή ενός διαφορετικού μοντέλου είναι ικανή να δώσει διαφορετικά αποτελέσματα. Έτσι, κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή πολλών διαφορετικών μεθόδων για ένα πρόβλημα, ώστε να πραγματοποιηθούν συγκρίσεις και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν συνολικά. Ως αποτέλεσμα, θα ληφθεί η βέλτιστη και πιο έγκυρη και κατάλληλη λύση που θα ικανοποιεί τους στόχους και τους περιορισμούς του προβλήματος.

Ακόμη, στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό πρότυπο προσέγγισης του προβλήματος χωροθέτησης των κινητών μονάδων, μετά από εξέταση πολλών πραγματικών πτυχών του. Με στόχο, όμως, να καταστεί ακόμα πιο ρεαλιστικό, το πρόβλημα θα μπορούσε να τροποποιηθεί, περιλαμβάνοντας *ορισμένες διαφορετικές ή επιπλέον υποθέσεις*, όπως είναι, για παράδειγμα, οι παρακάτω:

- Η ύπαρξη λωρίδων αναμονής των οχημάτων που πρόκειται να ελεγχθούν. Οι λωρίδες αυτές θα μπορούσαν να αναπαρασταθούν με μια μεταβλητή (ή ένα δείκτη) και να συμμετέχουν σε περιορισμούς χωρητικότητας της κάθε τοποθεσίας ή και σε περιορισμούς σχετικούς με το ποσοστό εξυπηρέτησης ανά λωρίδα (μετά από εκτίμηση της χωρητικότητας και του μεγέθους των λωρίδων). Με άλλα λόγια, ο αριθμός των εξυπηρετούμενων οχημάτων ανά ώρα θα μπορούσε να είναι συνάρτηση, εκτός του αριθμού των κινητών μονάδων, και του αριθμού λωρίδων της κάθε θέσης.
- Παράλληλα με την ύπαρξη των λωρίδων αναμονής, η προσθήκη ενός περιορισμού για το χρόνο αναμονής των οχημάτων, ο οποίος θα αποτελούσε συνάρτηση του αριθμού των εξυπηρετούμενων οχημάτων αλλά και ενός μέσου αριθμού αφίξεων των οχημάτων ανά ώρα (ρυθμός αφίξεων), δημιουργώντας, έτσι, ένα στοχαστικό περιβάλλον. Ο περιορισμός αυτός θα συντελούσε και στο να αποφευχθούν φαινόμενα καθυστερήσεων. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι ο υπολογισμός του ρυθμού αφίξεων θα μπορούσε να υλοποιηθεί με τη χρήση ενός μοντέλου προσομοίωσης.
- Κατ' επέκταση της προηγούμενης πρότασης, η προσαρμογή, γενικά, στοχαστικών μοντέλων για μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση του προβλήματος, δηλαδή η συμπερίληψη της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται σε τέτοιου είδους προβλήματα σε ορισμένες παραμέτρους, όπως πχ η συμπερίληψη της εποχικότητας στη ζήτηση.
- Η θεώρηση διαφορετικού ποσοστού εξυπηρέτησης σε κάθε τοποθεσία λόγω διαφορετικού φόρτου. Θα μπορούσε να επιλυθεί το πρόβλημα με την υπόθεση ότι πρέπει να εξυπηρετηθεί ένα συγκεκριμένο ποσοστό οχημάτων, διαφορετικό για κάθε σύνδεσμο, ανάλογα με ορισμένα

δεδομένα χαρακτηριστικά του καθενός (φόρτος, διαθέσιμος χώρος κ.ά.). Βέβαια, αυτή η θεώρηση οδηγεί σε μια πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία.

- Ανάλογα με τα δεδομένα, η αντικατάσταση του περιορισμού που σχετίζεται με το διαθέσιμο αριθμό κινητών μονάδων με έναν περιορισμό που σχετίζεται με τον προϋπολογισμό που μπορεί να διατεθεί.

Τα παραπάνω, αλλά και άλλα, στοιχεία θα μπορούσαν να ενταχθούν στο χρησιμοποιούμενο μοντέλο και να το τροποποιήσουν ποικιλοτρόπως. Ειδικότερα, η τροποποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, ασκεί, ανάλογα με την ορθότητα επιλογής της, καθοριστικό ρόλο στην απόδοση του αλγορίθμου που επιλύει το πρόβλημα. Είναι σκόπιμη, δηλαδή, η μελέτη και η δημιουργία διαφόρων συναρτήσεων αξιολόγησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο εξεταζόμενο πρόβλημα, ώστε να επιτευχθεί η εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Όσον αφορά την αλγοριθμική επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος, από την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εν λόγω εργασίας, έγινε αντιληπτό ότι η εφαρμογή των Γενετικών Αλγορίθμων είναι αρκετά προσοδοφόρα και αποτελεσματική. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτελούν ισχυρά εργαλεία στην αντιμετώπιση προβλημάτων που αφορούν τη μοντελοποίηση, ανάλυση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς ποικίλων συστημάτων. Ωστόσο, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η επιπλέον εφαρμογή ενός (ή πολλών) *διαφορετικού τρόπου επίλυσης* του προβλήματος και, συνεπώς, η χρήση ενός διαφορετικού λογισμικού (πχ του Open Solver με την επιλογή μη γραμμικών μηχανών βελτιστοποίησης), ώστε έπειτα να συγκριθούν τα αποτελέσματα και να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα.

Ένα άλλο πεδίο έρευνας, σχετικό με την αλγοριθμική επίλυση του προβλήματος, θα μπορούσε να αποτελέσει η *βελτίωση της απόδοσης* των Γενετικών Αλγορίθμων. Ένα πρώτο σημαντικό εμπόδιο στην απόδοση ενός Γενετικού Αλγορίθμου αποτελεί ο κίνδυνος της «πλάνης», δηλαδή ο κίνδυνος που υπάρχει ο Γενετικός Αλγόριθμος να παρασυρθεί και να συγκλίνει πρώιμα σε υποβέλιστα σημεία, χάνοντας, έτσι, την ποικιλομορφία του. Το φαινόμενο αυτό της πλάνης θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με προσεγγίσεις που έχουν προταθεί από ορισμένους ερευνητές, όπως είναι για παράδειγμα η χρήση και η ενσωμάτωση στο Γενετικό Αλγόριθμο επιπρόσθετων τελεστών, όπως πχ του τελεστή αντιστροφής ή η χρήση άλλων

μορφών Γενετικών Αλγορίθμων, όπως είναι ο «ακατάσταστος» (messy) Γενετικός Αλγόριθμος (Goldberg et al., 1989).

Μια άλλη λύση για το παραπάνω πρόβλημα ενδεχομένως να αποτελούσε και η αλλαγή της συνθήκης τερματισμού της διαδικασίας της βελτιστοποίησης. Όμως, είναι αναγκαίο να αναφερθεί εδώ ότι η λύση αυτή μπορεί να αυξήσει, σημαντικά και χωρίς να είναι απαραίτητο, τον υπολογιστικό χρόνο. Επιπλέον, ένα άλλο σημείο που μπορεί να ερευνηθεί, σχετικά με το ίδιο πρόβλημα, είναι ο συνδυασμός του Γενετικού Αλγορίθμου με μια άλλη ευρετική ή μεθευρετική μέθοδο (πχ τη μέθοδο τοπικής αναζήτησης) για την αντιμετώπιση του φαινομένου.

Επιπροσθέτως, αναφέρεται ότι υπάρχουν διάφοροι τρόποι να βελτιωθεί η απόδοση του αλγορίθμου όταν, κατά το αρχικό στάδιο της εφαρμογής του, δε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ένας από αυτούς είναι και η αλλαγή της κωδικοποίησης. Σε ορισμένα προβλήματα είναι πιο αποτελεσματική η δυαδική κωδικοποίηση, ενώ σε κάποια άλλα προβλήματα η πραγματική κωδικοποίηση δίνει καλύτερα αποτελέσματα.

Παράλληλα, όμως, δεν πρέπει να λησμονείται η μέθοδος δοκιμής-λάθους στην εισαγωγή τιμών των παραμέτρων του Γενετικού Αλγορίθμου. Αν και αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία, η χρήση πολλών και διαφορετικών τιμών για τον πληθυσμό, το βαθμό μετάλλαξης και διασταύρωσης έχει σαν αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση της απόδοσης του αλγορίθμου. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ακόμα περισσότερες τιμές, από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν, για τις εν λόγω παραμέτρους αλλά και μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων της διαδικασίας βελτιστοποίησης για κάθε συνδυασμό.

9. ΠΗΓΕΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ

- Al-Sultan, K.S. & Al-Fawzan, M.A. (1999). A Tabu Search Approach to the Uncapacitated Facility Location Problem. *Annals of Operations Research*. 86, pp. 91-103.
- Alumur, S. & Kara, B.Y. (2008). Network Hub Location Problems: The State of the Art. *European Journal of Operational Research*. 190, pp.1-21.
- Arthur, J.T. & Lakshman, S.T. (1995). An Integer Programming Model for Locating Vehicle Emissions Testing Stations. *Management Science*. Vol. 41, No. 3, pp. 496-512.
- Back, T. & Hoffmeister, F. (1991). Extended Selection Mechanisms in Genetic Algorithms. In R.K. Belew & L.B. Booker (Eds), *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. California, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Back, T. (1996). *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*. Oxford University.
- Back, T., Fogel, D.B. & Michalewicz, Z. (1997). *Handbook of Evolutionary Computation*. Institute of Physics Publishing and Oxford University Press.
- Balinski, M.L. (1965). Integer Programming: Methods, Uses, Computations. *Management Science*. 12, pp. 253–313.
- Batta, R., Dolan, J. & Krishnamoorthy, M. (1989). A Covering Location Model: Revisited. *Transportation Science*. 23, pp. 177-287.
- Batta, R. & Mannur, N.R. (1990). Covering-location Models for Emergency Situations that Require Multiple Response Units. *Management Science*. 36, pp. 16–23.
- Bean, J.C. (1994). Genetic Algorithms and Random Keys for Sequencing and Optimization. *ORSA Journal on Computing*. 6(2), pp. 154-160.
- Bell, T. & Church, R.L. (1985). Location-allocation Theory in Archaeological Settlement Pattern Research: Some Preliminary Applications. *World Archaeology*. 16, pp. 354-371.
- Berge, C. (1957). Two Theorems in Graph Theory. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*. 43, pp. 842-844.
- Bozkaya, B. & Tansel, B. (1998). A Spanning Tree Approach to the Absolute P-Center Problem. *Location Science*. 6, pp. 83–107.

- Bramlette, M.F. (1991). Initialization, Mutation and Selection Methods in Genetic Algorithms for Function Optimization. In R.K. Belew & L.B. Booker (Eds), *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. California, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Bryan, D.L. & O'Kelly M.E. (1999). Hub-and-Spoke Networks in Air Transportation: An Analytical Review. *Journal of Regional Science*. 39, pp. 275-295.
- Calik, H. (2013). *Exact Solution Methodologies for the P-Center Problem under Single and Multiple Allocation Strategies*. (Ph.D. thesis). Bilkent University, Ankara.
- Campbell, J.F. (1990). Locating Transportation Terminals to Serve an Expanding Demand. *Transportation Research, Part B: Methodological*. 24(3), pp. 173-192.
- Campbell, J.F. (1994a). Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problems. *European Journal of Operational Research*. 72(2), pp. 387-405.
- Campbell, J.F., Ernst, A.T. & Krishnamoorthy, M. (2001). Hub Location Problems. In H. Hamacher & Z. Drezner (Eds), *Location Theory: Applications and Theory*, pp. 373-406. New York: Springer-Verlag.
- Campbell, J.F. & O'Kelly, M.E. (2012). Twenty Five Years of Hub Location Research. *Transportation Science*. 46, pp. 153-169.
- Cánovas, L., Garcia, S. & Marín, A. (2007). Solving the Uncapacitated Multiple Allocation Hub Location Problem by Means of a Dual-ascent Technique. *European Journal of Operational Research*. 179, pp. 990-1007.
- Carrizosa, E. & Plastria, F. (1998b). Polynomial Algorithms for Parametric Minquantile and Maxcovering Planar Location Problems with Locational Constraints. *TOP*. 6, pp. 179-194.
- Ceria, S., Nobili, P. & Sassano, A. (1998). A Lagrangian-based Heuristic for Large-scale Set Covering Problems. *Mathematical Programming*. 81, pp. 215-228.
- Chapman, S. & White, J. (1974). Probabilistic Formulations of Emergency Service Facilities Location Problems. *Paper Presented at the 1974 ORSA/TIMS Conference*. San Juan, Puerto Rico.
- Church, R.L. & Garfinkel, S. (1978). Locating an Obnoxious Facility on a Network. *Transportation Science*. 12, pp. 107-118.

- Church, R.L. & Meadows, M.E. (1979). Location Modeling Utilizing Maximum Service Distance Criteria. *Geographical Analysis*. 11(4), pp. 358-373.
- Church, R.L. & ReVelle, C. (1974). The Maximal Covering Location Problem. *Papers in Regional Science*. 32(1), pp. 101-118.
- Church, R.L., Stoms, D.M. & Davis, F.W. (1996). Reserve Selection as a Maximal Covering Location Problem. *Biological Conservation*. 76, pp. 105-112.
- Colomi, A., Dorigo, M. & Maniezzo, V. (1991). Distributed Optimization by Ant Colonies. In F. Varela & P.E. Bourguine (Eds), *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. 142, pp. 134-142. Paris, France.
- Cooper, L. (1974). A Random Locational Equilibrium Problem. *Journal of Regional Science*. 14(1), pp. 47-54.
- Cornuejols, G., Nemhauser, G.L. & Wolsey, L.A. (1990). The Uncapacitated Facility Location Problem. In P.B. Mirchandani & R.L. Francis (Eds), *Discrete Location Theory*, pp. 119-171. New York: Wiley.
- Current, J., Daskin, M. S. & Schilling, D. (2002). Basic Facility Location Models. *Facility Location Applications and Theory*. 3.1, pp. 82-97.
- Curtin, K.M., Hayslett-McCall, K, & Qiu, F. (2010). Determining Optimal Police Patrol Areas with Maximal Covering and Backup Covering Location Models. *Networks and Spatial Economics*. 10, pp. 125–145.
- Darwin, C. R. (1859). *The Origin of Species*. Harmondsworth.
- Daskin, M.S. (1982). Application of an Expected Covering Model to Emergency Medical Service System Design. *Decision Science*. 13, pp. 416-439.
- Daskin, M.S. (1983). The Maximal Expected Covering Location Model: Formulation, Properties and Heuristic Solution. *Transportation Science*. 17, pp. 48-70.
- Daskin, M.S. (1995). *Network and Discrete Location*. New York: J. Wiley and Sons.
- Daskin, M.S. (2000). A New Approach to Solving the Vertex p-Center Problem to Optimality: Algorithm and Computational Results. *Communications of the Japanese Operations Research Society*. 45(9), pp.428-436.
- Daskin, M.S. (2013). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications, 2nd Edition*. Hoboken: Wiley.

- Daskin, M.S., Coullard, C.R. & Shen, Z.M. (2002). An Inventory-location Model: Formulation, Solution, Algorithm and Computational Results. *Annals of Operations Research*. 110, pp. 83-106.
- Daskin, M.S., Hogan, K. & ReVelle, C. (1988). Integration of Multiple Excess, Backup and Expected Covering Models. *Environmental Planning*. B15, pp. 15-35.
- Daskin, M.S. & Stern, E.H. (1981). A Hierarchical Objective Set Covering Model for Emergency Medical Service Vehicle Deployment. *Transportation Science*. 15, pp. 137-152.
- Dawkins, R. (1982). *The Extended Phenotype*. Oxford UK: Oxford University Press.
- Dawkins, R. (1986). *The Blind Watchmaker*. Harlow, Essex: Longman.
- De Jong, K.A. (1975). *An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*. (Ph.D. thesis). University of Michigan, Ann Arbor.
- Drezner, Z. & Hamacher, H.W. (Eds) (2002). *Facility Location: Applications and Theory*. Berlin: Springer.
- Drezner, Z. & Hamacher, H.W. (Eds) (2004). *Facility Location: Applications and Theory*. Berlin: Springer.
- Drezner, Z. & Wesolowsky, G.O. (1990). The Weber Problem on the Plane with Some Negative Weights. *INFOR*. 29, pp. 87-89.
- Eiselt, H.A., ReVelle, C. & Daskin, M.S. (2008). A Bibliography for Some Fundamental Problem Categories in Discrete Location Science. *European Journal of Operational Research*. 184/3, pp. 817-848.
- Erkut, E., Baptie, T. et al. (1990). The Discrete P-Maxian Location Problem. *Computers and Operations Research*. 17(1), pp. 51-61.
- Erkut, E. & Neuman, S. (1989). Analytical Models for Locating Undesirable Facilities. *European Journal of Operational Research*. 40(3), pp. 275-291.
- Erkut, E. & Neuman, S. (1992). A Multiobjective Model for Locating Undesirable Facilities. *Annals of Operations Research*. 40, pp. 209-227.
- Erkut, E., ReVelle, C. et al. (1996). Integer-friendly Formulations for the R-Separation Problem. *European Journal of Operational Research*. 92(2), pp. 342-351.
- Erlenkotter, D. (1981). A Comparative Study of Approaches to Dynamic Location Problems. *European Journal of Operational Research*. 6, pp. 133-143.

- Ernst, A.T. & Krishnamoorthy, M. (1996). Efficient Algorithms for the Uncapacitated Single Allocation P-Hub Median Problem. *Location Science*. 4, pp. 139-154.
- Eshelman, L.J. & Schaffer, J.D. (1991). Preventing Premature Convergence in Genetic Algorithms by Preventing Incest. In R.K. Belew & L.B. Booker (Eds), *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. California, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Feo, T.A. & Resende, M.G.C. (1989). A Probabilistic Heuristic for a Computationally Difficult Set Covering Problem. *Operations Research Letters*. 8(2), pp. 67-71.
- Fogel, D.B. (1995). Phenotypes, Genotypes and Operators in Evolutionary Computation. In D.B. Fogel (Ed.), *Proceedings of the Second 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'95)*, pp. 193-198. New York: IEEE Press.
- Fogel, L.J. (1999). *Intelligence through Simulated Evolution*. New York: John Wiley & Sons.
- Fujiwara, O., Makjamroen, T. & Gupta, K. (1987). Ambulance Development Analysis: A case of Bangkok. *European Journal of Operational Research*. 31, pp. 9-18.
- Galvao, R.D. (2004). Uncapacitated Facility Location Problems: Contributions. *Pesquisa Operacional*. 24, pp. 7-38.
- Galvao, R.D. & ReVelle, C. (1996). A Lagrangian Heuristic for the Maximal Covering Location Problem. *European Journal of Operational Research*. 88, pp. 114-123.
- Garey, M.R. & Johnson, D.S. (1979). *Computer and Intractability: A Guide to Theory of NP-Completeness*. S. Francisco.
- Garfinkel, R.S., Neebe, A.W. & Rao, M.R. (1977). The m-Center Problem: Minimax Facility Location. *Management Science*. 23, pp. 1133-1142.
- Geoffrion, A.M. (1974). Lagrangian Relaxation for Integer Programming. *Mathematical Programming Study*. 2, pp. 82-114.
- Ghaziri, H. (1991). Solving Routing Problems by a Self-Organizing Map. *Artificial Neural Networks*. 79, pp. 829-834.

- Giannikos, I. & Polychroniou, P. (2009). A Fuzzy Goal Programming Model for Task Allocation in Teamwork. *International Journal of Human Resources Development and Management*. 9(1), pp. 97-115.
- Glover, F. (1989). Tabu Search. Part I. *ORSA Journal on Computing*. 1(3), pp. 190-206.
- Glover, F. & Laguna, M. (1997). *Tabu Search*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston, MA: Addison Wesley Publishing Company, Inc.
- Goldberg, D.E. & Deb, K. (1991). A Comparative Analysis of Selection for Schemes Used in Genetic Algorithms. In G. Rawlins (Ed.), *Foundation of Genetic Algorithms*. California, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Goldberg, J., Dietrich, R., Chen, J. & Mitwasi, M. (1990b). Validating and Applying a Model for Locating Emergency Medical Services in Tucson. *A.Z European Journal of Operational Research*. 49, pp. 308-324.
- Goldberg, D.E., Korb, B. & Dep, K. (1989). Messy Genetic Algorithms- Motivation Analysis and First Results. *Complex Systems 3*. pp. 493-530.
- Goldberg, D.E. & Lingle, R. (1985). Alleles, Loci and the Traveling Salesman Problem. In J.J Grefenstette (Ed.), *Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*, pp. 154-159. Carnegie – Mellon University.
- Goldberg, D.E. & Segrest, P. (1987). Finite Markov Chain Analysis of Genetic Algorithms. In J.J Grefenstette (Ed.), *Genetic Algorithms and their Applications: Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms*. Erlbaum.
- Goldman, A.J. (1969). Optimal Locations for Centers in a Network. *Transportation Science*. 3(4), pp. 352-360.
- Hakimi, S.L. (1964). Optimum Locations of Switching Centers and Absolute Centers and Medians of a Graph. *Operations Research*. 12(3), pp. 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), pp. 462-475.

- Hamacher, H.W. & Nickel, S. (1996). Multicriteria Planar Location Problems. *European Journal of Operational Research*. 94, pp. 66-86.
- Hancock, P.J.B. (1994). An Empirical Comparison of Selection Methods in Evolutionary Algorithms. In T.C. Fogarty (Ed.), *Evolutionary Computing: AISB Workshop*, Selected Papers. Leeds, U.K.: Springer-Verlag.
- Handler, G.Y. & Mirchandani, P.B. (1979). *Locations in Networks: Theory and Algorithms*. Cambridge: M.I.T Press.
- Handler, G.Y. (1990). P-Center Problems. In P.B. Mirchandani & R.L. Francis (Eds), *Discrete Location Theory*. New York: Wiley.
- Hansen, P., Peeters, D., Richard, D. & Thisse, J.F (1981). On the Location of an Obnoxious Facility. *Sistemi Urbani*. 3, pp. 299-317.
- Hansen, P., Peeters, D., Richard, D. & Thisse, J.F (1985). The Minisum and Maximax Location Problems Revisited. *Operations Research*. 33(6), pp. 1251-1265.
- Hochbaum, D.S. & Pathria, A. (1998). Locating Centers in a Dynamically Changing Network and Related Problems. *Location Science*. 6, pp. 243-256.
- Hogan, K., & ReVelle, C. (1986). Concepts and Applications of Backup Coverage. *Management Science*. 32, pp. 1434 – 1444.
- Hohn, F. (1955). Mathematical Aspects of Switching. *The American Mathematical Monthly*. 62, pp. 75–90.
- Holland, J. (1975, 1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Cambridge: M.I.T Press.
- Janikow, C.Z. & Michalewicz, Z. (1991). An Experimental Comparison of Binary and Floating Point Representations in Genetic Algorithms. In R.K. Belew & L.B. Booker (Eds), *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. California, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Jiaa, H., Ordonez, F. & Dessouky, M. (2007). A Modeling Framework for Facility Location of Medical Services for Large- scale Emergencies. *IIE Transactions*. 39(1), pp. 41-55.
- Jones, T. (1995). Crossover, Macromutation and Population-based Search. In L.J. Eshelman (Ed.), *Proceedings of the Sixth International Conference on Genetic Algorithms*. California, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Klincewicz, J.G. (1998). Hub Location in Backbone/Tributary Network Design: A Review. *Location Science*. 6, pp. 307-335.

- Klose, A. & Drexl, A. (2005). Facility Location Models for Distribution System Design. *European Journal of Operational Research*. 162(1), pp. 4-29.
- Krapup, J. & Pruzan, P.M. (1983). The Simple Plant Location Problem: Survey and Synthesis. *European Journal of Operational Research*. 12, pp. 36-81.
- Kuby, M.J. (1987). Programming Models for Facility Dispersion: The P-Dispersion and Maximum Dispersion Problems. *Geographical Analysis*. 19(4), pp. 315-329.
- Kuby, M.J. & Gray, R.G. (1993). The Hub Network Design Problem with Stop Feeders: The case of Federal Express. *Transportation Research*. 27A, pp. 1-12.
- Laporte, G., Nickel, S. & Saldanha da Gama, F. (Eds) (2015). *Location Science*. Heidelberg: Springer.
- Loesch, A. (1944). *The Economics of Location* (trans: Woglom WH, 1954). New Haven: Yale University Press.
- Martinich, J.S. (1988). A Vertex-closing Approach to the P-Center Problem. *Naval Research Logistics*. 35, pp. 185–201.
- Megiddo, N., Zemel, E. & Hakimi, S.L. (1983). The Maximal Coverage Location Problem. *SIAM Journal of Algebraic and Discrete Methods*. 4, pp. 253-261.
- Melo, T., Nickel, S. & Saldanha de Gama, F. (2009). Facility Location and Supply Chain Management: A Review. *European Journal of Operational Research*. 196, pp. 401-412.
- Michalewicz, Z. (1994). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Berlin: Springer-Verlag.
- Michalewicz, Z. & Fogel, D.B. (2000). *How to Solve it: Modern Heuristics*. New York: Springer-Verlag.
- Mladenovic', N., Labbé, M. & Hansen, P. (2003). Solving the P-Center Problem with Tabu Search and Variable Neighborhood Search. *Networks*. 42, pp. 48–64.
- Muhlenbein, H. (1992). How Genetic Algorithms Really Work: 1. Mutation and Hillclimbing. In R. Manner & B. Manderick (Eds), *Parallel Problem Solving from Nature 2*. North- Holland.
- Nagy, G. & Salhi, S. (2007). Location-routing: Issues, Models and Methods. *European Journal of Operational Research*. 177, pp. 649-672.
- Niaki, S.T.A. (2016). A Capacitated Maximal Covering Location Problem with Different Transportation Models, Facilities and Set up Costs. *Paper Presented at the*

12th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2016). Tehran, Iran, 25-26 January.

Norman, R.Z. & Rabin, M.O, (1959). An Algorithm for a Minimum Cover of a Graph. *Proceedings of the American Mathematical Society*. 10, pp. 315–319.

O' Kelly, M. E. (1986a). The Location of Interacting Hub Facilities. *Transportation Science*. 20(2), pp. 92-106.

O' Kelly, M. E. (1986b). Activity Levels at Hub Facilities in Interacting Networks. *Geographical Analysis*. 18, pp. 343-356.

O' Kelly, M. E. (1987). A Quadratic Integer Program for the Location of Interacting Hub Facilities. *European Journal of Operational Research*. 32, pp. 393-404.

Owen, S.H. & Daskin, M.S. (1998). Strategic Facility Location: A Review. *European Journal of Operational Research*. 111, pp. 423-447.

Palisade Corporation (January 2010). *Guide to Using Evolver – The Genetic Algorithm Solver for Microsoft Excel, Version 5.5*. Ithaca, New York USA.

Pinto, J.V. (1977). Launhardt and Location Theory: Rediscovery of a Neglected Book. *Journal of Regional Science*. 17(1), pp. 17-29.

Plane, D. & Hendrick, T. (1977). Mathematical Programming and the Location of Fire Companies for the Denver Fire Department. *Operations Research*. 24(4), pp. 563-578.

Plastria, F. (1995). Continuous Location Problems: Research, Results and Questions. In Z. Drezner (Ed.), *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*, pp. 85-127. New York: Springer-Verlag.

Puerto, J. & Fernandez, F.R. (1998). A Convergent Approximation Scheme for Efficient Sets of the Multicriteria Weber Location Problem. *Sociedad de Estadística e Investigación Operativa*. 6. pp. 195-204.

Pullan, W. (2008). A Memetic Genetic Algorithm for the Vertex P-Center Problem. *Evolutionary Computation Journal*. 16, pp. 417–436.

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), pp. 437-452.

Rawlins, G. (1991). *Foundations of Genetic Algorithms*. California, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.

- Repede, J. & Bernardo, J. (1994). Developing and Validating a Decision Support System for Locating Emergency Medical Services in Louisville, Kentucky. *European Journal of Operational Research*. 75, pp. 567-581.
- ReVelle, C. & Hogan, K. (1989b). The Maximum Availability Location Problem. *Transportation Science*. 23, pp. 192-200.
- Roth, R. (1969). Computer Solutions to Minimum – cover Problems. *Operations Research*. 17, pp. 455-65.
- Saez, D. Cortes, C.E. & Nunez, 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), pp. 3412-3438.
- Salhi, S. & Al-Khedhairi, A. (2010). Integrating Heuristic Information into Exact Methods: the Case of the Vertex P-Center Problem. *Journal of Operational Research Society*. 61, pp. 1619–1631.
- Schilling, D., Elzinga, D.J., Cohan, J., Church, R.L. & ReVelle, C. (1979). The Team/ Fleet Model for Simultaneous Facility and Equipment Siting. *Transportation Science*. 13(2), pp. 163-175.
- Schmitt, L.J. (1995). An Evaluation of a Genetic Algorithmic Approach to the Vehicle Routing Problem. *Working paper, Department of Information Technology Management*. Memphis, TN: Christian Brothers University.
- Schumann, M. & Retzko, R. (1995). Self-Organizing Maps for Vehicle Routing Problems-minimizing an Explicit Cost Function. In F. Fogelman-Soulie (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks*, pp. 401-406. Paris.
- Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission (1980). Recommended Locations for Motor Vehicle Inspection and Emission Test Facilities in the Southeastern Wisconsin Region. *Community Assistance Planning Report*. No. 40, pp. 1-38.
- Spears, W.M. (1993). Crossover or Mutation?. In L.D. Whitley (Ed.), *Foundations of Genetic Algorithms 2*. California, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Stender, J., Hillebrand, E. & Kingdon, J. (1994). *Genetic Algorithms in Optimization, Simulation and Modeling*. London, U.K: IOS Press.

- Storberg, J.E. (1988). The Spatial Structuring of Central Places. *Geographical Analysis*. 20, pp. 93-110.
- Storbeck, J.E., Vohra, R,V, (1988). A Simple Trade-off Model for Maximal and Multiple Coverage. *Geographical Analysis*. 20, pp. 220-230.
- Sylvester, J.J. (1857). A Question in the Geometry of Situation. *Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics*, pp. 1-79.
- Syswenda, G. (1991). A Study of Reproduction in Generational and Steady-state Genetic Algorithms. In G. Rawlins (Ed.), *Foundations of Genetic Algorithms*. California, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Talmar, M. (2002). Location of Rescue Helicopters in South Tyrol. *Paper Presented at the 37th Annual ORSNZ Conference*. Auckland, New Zealand, 28-30 November.
- Tansel, B.C. (2011). Discrete Center Problems. In H.A. Eiselt & V. Marianov (Eds), *Foundations of Location Analysis*, pp 79–106. New York: Springer.
- Tellier, L.N. & Polanski, B. (1989). The Weber Problem: Frequency of Different Solution Types and Extension to Repulsive Forces and Dynamic Processes. *Journal of Regional Science*. 29, pp. 387-405.
- Ting, S.S. (1984). A Linear – Time Algorithm for Maxisum Facility Location on Tree Networks. *Transportation Science*. 18, pp. 76-84.
- Toregas, C. & ReVelle, C. (1972). Optimal Location under Time or Distance Constraints. *Papers in Regional Science Association*. 28(1), pp. 133-144.
- Toregas, C., Swain, A., ReVelle, C. & Bergman, L. (1971). The Location of Emergency Service Facilities. *Operations Research*. 19(6), pp.1363-1373.
- Vasko, F.J., Wolf F.E. & Stott K.L. (1989). A Set Covering Approach to Metallurgical Grade Assignment. *European Journal of Operational Research*. 38(6), pp.27-34.
- Walker, W. (1974). Using the Set Covering Location Problem to Assign Fire Companies to Fire Houses. *Operations Research*. 20(3), pp. 275-277.
- Weber, A. (1909). *Theory of the Location of Industries* (trans: Friedrich CJ, 1929). Chicago: University of Chicago Press.
- Whitley, L.D. & Vose, M.D. (1995). *Foundations of Genetic Algorithms*. California, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.

Zanjirani Farahani, R., Hekmatfar, M., Arabani, A.B. & Nikbakhsh, E. (2013). Hub Location Problems: A Review of Models, Classification, Solution Techniques and Applications. *Computers and Industrial Engineering*. 64, pp. 1096–1109.

Αλεξανδρή, Γ.Π. (2009). *Προσδιορισμός Βελτιωμένων Μοντέλων Χωροθέτησης-Κάλυψης με Εξερεύνηση των Δυνατοτήτων των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών*. (Διδακτορική Διατριβή). Τμήμα Πληροφορικής. Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

Βλαχάβας, Ι., Κεφαλάς, Π., Βασιλειάδης, Ν., Κόκκορας Φ. & Σακελλαρίου Η. (2006). *Τεχνητή Νοημοσύνη – Γ' Έκδοση*. Αθήνα: Εκδόσεις Β. Γκιούρδας.

Γεωργόπουλος, Ε.Φ. & Λυκοθανάσης, Σ.Δ. (1999). *Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους*. Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

Δούρος Β. (2012). *Αλγόριθμοι: Κλάση NP, NP- Complete Προβλήματα*. Διαφάνειες. Τμήμα Πληροφορικής. Αθήνα: Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης (ΕΚΠΑΑ) (2005). *Ποιότητα της ατμόσφαιρας σε αστικές περιοχές-Νέα δεδομένα και προοπτικές*. Ημερίδα 5 Μαρτίου, Κηφισιά.

Καρλαύτης, Μ.Γ. & Λαγαρός, Ν.Δ. (2010). *Επιχειρησιακή Έρευνα και Βελτιστοποίηση για Μηχανικούς*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.

ΚΥΑ 103079/3712/92 (ΦΕΚ 710B/92). *Όροι και προϋποθέσεις εξουσιοδότησης συνεργείου επισκευής οχημάτων για χορήγηση της Κάρτας Ελέγχου Καυσαερίων*.

ΚΥΑ Φ1/26579/3183 (ΦΕΚ Β 790/18.5.2007). *Καθορισμός μεθόδων μέτρησης και επιτρεπομένων ορίων του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των υδρογονανθράκων (HC) στα καυσαέρια των βενζινοκίνητων και υγραεριοκίνητων αυτοκινήτων και των ορίων θολερότητας στα καυσαέρια των πετρελαιοκίνητων αυτοκινήτων*.

Μητρόπουλος, Π. (2007). *Πολυκριτηριακή Ανάλυση στη Λήψη Αποφάσεων για τη Χωροθέτηση Εγκαταστάσεων και την Κατανομή Πόρων*. (Διδακτορική Διατριβή). Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων. Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Ν. 2052/1992 (ΦΕΚ 94/Α'/05.07.1992). *Μέτρα για την αντιμετώπιση του νέφους και πολεοδομικές ρυθμίσεις*.

Ν. 3710/2008 (ΦΕΚ 216/Α'/2008). *Ρυθμίσεις για θέματα μεταφορών και άλλες διατάξεις*.

Νεάρχου, Α.Χ. (1996). *Γενετικοί Αλγόριθμοι στο Σχεδιασμό Ρομποτικών Τροχιών*. (Διδακτορική Διατριβή). Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών. Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Οδηγία 2000/30/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της Ε.Ε της 6^{ης} Ιουνίου, *σχετικά με τον έλεγχο των οχημάτων επαγγελματικής χρήσεως που κυκλοφορούν στην Κοινότητα*. Επίσημη Εφημερίδα Αρ. L203 της 10.08.2000.

Οδηγία 70/156/ΕΟΚ του Συμβουλίου της Ε.Ε της 6ης Φεβρουαρίου 1970, *περί προσεγγίσεως των νομοθεσιών των κρατών μελών που αφορούν στην έγκριση των οχημάτων με κινητήρα και των ρυμουλκούμενων τους*. Επίσημη Εφημερίδα Αρ. L42 της 23.2.1970.

Παταργιάς, Π.Α (2001). *Η υπερθέρμανση του πλανήτη μας και η θερμοκρασιακή πραγματικότητα της Αθήνας*, Τεύχος 2173, Ενημερωτικό Δελτίο ΤΕΕ, 5 Νοεμβρίου.

ΠΕΡΠΑ (2002). *Τμήμα Αυτοκινήτων και Εξωτερικών Καύσεων – Αιτιολογική Έκθεση 1996-2001*. ΥΠΕΧΩΔΕ.

Πίτσα, Κ.Α. (2003). *Τεχνικός Έλεγχος Οχημάτων – Κύκλοι Οδήγησης και Ατμοσφαιρική Ρύπανση*. (Διδακτορική Διατριβή). Τομέας Σύνθεσης και Ανάπτυξης Βιομηχανικών Διαδικασιών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Π.Δ 363/1995 (ΦΕΚ 193/Α/14.09.1995). *Καθορισμός συστήματος επιβολής διοικητικών ποινών στους παράγοντες εφαρμογής του θεσμού της κάρτας ελέγχου καυσαερίων Κ.Ε.Κ.*

Σαρατζέμη, Μ.Α. (1991). *Επίλυση Προβλημάτων Χωροθέτησης Κέντρων Παροχής Υπηρεσιών*. (Διδακτορική Διατριβή). Τομέας Εφαρμοσμένης Πληροφορικής. Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη.

Τσιχριντζής, Β.Α. (2015). *Στοιχεία Επιχειρησιακής Έρευνας για Μηχανικούς*, 4^η Έκδοση, σσ. 8-10. Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών (2007). *Κώδικας Οδικής Κυκλοφορίας (Κ.Ο.Κ)*, Αθήνα.

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής **διαδικτυακές πηγές**:

International Energy Agency (2000). *World Energy Outlook 2000*. Ανακτήθηκε από <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2008-1994/weo2000.pdf>

(Τελευταία πρόσβαση: 11 Μαΐου 2016)

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Environment and Human Settlements Division. (1979). *Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*. Ανακτήθηκε από <http://tinyurl.com/o2me86d> (Τελευταία πρόσβαση: 11 Μαΐου 2016)

Θεοπέμπτου, Χ. (2015). *Οι ρύποι των οχημάτων*. Ανακτήθηκε από <http://dialogos.com.cy/blog/i-ripi-ton-ochimaton/#.VzofvWBJnIU> (Τελευταία πρόσβαση: 11 Μαΐου 2016)

EC Regulation EC/715/2007. *About emission limits relating to vehicles (Euro 6)*.

Ανακτήθηκε από <http://tinyurl.com/zlrh47l>

Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2012). *Οδική ασφάλεια: αυστηρότεροι κανόνες τεχνικού ελέγχου των οχημάτων για να σώζονται ζωές*. Δελτίο Τύπου 13 Ιουλίου, Βρυξέλλες. Ανακτήθηκε από http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-780_el.htm (Τελευταία πρόσβαση: 11 Μαΐου 2016)

<http://www.palisade.com>