



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΥΕΛΙΚΤΗΣ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ**

**Μοσχούλα Πτερνέα**

Επίβλεψη:

**Ματθαίος Γ. Καρλαύτης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ**

**Νίκος Δ. Λαγαρός, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ**

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2013

*Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.*

---

---

## Ευχαριστίες

---

---

Πρώτα από όλους, ευχαριστώ θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ κ. Ματθαίο Γ. Καρλαύτη, αφενός επειδή μου προσέφερε τη δυνατότητα να καταπιαστώ με μία πραγματικά ενδιαφέρουσα εργασία και αφετέρου για την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια υλοποίησής της.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στο λέκτορα της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ κ. Κωνσταντίνο Λ. Κεραπτσόγλου για την πολύτιμη βοήθεια και τις χρήσιμες διευκρινίσεις που παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ευχαριστώ, παράλληλα, τον επίκουρο καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών κ. Νίκο Δ. Λαγαρό για τη συμβολή του στην επίβλεψη της εργασίας αυτής.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω και στους καλούς μου φίλους Μάριο Πομόνη και Γρηγόρη Φούντα, τόσο για την ουσιαστική συμπαράσταση κατά τη διάρκεια της εργασίας, όσο και για τις πρακτικές συμβουλές και υποδείξεις τους.

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



---

---

## Περίληψη

---

---

**Τίτλος:** Βέλτιστος σχεδιασμός δικτύου αστικών συγκοινωνιών ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση ευέλικτης μαθηματικής προσέγγισης

**Όνομα φοιτήτριας:** Μοσχούλα Πτερνέα

**Επιβλέποντες καθηγητές:** Ματθαίος Γ. Καρλαύτης, Νίκος Δ. Λαγαρός

**Αθήνα, Νοέμβριος 2013**

Η εργασία αποσκοπεί στο βέλτιστο σχεδιασμό αστικού λεωφορειακού δικτύου, δηλαδή των γραμμών, των συχνοτήτων τους και του είδους οχημάτων που λειτουργούν σε κάθε μία, όταν διατίθενται τόσο συμβατικά όσο και ηλεκτρικά λεωφορεία. Η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση του κόστους του φορέα, του κόστους χρήστη και του εξωτερικού κόστους. Οι περιορισμοί διασφαλίζουν ότι τα μήκη, οι συχνότητες και τα απαιτούμενα οχήματα κυμαίνονται εντός των επιτρεπτών ορίων και παράλληλα ελέγχουν τη μορφολογία και τη λειτουργία των γραμμών. Από την επίλυση, η οποία πραγματοποιείται με γενετικό αλγόριθμο, προκύπτει ότι η εξυπηρετούμενη ζήτηση μειώνεται δραματικά όταν μειωθεί η επιπλέον απόσταση που είναι διατεθειμένοι να βαδίσουν οι επιβάτες. Επιπλέον, η ταχύτητα κίνησης των οχημάτων επηρεάζει το μέσο χρόνο διαδρομής και το μέγεθος του απαιτούμενου στόλου. Επίσης, οι εκπεμπόμενοι ρύποι μεταβάλλονται ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης και το πλήθος των χρησιμοποιούμενων σταθμών, το οποίο εξαρτάται από τη δομή του δικτύου. Οι αυστηρές προϋποθέσεις διέλευσης ηλεκτρικών οχημάτων οδηγούν σε μειωμένη ποσοστιαία συμμετοχή τους στο στόλο, η οποία αυξάνεται με την αύξηση των σταθμών φόρτισης. Τέλος, οι βασικές διαφοροποιήσεις της εργασίας από παλαιότερες έρευνες αφορούν στην ποσοτικοποίηση των εκπεμπόμενων ρύπων και κατ' επέκταση στη δυνατότητα ενσωμάτωσης στο πρόβλημα των παραγόντων από τους οποίους εξαρτώνται, στις ειδικές απαιτήσεις χρησιμοποίησης των ηλεκτρικών λεωφορείων (ύπαρξη σταθμού φόρτισης στο άκρο της γραμμής) και στον έλεγχο της μορφολογίας των γραμμών χωρίς να προηγηθεί προκατασκευή τους.

**Λέξεις-κλειδιά:** Βελτιστοποίηση δικτύου – αστικές συγκοινωνίες – ηλεκτρικά λεωφορεία – ρύποι – γενετικός αλγόριθμος



---

---

## Abstract

---

---

**Title:** *A flexible mathematical approach to the optimal design of an urban transit network with electric vehicles*

**Student name:** Moschoula Pternea

**Supervisors:** Matthew G. Karlaftis, Nikos D. Lagaros

**Athens, November 2013**

This thesis focuses on the optimal design of an urban bus network, i.e. bus routes, their frequencies and the type of buses operating in each one, given the availability of conventional and electric buses. The objective is to minimize operator cost, user cost and external cost. The constraints ensure that length, frequency and fleet values all lie within limits and at the same time they control route morphology and operation. We used our methodology by utilizing a genetic algorithm on a prototype network. The results indicate that satisfied demand decreases dramatically when extra access and egress distance that passengers are willing to walk are decreased. Furthermore, vehicle speed affects both the average route time and the number of vehicles required. Pollutants depend on vehicle speed and on the number of charging stations used, which in turn depends on the structure of the network. In addition, the percentage of electric vehicles in the fleet is lower compared to conventional ones because of the strict conditions that have to be met for their use but increases when extra charging stations are added. The thesis differs from previous studies in the quantification of pollutants and thus the possibility to integrate factors that emissions depend on, in the use of electric vehicles which require a charging station in at least one terminal of each line they serve and also in the way that route morphology is controlled without construction of specific routes a priori.

**Keywords:** Network optimization – urban transportation – electric buses – pollutants – genetic algorithm





---

---

## Εκτεταμένη περίληψη

---

---

Στην παρούσα τεχνική έκθεση προσεγγίζεται το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου αστικών συγκοινωνιών (Transit Route Network Design Problem – TRNDP). Συγκεκριμένα, επιδιώκεται ο προσδιορισμός των λεωφορειακών γραμμών οι οποίες συνθέτουν το συγκοινωνιακό δίκτυο, των αντίστοιχων συχνοτήτων τους και του τύπου των οχημάτων που λειτουργούν σε κάθε μία. Χαρακτηριστικό του προβλήματος είναι η θεώρηση δύο τύπων λεωφορείων: Των συμβατικών/ντιζελοκίνητων, τα οποία λειτουργούν με πετρελαιοκινητήρα, και των ηλεκτρικών, τα οποία διαθέτουν ηλεκτροκινητήρα και απαιτούν επαναφόρτιση σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Το σύνολο των λεωφορειακών στάσεων, οι οποίες αντιστοιχούν σε κόμβους Προέλευσης – Προορισμού (Π-Π), καθώς και το οδικό δίκτυο στο οποίο ανήκουν, θεωρούνται γνωστά. Διακρίνεται, επίσης, ένα υποσύνολο του συνόλου των στάσεων, το οποίο περιέχει τους κόμβους του δικτύου όπου μπορούν να κατασκευαστούν σταθμοί φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων. Θεωρείται ότι, ενώ τα συμβατικά λεωφορεία μπορούν να κινηθούν σε οποιοδήποτε τμήμα του οδικού δικτύου, τα ηλεκτρικά για λόγους ασφαλείας δεν μπορούν να κινηθούν παρά μόνο σε γραμμές που διαθέτουν σταθμό επαναφόρτισης σε ένα τουλάχιστον άκρο τους.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αποτελείται από έξι όρους:

- (α) Τη μη εξυπηρετούμενη ζήτηση.
- (β) Το μέσο χρόνο μετακίνησης.
- (γ) Τη μάζα των εκπεμπόμενων ρύπων ( $\text{NO}_x$ ).
- (δ) Το πλήθος των απαιτούμενων σταθμών φόρτισης.
- (ε) Το μέγεθος του απαιτούμενου στόλου συμβατικών οχημάτων.
- (στ) Το μέγεθος του απαιτούμενου στόλου ηλεκτρικών οχημάτων.

Η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης δεσμεύεται από τους ακόλουθους περιορισμούς:

Περιορισμός #1: Τα ηλεκτρικά λεωφορεία επιτρέπεται να κυκλοφορούν μόνο σε γραμμές οι οποίες διαθέτουν σταθμό φόρτισης σε ένα τουλάχιστον άκρο τους.

Περιορισμός #2: Το μήκος κάθε γραμμής οφείλει να κυμαίνεται εντός ορισμένων ορίων. Το μέγιστο μήκος διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος των λεωφορείων τα οποία χρησιμοποιούν τη γραμμή.

Περιορισμός #3: Η συχνότητα κάθε γραμμής οφείλει να κυμαίνεται εντός ορισμένων ορίων.

Περιορισμός #4: Το πλήθος των απαιτούμενων οχημάτων ανά είδος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα αντίστοιχα διαθέσιμα οχήματα.

Περιορισμός #5: Δύο στάσεις επιτρέπεται να είναι διαδοχικές σε μια γραμμή μόνο εάν τουλάχιστον η μία από τις δύο περιέχεται στις πέντε κοντινότερες στάσεις της άλλης.

Περιορισμός #6: Απαγορεύεται να περιέχονται στο δίκτυο δύο ή περισσότερες γραμμές οι οποίες περιέχουν ακριβώς τις ίδιες στάσεις.

Οι όροι της αντικειμενικής συνάρτησης είναι κανονικοποιημένοι προκειμένου να εξαλειφθούν αισθητές διαφορές μεταξύ των τάξεων μεγέθους τους και να διευκολυνθεί, συγχρόνως, η επιλογή των συντελεστών βάρους. Επίσης, οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί θεωρούνται εύκαμπτοι, γεγονός που σημαίνει ότι η παραβίασή τους επιβαρύνει την αντικειμενική συνάρτηση με ποινή – η οποία και αυξάνεται εκθετικά ανάλογα με την απόκλιση από τα επιτρεπόμενα όρια.

Η μάζα των εκπεμπόμενων οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) υπολογίζεται από τις σχέσεις που προτείνει ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος στο EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook – 2009.

Η παρούσα εργασία διαφοροποιείται σημαντικά σε σχέση με προηγούμενες προσεγγίσεις, ιδιαίτερα στα εξής σημεία:

(α) Υπολογίζεται η μάζα αέριων ρύπων που εκπέμπονται σε κάθε ώρα λειτουργίας του δικτύου. Η γνώση της ποσότητας αυτής έχει διπλή χρησιμότητα:

(i) Είναι δυνατή η σύγκριση της ποσότητας του εκπεμπόμενου ρύπου με τις τυπικές «επιτρεπόμενες» τιμές, προκειμένου να διαπιστωθεί το μέγεθος της επιβάρυνσης τόσο του περιβάλλοντος εν γένει όσο και της ανθρώπινης υγείας.

(ii) Επιτρέπει τη σύγκριση, από περιβαλλοντικής απόψεως, μεταξύ διαφορετικών συγκοινωνιακών δικτύων.

(β) Η αύξηση των οχηματοχιλιομέτρων που αντιστοιχούν σε ηλεκτρικά λεωφορεία δε μεταφράζεται σε ευθέως ανάλογη αύξηση του περιβαλλοντικού οφέλους, καθώς η εκπεμπόμενη ποσότητα ρύπου δεν εξαρτάται μόνο από τη διανυόμενη απόσταση, αλλά και από άλλα χαρακτηριστικά, όπως, για παράδειγμα την κλίση του δρόμου. Επομένως, η χωρική κατανομή των ηλεκτρικών λεωφορείων λαμβάνει υπόψη τους παράγοντες που επηρεάζουν τη μάζα των εκπεμπόμενων ρύπων, όπως το ποσοστό πλήρωσης του λεωφορείου, η ύπαρξη πολλών τύπων λεωφορείων, η διαφοροποίηση της ταχύτητας κίνησης μεταξύ των οδικών τμημάτων κ.λπ..

(γ) Εισάγονται δύο διαφορετικοί τύποι οχημάτων, ο ένας εκ των οποίων έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις: Συγκεκριμένα, τα ηλεκτρικά λεωφορεία απαιτούν σταθμό επαναφόρτισης στο άκρο τους. Επιπλέον, η περιορισμένη εμβέλεια κίνησής τους επιβάλλει ελαττωμένο επιτρεπόμενο μήκος γραμμών σε σχέση με τα συμβατικά λεωφορεία.

(δ) Σε παλαιότερες προσεγγίσεις, προκειμένου να προκύψουν γραμμές με εφικτή γεωμετρία, προκατασκευάζονταν πολλές διαφορετικές γραμμές και το βέλτιστο δίκτυο προέκυπτε από το συνδυασμό μέρους των γραμμών αυτών. Με άλλα λόγια, κατά την επίλυση με γενετικό αλγόριθμο ανταλλάσσονταν ολόκληρες γραμμές μεταξύ των δικτύων,

ενώ η αλληλουχία των στάσεων εντός των γραμμών διατηρούνταν σταθερή. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα: Η επιλογή γραμμών αποκλειστικά από το σύνολο των προκατασκευασμένων περιορίζει το «διάστημα αναζήτησης» του αλγορίθμου επίλυσης και, κατά συνέπεια, ενδέχεται να οδηγεί σε λύσεις οι οποίες απέχουν σημαντικά από το ολικό βέλτιστο. Αντίθετα, σε προσεγγίσεις όπου η αλληλουχία των στάσεων καθορίζεται επιτόπου κατά την επίλυση του προβλήματος, ενδέχεται να προκύψουν γραμμές οι οποίες ενώ βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση, στην πράξη παρουσιάζουν ασυνήθιστη γεωμετρία και δεν μπορούν να υλοποιηθούν. Προκειμένου να αρθεί αυτό το πρόβλημα, η παρούσα εργασία όχι μόνο απαγορεύει την επανάληψη στάσεων ενός της ίδιας γραμμής, αλλά επιπλέον καθορίζει, μέσω του περιορισμού #5, ότι δύο στάσεις επιτρέπεται να τεθούν ως διαδοχικές σε μια γραμμή μόνο εάν τουλάχιστον η μία εξ αυτών περιέχεται στο σύνολο των πέντε πλησιέστερων της άλλης.

Το πρόβλημα υλοποιήθηκε σε Visual Basic for Applications και επιλύθηκε για πολλά διαφορετικά σενάρια με χρήση γενετικού αλγορίθμου, εκτελούμενου από το λογισμικό Evolver 5.5. Από τη διεξαγωγή των πειραμάτων μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(α) Η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση επηρεάζεται κυρίως από την επιπλέον απόσταση που είναι διατεθειμένοι να βαδίσουν οι επιβάτες προκειμένου να εξυπηρετηθούν από το λεωφορειακό δίκτυο, σε περίπτωση που το ζεύγος Προέλευσης – Προορισμού τους δεν εξυπηρετείται με μία – το πολύ – μετεπιβίβαση.

(β) Ο μέσος χρόνος διαδρομής παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε μεταβολές της μέσης ταχύτητας των λεωφορείων και μικρότερη σε μεταβολές της ζήτησης.

(γ) Η μάζα των εκπεμπόμενων ρύπων επηρεάζεται αφενός από το συντελεστή εκπομπής EF και αφετέρου από το πλήθος των χρησιμοποιούμενων σταθμών επαναφόρτισης.

(δ) Το πλήθος των χρησιμοποιούμενων σταθμών επαναφόρτισης εξαρτάται από τη δομή του δικτύου και είναι τέτοιο ώστε να αποδίδει σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος χωρίς να επιβαρύνει το συγκοινωνιακό φορέα με δυσανάλογο κόστος κατασκευής των σταθμών.

(ε) Το πλήθος απαιτούμενων οχημάτων παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές της μέσης ταχύτητας, η οποία επηρεάζει το χρόνο κύκλου, και μικρότερη ευαισθησία σε μεταβολές της συνολικής και της εξυπηρετούμενης ζήτησης.

(στ) Το ποσοστό συμβατικών οχημάτων κατά κανόνα υπερβαίνει το αντίστοιχο ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων λόγω των ιδιαίτερων απαιτήσεων για την κίνηση των τελευταίων σε μια λεωφορειακή γραμμή (σταθμός φόρτισης σε ένα τουλάχιστον άκρο). Επομένως, το ποσοστό των ηλεκτρικών λεωφορείων γενικά αυξάνεται με την αύξηση των χρησιμοποιούμενων σταθμών επαναφόρτισης.

(ζ) Το ποσοστό των επιβατών που εξυπηρετούνται χρησιμοποιώντας τις αρχικές στάσεις Προέλευσης – Προορισμού τους αυξάνεται όταν αυξάνεται το ποσοστό της εξυπηρετούμενης ζήτησης.

(η) Ο περιορισμός #5 εξασφαλίζει τη δημιουργία λεωφορειακών γραμμών με εφικτή γεωμετρία, ενώ οι μεμονωμένες παραβιάσεις του από ορισμένα ζεύγη διαδοχικών στάσεων δεν είναι ικανές να οδηγήσουν στη δημιουργία μη εφικτών γραμμών.

---

---

## Πίνακας Περιεχομένων

---

---

1	Εισαγωγή .....	1
1.1	Ανασκόπηση του προβλήματος σχεδιασμού .....	1
1.2	Σκοπός διπλωματικής εργασίας .....	2
1.3	Δομή διπλωματικής εργασίας .....	2
2	Η επίδραση των μεταφορών στο φυσικό περιβάλλον .....	5
2.1	Γενικά.....	5
2.2	Είδη ατμοσφαιρικών ρύπων.....	5
2.2.1	Ενώσεις πρόδρομες του όζοντος .....	6
2.2.2	Αέρια θερμοκηπίου .....	6
2.2.3	Ουσίες που προκαλούν οξίνιση: $\text{NH}_3$ , $\text{SO}_2$ .....	7
2.2.4	Σωματιδιακοί ρύποι .....	7
2.2.5	Καρκινογόνες ουσίες.....	7
2.2.6	Τοξικές ουσίες: Διοξίνες και φουράνια.....	8
2.2.7	Βαρέα μέταλλα .....	8
2.3	Κατηγορίες οχημάτων ως προς το καύσιμο κίνησης.....	8
2.4	Παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση καυσίμου και την εκπομπή ρύπων .9	
3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	11
3.1	Γενικά.....	11
3.2	Ομαδοποίηση ερευνών .....	11
3.3	Πρόσφατες έρευνες επίλυσης TRNDP .....	13
3.3.1	Κατασκευή γραμμών συγκοινωνιακού δικτύου .....	13
3.3.2	Καθορισμός συχνοτήτων δεδομένων γραμμών .....	17
3.3.3	Ταυτόχρονος προσδιορισμός γραμμών και αντίστοιχων συχνοτήτων .....	18
3.3.4	Καθορισμός δρομολογίων.....	22
3.4	Σχετικές έρευνες με περιβαλλοντικές παραμέτρους.....	30
3.5	Βιβλιογραφικές έρευνες.....	32
4	Διαμόρφωση μαθηματικού προτύπου .....	37
4.1	Γενικά.....	37
4.1.1	Αντικειμενική συνάρτηση.....	37
4.1.2	Περιορισμοί .....	38

4.2	Ανάλυση αντικειμενικής συνάρτησης και περιορισμών .....	39
4.2.1	Ανάλυση όρων αντικειμενικής συνάρτησης .....	39
4.2.2	Ανάλυση περιορισμών .....	40
4.3	Κανονικοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης.....	43
4.4	Είδος περιορισμών – επιβαλλόμενες ποινές .....	46
4.4.1	Είδος περιορισμών.....	46
4.4.2	Επιβαλλόμενες ποινές.....	47
5	Μεθοδολογικά εργαλεία.....	49
5.1	Εισαγωγή .....	49
5.2	Περιβάλλον υλοποίησης μοντέλου .....	49
5.3	Μεθοδολογία επίλυσης.....	51
5.3.1	Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	51
5.3.2	Εργαλείο επίλυσης: Evolver 5.5.....	59
5.4	Μεθοδολογία υπολογισμού εκπεμπόμενων ρύπων .....	62
6	Υλοποίηση και επίλυση προβλήματος.....	65
6.1	Γενικά.....	65
6.2	Εισαγωγή δεδομένων.....	66
6.3	Παραγωγή νέων σταθερών .....	68
6.4	Επαναληπτική διαδικασία .....	69
6.4.1	Δημιουργία λύσης.....	70
6.4.2	Μετασχηματισμός λύσης .....	71
6.4.3	Υπολογισμός χρόνου μεταξύ διαδοχικών στάσεων .....	72
6.4.4	Υπολογισμός μήκους γραμμών .....	73
6.4.5	Υπολογισμός χρόνων γραμμής και κύκλου .....	74
6.4.6	Εύρεση των δύο συντομότερων διαδρομών.....	75
6.4.7	Καταμερισμός της ζήτησης.....	78
6.4.8	Υπολογισμός συχνοτήτων γραμμών .....	81
6.4.9	Υπολογισμός όρων αντικειμενικής συνάρτησης .....	82
6.4.10	Υπολογισμός αντικειμενικής συνάρτησης και επιβολή ποινών.....	87
6.5	Υπολογισμός μεγεθών που δε συμμετέχουν στην επαναληπτική διαδικασία.....	89
6.5.1	Υπολογισμός οχηματοχιλιομέτρων.....	90
6.5.2	Υπολογισμός πλήθους επιβατών που εξυπηρετούνται με/χωρίς περπάτημα..	90

6.5.3	Υπολογισμός ζευγών Π-Π που εξυπηρετούνται χωρίς περπάτημα .....	91
6.6	Έλεγχος περιορισμού β.....	91
7	Αποτελέσματα.....	93
7.1	Γενικά.....	93
7.2	Πειραματικό δίκτυο.....	93
7.3	Καθορισμός αρχικής λύσης .....	94
7.4	Καθορισμός παραμέτρων επίλυσης .....	95
7.5	Παραλλαγές στις παραμέτρους του Γενετικού Αλγορίθμου .....	97
7.6	Εναλλακτικά σενάρια .....	98
7.6.1	DEMAND+10: Αύξηση της ζήτησης κατά 10% .....	99
7.6.2	DEMAND+20: Αύξηση της ζήτησης κατά 20% .....	102
7.6.3	DEMAND-10: Μείωση της ζήτησης κατά 10%.....	105
7.6.4	DEMAND-20: Μείωση της ωριαίας ζήτησης κατά 20% .....	106
7.6.5	SPEED22: Αύξηση της μέσης ταχύτητας κίνησης σε 22 km/h.....	108
7.6.6	SPEED10: Μείωση της μέσης ταχύτητας κίνησης σε 10 km/h.....	111
7.6.7	WALK400: Μείωση του $L_{W,E}$ σε 400 m. ....	113
7.6.8	WALK700: Μείωση του $L_{W,E}$ σε 700 m .....	115
7.6.9	Συνολικά αποτελέσματα .....	116
7.7	Σύνοψη αποτελεσμάτων .....	120
7.8	Ενδεικτική απεικόνιση λύσης .....	132
8	Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	137
8.1	Συμπεράσματα.....	137
8.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	138
8.2.1	Γενικά.....	138
8.2.2	Παραλλαγές στο είδος των δεδομένων .....	138
8.2.3	Παραλλαγές στην αντικειμενική συνάρτηση .....	139
8.2.4	Παραλλαγές στη μορφή και τη γεωμετρία των γραμμών .....	139
8.2.5	Παραλλαγές στις παραδοχές και στις επιμέρους μεθοδολογίες.....	139
8.2.6	Παραλλαγές στον αλγόριθμο επίλυσης.....	140
9	Βιβλιογραφικές αναφορές .....	141
10	Παράρτημα.....	147





---

---

## Κατάλογος σχημάτων

---

---

Σχήμα 3.1 Μεθολογίες επίλυσης κατά Kerapatsoglou and Karlaftis (2009). .....	12
Σχήμα 4.1 Η λειτουργία του περιορισμού #5. ....	42
Σχήμα 4.2 Περιορισμός #6. ....	43
Σχήμα 4.3 Εκτίμηση της μέγιστης τιμής του μέσου χρόνου μετακίνησης. ....	45
Σχήμα 5.1 Το προγραμματιστικό περιβάλλον της VBA. ....	50
Σχήμα 5.2 Κλήση UDF συνάρτησης στο φύλλο εργασίας. ....	51
Σχήμα 5.3 Ομοιόμορφη διασταύρωση (Πηγή: Guide to using Evolver, Version 5.7, Palisade Corporation, September 2010). ....	55
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα ροής τυπικού Γενετικού Αλγορίθμου. (Πηγή: Μακρόπουλος και Ευστρατιάδης, 2011) .....	57
Σχήμα 5.5 Ορισμός του μοντέλου στο Evolver. ....	60
Σχήμα 5.6 Ρυθμίσεις α) γενικές, β) τερματισμού, γ) προβολής και δ) μακροεντολών στο Evolver. ....	62
Σχήμα 5.7 Σχέσεις υπολογισμού ρύπων. (Πηγή: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook - 2009). ....	63
Σχήμα 6.1 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος. ....	66
Σχήμα 6.2 Η λειτουργία της συνάρτησης F_NEAREST_5_STOPS. ....	69
Σχήμα 6.3 Διάγραμμα ροής της επαναληπτικής διαδικασίας. ....	70
Σχήμα 6.4 Η λειτουργία της συνάρτησης F_REMOVE_DOUBLES_N_ZEROS. ....	72
Σχήμα 6.5 Η λειτουργία της συνάρτησης F_TIME_CONSECUTIVE. ....	73
Σχήμα 6.6 Η λειτουργία της συνάρτησης F_LENGTHLINE. ....	74
Σχήμα 6.7 Κατασκευή του πίνακα TIMEMATRIX από τη συνάρτηση F_ROUTETIME. ....	76
Σχήμα 6.8 Κατασκευή του πίνακα PASS_ASSIGN_2_FASTEST από τη συνάρτηση F_PASS_ASSIGN_2_FASTEST. ....	80
Σχήμα 6.9 Κατασκευή του πίνακα PASSENGERS_BETWEEN_STOPS από τη συνάρτηση F_PASSENGERS_BETWEEN_STOPS. ....	81
Σχήμα 6.10 Υπολογισμός μη εξυπηρετούμενης ζήτησης. ....	82
Σχήμα 6.11 Υπολογισμός του μέσου χρόνου διαδρομής με χρήση της συνάρτησης F_AVERAGE_TIME. ....	83
Σχήμα 6.12 Η λειτουργία της συνάρτησης F_EMISSIONS. ....	84
Σχήμα 6.13 Υπολογισμός μάζας ρύπων από τη συνάρτηση F_EMISSIONS. ....	84
Σχήμα 6.14 Η λειτουργία της συνάρτησης F_NUMGREENUSED. Παρ' όλο που η στάση 1 ανήκει στο σύνολο $N_{PCS}$ , δεν προσμετράται στο σύνολο των σταθμών επαναφόρτισης, γιατί η μόνη γραμμή στην οποία ανήκει ως αφετηρία ή τέρμα, δηλαδή η γραμμή 1, έχει $G_1=0$ . ..	85
Σχήμα 6.15 Υπολογισμός απαιτούμενων οχημάτων ανά γραμμή. ....	86
Σχήμα 6.16 Υπολογισμός απαιτούμενων οχημάτων ανά είδος. ....	86
Σχήμα 6.17 Η συνάρτηση F_GP. ....	88
Σχήμα 7.1 Το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων. ....	94
Σχήμα 7.2: Τα διαγράμματα προόδου των επιλύσεων για διάφορα σενάρια. ....	99

Σχήμα 7.3 Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε σενάριο επίλυσης.....	117
Σχήμα 7.4 Οι τιμές της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης για τα διάφορα σενάρια. ....	120
Σχήμα 7.5 Το ποσοστό μη εξυπηρετούμενης ζήτησης για κάθε σενάριο επίλυσης. ....	121
Σχήμα 7.6 Το ποσοστό εξυπηρετούμενης ζήτησης σε συνάρτηση με την παράμετρο $L_{W,E}$ . ....	122
Σχήμα 7.7 Ο μέσος χρόνος διαδρομής για διάφορα σενάρια επίλυσης. ....	122
Σχήμα 7.8 Η μεταβολή του μέσου χρόνου διαδρομής ως προς την ταχύτητα. ....	123
Σχήμα 7.9 Η σχέση των ρύπων με το πλήθος των σταθμών επαναφόρτισης και το συντελεστή εκπομπής EF για διάφορα εναλλακτικά σενάρια. ....	124
Σχήμα 7.10 Οι χρησιμοποιούμενοι σταθμοί φόρτισης σε κάθε σενάριο. ....	125
Σχήμα 7.11 Η εξυπηρετούμενη ζήτηση και τα συνολικά απαιτούμενα οχήματα για διάφορα εναλλακτικά σενάρια. ....	125
Σχήμα 7.12 Η μείωση των συνολικών απαιτούμενων οχημάτων με την αύξηση της ταχύτητας.....	126
Σχήμα 7.13 Τα ποσοστά συμβατικών και ηλεκτρικών οχημάτων για κάθε εναλλακτικό σενάριο. ....	127
Σχήμα 7.14 Το ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων και οι σταθμοί επαναφόρτισης για διάφορα εναλλακτικά σενάρια. ....	128
Σχήμα 7.15 Η συνολική ζήτηση, το ποσοστό εξυπηρετούμενης ζήτησης και το ποσοστό ζήτησης που δε χρειάζεται επιπλέον βάδισμα, για διάφορα εναλλακτικά σενάρια.....	129
Σχήμα 7.16 Το δίκτυο που προκύπτει με την άρση του περιορισμού #5. ....	131
Σχήμα 7.17 Λεπτομερής απεικόνιση του δικτύου που προκύπτει με την άρση του περιορισμού #5. ....	132
Σχήμα 7.18 Απεικόνιση της λύσης του σεναρίου WALK400. ....	133
Σχήμα 7.19 Λεπτομερής απεικόνιση του συγκοινωνιακού δικτύου που προκύπτει από την επίλυση του σεναρίου WALK400. ....	134
Σχήμα 7.20 Οι γραμμές του σεναρίου WALK400. ....	135
Σχήμα 8.1 Επαναληπτική διαδικασία προσδιορισμού συχνοτήτων. ....	140

---

---

## Κατάλογος πινάκων

---

---

Πίνακας 3.1 Σύνοψη ερευνών για την κατασκευή των γραμμών του συγκοινωνιακού δικτύου. ....	23
Πίνακας 3.2 Σύνοψη ερευνών για τον καθορισμό των συχνοτήτων δεδομένων γραμμών. ...	23
Πίνακας 3.3 Σύνοψη ερευνών για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό των γραμμών και των συχνοτήτων τους. ....	24
Πίνακας 3.4 Σύνοψη ερευνών για τον καθορισμό των δρομολογίων. ....	24
Πίνακας 3.5 Συγκεντρωτική παρουσίαση όλων των πρόσφατων ερευνών πάνω στο TRNDP. ....	26
Πίνακας 4.1 Η τιμή της επιβαλλόμενης ποινής για διάφορες τιμές της αντίστοιχης απόκλισης. ....	48
Πίνακας 6.1 Οι συναρτήσεις ελέγχου των περιορισμών. ....	87
Πίνακας 7.1 Η κοινή για όλα τα πειράματα αρχική λύση. ....	95
Πίνακας 7.2 Σταθερές τιμές παραμέτρων στα εναλλακτικά σενάρια. ....	95
Πίνακας 7.3 Το σύνολο $N_{PCS}$ των κόμβων όπου είναι δυνατή η κατασκευή σταθμού επαναφόρτισης. ....	96
Πίνακας 7.4 Οι τιμές των συντελεστών βάρους $W_i$ . ....	96
Πίνακας 7.5 Οι μέγιστες τιμές των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης στο Βασικό σενάριο. ....	96
Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα του βασικού πειράματος για παραλλαγές στις παραμέτρους του Γενετικού Αλγορίθμου. ....	97
Πίνακας 7.7 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων DEMAND+10 και Βασικού. ....	100
Πίνακας 7.8 Οι μέγιστοι φόρτοι επιβατών, οι συχνότητες, οι χρόνοι απλής διαδρομής και τα απαιτούμενα οχήματα ανά γραμμή για τα σενάρια Βασικό και DEMAND+10. ....	101
Πίνακας 7.9 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων DEMAND+20 και Βασικού. ....	103
Πίνακας 7.10 Οι τιμές των $Q_{max}$ , $f$ , $T$ και $V$ στα σενάρια Βασικό και DEMAND+20. ....	104
Πίνακας 7.11 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων DEMAND-10 και Βασικού. ....	105
Πίνακας 7.12 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων DEMAND-20 και Βασικού. ....	107
Πίνακας 7.13 Οι τιμές των $Q_{max}$ , $f$ , $T$ και $V$ στα σενάρια Βασικό και DEMAND-20. ....	108
Πίνακας 7.14 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων SPEED22 και Βασικού. ....	109
Πίνακας 7.15 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων SPEED10 και Βασικού. ....	111
Πίνακας 7.16 Κανονικοποιημένοι όροι αντικειμενικής συνάρτησης στα σενάρια Βασικό και SPEED10. ....	112
Πίνακας 7.17 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων WALK400 και Βασικού. ....	113
Πίνακας 7.18 Ανάλυση της εξυπηρετούμενης και μη ζήτησης με βάση τα αποτελέσματα της συνάρτησης $F\_PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST\_BEFORE$ . ....	114
Πίνακας 7.19 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων WALK700 και Βασικού. ....	115
Πίνακας 7.20 Οι τιμές των $Q_{max}$ , $f$ , $T$ και $V$ στα σενάρια Βασικό και WALK700. ....	116
Πίνακας 7.21 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίων. ....	118

Πίνακας 7.22 Αποτελέσματα της επίλυσης του βασικού σεναρίου χωρίς τον περιορισμό #5. .....	130
Πίνακας 7.23 Η τελική λύση του Σεναρίου WALK400.....	132

## Κατάλογος συμβόλων

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
$A$	Μέγεθος του οποίου ζητείται η απόκλιση.
$A_{\max}$	Μέγιστη τιμή του μεγέθους του οποίου ζητείται η απόκλιση.
$A_{\min}$	Ελάχιστη τιμή του μεγέθους του οποίου ζητείται η απόκλιση.
$A_{5\text{NEAREST}}$	Οι 5 πλησιέστερες στάσεις στη στάση A.
$B_{5\text{NEAREST}}$	Οι 5 πλησιέστερες στάσεις στη στάση B.
$C$	Ο κοινός κόμβος δύο γραμμών L1, L2 όπου μπορεί να πραγματοποιηθεί μετεπιβίβαση.
Common1	Ο κόμβος μετεπιβίβασης της πρώτης διαδρομής ενός ζεύγους στον TIMEMATRIX.
Common2	Ο κόμβος μετεπιβίβασης της δεύτερης διαδρομής ενός ζεύγους στον TIMEMATRIX
$d$	Μητρώο Προέλευσης – Προορισμού.
$d_{ij}$	Η ζήτηση για μετακίνηση από τον κόμβο $i$ στον κόμβο $j$ .
$d_w$	Το πλήθος των μετακινούμενων που μεταβαίνουν σε άλλη στάση πέρα από της προέλευσης ή του προορισμού τους.
$D_s$	Εξυπηρετούμενη ωριαία ζήτηση.
$D_T$	Συνολική ωριαία ζήτηση.
$D_U$	Μη εξυπηρετούμενη ωριαία ζήτηση.
Destination	Ο προορισμός όπως αναγράφεται στον πίνακα TIMEMATRIX.
dev	Η απόκλιση ενός μεγέθους από τα επιτρεπόμενα όρια.
$devf_n$	Η απόκλιση της συχνότητας της γραμμής $n$ από τα επιτρεπόμενα όρια.
$devL_n$	Η απόκλιση του μήκους της γραμμής $n$ από τα επιτρεπόμενα όρια.
$devV_c$	Η απόκλιση των απαιτούμενων συμβατικών οχημάτων από τα διαθέσιμα.
$devV_e$	Η απόκλιση των απαιτούμενων ηλεκτρικών οχημάτων από τα διαθέσιμα.
$e$	Μητρώο εκπεμπόμενων ρύπων ανά οδικό τμήμα.
EF	Συντελεστής εκπομπής ρύπου.
$e_n$	Η μάζα των εκπεμπόμενων ρύπων της γραμμής $n$ για μία ώρα λειτουργίας του δικτύου.

$f_{max}$	Μέγιστη επιτρεπόμενη συχνότητα.
$f_{min}$	Ελάχιστη επιτρεπόμενη συχνότητα.
$f_n$	Συχνότητα γραμμής $n$ .
$G$	Διαδική μεταβλητή που καθορίζει εάν από μία γραμμή διέρχονται συμβατικά ή ηλεκτρικά οχήματα.
$G_{p,n}$	Διαδική μεταβλητή που καθορίζει εάν επιτρέπεται η λειτουργία ηλεκτρικών οχημάτων σε μία γραμμή.
$H_n$	Χρονοαπόσταση γραμμής $n$ (χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών διελεύσεων του οχήματος από την ίδια διατομή της οδού).
$i$	Δείκτης κόμβου προέλευσης.
$j$	Δείκτης κόμβου προορισμού.
$L$	Μητρώο αποστάσεων μεταξύ κόμβων.
$L_{AK}$	Υποθετική απόσταση από σημείο προέλευσης A μέχρι κοινό κόμβο K.
$L_{KB}$	Υποθετική απόσταση από κοινό κόμβο K μέχρι σημείο προορισμού B.
$L_{max,c}$	Μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος γραμμής με συμβατικά λεωφορεία.
$L_{max,e}$	Μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος γραμμής με ηλεκτρικά λεωφορεία.
$L_{min}$	Ελάχιστο επιτρεπόμενο μήκος γραμμής.
$L_{W,E}$	Η απόσταση της στάσης την οποία χρησιμοποιούν οι επιβάτες αντί εκείνης της Προέλευσης ή του Προορισμού τους από τη στάση Προέλευσης ή Προορισμού αντιστοίχως.
Line11	Η πρώτη γραμμή της πρώτης διαδρομής ενός ζεύγους Π-Π στον πίνακα TIMEMATRIX.
Line12	Η δεύτερη γραμμή της πρώτης διαδρομής ενός ζεύγους Π-Π στον πίνακα TIMEMATRIX.
Line21	Η πρώτη γραμμή της δεύτερης διαδρομής ενός ζεύγους Π-Π στον πίνακα TIMEMATRIX.
Line22	Η δεύτερη γραμμή της δεύτερης διαδρομής ενός ζεύγους Π-Π στον πίνακα TIMEMATRIX.
MAX_NUM_STOPS	Μέγιστος αριθμός επιτρεπόμενων στάσεων ανά γραμμή.
$N$	Σύνολο κόμβων του δικτύου.
$N_{CS}$	Σύνολο σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων.
$N_{CS,max}$	Μέγιστος δυνατός αριθμός χρησιμοποιούμενων σταθμών φόρτισης.
$N_{PCS}$	Σύνολο δυνατών σταθμών φόρτισης.

NUM_LINES	Πλήθος λεωφορειακών γραμμών στο δίκτυο.
NUM_OD	Πλήθος κόμβων Προέλευσης – Προορισμού.
Origin	Η προέλευση όπως αναγράφεται στον πίνακα TIMEMATRIX.
$P_i$	Ποινή που προστίθεται στην αντικειμενική συνάρτηση λόγω παραβίασης περιορισμού.
passw	Το πλήθος των επιβατών που μεταβαίνουν σε άλλη στάση πέρα από εκείνη της προέλευσης ή του προορισμού τους.
PENALTY	Ποινή στην αντικειμενική συνάρτηση λόγω παραβίασης περιορισμού.
$Q_{max,n}$	Ο επιβατικός φόρτος της λεωφορειακής γραμμής $n$ στο κρίσιμο τμήμα.
$\bar{T}$	Μέσος χρόνος μετακίνηση ανά επιβάτη.
$T_1$	Χρόνος μετακίνησης της πρώτης διαδρομής του πίνακα TIMEMATRIX.
$T_2$	Χρόνος μετακίνησης της δεύτερης διαδρομής του πίνακα TIMEMATRIX.
$T_{c,n}$	Χρόνος κύκλου γραμμής $n$ .
$T_{d,n}$	Χρόνος κίνησης λεωφορείου από αφετηρία μέχρι τέρμα, συμπεριλαμβανομένου του χρόνου επαναφοράς στο ένα άκρο.
$T_r$	Χρόνος επαναφοράς σε κάθε άκρο της γραμμής.
$T_w$	Χρόνος αναμονής επιβατών στη στάση.
$t$	Μητρώο χρόνων κίνησης μεταξύ στάσεων.
Time1	Ο χρόνος μετακίνησης με την πρώτη διαδρομή ενός ζεύγους Π-Π στον πίνακα TIMEMATRIX.
Time11	Ο χρόνος από τη στάση Προέλευσης μέχρι τον κοινό κόμβο για την πρώτη διαδρομή ενός ζεύγους Π-Π στον πίνακα TIMEMATRIX.
Time12	Ο χρόνος από τον κοινό κόμβο μέχρι τον κόμβο προορισμού για την πρώτη διαδρομή ενός ζεύγους Π-Π στον πίνακα TIMEMATRIX.
Time2	Ο χρόνος μετακίνησης με τη δεύτερη διαδρομή ενός ζεύγους Π-Π στον πίνακα TIMEMATRIX.
Time21	Ο χρόνος από τη στάση Προέλευσης μέχρι τον κοινό κόμβο για τη δεύτερη διαδρομή ενός ζεύγους Π-Π στον πίνακα TIMEMATRIX.
Time22	Ο χρόνος από τον κοινό κόμβο μέχρι τον κόμβο προορισμού για τη δεύτερη διαδρομή ενός ζεύγους Π-Π στον πίνακα TIMEMATRIX.

TRNDP	Συντομογραφία για το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου αστικών συγκοινωνιών.
$U$	Μητρώο ταχυτήτων.
$V_{av,c}$	Στόλος διαθέσιμων συμβατικών οχημάτων.
$V_{av,e}$	Στόλος διαθέσιμων ηλεκτρικών οχημάτων.
$V_n$	Απαιτούμενα οχήματα για τη λειτουργία της γραμμής $n$ .
$V_{req,c}$	Απαιτούμενα συμβατικά οχήματα.
$V_{req,e}$	Απαιτούμενα ηλεκτρικά οχήματα.
$(Vkm)_n$	Οχηματοχιλιόμετρα που αντιστοιχούν στη γραμμή $n$ ανά ώρα λειτουργίας.
$W_i$	Συντελεστής βαρύτητας $i$ όρου αντικειμενικής συνάρτησης.
$wdist_1$	Το σύνολο των αποστάσεων των κόμβων που συνδέονται με τον κόμβο προορισμού με την προϋπόθεση ότι η απόστασή τους από τον κόμβο προέλευσης δεν υπερβαίνει την απόσταση $L_{w,e}$ .
$wdist_2$	Το σύνολο των αποστάσεων των κόμβων που συνδέονται με τον κόμβο προέλευσης με την προϋπόθεση ότι η απόστασή τους από τον κόμβο προορισμού δεν υπερβαίνει την απόσταση $L_{w,e}$ .
$Z_i$	Όρος της αντικειμενικής συνάρτησης (γενικά).
$ Z_{i,max} $	Μέγιστη τιμή του όρου $Z_i$ της αντικειμενικής συνάρτησης.
$ Z_{i,norm} $	Κανονικοποιημένη τιμή του όρου $Z_i$ της αντικειμενικής συνάρτησης.

---



---

---

# 1 Εισαγωγή

---

---

## 1.1 Ανασκόπηση του προβλήματος σχεδιασμού

Τα δίκτυα αστικών συγκοινωνιών (public transportation networks) προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως αυξημένη ταχύτητα μετακίνησης, η αποφυγή κυκλοφοριακής συμφόρησης, η εξοικονόμηση ενέργειας και η μειωμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση λόγω εκπεμπόμενων ρύπων. Σύμφωνα με τους Λυμπέρη και Καρλαύτη (2009), ο ρόλος των αστικών συγκοινωνιών έχει τρεις διαστάσεις:

- Την εξασφάλιση, στο σύνολο των κατοίκων μιας πόλης, ενός ελάχιστου επιπέδου κινητικότητας και δικαιώματος στις μετακινήσεις. Πράγματι, οι αστικές συγκοινωνίες αποτελούν τη μόνη δυνατή επιλογή μετακίνησης για ένα σημαντικό τμήμα του πληθυσμού, το οποίο είτε δε διαθέτει τη δυνατότητα χρήσης ΙΧ (π.χ. οικογένειες χαμηλού εισοδήματος), είτε δεν έχει το δικαίωμα χρήσης του (π.χ. νεαρά άτομα, ηλικιωμένοι, άτομα με κινητικές δυσκολίες). Παράλληλα, εξυπηρετούν τους επισκέπτες μιας πόλης.
- Τη χρήση των αστικών συγκοινωνιών ως αντίβαρου στα ΙΧ. Υψηλό επίπεδο παρεχόμενης εξυπηρέτησης από τις αστικές συγκοινωνίες – δηλαδή εξασφάλιση μετακινήσεων με άνεση και ασφάλεια, και μάλιστα με χαμηλό αντίτιμο – οδηγεί σε μεταφορά της επιβατικής ζήτησης από τα ΙΧ προς εκείνες. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση στη χρήση του ΙΧ και, κατ' επέκταση, στις δυσμενείς επιπτώσεις του στο φυσικό και κοινωνικοοικονομικό αστικό περιβάλλον.
- Την οικονομική βιωσιμότητα των αστικών συγκοινωνιών ως φορέων. Από αυτήν την άποψη, η αντιμετώπισή τους διαφοροποιείται από χώρα σε χώρα: Στη Βρετανία, για παράδειγμα, οι αστικές συγκοινωνίες αντιμετωπίζονται πρωτίστως ως επιχειρήσεις, ενώ στη Γαλλία θεωρούνται κυρίως κοινωνικό αγαθό και απολαμβάνουν υψηλής κρατικής στήριξης (Λυμπέρη και Καρλαύτη, 2009).

Ο συνδυασμός υψηλού επιπέδου παρεχόμενων υπηρεσιών και οικονομικής βιωσιμότητας απαιτεί συστηματική προσέγγιση του σχεδιασμού ενός δικτύου αστικών συγκοινωνιών. Σύμφωνα με τους Keraptsoglou and Karlaftis (2009), «το πρόβλημα που περιγράφει το σχεδιασμό ενός δικτύου αστικών συγκοινωνιών αναφέρεται ως «Πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου διαδρομών» (Transit Route Network Design problem – TRNDP). Στη συνέχεια της εργασίας αυτής, η αναφορά στο πρόβλημα θα πραγματοποιείται, χάριν συντομίας, με χρήση της συντομογραφίας TRNDP.

Το TRNDP αποτελεί ένα από τα πολυπλοκότερα προβλήματα βελτιστοποίησης, καθώς πρόκειται για NP-Hard πρόβλημα ακέραίου, μη γραμμικού προγραμματισμού, με πολλές άγνωστες μεταβλητές προς προσδιορισμό και περιορισμούς που αφορούν όχι μόνο στις μεταβλητές εισόδου, αλλά και στις εσωτερικές μεταβλητές, όπως οι συχνότητες και τα μήκη

των γραμμών (Newell, 1979). Η πολυπλοκότητα αυτή αντανακλάται και στο πλήθος των ερευνών οι οποίες επικεντρώθηκαν στην επίλυσή του. Όπως θα γίνει εμφανές και από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (κεφάλαιο 3), οι προσεγγίσεις του TRNDP διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς τρεις βασικούς τομείς (Keraptsoglou and Karlaftis, 2009):

(α) Τους στόχους (Objectives), όπως π.χ. η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του δικτύου ή η μεγιστοποίηση του μέτρου της ποιότητας των υπηρεσιών.

(β) Τις παραμέτρους (Parameters), οι οποίες αποτελούν είτε μεταβλητές απόφασης (π.χ. γραμμές, συχνότητες), είτε σταθερές λειτουργικές παραμέτρους που επηρεάζουν και περιορίζουν το δίκτυο, όπως, π.χ., οι επιτρεπόμενες συχνότητες ή ο διαθέσιμος στόλος οχημάτων.

(γ) Τη μεθοδολογία (Methodology), δηλαδή το λογικό – μαθηματικό πλαίσιο και τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση και επίλυση του προβλήματος.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι οι σχεδιασμός ενός δικτύου αστικών συγκοινωνιών δεν αρκείται πλέον σε εμπειρικούς κανόνες. Αντιθέτως, «η συστηματική διαδικασία σχεδιασμού περιλαμβάνει ξεκάθαρα και συνεπή βήματα και συναφείς τεχνικές» (Keraptsoglou and Karlaftis, 2009), προκειμένου να επιτευχθεί ο συνδυασμός υψηλού επιπέδου εξυπηρέτησης και οικονομικής βιωσιμότητας των συγκοινωνιών. Αυτό είναι και το πεδίο εφαρμογής του προβλήματος.

## **1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας**

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη του προτύπου για το βέλτιστο σχεδιασμό ενός δικτύου αστικών συγκοινωνιών με έμφαση στις περιβαλλοντικές παραμέτρους του σχεδιασμού. Το νέο πρότυπο διαφοροποιείται από τα υπάρχοντα ως προς τα παρακάτω: Συμπεριλαμβάνει την ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων και, επομένως, τους παράγοντες από τους οποίους αυτή εξαρτάται. Γίνεται επίσης η υπόθεση ότι διατίθενται δύο διαφορετικοί τύποι λεωφορείων, τα συμβατικά και τα ηλεκτρικά – τα τελευταία παρουσιάζουν ιδιαίτερες απαιτήσεις ως προς την κυκλοφορία τους. Επομένως, με δεδομένες τις διαθέσιμες λεωφορειακές στάσεις, καθορίζονται οι λεωφορειακές γραμμές που θα αποτελέσουν το συγκοινωνιακό δίκτυο, καθώς και οι συχνότητές τους. Σε αντίθεση, όμως, με άλλες προσεγγίσεις, η μορφολογία των λεωφορειακών γραμμών ελέγχεται επιτόπου, χωρίς όμως να έχει προηγηθεί κατασκευή δεδομένων γραμμών.

## **1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας**

Η διπλωματική εργασία είναι δομημένη κατά τον ακόλουθο τρόπο:

**Κεφάλαιο 2:** Η επίδραση των μεταφορών στο φυσικό περιβάλλον. Το κεφάλαιο 2 εξετάζει τα είδη των ρυπογόνων ουσιών οι οποίες ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα κατά την κίνηση των οχημάτων καθώς και τις βλαπτικές επιδράσεις τους στο περιβάλλον και στην

ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι κατηγορίες στις οποίες διαιρούνται τα λεωφορεία ανάλογα με το καύσιμο κίνησής τους και αναλύονται οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η κατανάλωση καυσίμου και, κατ' επέκταση, η ποσότητα των ρύπων που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

**Κεφάλαιο 3:** Βιβλιογραφική ανασκόπηση. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση περιλαμβάνει σύνοψη των ερευνών οι οποίες επικεντρώθηκαν στην επίλυση του TRNDP από το 2007 μέχρι και σήμερα. Οι δημοσιεύσεις διαιρούνται σε κατηγορίες, ανάλογα με τη μεθοδολογία επίλυσης και παρουσιάζονται με χρονολογική σειρά ανά κατηγορία. Επιπλέον, παρατίθενται συνοπτικοί πίνακες κατάταξης των δημοσιεύσεων σε κατηγορίες με κριτήρια όπως η μεθοδολογία επίλυσης, το είδος της αντικειμενικής συνάρτησης, οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί και άλλα. Παράλληλα, αναφέρονται τα επιστημονικά άρθρα στα οποία επικεντρώθηκαν στη συστηματοποίηση και οργανωμένη παρουσίαση των σχετικών ερευνών. Τέλος, εξετάζονται ξεχωριστά οι έρευνες σχεδιασμού δικτύου στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν περιβαλλοντικές παράμετροι.

**Κεφάλαιο 4:** Διαμόρφωση μαθηματικού προτύπου. Στο κεφάλαιο 5 περιγράφονται και εξηγούνται αναλυτικά η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί του προβλήματος. Επιπλέον, εξηγείται η κανονικοποίηση των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης και ο τρόπος υπολογισμού των ποινών που προστίθενται σε αυτή σε περίπτωση παραβίασης περιορισμού.

**Κεφάλαιο 5:** Μεθοδολογικά εργαλεία. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο των γενετικών αλγορίθμων, οι οποίοι και χρησιμοποιήθηκαν στην επίλυση του προβλήματος. Περιλαμβάνει ιστορική αναδρομή στη χρησιμοποίηση και εξέλιξή τους, περιγράφει τα τυπικά βήματα που ακολουθούνται κατά την επίλυση ενός προβλήματος από γενετικό αλγόριθμο και εξηγεί τα πλεονεκτήματά τους, τα οποία τους καθιστούν πολύτιμο εργαλείο στη βελτιστοποίηση. Επιπλέον, το κεφάλαιο 4 εξηγεί τον τρόπο χρησιμοποίησης του Microsoft Excel και του λογισμικού βελτιστοποίησης EnoIver 5.5 στην παρούσα εργασία. Τέλος, αναλύει τη χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία υπολογισμού ρύπων, η οποία προτείνεται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (ΕΕΑ).

**Κεφάλαιο 6:** Υλοποίηση και επίλυση προβλήματος. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία υλοποίησης του προβλήματος, η οποία ξεκινά με την εισαγωγή των δεδομένων. Στη συνέχεια, εξηγείται η επεξεργασία τους για την παραγωγή νέων σταθερών μεγεθών. Έπειτα περιγράφεται αναλυτικά η επαναληπτική διαδικασία αξιολόγησης της αντικειμενικής συνάρτησης και στο τέλος αναλύονται τα μεγέθη που υπολογίζονται στο πέρας της βελτιστοποίησης.

**Κεφάλαιο 7:** Αποτελέσματα. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου αρχικά ως προς μεταβολές των παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου και στη συνέχεια ως προς μεταβολές των παραμέτρων του προβλήματος και των δεδομένων. Έπειτα παρατίθενται και ερμηνεύονται με χρήση διαγραμμάτων τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση των εναλλακτικών σεναρίων.

**Κεφάλαιο 8:** Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα. Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά περιγράφονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την επίλυση του προβλήματος με τον προτεινόμενο τρόπο. Στη συνέχεια προτείνονται τρόποι διαφοροποίησης της παρούσας εργασίας ως προς τη διατύπωση της αντικειμενικής συνάρτησης, το είδος των δεδομένων, τους περιορισμούς στη μορφολογία των γραμμών, τις παραδοχές, τη μεθοδολογία και τον αλγόριθμο επίλυσης.

---

---

## 2 Η επίδραση των μεταφορών στο φυσικό περιβάλλον

---

---

### 2.1 Γενικά

Είναι διαπιστωμένο ότι ο τομέας των μεταφορών συμμετέχει σε σημαντικό ποσοστό στην επιβάρυνση του φυσικού περιβάλλοντος, η οποία οφείλεται αφενός στην αυξημένη καταναλισκόμενη ενέργεια, αφετέρου στη ρύπανση του περιβάλλοντος – πρωτίστως της ατμόσφαιρας – από υποπροϊόντα της καύσης.

Παρόλο που η επιλογή των αστικών συγκοινωνιών είναι περιβαλλοντικά φιλικότερη έναντι των ΙΧ, είναι αναγκαία η εξέταση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του σχεδιαζόμενου δικτύου αστικών συγκοινωνιών, προκειμένου να διαπιστωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της λειτουργίας του. Για το σκοπό αυτό, στην παρούσα εργασία εισάγονται οι εκπεμπόμενοι από τα λεωφορεία ρύποι ως όρος στην αντικειμενική συνάρτηση. Ο υπολογισμός των ρύπων βασίζεται στη μεθοδολογία που προτείνει ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (European Environmental Agency – EEA).

### 2.2 Είδη ατμοσφαιρικών ρύπων

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος κατηγοριοποιεί τους εκπεμπόμενους ατμοσφαιρικούς ρύπους ως εξής:

- (α) Ενώσεις πρόδρομες του όζοντος: CO (μονοξείδιο του άνθρακα), NO<sub>x</sub> (οξειδία του αζώτου), NMVOCs (μη μεθανιούχες πτητικές οργανικές ενώσεις)
- (β) Αέρια θερμοκηπίου: CO<sub>2</sub> (διοξείδιο του άνθρακα), CH<sub>4</sub> (μεθάνιο), N<sub>2</sub>O (υποξείδιο του αζώτου)
- (γ) Ουσίες που προκαλούν οξίνιση: NH<sub>3</sub> (αμμωνία), SO<sub>2</sub> (διοξείδιο του άνθρακα)
- (δ) PM (σωματιδιακοί ρύποι - Particulate Matter mass)
- (ε) Καρκινογόνες ουσίες: PAHs (Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες), POPs (Εμμονοι Οργανικοί Ρύποι)
- (στ) Τοξικές ουσίες: Διοξίνες, φουράνια
- (ζ) Βαρέα μέταλλα

Στη συνέχεια εξηγούνται οι επιβλαβείς συνέπειες των ουσιών αυτών τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη υγεία.

### 2.2.1 Ενώσεις πρόδρομες του όζοντος

#### **(α) CO: Μονοξείδιο του άνθρακα (Carbon monoxide)**

Παρόλο που το μονοξείδιο του άνθρακα παράγεται φυσιολογικά από το ανθρώπινο σώμα, είναι επικίνδυνο όταν βρίσκεται σε συγκεντρώσεις υψηλότερες από το κανονικό, καθώς ενδέχεται να προκαλέσει αδυναμία μεταφοράς οξυγόνου στους ιστούς, με αποτέλεσμα την πρόσθετη επιβάρυνση της υγείας των καρδιοπαθών, προκαλώντας μυοκαρδική ισχαιμία και στηθάγχη (EPA, 2013).

#### **(β) NO<sub>x</sub>: Οξείδια του αζώτου (mono-nitrogen oxides)**

Διακρίνονται δύο βασικά οξείδια του αζώτου, το μονοξείδιο (NO: Nitrogen monoxide) και το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>: Nitrogen dioxide), το οποίο είναι πιο τοξικό. Ερχόμενα σε επαφή με τον αέρα, τα οξείδια του αζώτου μετατρέπονται σε νιτρικό οξύ, το οποίο περιέχεται διαλυμένο στο νερό της όξινης βροχής (EPA, 2013). Ως προς την ανθρώπινη υγεία, έχει αποδειχθεί ότι καθιστούν τον οργανισμό ευάλωτο σε βρογχίτιδα και εμφύσημα (EPA, 2013).

#### **(γ) NMVOCs: Μη μεθανιούχες πτητικές οργανικές ενώσεις (Non-methane volatile organic compounds)**

Μια κατηγορία των NMVOCs, οι μη μεθανιούχοι υδρογονάνθρακες (Nonmethane hydrocarbons – NMHCs), αντιδρούν με τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) με αποτέλεσμα το σχηματισμό όζοντος τροποσφαιρικού όζοντος. Στις αστικές περιοχές, όπου λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας η συγκέντρωση NO<sub>x</sub> στην ατμόσφαιρα είναι αυξημένη, αρκεί ακόμα και μικρή ποσότητα NMHCs για να ξεκινήσει μια σειρά φωτοχημικών αντιδράσεων που οδηγεί στο σχηματισμό όζοντος και άλλων παραγώγων (Talapatra and Srivastara, 2011).

### 2.2.2 Αέρια θερμοκηπίου

#### **(α) CO<sub>2</sub>: Διοξείδιο του άνθρακα**

Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί φυσικό συστατικό της γήινης ατμόσφαιρας (EPA, 2013). Ωστόσο, η αύξηση της περιεχόμενης ποσότητας του CO<sub>2</sub> – η οποία στις μεταφορές δεν οφείλεται μόνο στην κατανάλωση καυσίμου, αλλά στην καύση λιπαντικού και την προσθήκη στην εξάτμιση ουσιών που περιέχουν άνθρακα (EMEP/EEA 2009) – οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της συγκρατούμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα περαιτέρω άνοδο της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας (EPA, 2013).

#### **(β) CH<sub>4</sub>: Μεθάνιο**

Σύμφωνα με τον EPA (2013), το μεθάνιο αποτελεί το δεύτερο σε επίπεδο εκπομπών από ανθρωπογενείς δραστηριότητες αέριο θερμοκηπίου στις ΗΠΑ, αλλά η αθροιστική του επιρροή στην κλιματική αλλαγή για μια περίοδο εκατό ετών είναι εικοσαπλάσια εκείνης του CO<sub>2</sub>.

### **(γ) N<sub>2</sub>O: Υποξείδιο του αζώτου (Nitrous oxide)**

Το υποξείδιο του αζώτου, σύμφωνα με τους Brodsky and Cohen (1986) ευθύνεται για προβλήματα υγείας που προκαλούνται από την ιδιότητά του να οξειδώνει και να αδρανοποιεί τη βιταμίνη B12, συστατικό πολλών ενζύμων που απαντώνται τόσο σε ζωικούς οργανισμούς όσο και στον άνθρωπο. Οι ίδιοι επισημαίνουν ότι, σύμφωνα με μελέτες, το N<sub>2</sub>O επιδρά στο αιματολογικό, το ανοσοποιητικό, το νευρικό και το αναπαραγωγικό σύστημα.

#### 2.2.3 Ουσίες που προκαλούν οξίνιση: NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>

### **(α) NH<sub>3</sub>: Αμμωνία (Ammonia)**

Σύμφωνα με το New York State Department of Health (2013), σε υψηλές συγκεντρώσεις η αμμωνία προκαλεί ερεθισμό και του αναπνευστικού συστήματος, ο οποίος ενδέχεται να οδηγήσει σε πνευμονικό οίδημα και βλάβες στους αεραγωγούς και, κατ' επέκταση, σε δύσπνοια. Επιπλέον, προκαλεί δερματικό ή οφθαλμικό ερεθισμό και, σε ακόμα υψηλότερες συγκεντρώσεις, έγκαυμα.

### **(β) SO<sub>2</sub>: Διοξείδιο του θείου (Sulphur Dioxide)**

Το διοξείδιο του θείου ευθύνεται για την πρόκληση όξινης βροχής (EPA, 2013). Επιπλέον, σύμφωνα με τον Vale (2012), όταν το διοξείδιο του θείου έρθει σε επαφή με τους βλεννογόνους, οδηγεί στο σχηματισμό θειώδους οξέος (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>), το οποίο προκαλεί ενόχληση στους οφθαλμούς, στους ίδιους τους βλεννογόνους και στο δέρμα. Επιπρόσθετα, ευθύνεται για διαταραχές του αναπνευστικού συστήματος (EPA, 2013).

#### 2.2.4 Σωματιδιακοί ρύποι

Σύμφωνα με τον EPA (2013) οι σωματιδιακοί ρύποι (Particulate Matter Mass – PM) είναι μείγμα μικροσκοπικών σωματιδίων και υγρών σταγονιδίων αποτελούμενων από οξέα, οργανικές ενώσεις, μέταλλα και άλλες ουσίες. Ευθύνονται για διαταραχές στην καρδιά (καρδιακή προσβολή, αρρυθμία) και το αναπνευστικό σύστημα (άσθμα, δύσπνοια, μειωμένη λειτουργία πνευμόνων), καθώς και για πρόωρο θάνατο ατόμων με καρδιακά ή αναπνευστικά προβλήματα (EPA, 2013).

#### 2.2.5 Καρκινογόνες ουσίες

### **(α) PAHs: Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)**

Οι PAHs είναι προϊόντα της ατελούς καύσης των καυσίμων. Παρ' όλο που εργαστηριακά πειράματα τους έχουν ενοχοποιήσει για πρόκληση διαταραχών στην αναπαραγωγή, το

δέρμα και το ανοσοποιητικό σύστημα, δεν έχει αποδειχθεί παρόμοια επίδραση στον ανθρώπινο οργανισμό (ATSDR, 1996).

### **(β) POPs: Έμμονοι Οργανικοί Ρύποι (Persistent Organic Pollutants)**

Οι POPs έχουν ενοχοποιηθεί για πρόκληση αναπαραγωγικών, αναπτυξιακών, νευρολογικών και ανοσολογικών διαταραχών στους ανθρώπους. Ωστόσο, κύρια πηγή έκθεσης του ανθρώπου σε αυτούς δεν είναι τόσο η εισπνοή τους από την ατμόσφαιρα, αλλά η κατανάλωση μολυσμένων τροφών (EPA, 2013).

#### **2.2.6 Τοξικές ουσίες: Διοξίνες και φουράνια**

Σύμφωνα με τον EPA (2013), οι διοξίνες (dioxins) και τα φουράνια (furans) είναι καρκινογόνες ουσίες οι οποίες ενοχοποιούνται για διαταραχές των ορμονικών επιπέδων του οργανισμού. Εργαστηριακές δοκιμές σε πειραματόζωα συσχετίζουν την υψηλή συγκέντρωση διοξινών και φουρανίων με διαταραχές στην ανάπτυξη των εμβρύων, μειωμένη δυνατότητα αναπαραγωγής και καταστολή της λειτουργίας του ανοσοποιητικού συστήματος. Τέλος, η συσσώρευση διοξινών στους λιπώδεις ιστούς προκαλεί την εμφάνιση χλωρακμής.

#### **2.2.7 Βαρέα μέταλλα**

Σύμφωνα με τους Adal and Wiener (2013), η τοξική επίδραση των βαρέων μετάλλων ποικίλλει ανάλογα με το είδος τους, την απορροφούμενη από τον οργανισμό δόση, τη χρονική διάρκεια και τον τρόπο έκθεσης σε αυτά και την ηλικία του οργανισμού (τα παιδιά είναι πιο επιρρεπή στις συνέπειες της έκθεσης σε βαρέα μέταλλα συγκρινόμενα με τους ενήλικες). Η έκθεση σε βαρέα μέταλλα ενδέχεται να προκαλέσει από δηλητηρίαση μέχρι πνευμονοκονιώσεις, νευροπάθειες, εκφυλισμό του ήπατος και των νεφρών και καρκινογένεση (Adal and Wiener, 2013).

## **2.3 Κατηγορίες οχημάτων ως προς το καύσιμο κίνησης**

Σήμερα έχουν κατασκευαστεί λεωφορεία που χρησιμοποιούν πολλές και διαφορετικές πηγές ενέργειας. Οι συνηθέστερες κατηγορίες τους με κριτήριο το είδος του κινητήρα είναι οι εξής (Καρλαύτης και Λυμπέρης, 2009):

(α) Λεωφορεία με πετρελαιοκινητήρες: Το πετρέλαιο αποτελεί το πιο διαδεδομένο καύσιμο κίνησης των λεωφορείων. Ωστόσο, παρουσιάζουν μειονεκτήματα όπως η εκπομπή καυσαερίων, ο θόρυβος και οι αυξημένες δονήσεις. Μετεξέλιξή τους αποτελούν οι λεγόμενοι «καθαροί» πετρελαιοκινητήρες (BATELLE, 2002), με χρήση ανακύκλωσης καυσαερίων και αριθμού καταλυτών.



(β) Λεωφορεία με κινητήρες φυσικού αερίου: Οι κινητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται στα λεωφορεία τύπου CNG (Compressed Natural Gas). Προκαλούν μικρότερης έκτασης περιβαλλοντική επιβάρυνση συγκρινόμενοι με τους πετρελαιοκινητήρες και το καύσιμό τους είναι φθηνότερο. Ωστόσο, η αξιοπιστία τους είναι μειωμένη και επιπλέον απαιτούν ειδικές εγκαταστάσεις, καθώς και προσωπικό συντήρησής τους και αποθήκευσης καυσίμων.

(γ) Λεωφορεία με κινητήρες υδρογόνου: Παρουσιάζουν ανάλογα χαρακτηριστικά με τα λεωφορεία φυσικού αερίου.

(δ) Λεωφορεία με κινητήρες που καταναλώνουν μείγμα φυσικού αερίου και υδρογόνου, σε αναλογία 80% - 20% ή 70% - 30% (BATELLE, 2002).

(ε) Λεωφορεία με ηλεκτροκινητήρες: Η χρήση των ηλεκτροκινητήρων ξεκίνησε ως λύση για την αντιμετώπιση της προκαλούμενης από τις μετακινήσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι ηλεκτροκινητήρες αντλούν εξ ολοκλήρου την απαιτούμενη ενέργεια κίνησης από συσσωρευτές, οι οποίοι επαναφορτίζονται σε τακτά χρονικά διαστήματα σε ειδικούς σταθμούς, και πλεονεκτούν έναντι των πετρελαιοκινητήρων ως προς τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις – υστερούν, όμως, σε θέματα αξιοπιστίας και σταθερότητας στην απόδοση. Ο μεγάλος χρόνος επαναφόρτισης των συσσωρευτών ενδέχεται να οδηγήσει σε απαίτηση συνεχούς αντικατάστασής τους, ενώ απαιτείται επιπλέον ειδική εκπαίδευση του προσωπικού.

Η πιο σύγχρονη εξέλιξη των ηλεκτροκινητήρων είναι οι ηλεκτροκινητήρες με κυψέλες καυσίμου (π.χ. υδρογόνου). Σε αντίθεση με του συσσωρευτές, οι κυψέλες καυσίμου δεν αποθηκεύουν, αλλά παράγουν επιτόπου ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, η χρήση τους δεν έχει διαδοθεί ευρέως εξαιτίας των περιορισμένων δοκιμών που έχουν πραγματοποιηθεί, καθώς και του υψηλού κόστους.

(στ) Υβριδικά λεωφορεία: Τα υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν συνδυασμό ηλεκτροκινητήρα με συσσωρευτές και κινητήρα άλλου τύπου. Παρουσιάζουν όλα τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροκίνησης (συμπεριλαμβανομένης της μειωμένης εκπομπής ρύπων, ακόμα και στην περίπτωση που ο δεύτερος κινητήρας είναι πετρελαιοκινητήρας) και, επιπλέον, τη δυνατότητα επαναφόρτισης των συσσωρευτών κατά τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος. Τα βασικά τους μειονεκτήματα έγκεινται στην έλλειψη αυτονομίας και το υψηλό κόστος τους.

## **2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση καυσίμου και την εκπομπή ρύπων**

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση καυσίμου και την αντίστοιχη ποσότητα των ρύπων οι οποίοι εκπέμπονται κατά την κίνηση ενός οχήματος είναι οι εξής (Duysinx, 2012):

(α) Τα χαρακτηριστικά της μηχανής.

- (β) Τα χαρακτηριστικά μετάδοσης της κίνησης (σχέση μετάδοσης, απόδοση).
- (γ) Το απόβαρο του οχήματος.
- (δ) Η οπισθέλκουσα δύναμη.
- (ε) Η αντίσταση κύλισης.
- (στ) Ο κύκλος οδήγησης και τα χαρακτηριστικά του ταξιδιού.
- (ζ) Η συμπεριφορά – «επιθετικότητα» του οδηγού.

Παρατηρώντας τους επτά παραπάνω παράγοντες, γίνεται αντιληπτό πως σχετίζονται:

- (α) Με το ίδιο το όχημα (π.χ. με τα χαρακτηριστικά της μηχανής του).
- (β) Με τον τρόπο οδήγησης (συμπεριφορά οδηγού).
- (γ) Με το οδικό περιβάλλον (για παράδειγμα, η κατά μήκος κλίση του οδικού άξονα επηρεάζει την αντίσταση κύλισης).

### 3.1 Γενικά

Όπως εξηγήθηκε στο υποκεφάλαιο 1.1, οι τρόποι επίλυσης του TRNDP παρουσιάζουν έντονη ποικιλία ως προς τους στόχους, τις παραμέτρους και τη μεθοδολογική προσέγγιση. Επομένως, υπάρχουν πολλοί τρόποι ομαδοποίησης των δημοσιευμένων ερευνών που επικεντρώνονται στην επίλυση του TRNDP. Στην παρούσα εργασία, η βιβλιογραφία παρουσιάζεται ομαδοποιημένη σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τις μεταβλητές απόφασης (υποκεφάλαιο 3.2), ενώ οι μεθοδολογίες επίλυσης διακρίνονται σε συμβατικές και ευρετικές.

### 3.2 Ομαδοποίηση ερευνών

Οι μεταβλητές απόφασης του TRNDP διαφέρουν μεταξύ των ερευνών: Ορισμένες έρευνες αποσκοπούν στον προσδιορισμό των γραμμών του δικτύου, κάποιες άλλες στον καθορισμό των συχνοτήτων, ενώ τα τελευταία χρόνια συνηθίζονται προσεγγίσεις που επιδιώκουν τον ταυτόχρονο καθορισμό γραμμών και συχνοτήτων. Προκειμένου να συστηματοποιήσουν τις υπάρχουσες προσεγγίσεις του προβλήματος, οι Van Nes et al. (1988) ομαδοποίησαν τα μαθηματικά πρότυπα επίλυσης στις εξής έξι κατηγορίες:

- (α) Αναλυτικά πρότυπα για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων του συγκοινωνιακού συστήματος.
- (β) Πρότυπα προσδιορισμού των συνδέσμων (links) που θα ενταχθούν στο συγκοινωνιακό δίκτυο.
- (γ) Πρότυπα καθορισμού των γραμμών (μόνο).
- (δ) Πρότυπα καθορισμού συχνοτήτων για δεδομένο σύνολο γραμμών.
- (ε) Πρότυπα δύο φάσεων, όπου πρώτα κατασκευάζονται οι γραμμές και έπειτα προσδιορίζεται η συχνότητα καθεμιάς.
- (στ) Πρότυπα ταυτόχρονου καθορισμού γραμμών και συχνοτήτων.

Από το 2007, η έρευνα γύρω από την επίλυση του TRNDP επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο σε πρότυπα ταυτόχρονου καθορισμού συχνοτήτων και γραμμών, καθώς και σε πρότυπα για την κατασκευή των γραμμών του δικτύου, χωρίς καθορισμό των συχνοτήτων. Και στις δύο περιπτώσεις, πρωταρχικό ρόλο έπαιξε η διάδοση της εφαρμογής ευρετικών (heuristics) και μεθευρετικών (metaheuristics) μεθόδων, οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα ευρείας αναζήτησης λύσεων.

Στην παρούσα εργασία, η παρουσίαση των σχετικών δημοσιευμένων ερευνών βασίζεται στη διαίρεσή τους στις εξής τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τις μεταβλητές απόφασης:

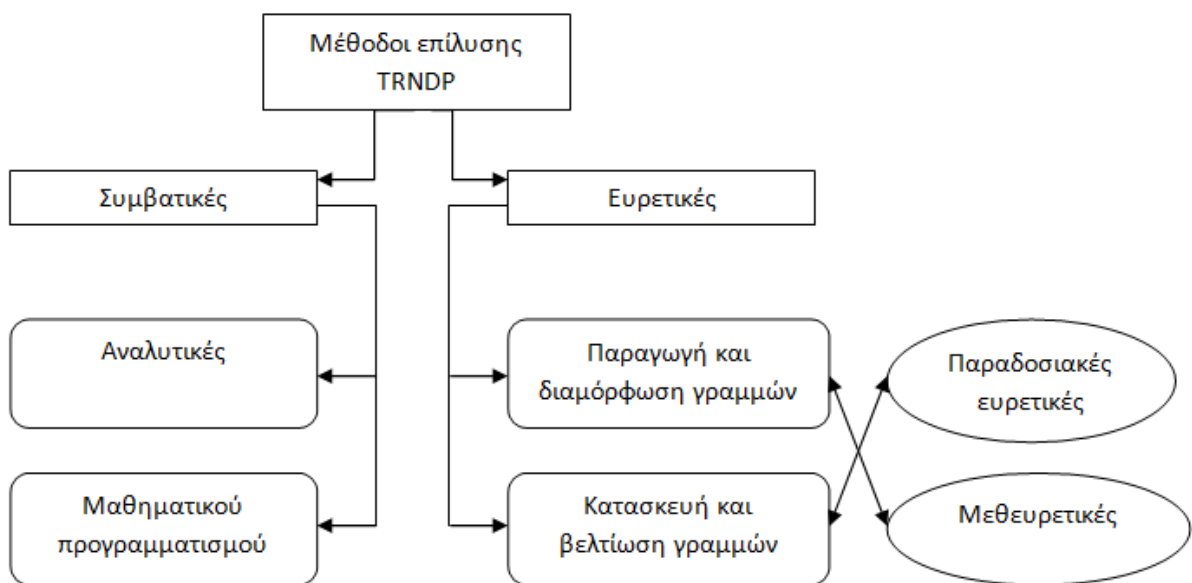
(α) Κατασκευή γραμμών συγκοινωνιακού δικτύου.

(β) Καθορισμός συχνοτήτων δεδομένων γραμμών.

(γ) Ταυτόχρονος προσδιορισμός γραμμών και αντίστοιχων συχνοτήτων.

(δ) Καθορισμός δρομολογίων.

Οι μέθοδοι επίλυσης του TRNDP μπορούν να διαιρεθούν σε δύο βασικές κατηγορίες (Keraptsoglou and Karlaftis, 2009): Στις συμβατικές (conventional) και τις ευρετικές (heuristic). Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζονται οι δύο αυτές κατηγορίες, καθώς και οι υποδιαίρεσεις τους.



Σχήμα 3.1 Μεθολογίες επίλυσης κατά Keraptsoglou and Karlaftis (2009).

Τα τελευταία χρόνια οι συμβατικές μέθοδοι σταδιακά αντικαθίστανται από ευρετικές και μεθευρετικές λόγω της συνδυαστικής φύσης του προβλήματος (Israeli and Ceder, 1993) και της δυσκολίας που παρουσιάζει η διατύπωσή του με μεθόδους μαθηματικού προγραμματισμού (Chakroborty, 2003).

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι διάφορες μεθοδολογίες που έχουν προταθεί τα τελευταία έξι χρόνια για την επίλυση του TRNDP, ομαδοποιημένες σε πρώτο επίπεδο ανάλογα με τις μεταβλητές απόφασης και σε δεύτερο επίπεδο ανάλογα με την ακολουθούμενη μεθοδολογία.

### 3.3 Πρόσφατες έρευνες επίλυσης TRNDP

#### 3.3.1 Κατασκευή γραμμών συγκοινωνιακού δικτύου

##### (α) Συμβατικές μέθοδοι

##### (α.1) Αναλυτικές μέθοδοι

Σε αυτήν την κατηγορία υπάγεται η έρευνα των **Estrada et al. (2011)**, οι οποίοι σχεδίασαν ένα εξιδανικευμένο δίκτυο για λεωφορεία υψηλής απόδοσης (High Performance Buses-HBS). Το δίκτυο έχει ορθογωνική κάτοψη, διαστάσεων  $D_x * D_y$  ( $D_x \geq D_y$ ). Πυρήνας του είναι ένας κάναβος, αποτελούμενος από γραμμές δύο κατευθύνσεων οι οποίες απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $s_x$  κατά το  $x$  άξονα και  $s_y$  κατά τον  $y$  και καλύπτουν ένα ορθογώνιο ομόκεντρο του πρώτου, διαστάσεων  $d_x * d_y$ . Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών στάσεων ισούται με  $s$ , ενώ η απόσταση μεταξύ των γραμμών με  $s_x = p_x * s$  και  $s_y = p_y * s$ , όπου  $p_x$  και  $p_y$  ακέραιοι. Στην επίλυση χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχοι αδιάστατοι όροι  $\alpha_x = d_x / D_x$  και  $\alpha_y = d_y / D_y$ . Γίνεται, επιπλέον, η παραδοχή ότι όλες οι γραμμές έχουν κοινό χρονικό διαχωρισμό  $H$  στον πυρήνα και αυξημένο χρονικό διαχωρισμό στα σημεία της περιφέρειας όπου διακλαδίζονται. Το πρόβλημα επιλύεται ως προς τις μεταβλητές  $H$ ,  $s$ ,  $s_x$ ,  $s_y$ ,  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  για ελαχιστοποίηση του κόστους φορέα και χρήστη. Οι ερευνητές εφάρμοσαν τη μεθοδολογία τους στην πόλη της Βαρκελώνης.

##### (α.2) Μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού

Με μέθοδο μαθηματικού προγραμματισμού, και συγκεκριμένα με τη διάσπαση Benders, χρησιμοποίησαν οι **Marín and Jaramillo (2008)**, οι οποίοι διαίρεσαν το πρόβλημα σε δύο επιμέρους: Ένα κύριο πρόβλημα προσδιορισμού εφικτού δικτύου (πρόβλημα τοποθέτησης – location problem) και ένα δεύτερο (sub problem) πρόβλημα καταμερισμού της ζήτησης. Η διάσπαση κατά Benders αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία μεταξύ του κύριου μοντέλου (Master Model-MM) και του δευτερεύοντος μοντέλου (Sub Model-SM). Σε κάθε επανάληψη, οι δυϊκές μεταβλητές του δεύτερου μοντέλου καθορίζουν τις λεγόμενες «περικοπές βελτιστοποίησης» ή «περικοπές εφικτότητας» (Optimality Benders Cuts – OBC ή Feasibility Benders Cuts – FBC). Είναι, επίσης, δυνατή η επιτάχυνση της σύγκλισης με εφαρμογή της επιταχυνόμενης διάσπασης Benders (Accelerated Benders Decomposition). Το μοντέλο των Marín και Jaramillo δοκιμάστηκε στην Σεβίλλη της Ισπανίας.

Οι **Černa et al. (2011)** επέλυσαν με πέντε διαφορετικούς τρόπους το πρόβλημα κάλυψης της μεταφορικής ζήτησης με κατασκευή μίας μόνο γραμμής, θεωρώντας δεδομένο το δίκτυο  $G$  και τη ζήτηση  $D$ . Στόχος του προβλήματος ήταν η ελαχιστοποίηση του μήκους της γραμμής έτσι ώστε η μέση απόσταση των σημείων Προέλευσης επιβατών από τις λεωφορειακές στάσεις να μην υπερβαίνει ένα όριο  $\lambda$ .

Η πρώτη και η πέμπτη προτεινόμενη μέθοδος των Černa et al. ανήκουν στην κατηγορία των (συμβατικών) μεθόδων μαθηματικού προγραμματισμού: Η πρώτη μέθοδος ονομάζεται

ακριβής μέθοδος (Exact Method – EM) και βασίζεται στην επίλυση του Προβλήματος του Περιοδεύοντος Πωλητή (Open Travelling Salesman Problem – OTSP). Η πέμπτη μέθοδος συνίσταται στη μετατροπή του προβλήματος σε πρόβλημα Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Integer LP Model).

Οι υπόλοιπες μέθοδοι θα εξεταστούν χωριστά, καθώς ανήκουν στην κατηγορία των ευρετικών.

## (β) Ευρετικές - Μεθευρετικές μέθοδοι

Μια μέθοδος προσανατολισμένη στον καθορισμό των γραμμών του δικτύου προτάθηκε από τους **Mauttone and Urquhart (2009)**. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ονομάζεται Αλγόριθμος Εισαγωγής Ζευγών (Pair Insertion Algorithm-PIA) και στηρίζεται στον προϋπάρχοντα RGA (Route Generation Algorithm) των Baaj and Mahmassani (1995). Λαμβάνοντας υπόψη τη διαζωνική φύση της ζήτησης, ο PIA εισάγει τους κόμβους ανά ζεύγη – και όχι μεμονωμένα, όπως συνηθιζόταν σε προηγούμενα αντίστοιχα πρότυπα – σε καινούργιες ή υπάρχουσες γραμμές, με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απαιτούμενες μετεπιβιβάσεις. Για την εφαρμογή του PIA επιλέχθηκε η πόλη Rivera της Ουρουγουάης.

Οι **Fan and Mumford (2010)**, εφάρμοσαν στο πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl μια ευρετική μέθοδο η οποία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο στάδια:

- Στο πρώτο στάδιο κατασκευάζεται ένα δίκτυο με απλή συνένωση των εφικτών γραμμών ενός δεδομένου συνόλου σύμφωνα με τον αλγόριθμο της συντομότερης διαδρομής, χωρίς να ληφθούν υπόψη οι μετεπιβιβάσεις.
- Στη συνέχεια, κάθε παραγόμενο σύνολο γραμμών  $S$  υφίσταται μικρές τροποποιήσεις από τον αλγόριθμο Make – Small – Change, με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός νέου συνόλου  $S'$ . Αφού υπολογιστεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, επιλέγεται ως νέο σύνολο, με την εφαρμογή είτε απλού «αλγόριθμου του ορειβάτη» (hill-climbing – HC) είτε, εναλλακτικά, προσομοιωμένης απόπτωσης (Simulated Annealing – SA), ένα εκ των  $S, S'$ , και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, οι **Černa et al. (2011)** παρουσίασαν πέντε διαφορετικούς τρόπους για την επίλυση του προβλήματος κάλυψης της μεταφορικής ζήτησης με μία μόνο γραμμή. Από αυτές τις μεθόδους, η δεύτερη, η τρίτη και η τέταρτη είναι ευρετικές. Συγκεκριμένα, η δεύτερη είναι Γενική Άπληστη Ευρετική Μέθοδος (General Greedy Heuristics – GGH), η τρίτη Άπληστη Ευρετική Μέθοδος Γειτονιάς (Neighbourhood Greedy Heuristics – NGH) και η τέταρτη Συνδυασμένη Ευρετική Μέθοδος (Combined Heuristics – CH).

Ακολούθησε η έρευνα των **Euchi and Mraïhi (2012)**, οι οποίοι επέλυσαν το Πρόβλημα Δρομολόγησης Σχολικού Λεωφορείου (School Bus Routing Problem, SBRP) για την ευρύτερη περιοχή της Τύνιδας (Great Tunis) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της Υβριδικής Αποικίας Τεχνητών Μυρμηγκιών (Hybrid Artificial Ant Colony – HAAC), η οποία συνδυάζει τον

αλγόριθμο της Αποικίας Τεχνητών Μυρμηγκιών (Artificial Ant Colony – AAC) με την Έρευνα Μεταβλητής Γειτονιάς (Variable Neighbourhood Search – VNS). Η μέθοδος συνοψίζεται στα εξής βήματα:

- Αναπαράσταση λύσης: Η λύση του προβλήματος αποτελείται από μια συμβολοσειρά (string) μήκους ίσου με τον αριθμό των στάσεων. Η τιμή που αντιστοιχίζεται σε κάθε στάση αντιστοιχεί στο λεωφορείο που θα διέρχεται από αυτή.
- Κατασκευή και βελτίωση (αρχικής) λύσης: Η αρχική λύση βελτιώνεται με τη μέθοδο της Δυναμικής Κατασκευής (Dynamic Construction) και, συγκεκριμένα, με χρήση Δυναμικής Αλυσίδας Λεωφορειακών Στάσεων (Dynamic Chain of Bus Stops), κατά την οποία εισάγονται στάσεις σε ήδη κατασκευασμένες γραμμές.
- Τοπική ενημέρωση φερομόνης (Local pheromone update).
- Έρευνα Μεταβλητής Γειτονιάς (Variable Neighbourhood Search – VNS). Πρόκειται για διαδικασία αναζήτησης με εφαρμογή ευρετικής μεθόδου τοπικής αναζήτησης γειτονιάς με ανταλλαγή (swar neighborhood local search heuristic). Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται ο εγκλωβισμός σε τοπικά βέλτιστα.
- Καθολική ενημέρωση φερομόνης (Global pheromone update).

Μεθυστική μέθοδο αναζήτησης με ταμπού (Tabu Search – TS) ανέπτυξαν οι **Roca-Riu et al. (2012)** με στόχο τη χωροθέτηση των γραμμών και των στάσεων υπεραστικών λεωφορείων μέσα στην πόλη. Συγκεκριμένα, θεωρείται δεδομένη η περιοχή μελέτης A, όπου βρίσκονται οι λεωφορειακές στάσεις και οι σταθμοί μετεπιβίβασης, και ο γράφος  $G(H;E)$ , όπου H και E οι κόμβοι και οι σύνδεσμοι, αντιστοίχως, του υπάρχοντος μεταφορικού δικτύου. Οι κόμβοι διαιρούνται σε τρία υποσύνολα:

- Υποσύνολο I: Οι «είσοδοι» της πόλης (city gates).
- Υποσύνολο J: Τα κεντροειδή των ζωνών παραγωγής και έλξης μετακινήσεων.
- Υποσύνολο K: Οι εν δυνάμει στάσεις των υπεραστικών λεωφορείων στην πόλη, οι οποίες ταυτίζονται με τις υπάρχουσες στάσεις αστικών λεωφορείων και σιδηροδρόμων (rail lines). Ισχύει  $I \subset K$ .

Επιπλέον, ορίζεται εκτός πόλης το σύνολο G των κόμβων προέλευσης του αντίστοιχου πίνακα O-D. Με χρήση του αλγορίθμου του Dijkstra (1959), βρίσκονται οι ελάχιστες διαδρομές R μεταξύ όλων των πιθανών στάσεων.

Σε κάθε επανάληψη, επιλέγεται μία στάση και αξιολογούνται οι πιθανές «κινήσεις» μεταξύ της συγκεκριμένης στάσης και ενός πλήθους από τις κοντινότερες της και επιλέγεται η καλύτερη. Οι κινήσεις αυτές περιλαμβάνουν:

- Αλλαγή της στάσης τερματισμού της γραμμής.
- Αφαίρεση της στάσης τερματισμού και αντικατάσταση της νέας στάσης τερματισμού από άλλη.
- Προσθήκη επιπλέον στάσης στο πέρας της γραμμής.
- Αλλαγή ενδιάμεσης στάσης της γραμμής.

Το μοντέλο των Roca-Riu et al. εφαρμόστηκε στην πόλη της Βαρκελώνης.

Τέλος, η πιο πρόσφατη έρευνα κατασκευής γραμμών ανήκει στους **Nikolić and Teodorović (2013)**, οι οποίοι βασίστηκαν στη νοημοσύνη σμήνους (Swarm Intelligence) και συγκεκριμένα στη μέθοδο Βελτιστοποίησης Αποικίας Μελισσών (Bee Colony Optimization – BCO). Η βασική ιδέα της μεθόδου έγκειται στη θεώρηση ενός τεχνητού σμήνους μελισσών οι οποίες εξερευνώντας το διαθέσιμο χώρο λύσεων κατά τον εξής τρόπο: Κάθε μέλισσα δημιουργεί μια αρχική λύση και στη συνέχεια ανταλλάσσει πληροφορίες με τα υπόλοιπα μέλη του σμήνους προκειμένου να εντοπιστούν οι λύσεις που αποδίδουν τις καλύτερες τιμές στην αντικειμενική συνάρτηση – εν προκειμένω, εκείνες που ελαχιστοποιούν τον απαιτούμενο χρόνο μετακίνησης. Το αποτέλεσμα είναι η συγκέντρωση των μελισσών στις περιοχές όπου εντοπίζονται οι λύσεις αυτές. Στη συνέχεια, οι μέλισσες παράγουν νέες λύσεις ή και βελτιώνουν τις ήδη υπάρχουσες. Ο αλγόριθμος αποτελείται από τις εξής εναλλασσόμενες φάσεις, οι οποίες επαναλαμβάνονται μέχρι την ικανοποίηση μιας συνθήκης τερματισμού:

- Κίνηση προς τα εμπρός (forward pass): Κατά την κίνηση προς τα εμπρός, κάθε μέλισσα κατασκευάζει νέες δυνατές λύσεις. Οι λύσεις αυτές είτε είναι απολύτως καινούργιες, είτε προκύπτουν με τροποποίηση των υπαρχουσών λύσεων.
- Κίνηση προς τα πίσω (backward pass): Κατά την κίνηση προς τα πίσω, οι μέλισσες συγκεντρώνονται στην υποθετική τους κυψέλη και ανταλλάσσουν πληροφορίες για την ποιότητα των λύσεων. Στη συνέχεια, κάθε λύση είτε διατηρείται είτε εγκαταλείπεται, με πιθανότητα που εξαρτάται από την τιμή την οποία προσδίδει στην αντικειμενική συνάρτηση.

Η αρχική λύση των Nikolić και Teodorović κατασκευάστηκε με απλό αλγόριθμο «άπληστης αναζήτησης» (greedy algorithm), ο οποίος εντάσσει στάσεις με υψηλή ζήτηση στην ίδια γραμμή, ώστε η ζήτηση αυτή να ικανοποιείται απευθείας. Ωστόσο, η επίλυσή τους διαφοροποιείται ως προς την κλασσική επίλυση σε ένα βασικό σημείο: Θεωρούν την ύπαρξη όχι ενός, αλλά δύο διαφορετικών ειδών μελισσών (Type 1 και Type 2), τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον τρόπο με τον οποίο τροποποιούν τις λύσεις.

#### **(γ) Συνδυασμός συμβατικών και ευρετικών μεθόδων**

Χαρακτηριστικό παράδειγμα έρευνας η οποία συνδυάζει συμβατικές και ευρετικές μεθόδους επίλυσης αποτελεί εκείνη των **Curtin and Biba (2011)**. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν το μοντέλο TRANSMAX (Transit Route Arc-Node Service Maximization model), το οποίο και εφάρμοσαν στην περιοχή Richardson του Τέξας.

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βασίζεται στη δομή των προβλημάτων του περιοδεύοντος πωλητή (Travelling Salesman Problem) και της δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing Problem). Η επίλυση ακολουθεί την τακτική «διαίρει και βασίλευε» (divide-and-conquer), κατά την οποία το πρόβλημα διαιρείται σε μικρότερα επιμέρους προβλήματα. Με τον τρόπο αυτό επιταχύνεται η διαδικασία επίλυσης και, ταυτόχρονα, προκύπτουν πολλές εναλλακτικές γραμμές με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.



Η διαδικασία επίλυσης περιλαμβάνει τρία στάδια:

- 1<sup>ο</sup> στάδιο: Χρησιμοποιείται ευρετικός αλγόριθμος απομείωσης δικτύου (network reduction heuristic), ο οποίος περιορίζει τον αριθμό των κόμβων και των συνδέσμων που θα αποτελέσουν το δίκτυο.
- 2<sup>ο</sup> στάδιο: Καθορίζεται το εύρος των δυνατών τιμών για το πλήθος  $R$  των συνδέσμων της βέλτιστης γραμμής, εξαρτώμενο από τη γεωμετρική μορφή της (π. χ. η κατασκευή βρόχου απαιτεί τουλάχιστον τρεις συνδέσμους).
- 3<sup>ο</sup> στάδιο: Βρίσκεται η βέλτιστη λύση για κάθε μία από τις δυνατές τιμές του  $R$  με συνδυασμένη χρήση του αλγορίθμου Simplex και μιας τεχνικής «κλάδου και φράγματος» (branch and bound).

### 3.3.2 Καθορισμός συχνοτήτων δεδομένων γραμμών

#### (α) Συμβατικές μέθοδοι

Μεταξύ των ερευνών που αποσκοπούν στον καθορισμό των συχνοτήτων δεδομένων γραμμών ξεχωρίζει εκείνη των **Torres et al. (2011)**, η οποία εξετάζει τον τρόπο κατά τον οποίο η τοπολογία του δικτύου επηρεάζει τη δυνατότητα επίλυσης του προβλήματος κάλυψης της ζήτησης (Demand Covering Model-DCM) σε πολυωνυμικό ή μη χρόνο. Συγκεκριμένα, οι ερευνητές διερεύνησαν διαφορετικές περιπτώσεις δικτύων τοπολογίας αστέρα και δένδρου με μη προσανατολισμένες διαδρομές, που εξυπηρετούν 1 ή 2 «γειτονιές» (1-NB και 2-NB, αντιστοίχως). Στη συνέχεια, επέλυσαν το πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού για το συγκοινωνιακό δίκτυο του Quito, το οποίο υποδιείρεσαν σε τρία επιμέρους δίκτυα με τοπολογία αστέρα (subdivided star).

#### (β) Ευρετικές – μεθευρετικές μέθοδοι

Στην κατηγορία αυτή είναι χαρακτηριστική η έρευνα των **Gallo et al. (2011)**, οι οποίοι επέλυσαν το πρόβλημα για δεδομένο δίκτυο – συγκεκριμένα το μετρό της ιταλικής πόλης Campania – με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

(α) Με Ευρετικό Αλγόριθμο Τοπικής Αναζήτησης (Heuristic Local Search Algorithm – HLSA). Αρχικά, βελτιστοποιείται η συχνότητα κάθε γραμμής ξεχωριστά, θεωρώντας σταθερές τις συχνότητες των υπόλοιπων γραμμών. Οι βέλτιστες αυτές συχνότητες αποτελούν την αρχική λύση, η οποία τροποποιείται με χρήση αλγορίθμου τοπικής αναζήτησης NS (Neighbourhood Search). Από όλες τις παραγόμενες λύσεις, επιλέγεται και τροποποιείται εκείνη που βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση.

(β) Με Διασκορπισμένη Αναζήτηση (Scatter Search), η οποία χρησιμοποιεί τον HLSA για να παραγάγει κατ' επανάληψη βελτιωμένα σύνολα λύσεων (που αντιστοιχούν σε τοπικά βέλτιστα) με βάση προηγούμενα σύνολα.

(γ) Με Γενετικό Αλγόριθμο (Genetic Algorithm – GA), εφαρμόζοντας, κατά τα γνωστά, τους γενετικούς τελεστές της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης (mutation).

Γενετικό αλγόριθμο (GA) εφάρμοσαν επίσης οι **Ferguson et al. (2011)** για τον καθορισμό των συχνοτήτων. Στόχος τους ήταν η επίτευξη της ισότητας (equity) ως προς τη δυνατότητα πρόσβασης των μετακινούμενων σε βασικές παροχές, όπως η εργασία, η αγορά και οι υπηρεσίες υγείας. Η ζήτηση λαμβάνεται υπόψη με σχετική αβεβαιότητα (demand uncertainty), ώστε να συνυπολογιστεί η μεταβλητότητα τόσο του αριθμού των μετακινούμενων, όσο και των σημείων προορισμού. Η επίλυση του προβλήματος για μια μεσαίου μεγέθους μητροπολιτική περιοχή των ΗΠΑ απέδειξε ότι, όσο μεγαλύτερη η αβεβαιότητα της ζήτησης, τόσο πιο απαραίτητο είναι να λαμβάνεται υπόψη.

### 3.3.3 Ταυτόχρονος προσδιορισμός γραμμών και αντίστοιχων συχνοτήτων

#### (α) Συμβατικές μέθοδοι

Λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει ο ταυτόχρονος προσδιορισμός γραμμών και συχνοτήτων, οι ευρετικές και μεθευρετικές μέθοδοι ενδείκνυνται ως η πλέον κατάλληλη λύση. Επομένως, δε συνηθίζεται πλέον η προσέγγιση του συγκεκριμένου προβλήματος με χρήση συμβατικών μεθόδων.

#### (β) Ευρετικές – μεθευρετικές μέθοδοι

Η μέθοδος ISTG των **Zhao and Zeng (2008)** βασίζεται στον επαναληπτικό προσδιορισμό ενός τοπικού διαστήματος αναζήτησης λύσεων και σε έναν ευρετικό αλγόριθμο ο οποίος συνδυάζει Ολοκληρωμένη Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Integrated Simulated Annealing), Αναζήτηση με Ταμπού (Tabu Search) και Άπληστη Αναζήτηση (Greedy Search).

Ορισμένοι από τους κόμβους του δικτύου αποτελούν τους λεγόμενους «master nodes», οι οποίοι βρίσκονται επί του «master path». Με δεδομένα τα master paths, παράγονται νέες διαδρομές μέσω τοπικής αναζήτησης. Το σύνολο των γραμμών αυτών,  $P_1(p)$  αποτελεί το τοπικό διάστημα διαδρομών (local path space) του master path  $p$ . Συγχρόνως, παράγεται ένα δεύτερο σύνολο διαδρομών, το  $P_2(p)$ , προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι όλοι οι παρακείμενοι κόμβοι του master path θα συμπεριληφθούν στις παραγόμενες γραμμές. Η αναζήτηση με ταμπού και η άπληστη αναζήτηση επιταχύνουν τη διαδικασία επίλυσης σε σχέση με τη μεμονωμένη εφαρμογή της προσομοιωμένης ανόπτησης.

Η ισχύς του μοντέλου διαπιστώθηκε τόσο κατά την εφαρμογή του σε απλά, υποθετικά δίκτυα, όσο και στο κλασικό ελβετικό δίκτυο του Mandl.

Μια επιπλέον έρευνα προσδιορισμού γραμμών και συχνοτήτων είναι των **Fan et al. (2008)**, οι οποίοι συνδύασαν τις εξής τρεις διαδικασίες:

α) Αρχική Διαδικασία Παραγωγής Υποψήφιων Γραμμών (Initial Candidate Route Set Generation Procedure – ICRSGP): Χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο της συντομότερης διαδρομής κατά Dijkstra (1959) και τον αλγόριθμο των  $k$ -συντομότερων διαδρομών κατά Yen (1971) για να παραγάγει εφικτές γραμμές.

β) Διαδικασία Ανάλυσης Δικτύου (Network Analysis Procedure-NAP): Κατανέμει στο δίκτυο την επιβατική κίνηση, καθορίζει τις συχνότητες και υπολογίζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

γ) Μεθευρετική Διαδικασία Αναζήτησης (Metaheuristic Search Procedure – MSP): Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των δύο προηγούμενων διαδικασιών επιλέγει, σε κάθε επανάληψη, το βέλτιστο σύνολο γραμμών. Η επιλογή των καλύτερων λύσεων γίνεται με συνδυασμένη χρήση γενετικού αλγορίθμου (GA) και προσομοιωμένης απόπτωσης (SA).

Παρόμοια, οι **Beltran et al. (2009)** δημοσίευσαν μία ακόμα ευρετική/μεθευρετική μέθοδο την οποία εφάρμοσαν στην πόλη της Ρώμης. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η θεώρηση οικολογικών οχημάτων (green vehicles), πέραν των συμβατικών, και η αντίστοιχη διαίρεση του δικτύου σε δύο επιμέρους δίκτυα: Το μη-πράσινο (non-green subnetwork), στο οποίο επιτρέπεται η κυκλοφορία οικολογικών και μη οχημάτων, και το πράσινο (green subnetwork), από όπου διέρχονται αποκλειστικά οικολογικά οχήματα. Η επιλογή του πράσινου δικτύου προσαυξάνει περαιτέρω το περιβαλλοντικό όφελος που συνεπάγεται η επιλογή του λεωφορείου έναντι του ΙΧ.

Ακριβέστερα, η αντικειμενική συνάρτηση των Beltran et al. αποτελείται από τρεις όρους (κόστος φορέα, κόστος χρήστη και εξωτερικό κόστος). Η παραγωγή των γραμμών πραγματοποιείται με χρήση ευρετικού αλγορίθμου (Heuristic Route Generation Algorithm – HRGA), ο οποίος παράγει τρία διαφορετικά και συμπληρωματικά μεταξύ τους σύνολα εφικτών γραμμών, τα A, B και C: Το σύνολο A περιλαμβάνει γραμμές που συνδέουν απευθείας, με βάση τη συντομότερη διαδρομή, εκείνα τα ζεύγη Προέλευσης – Προορισμού που παρουσιάζουν την υψηλότερη ζήτηση αλλά δεν εξυπηρετούνται από σιδηροδρομική σύνδεση. Οι γραμμές του συνόλου B συνδέουν τους βασικότερους σταθμούς μετεπιβίβασης, ενώ το C περιλαμβάνει τις γραμμές του υπάρχοντος δικτύου.

Η παραγωγή των γραμμών του συνόλου B πραγματοποιείται σε 2 φάσεις:

- Προσδιορισμός του σκελετού (skeleton) του δικτύου.
- Παραγωγή των διαδρομών του δικτύου. Αφού κατασκευαστεί ο σκελετός, οι γραμμές διαμορφώνονται με επιλογή και εισαγωγή συνδέσμων, ανάλογα με τους επιβατικούς φόρτους. Οι εφικτές εξ αυτών εισάγονται στη δεύτερη φάση επίλυσης του προβλήματος, δηλαδή στη διαμόρφωση των γραμμών (Route configuration) με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου (Genetic Algorithm – GA).

Επεκτείνοντας την προηγούμενη έρευνά τους, οι **Mauttone and Urquhart (2009)** πρότειναν τη μεθευρετική διαδικασία Άπληστης Τυχαιοποιημένης Προσαρμοστικής Αναζήτησης (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure – GRASP), η οποία συνίσταται στην επαναλαμβανόμενη εκτέλεση δύο διαδικασιών, της κατασκευής λύσεων και της τοπικής αναζήτησης. Αρχικά, υπολογίζεται η συντομότερη διαδρομή μεταξύ όλων των ζευγών κόμβων του εξεταζόμενου δικτύου G και στη συνέχεια ακολουθεί η επαναληπτική διαδικασία.

Η κατασκευή λύσεων πραγματοποιείται με τον Αλγόριθμο Εισαγωγής Ζευγών (PIA), που οι ίδιοι ερευνητές είχαν δημοσιεύσει νωρίτερα (υποκεφάλαιο 3.3.1). Η τοπική αναζήτηση υπολογίζει ένα σχεδόν βέλτιστο σύνολο συχνοτήτων  $F$  για δεδομένη σχέση μεταξύ του κόστους φορέα και του κόστους χρηστών. Συγκεκριμένα, αλλάζοντας τη συχνότητα κάθε γραμμής μιας λύσης  $S$ , προκύπτει η «γειτονιά»  $NS$  της λύσης. Ο αλγόριθμος τοπικής αναζήτησης βρίσκει τη λύση που ελαχιστοποιεί την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Κάθε φορά που η τιμή αυτή βελτιώνεται, η εξερεύνηση της γειτονιάς τερματίζεται και η τοπική αναζήτηση προχωράει στο επόμενο βήμα.

Ο συνδυασμός PIA και GRASP παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα, κατά την εφαρμογή του τόσο στο κλασσικό δίκτυο του Mandl όσο και στο δίκτυο της πόλης Rivera.

Στην ίδια κατηγορία ανήκει η έρευνα των **Shimamoto et al. (2010)**: Χρησιμοποίησαν γενετικό αλγόριθμο «ελιτίστικης», μη κυριαρχούμενης διαλογής (elitist non-dominated sorting genetic algorithm – NSGA-II) για την αξιολόγηση της λειτουργίας του υπάρχοντος δικτύου της Hiroshima, θεωρώντας δεδομένες τις θέσεις των διαθέσιμων στάσεων. Διακρίνουν έξι είδη κόμβων: Προέλευσης (origin node), προορισμού (destination node), στάσης (stop), επιβίβασης (boarding node), αποβίβασης (alighting node) και αποτυχημένης επιβίβασης (failure node). Αντίστοιχα, διακρίνουν επτά είδη συνδέσμων: Γραμμής (line arc), επιβιβαζόμενης ζήτησης (boarding demand arc), επιβίβασης (boarding arc), αποβίβασης (alighting arc), στάσης (stopping arc), βαδίσματος (walking arc) και αποτυχημένης επιβίβασης (failure arc).

Χαρακτηριστικό της έρευνας αυτής είναι ότι, σε αντίθεση με τις περισσότερες σχετικές δημοσιεύσεις, το γενικευμένο κόστος μιας διαδρομής περιλαμβάνει και το έμμεσο κόστος που συνδέεται με την αποτυχία επιβίβασης.

Στο πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl εφάρμοσαν επίσης οι **Han et al. (2011)** την ακόλουθη διαδικασία τριών διαδοχικών βημάτων για τον καθορισμό των γραμμών και των αντίστοιχων συχνοτήτων:

- Βήμα 1: Παραγωγή υποψήφιων γραμμών (Candidate Route Generation). Στο παραγόμενο σύνολο περιλαμβάνονται διαφορετικά είδη γραμμών, που προκύπτουν από τους αλγορίθμους της συντομότερης διαδρομής (Shortest Path ή Minimum Time – MT), της διαδρομής μέγιστης ροής (Maximal flow path ή Maximum Demand – MD, της διαδρομής μέγιστης ροής ανά ελάχιστο χρόνο (Maximal flow path per Minimum Time – MDMT), της διαδρομής μέγιστης ροής ανά ελάχιστο μήκος γραμμής (Maximal flow path per Minimum Route Length – MDML) και της διαδρομής μέγιστης ροής ανά ελάχιστο κόστος (Maximal flow path per Minimum Cost – MDMC).
- Βήμα 2: Εφαρμογή μεθευρετικών μεθόδων (Γενετικών Αλγορίθμων – GA, Προσομοιωμένης Ανόπτωσης – SA και Αναζήτησης με Ταμπού – TS).
- Βήμα 3: Ανάλυση και αξιολόγηση γραμμών (Route Analysis/Evaluation).

Όπως και οι Yu et al. το 2012, οι **Blum and Mathew (2011)** χρησιμοποίησαν τη «Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών» (Ant Colony Optimization – ACO), την οποία και

συνδύασαν με άλλες μεθόδους. Με τον τρόπο αυτό διαμόρφωσαν τη μέθοδο του Ευφυούς Πράκτορα (Intelligent Agent), την οποία και εφάρμοσαν στο συγκοινωνιακό δίκτυο του Δελχί της Ινδίας, καθώς και στο πρότυπο δίκτυο του Mandl. Η μέθοδος αναλύεται σε δύο φάσεις, δηλαδή τη φάση αρχικοποίησης και την επαναληπτική:

- Κατά την αρχικοποίηση κατασκευάζεται ένα σύνολο πιθανών γραμμών σύμφωνα με τον αλγόριθμο της συντομότερης διαδρομής και την μέθοδο Ant Colony Optimization – ACO. Στη συνέχεια, οι Παράγοντες Δημιουργίας (Creation Agents) επιλέγουν υποσύνολα των γραμμών αυτών και κατασκευάζουν υποψήφια δίκτυα. Διακρίνονται τέσσερα είδη Παραγόντων Δημιουργίας: Δένδρου (Tree Agent), κύριας γραμμής (Main Line Agent), τυχαίας επιλογής γραμμής (Random Route Selection Agent) και εξυπηρέτησης ζήτησης (Demand Satisfaction Agent). Έπειτα, η Μονάδα Αξιολόγησης Λύσεων (Solution Evaluation Module) υπολογίζει το κόστος για το φορέα και για τους χρήστες, με βάση των καταμερισμό των επιβατών στο δίκτυο.
- Κατά την επαναληπτική φάση λειτουργούν οι Παράγοντες Τροποποίησης (Modification Agents) και ο Παράγοντας Διαγραφής (Deletion Agent). Οι Παράγοντες Τροποποίησης βασίζονται σε ευρετικές μεθόδους τροποποίησης γραμμών (Route Operator Heuristics) ή επιλογής και αφαίρεσης γραμμών (Route Selection and Removal Heuristics) και συχνοτήτων γραμμών (Route Frequency Heuristics). Ο Παράγοντας Διαγραφής διαγράφει τις λύσεις με τη χαμηλότερη απόδοση. Αποτέλεσμα είναι η διατήρηση ενός συνόλου ισοδύναμων κατά Pareto λύσεων οι οποίες ελαχιστοποιούν το κόστος χρήστη για διάφορα επίπεδα κόστους φορέα.

Οι **Szeto and Wu (2011)** πρότειναν μια μέθοδο για τον ταυτόχρονο καθορισμό των γραμμών και των αντίστοιχων συχνοτήτων με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου για το πρώτο και ευρετικού αλγορίθμου Τοπικής Αναζήτησης για το δεύτερο. Η διαδικασία λαμβάνει ως δεδομένες τις υπάρχουσες λεωφορειακές στάσεις, τους τερματικούς σταθμούς και έναν ενδιάμεσο κόμβο για την πραγματοποίηση των μετεπιβιβάσεων. Η διαφορά που εντοπίζεται κατά την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου έγκειται στο γεγονός ότι, σε κάθε βήμα της επανάληψης, οι γενετικοί τελεστές εφαρμόζονται ταυτόχρονα στις γραμμές και τις συχνότητές τους. Το μοντέλο εφαρμόστηκε στο συγκοινωνιακό δίκτυο της πόλης Tin Shui Wai του Hong Kong.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μεθόδου βασισμένης στη «νοημοσύνη σμήνους» (swarm intelligence) αποτελεί η έρευνα των **Yu et al. (2012)**, οι οποίοι χρησιμοποίησαν επίσης τη μέθοδο Ant Colony Optimization (ACO). Η βελτιστοποίηση του δικτύου περιλαμβάνει τρία στάδια: Αρχικά κατασκευάζεται ένα κενό δίκτυο στο οποίο προστίθενται οι γραμμές – σκελετοί (skeleton routes), έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί ο φόρτος των επιβατών που εξυπηρετούνται χωρίς μετεπιβίβαση και να πληρούνται οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί. Στη συνέχεια, προστίθενται οι κύριες γραμμές (main routes) ανάλογα με τη μέγιστη συγκέντρωση επιβατών και στο τέλος τοποθετούνται οι γραμμές – διακλαδώσεις (branch), οι οποίες συνδέουν τις γραμμές – σκελετούς και τις κύριες γραμμές με τον απομακρυσμένο από το κέντρο της πόλης δρόμο. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στην πόλη Dalian της Βορειοανατολικής Κίνας.

Αντίστοιχη μεθοδολογία επίλυσης με τους Beltran et al. (2009) εφάρμοσαν οι **Cipriani et al. (2012)**, αγνοώντας, όμως, την ύπαρξη οικολογικών οχημάτων και οικολογικών διαδρομών. Εν συνεχεία τροποποίησαν τη μέθοδο θεωρώντας ελαστική ζήτηση. Και στις δύο περιπτώσεις το μοντέλο δοκιμάστηκε στο συγκοινωνιακό δίκτυο της Ρώμης.

#### 3.3.4 Καθορισμός δρομολογίων

Οι **Shafahi and Khani (2010)** κατασκεύασαν δύο πρότυπα για τον καθορισμό των δρομολογίων σε δεδομένο συγκοινωνιακό δίκτυο, με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου αναμονής κατά τις μετεπιβιβάσεις:

- Το πρώτο είναι μοντέλο μικτού ακέραιου προγραμματισμού (Mixed Integer Programming Model) και από την επίλυσή του προκύπτουν οι χρόνοι αναχώρησης των οχημάτων.
- Το δεύτερο είναι επίσης μοντέλο μικτού ακέραιου προγραμματισμού, με τη διαφορά ότι εξετάζεται η παράταση του χρόνου παραμονής των οχημάτων σε ορισμένες στάσεις για τη διευκόλυνση των μετεπιβιβάσεων.

Για δίκτυα μεγάλων πόλεων, όπου δεν είναι εφικτή η επίλυση με Μικτό Ακέραιο Προγραμματισμό, χρησιμοποιήθηκε Γενετικός Αλγόριθμος. Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε στο δίκτυο της πόλης Mashhad του Ιράν, όπου αποδείχθηκε ότι η χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου βελτιώνει αισθητά την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης εν συγκρίσει με συμβατικές μεθόδους.

Στους Πίνακες 3.1 μέχρι 3.4 συνοψίζεται η προαναφερθείσα βιβλιογραφία με κριτήριο τη μέθοδο που ακολουθήθηκε για την επίλυση του TRNDP:

Πίνακας 3.1 Σύνοψη ερευνών για την κατασκευή των γραμμών του συγκοινωνιακού δικτύου.

<b>A) ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ</b>				
<b>ΕΤΟΣ</b>	<b>ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ</b>	<b>ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ</b>		<b>ΕΥΡΕΤΙΚΕΣ/ΜΕΘΕΥΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ</b>
		<b>Αναλυτικές</b>	<b>Μαθηματικού προγραμματισμού</b>	
2008	Marín and Jaramillo		√	
2009a	Mauttone and Urquhart			√
2010	Fan and Mumford			√
2011	Curtin and Biba	√		√
2011	Estrada et al.	√		
2011	Černa et al.		√	√
2012	Euchi and Mraichi			√
2012	Roca-Riu et al.			√
2013	Nikolić and Teodorović			√

Πίνακας 3.2 Σύνοψη ερευνών για τον καθορισμό των συχνοτήτων δεδομένων γραμμών.

<b>B) ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ</b>				
<b>ΕΤΟΣ</b>	<b>ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ</b>	<b>ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ</b>		<b>ΕΥΡΕΤΙΚΕΣ/ΜΕΘΕΥΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ</b>
		<b>Αναλυτικές</b>	<b>Μαθηματικού προγραμματισμού</b>	
2011	Torres et al.		√	
2011	Gallo et al.			√
2012	Ferguson et al.			√

Πίνακας 3.3 Σύνοψη ερευνών για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό των γραμμών και των συχνοτήτων τους.

<b>Γ) ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ</b>				
ΕΤΟΣ	ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ		ΕΥΡΕΤΙΚΕΣ/ΜΕΘΕΥΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ
		Αναλυτικές	Μαθηματικού προγραμματισμού	
2008	Zhao and Zeng			✓
2008	Fan et al.			✓
2009	Beltran et al.			✓
2009b	Mauttone and Urquhart			✓
2010	Shimamoto et al.			✓
2011	Han et al.			✓
2011	Szeto and Wu			✓
2011	Blum and Mathew			✓
2012	Cipriani et al.			✓
2012	Yu et al.			✓
2012	Cipriani et al.			✓

Πίνακας 3.4 Σύνοψη ερευνών για τον καθορισμό των δρομολογίων.

<b>Δ) ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΩΝ</b>				
ΕΤΟΣ	ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ		ΕΥΡΕΤΙΚΕΣ/ΜΕΘΕΥΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ
		Αναλυτικές	Μαθηματικού προγραμματισμού	
2010	Shafahi and Khani		✓	✓



Ο Πίνακας 3.5 παρουσιάζει τη διαφοροποίηση των επιλύσεων του TRNDP ως προς την αντικειμενική συνάρτηση, τις μεταβλητές απόφασης, τους περιορισμούς, τη διάρθρωση του δικτύου, τη δομή της μεταφορικής ζήτησης, το είδος της ζήτησης, την πόλη εφαρμογής και τη μεθοδολογία επίλυσης.

Πίνακας 3.5 Συγκεντρωτική παρουσίαση όλων των πρόσφατων ερευνών πάνω στο TRNDP.

Έτος	Συγγραφείς	Παράμετροι						Πόλη εφαρμογής	Μεθοδολογία
		Αντικειμενική συνάρτηση	Μεταβλητές απόφασης	Περιορισμοί	Διάρθρωση δικτύου	Δομή ζήτησης	Ζήτηση		
2008	Zhao and Zeng	Κόστος χρήστη	Γραμμές, συχνότητες, δρομολόγιο	Χρονικοί διαχωρισμοί, μήκος γραμμής, μέγεθος στόλου, συντελεστής φορτίου, directness, γεωμετρία-τοπολογία (προκαθορισμένες διαδρομές, αφετηρίες, στάσεις, τέρματα, σύνδεσμοι, επανάληψη ή όχι κόμβων)	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	[Πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl]	Ευρετική/ Μεθευρετική (SA, GS, TS)
2008	Fan et al.	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών, μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	Γραμμές, Συχνότητες	Χρονικοί διαχωρισμοί, συντελεστής φορτίου, μέγεθος στόλου, μήκος γραμμής, πλήθος γραμμών	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Ανάλογη με εξυπηρέτηση	-	Μεθευρετική: GA, SA
2008	Marín and Jaramillo	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών, εξωτερικό κόστος, κάλυψη ζήτησης	Γραμμές	Γραμμικότητα (βαθμός κόμβου 1), επιλογή μέσου	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Seville (Ισπανία)	Benders Decomposition
2009a	Mauttone and Urquhart	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών	Γραμμές	Ποσοστά κάλυψης με καμία/μία ανταπόκριση, χρόνος διαδρομής, συντελεστής κύκλωσης	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Rivera (Ουρουγουάη)	Ευρετική (PIA)
2009	Beltran et al.	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών, εξωτερικό κόστος	Γραμμές, Συχνότητες	Χωρητικότητα οχημάτων, μήκος διαδρομής, συχνότητα, διαθέσιμος στόλος οχημάτων ανά είδος, κατανομή οχημάτων στο δίκτυο ανά είδος οχήματος και συνδέσμου	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Ελαστική	Ρώμη (Ιταλία)	Ευρετική/ Μεθευρετική (HRGA, GA)

Έτος	Συγγραφείς	Παράμετροι						Πόλη εφαρμογής	Μεθοδολογία
		Αντικειμενική συνάρτηση	Μεταβλητές απόφασης	Περιορισμοί	Διάρθρωση δικτύου	Δομή ζήτησης	Ζήτηση		
2009b	Mauttone and Urquhart	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών	Γραμμές, συχνότητες	Ποσοστά κάλυψης με καμία/μία ανταπόκριση, συχνότητες, συντελεστής φορτίου, χωρητικότητα οχημάτων	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Rivera (Ουρουγουάη), [Πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl]	Μεθευρετική (GRASP)
2010	Fan and Mumford	Συνολικός χρόνος διαδρομής, μετεπιβιβάσεις	Γραμμές	Μήκος διαδρομής, σύνδεση γραμμών, πλήθος γραμμών, γραμμικότητα (όχι βρόχοι, όχι επανάληψη κόμβου στην ίδια γραμμή)	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	[Πρότυπο δίκτυο του Mandl]	Make-Small-Change, Ευρετική (HC), Μεθευρετική (SA)
2010	Shimamoto et al.	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών	Γραμμές, Συχνότητες	Αριθμός γραμμών, χρόνος ταξιδιού, μέγεθος στόλου, κάθε γραμμή διέρχεται μία φορά από τον κόμβο	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Hiroshima (Ιαπωνία)	Μεθευρετική (NSGA-II)
2010	Shafahi and Khani	Χρόνος αναμονής	Δρομολόγιο	Ελάχιστοι και μέσοι χρόνοι αναμονής	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Mashhad (Ιράν)	MIP/Μεθευρετική (GA)
2011	Szeto and Wu	Ανταποκρίσεις, συνολικός χρόνος ταξιδιού	Γραμμές, Συχνότητες	Αφετηρίες/τέρματα, γραμμικότητα, κάθε γραμμή διέρχεται μία φορά από τον κόμβο, μέγεθος στόλου, συχνότητες, αριθμός στάσεων	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Tin Shui Wai (Χονγκ Κονγκ)	Μεθευρετική (GA), Ευρετική (LS)
2011	Curtin and Biba	Αξία υπηρεσιών (service value)	Γραμμές	Βαθμός κόμβου 1+1, γραμμικότητα, μήκος γραμμών, είδος γραμμών (κυκλικές, με συγκεκριμένη αφετηρία/τέρμα, διέλευση από συγκεκριμένα σημεία)	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Richardson, TX (ΗΠΑ)	TRANSMaх: Ευρετική, Simplex, Branch and Bound

Έτος	Συγγραφείς	Παράμετροι						Πόλη εφαρμογής	Μεθοδολογία
		Αντικειμενική συνάρτηση	Μεταβλητές απόφασης	Περιορισμοί	Διάρθρωση δικτύου	Δομή ζήτησης	Ζήτηση		
2011	Torres et al.	(Λειτουργικό) κόστος φορέα	Συχνότητες	Κάλυψη ζήτησης, συχνότητες	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Quito (Εκουαδόρ)	Συμβατική (Μαθηματικού προγραμματισμού)
2011	Estrada et al.	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών	Χρονικοί διαχωρισμοί, Αποστάσεις γραμμών, Διαστάσεις πυρήνα	Αποστάσεις γραμμών, χρονικοί διαχωρισμοί, πλήθος γραμμών, χωρητικότητα οχημάτων	Ορθογωνικό πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Βαρκελώνη (Ισπανία)	Συμβατική (Αναλυτική)
2011	Blum and Mathew	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών	Γραμμές, Συχνότητες	Συχνότητες, χωρητικότητα οχημάτων, μέγεθος στόλου, μετεπιβιβάσεις	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Delhi (Ινδία), [Πρότυπο δίκτυο του MandI]	Ευρετική (Agent, ACO)
2011	Gallo et al.	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών, κόστος χρήστη ΙΧ, εξωτερικό κόστος	Συχνότητες	Εφικτές συχνότητες, μέγεθος στόλου, πλήθος οχηματοχιλιόμετρων, χωρητικότητα (ανά σύνδεσμο και μονάδα χρόνου)	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Ελαστική	Campania (Ιταλία)	Ευρετική (Τοπική αναζήτηση)/ Μεθευρετική
2011	Han et al.	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών, μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	Γραμμές, Συχνότητες	Συχνότητες, συντελεστής φορτίου, μέγεθος στόλου, μήκος γραμμής, πλήθος γραμμών	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	[Πρότυπο δίκτυο του MandI]	Μεθευρετική (GA/SA/TS)
2011	Černa et al.	Μήκος γραμμής	Γραμμές	Μέση απόσταση σημείων Προέλευσης – στάσεων	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	[Περιοχή χαμηλής ζήτησης]	Συμβατική (Μη γραμμικού, ακέραίου προγραμματισμού) και ευρετικές (GGH, NGH, CH)

Έτος	Συγγραφείς	Παράμετροι						Πόλη εφαρμογής	Μεθοδολογία
		Αντικειμενική συνάρτηση	Μεταβλητές απόφασης	Περιορισμοί	Διάρθρωση δικτύου	Δομή ζήτησης	Ζήτηση		
2012	Cipriani et al.	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών, μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	Γραμμές, Συχνότητες	Χωρητικότητα οχημάτων, μήκος διαδρομής, συχνότητα	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Ρώμη (Ιταλία)	Ευρετική/ Μεθευρετική (HRGA, GA)
2012	Yu et al.	Απευθείας και με μετεπιβιβάσεις κάλυψη ζήτησης ("πυκνότητα" ζήτησης)	Γραμμές	Μήκος διαδρομής, απόσταση στάσεων, κάλυψη ζήτησης, «ευθύτητα» (directness), χωρητικότητα οχημάτων	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Dalian (Κίνα)	Μεθευρετική (ACO)
2012	Euchi and Mraih	Μεταφορικό κόστος	Γραμμές	Αφετηρία γραμμών, διέλευση μόνο μίας γραμμής από κάθε κόμβο, αποστάσεις βαδίσματος, χωρητικότητα οχημάτων	Ακανόνιστο (μία γραμμή/ λεωφορείο)	Από πολλά σε ένα	Σταθερή	Great Tunis (Τυνησία)	Μεθευρετική (HAAC, VNS)
2012	Ferguson et al.	Διαφορά προσβασιμότητας μέσω MMM-IX (Equity)	Συχνότητες	Κόστος οχημάτων, λειτουργικό κόστος, γραμμικότητα	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Μεταβλητή	[Μέσου μεγέθους μητροπολιτική περιοχή των ΗΠΑ]	Μεθευρετική (GA)
2012	Roca-Riu	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών	Γραμμές	Γραμμικότητα (βαθμός κόμβου 1), αριθμός τερμάτων	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	Βαρκελώνη (Ισπανία)	Μεθευρετική (TS)
2012	Cipriani et al.	Κόστος φορέα, κόστος επιβατών, εξωτερικό κόστος	Γραμμές, Συχνότητες	Χωρητικότητα οχημάτων, μήκος διαδρομής, συχνότητα	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Ελαστική	Ρώμη (Ιταλία)	Ευρετική/ Μεθευρετική (HRGA, GA)
2013	Nikolić and Teodorović	Συνολικός χρόνος μετακίνησης	Γραμμές	-	Ακανόνιστο πλέγμα	Από πολλά σε πολλά	Σταθερή	[Πρότυπο δίκτυο του Mandl], Δίκτυο 110 κόμβων και 275 συνδέσμων	Μεθευρετική (BCO)

Σημειώνεται η ερμηνεία των συντομογραφιών που περιέχει ο Πίνακας 3.5:

ACO = Ant Colony Optimization (Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών)

BCO = Bee Colony Optimization (Βελτιστοποίηση Αποικίας Μελισσών)

CH = Combined heuristics (Συνδυαστική Ευρετική Μέθοδος)

GA = Genetic Algorithm (Γενετικός Αλγόριθμος)

GGH = General Greedy Heuristics (Γενική Άπληστη Ευρετική Μέθοδος)

GRASP = Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (Διαδικασία Άπληστης Τυχαιοποιημένης Προσαρμοστικής Αναζήτησης)

GS = Greedy Search (Άπληστη Αναζήτηση)

HAAC = Hybrid Artificial Ant Colony (Υβριδική Αποικία Τεχνητών Μυρμηγκιών)

HC = Hill-Climbing (Αλγόριθμος του ορειβάτη)

HRGA = Heuristic Route Generation Algorithm (Ευρετικός Αλγόριθμος Παραγωγής Γραμμών)

MIP = Mixed Integer Programming (Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός)

NSGA-II = Elitist non-dominated Sorting Genetic Algorithm (Γενετικός Αλγόριθμος Ελιτίστικης, μη κυριαρχούμενης Διαλογής)

NGH = Neighbourhood Greedy Heuristics (Άπληστη Ευρετική Αναζήτηση Γειτονιάς)

PIA = Pair Insertion Algorithm (Αλγόριθμος Εισαγωγής Ζευγών)

SA = Simulated Annealing (Προσομοιωμένη Ανόπτηση)

TS = Tabu Search (Αναζήτηση με Ταμπού)

VNS = Variable Neighbourhood Search (Έρευνα Μεταβλητής Γειτονιάς)

### 3.4 Σχετικές έρευνες με περιβαλλοντικές παραμέτρους

Σε αρκετές προσεγγίσεις του σχεδιασμού αστικών συγκοινωνιών έχουν εισαχθεί περιβαλλοντικές παράμετροι. Ωστόσο, η ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων δεν έχει εισαχθεί αυτούσια στην αντικειμενική συνάρτηση. Ως σήμερα, το περιβαλλοντικό όφελος έχει εισαχθεί έμμεσα, είτε με την επιδίωξη αυξημένης χρήσης αστικών συγκοινωνιών έναντι ιδιωτικών μέσων (ΙΧ), είτε με την απόδοση περιβαλλοντικού οφέλους (μπόνους) στην αντικειμενική συνάρτηση κατά τη χρήση των αστικών συγκοινωνιών.

Για παράδειγμα, οι **Delle Site and Filippi (1995)** εισήγαγαν στην αντικειμενική συνάρτηση την κατανάλωση καυσίμου. Θεώρησαν το διάνυσμα  $\gamma = [\gamma_a, \gamma_b]^T$ , όπου  $\gamma$  η μέση κατανάλωση καυσίμου ανά οχηματοχιλιόμετρο από τα ΙΧ και τα λεωφορεία. Ισχύει

$$G = \gamma(V, R, \delta) \quad (3.1)$$

όπου

$V = [v_a, v_b]^T$  η μέση ταχύτητα

$R=[R_a, R_b]^T$  το πλήθος των οχημάτων, αυτοκινήτων ( $R_a$ ) και λεωφορείων ( $R_b$ )

$\delta=[\delta_a, \delta_b]^T$  η μέση κατάληψη οχήματος.

Η συνολική κατανάλωση καυσίμου δίνεται από το διάνυσμα  $\gamma= \gamma(V, R, \delta)*K$ , όπου το  $K=[K_a, K_b]^T$  περιλαμβάνει τα πραγματοποιούμενα οχηματοχιλιόμετρα από ΙΧ και λεωφορεία.

Ως παράμετροι επηρεασμού της λύσης θεωρήθηκαν τα εξής μεγέθη:

$F$ : Μέσο κόμιστρο ανά επιβάτη λεωφορείου

$K_b$ : Διανυόμενα οχηματοχιλιόμετρα λεωφορείων

$S$ : Μέση χωρητικότητα λεωφορείου

Στόχος του προβλήματος ήταν η μεγιστοποίηση της μείωσης στην κατανάλωση καυσίμου. Επομένως, η αντικειμενική συνάρτηση διατυπώθηκε ως εξής:

$$\max_{F, K_b, S} Z = \Gamma_a^0 - \Gamma_a + \Gamma_b^0 \quad (3.2)$$

όπου

$\Gamma_a^0, \Gamma_a$ : Η αρχική και τελική, αντιστοίχως, κατανάλωση καυσίμου από τα ΙΧ

$\Gamma_b^0, \Gamma_b$ : Η αρχική και τελική, αντιστοίχως, κατανάλωση καυσίμου από τα λεωφορεία.

Το πρόβλημα επιλύθηκε υπό τους περιορισμούς του λειτουργικού κόστους φορέα, της χωρητικότητας των λεωφορείων και της εξισορρόπησης (equilibrium) ζήτησης – κόστους.

Το **2001**, οι ίδιοι ερευνητές επέλυσαν εκ νέου το πρόβλημα. Θεώρησαν ένα αρχικό λεωφορειακό δίκτυο, με αρχική ζήτηση  $D_o$  και μέση κατανάλωση καυσίμου ανά επιβάτη ίση με  $\gamma_o$ . Διερεύνησαν την επιρροή στη λύση των ίδιων μεταβλητών εξυπηρέτησης με την αντίστοιχη έρευνά τους το 1995:

$F$ : Μέσο κόμιστρο ανά επιβάτη λεωφορείου

$K$ : Διανυόμενα οχηματοχιλιόμετρα λεωφορείων (δείκτης εξυπηρέτησης)

$N$ : Μέση χωρητικότητα λεωφορείου.

Οι μεταβολές στις τιμές των  $F$ ,  $K$  και  $N$  οδηγούν σε μεταβολή της ζήτησης  $D$  και της μέσης κατανάλωσης καυσίμου ανά επιβάτη,  $\gamma$ . Επομένως, η μεταβολή στη συνολική κατανάλωση καυσίμου, από λεωφορεία και ΙΧ δίνεται από τη σχέση

$$D_o * \gamma_o - D * \gamma + \varepsilon(D - D_o) * \gamma_{priv} \quad (3.3)$$

όπου

$\varepsilon$ : το ποσοστό της νέας μεταφορικής ζήτησης των λεωφορείων, το οποίο αφαιρείται από τις μετακινήσεις με ΙΧ

$\gamma_{priv}$ : η μέση κατανάλωση καυσίμου ανά όχημα και διαδρομή για τα ΙΧ.

Ισχύουν οι εξής παραδοχές:

(α) Το κλάσμα 1-ε της νέας επιβατικής ζήτησης  $D-D_0$ , που δεν αφαιρείται από τα ΙΧ, δεν επιφέρει μεταβολή στην κατανάλωση.

(β) Η ανά μονάδα κατανάλωση  $\gamma_{priv}$  των μετακινούμενων με ΙΧ δεν επηρεάζεται από μεταβολές στο επίπεδο εξυπηρέτησης του λεωφορειακού δικτύου: Από τη στιγμή που ο δείκτης  $\gamma_{priv}$  ισούται με τη μέση κατανάλωση ανά οχηματοχιλιόμετρο  $\gamma'_{priv}$  πολλαπλασιασμένη με το λόγο  $d_{priv}/\delta_{priv}$ , όπου  $d_{priv}$  το μέσο μήκος ταξιδιού και  $\delta_{priv}$  η μέση κατάληψη των ΙΧ, θεωρείται ότι τα  $\gamma'_{priv}$ ,  $d_{priv}$ ,  $\delta_{priv}$  είναι σταθερά.

Στη συνέχεια διαμορφώνονται δύο εναλλακτικά προβλήματα, στο πρώτο εκ των οποίων η λύση περιορίζεται από το κόστος για το φορέα, ενώ στο δεύτερο από την επιτρεπόμενη κατάληψη (occupancy) των οχημάτων.

Τέλος, η χαρακτηριστική είναι η περιβαλλοντική προσέγγιση των **Beltran et al. (2009)**, η οποία περιγράφηκε στο εδάφιο 3.3.3. Οι ερευνητές θεώρησαν ετερογενή στόλο, αποτελούμενο από συμβατικά και οικολογικά λεωφορεία. Αντίστοιχα, διαίρεσαν το δίκτυο σε δύο μέρη: Στο «πράσινο» τμήμα του δικτύου κυκλοφορούν αποκλειστικά οικολογικά λεωφορεία, ενώ στο «μη πράσινο» τόσο συμβατικά όσο και οικολογικά. Η επιλογή του λεωφορείου έναντι του ΙΧ λαμβάνεται υπόψη στην αντικειμενική συνάρτηση ως περιβαλλοντικό όφελος, ενώ επιπλέον η χρήση οικολογικού λεωφορείου προσμετράται ως επιπρόσθετο περιβαλλοντικό όφελος.

### 3.5 Βιβλιογραφικές έρευνες

Η πολυπλοκότητα του προβλήματος σχεδιασμού δικτύου αστικών συγκοινωνιών έχει οδηγήσει πολλούς μελετητές στη συστηματική οργάνωση και παρουσίαση των εναλλακτικών προσεγγίσεών του. Στη συνέχεια αναφέρονται οι τέσσερις πιο πρόσφατες δημοσιεύσεις οι οποίες περιέχουν ανασκόπηση και κατηγοριοποίηση των υπάρχουσών ερευνών πάνω στο TRNDP.

Η πρώτη δημοσίευση είναι των **Desaulniers and Hickman (2007)**, οι οποίοι διαίρεσαν τις μεθόδους σχεδιασμού σε τέσσερις επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με το επίπεδο σχεδιασμού στο οποίο αναφέρονται. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

(α) Στρατηγικός σχεδιασμός (Strategic planning): Ο στρατηγικός σχεδιασμός αποσκοπεί στον καθορισμό του δικτύου και των γραμμών. Περιλαμβάνει το σχεδιασμό του δικτύου (Network Design) και τον καταμερισμό της επιβατικής ζήτησης στις δυνατές διαδρομές (Passenger Assignment).

(β) Τακτικός σχεδιασμός (Tactical Planning): Ο τακτικός σχεδιασμός περιλαμβάνει τον καθορισμό της συχνότητας κάθε γραμμής και τον προγραμματισμό των δρομολογίων.

(γ) Λειτουργικός σχεδιασμός (Operational Planning): Ο λειτουργικός σχεδιασμός περιλαμβάνει την αντιστοίχιση οχημάτων σε γραμμές (Vehicle scheduling) και την αντιστοίχιση οδηγών σε γραμμές (Driver scheduling), διαδικασίες οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε διαδοχικά είτε ταυτόχρονα. Επίσης, περιλαμβάνει τον καθορισμό



των βαρδιών (Crew rostering), του τρόπου διευθέτησης των λεωφορείων σε αμαξοστάσια (parking and dispatching) και του προγράμματος συντήρησης των οχημάτων (Vehicle maintenance).

(δ) Έλεγχος σε πραγματικό χρόνο (Real-time control): Ο έλεγχος σε πραγματικό χρόνο αναφέρεται στη διαχείριση του συγκοινωνιακού δικτύου σε περίπτωση συμβάντων τα οποία διαταράσσουν τη λειτουργία του. Τέτοια διαταραχή παρουσιάζεται σε περίπτωση δυσμενών καιρικών συνθηκών, οδικού ατυχήματος, βλάβης του οχήματος κ.λπ.. Η παρέμβαση μπορεί να έχει τη μορφή παράλειψης στάσεων, τροποποίησης των δρομολογίων ή εκούσιας καθυστέρησης του οχήματος (Vehicle holding), ώστε να διατηρείται ο επιθυμητός χρονικός διαχωρισμός μεταξύ δύο διαδοχικών διελεύσεων οχημάτων της ίδιας γραμμής.

Η επόμενη δημοσίευση του είδους ανήκει στους **Guihaire and Hao (2008)**, οι οποίοι αναφέρονται στο ευρύτερο πρόβλημα σχεδιασμού του δικτύου με τον όρο «Global transit public process» και το διαιρούν σε πέντε επιμέρους κατηγορίες προβλημάτων:

- (α) Σχεδιασμός δικτύου (Transit Network Design), δηλαδή προσδιορισμός των γραμμών αποκλειστικά.
- (β) Καθορισμός συχνοτήτων (Transit Network Frequencies Setting).
- (γ) Δρομολόγηση (Transit Network Timetabling).
- (δ) Καταμερισμός οχημάτων (Vehicle Scheduling).
- (ε) Καθορισμός βαρδιών (Crew Rostering and Scheduling).

Για κάθε κατηγορία προβλήματος (α) – (ε), οι ερευνητές διακρίνουν τις προσεγγίσεις επίλυσης σε

- (α) Μαθηματικές προσεγγίσεις.
- (β) Ευρετικές προσεγγίσεις.
- (γ) Προσεγγίσεις με τοπική αναζήτηση.
- (δ) Προσεγγίσεις με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων.
- (ε) Άλλες προσεγγίσεις.

Ακολουθεί η έρευνα των **Kepaptsoglou and Karlaftis (2009)**, οι οποίοι κατατάσσουν τις προσεγγίσεις του TRNDP σε κατηγορίες με βάση τρία κριτήρια:

(α) Τους στόχους (objectives) της βελτιστοποίησης: Περιλαμβάνουν τη μεγιστοποίηση του οφέλους του χρήστη, την ελαχιστοποίηση του κόστους χρήστη, τη μεγιστοποίηση του συνολικού οφέλους (total welfare), τη μεγιστοποίηση της μεταφορικής ικανότητας, την εξοικονόμηση ενέργειας και κατ' επέκταση την προστασία του περιβάλλοντος και τη βελτιστοποίηση διαφόρων άλλων παραμέτρων.

- (β) Τις παραμέτρους (parameters) του προβλήματος. Οι παράμετροι περιλαμβάνουν:
- (i) Τις μεταβλητές απόφασης (decision variables), (π.χ. γραμμές και συχνότητες), τη βέλτιστη χωρική απόσταση των γραμμών, το ύψος του κομίστρου, τον επιμερισμό του δικτύου σε ζώνες, την τοποθεσία των στάσεων και τα είδη των χρησιμοποιούμενων οχημάτων.

- (ii) Τη δομή του δικτύου (network structure), το οποίο μπορεί να είναι ακτινικό, μορφής κανάβου ή ακανόνιστης γεωμετρίας.
  - (iii) Το μοτίβο της ζήτησης (demand pattern): Η ζήτηση μπορεί να είναι «από πολλά προς ένα» (many-to-one), «από ένα προς πολλά» (one-to-many) ή «από πολλά προς πολλά» (many-to-many).
  - (iv) Τα χαρακτηριστικά της ζήτησης (demand characteristics): Η ζήτηση μπορεί να είναι είτε σταθερή (fixed, inelastic) είτε ελαστική (elastic). Με τη σειρά της, η ελαστική ζήτηση μπορεί είτε να παραμένει σταθερή στο σύνολό της και να μεταβάλλεται ο τρόπος με τον οποίο κατανέμεται στα διάφορα μεταφορικά μέσα, είτε να μεταβάλλεται στο σύνολό της, ανάλογα με την απόδοση του δικτύου. Επιπλέον, πολλές επιλύσεις του προβλήματος έλαβαν υπόψη το δυναμικό χαρακτήρα της ζήτησης, η οποία μεταβάλλεται με τον τόπο και το χρόνο.
  - (v) Τις επιχειρηματικές/λειτουργικές στρατηγικές (operational strategies): Οι στρατηγικές αυτές συνήθως εξετάζονται σε επίπεδο συγκοινωνιακής γραμμής και σπανίως ενσωματώνονται στο ευρύτερο πρόβλημα σχεδιασμού του δικτύου.
  - (vi) Τους περιορισμούς (constraints), οι οποίοι περιλαμβάνουν το εύρος των συχνοτήτων, την επιτρεπόμενη πληρότητα των οχημάτων, το σχήμα, την ευθύτητα και το μήκος των γραμμών, το πλήθος των επιτρεπόμενων διαδρομών, το μέγεθος του διαθέσιμου στόλου οχημάτων και το διαθέσιμο προϋπολογισμό.
- (γ) Τις μεθοδολογικές προσεγγίσεις: Η υποδιαίρεση των επιλύσεων με βάση τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο επίλυσης είναι εκείνη η οποία περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.2.

Οι Keraptsoglou and Karlaftis αναφέρονται, επίσης, στον καταμερισμό της ζήτησης στο δίκτυο (demand assignment), ο οποίος καθορίζει τόσο τις συχνότητες των γραμμών όσο και το πλήθος των απαιτούμενων οχημάτων και στηρίζεται στην αποδοχή των διαθέσιμων διαδρομών από το χρήστη (user acceptability). Για παράδειγμα, σε ορισμένες προσεγγίσεις ο χρήστης επιλέγει μια συγκεκριμένη διαδρομή μόνο εάν ο χρόνος μετακίνησης είναι ίσος ή μικρότερος από το άθροισμα των χρόνων αναμονής και κίνησης μέσω μιας διαδρομής ελάχιστου χρόνου. Σε άλλες περιπτώσεις, οι ροές των επιβατών στο δίκτυο συγκεντρώνονται στους συνδέσμους εκείνους που ελαχιστοποιούν συγχρόνως το χρόνο μετακίνησης και το κόστος για το φορέα. Επιπλέον, σε ορισμένες προσεγγίσεις οι επιβάτες επιλέγουν τον ελάχιστο δυνατό αριθμό μετεπιβιβάσεων και λαμβάνουν υπόψη το χρόνο μετακίνησης μόνο αν χρειαστεί να επιλέξουν μεταξύ διαδρομών που παρουσιάζουν τον ίδιο αριθμό μετεπιβιβάσεων. Εναλλακτικά, η φόρτιση του δικτύου πραγματοποιείται με εφαρμογή επαναληπτικής μεθόδου «όλα ή τίποτα» η οποία συσχετίζει τη ροή με την ταχύτητα κίνησης, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η μέθοδος των «υπερδιαδρομών» (hyperpaths). Είναι επίσης δυνατή η θεώρηση περισσότερων του ενός μεταφορικών μέσων, π.χ. λεωφορείου, τρένου και αυτοκινήτου, και ο αντίστοιχος καταμερισμός των επιβατών στα διάφορα μέσα.

Τέλος, μια άλλη συνολική παρουσίαση των υπαρχόντων προτύπων και μεθόδων επίλυσης του προβλήματος ανήκει στη **Schöbel (2011)**, η οποία αναφέρθηκε στο πρόβλημα ως Line Planning Problem και το συνοψίζει ως εξής: Για δεδομένη υποδομή (π.χ. οδικό δίκτυο, αν πρόκειται για δίκτυο λεωφορειακών γραμμών), αναζητείται ένα σύνολο γραμμών, κατά μήκος των οποίων θα μετακινούνται οι επιβάτες. Επίσης, καθορίζεται το πλήθος και οι διαδρομές (routes) που ακολουθούν οι γραμμές αυτές, καθώς και οι συχνότητές τους. Το Line Planning Problem επιδιώκει τον καθορισμό ενός συνόλου γραμμών με τις αντίστοιχες συχνότητές τους με την προϋπόθεση ότι το σύνολο αυτό είναι εφικτό (μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη), διασφαλίζει την άνεση των μετακινούμενων και επιπλέον διαθέτει χαμηλό κόστος.

Στη συνέχεια, το άρθρο συνοψίζει τα πρότυπα επίλυσης ως προς την αντικειμενική συνάρτηση, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει το κόστος ή την ποιότητα μετακίνησης.

Έπειτα επισημαίνεται η επιβολή περιορισμών στον προϋπολογισμό, τη συχνότητα, τη χωρητικότητα των γραμμών, τη μορφή των γραμμών κ.λπ.. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση διαιρεί τις μεθόδους επίλυσης του προβλήματος σε εκείνες που βασίζονται στη θεωρία παιγνίων, σε εκείνες που χρησιμοποιούν χωρική προσέγγιση (location-based) και σε ευρετικές μεθόδους.



---

---

## 4 Διαμόρφωση μαθηματικού προτύπου

---

---

### 4.1 Γενικά

Ο σχεδιασμός του προβλήματος βέλτιστου σχεδιασμού του δικτύου θα πραγματοποιηθεί με χρήση ακέραιου, μη γραμμικού προγραμματισμού. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται και εξηγείται η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, η οποία περιλαμβάνει αφενός την αντικειμενική συνάρτηση και αφετέρου τους επιβαλλόμενους περιορισμούς.

#### 4.1.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι το σταθμισμένο άθροισμα έξι όρων: Της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης, του μέσου χρόνου διαδρομής ανά επιβάτη, της μάζας των εκπεμπόμενων ρύπων, των απαιτούμενων σταθμών επαναφόρτισης, των απαιτούμενων συμβατικών λεωφορείων και των απαιτούμενων ηλεκτρικών λεωφορείων.

$$\min Z = W_1 * D_U + W_2 * \bar{T} + W_3 \sum_{n=1}^{NUM\_LINES} e_n + W_4 N_{CS} + W_5 V_{req,c} + W_6 V_{req,e} \quad (4.1)$$

όπου

$n$ : Δείκτης που αντιστοιχεί στις γραμμές του συγκοινωνιακού δικτύου.

NUM\_LINES: Το πλήθος των γραμμών του συγκοινωνιακού δικτύου.

$W_i, i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ : οι συντελεστές βάρους των επιμέρους όρων.

$D_U$ : Η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση.

$\bar{T}$ : ο μέσος χρόνος μετακίνησης ανά επιβάτη.

$e_n$ : Η μάζα εκπεμπόμενων ρύπων ( $NO_x$ ) από κάθε γραμμή  $n$  ανά ώρα λειτουργίας του συγκοινωνιακού δικτύου.

$N_{CS}$ : Το πλήθος των απαιτούμενων σταθμών φόρτισης (charging stations) των ηλεκτρικών λεωφορείων.

$V_{req,c}$ : Ο αριθμός των απαιτούμενων συμβατικών (ντιζελοκίνητων) λεωφορείων.

$V_{req,e}$ : Ο αριθμός των απαιτούμενων ηλεκτρικών λεωφορείων.

#### 4.1.2 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί διασφαλίζουν την εφικτότητα της λύσης, κυρίως μέσω της επιβολής ανώτατων ή και κατώτατων επιτρεπόμενων τιμών στις παραμέτρους του προβλήματος. Στην παρούσα προσέγγιση επιβάλλονται οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$(\#1) \quad G_{p,n} \geq G_n \quad (4.2)$$

$$(\#2\alpha) \quad L_{min} \leq L_{n,c} \leq L_{max,c} \quad (4.3)$$

$$(\#2\beta) \quad L_{min} \leq L_{n,e} \leq L_{max,e} \quad (4.4)$$

$$(\#3) \quad f_{min} \leq f_n \leq f_{max} \quad (4.5)$$

$$(\#4\alpha) \quad V_{req,c} \leq V_{av,c} \quad (4.6)$$

$$(\#4\beta) \quad V_{req,e} \leq V_{av,e} \quad (4.7)$$

$$(\#5) \quad \text{Αν } A, B \text{ διαδοχικές στάσεις} \rightarrow A \in B_{5\text{NEAREST}} \text{ ή } B \in A_{5\text{NEAREST}} \quad (4.8)$$

(#6) Απαγορεύεται να περιέχονται στο δίκτυο δύο ή περισσότερες γραμμές οι οποίες περιέχουν ακριβώς τις ίδιες στάσεις και μόνο αυτές, ανεξάρτητα από την αλληλουχία των στάσεων εντός της γραμμής.

όπου

$G_{p,n}$ : Δυαδική μεταβλητή που δηλώνει εάν στη γραμμή  $n$  μπορούν να λειτουργήσουν ηλεκτρικά λεωφορεία.

$G_n$ : Δυαδική μεταβλητή που δηλώνει το είδος των λεωφορείων που λειτουργούν στη γραμμή  $n$ .

$L_{min}$ : Τα ελάχιστο επιτρεπόμενο μήκος λεωφορειακής γραμμής.

$L_{n,c}$ : Το μήκος γραμμής  $n$  όπου λειτουργούν συμβατικά λεωφορεία.

$L_{max,c}$ : Το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος γραμμής όπου λειτουργούν συμβατικά λεωφορεία.

$L_{n,e}$ : Το μήκος γραμμής  $n$  όπου λειτουργούν ηλεκτρικά λεωφορεία.

$L_{max,e}$ : Το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος γραμμής όπου λειτουργούν ηλεκτρικά λεωφορεία.

$f_{min}$ : Ελάχιστη επιτρεπόμενη συχνότητα.

$f_n$ : Συχνότητα γραμμής  $n$ .

$f_{max}$ : Μέγιστη επιτρεπόμενη συχνότητα.

$V_{av,c}$ : Διαθέσιμα συμβατικά λεωφορεία.

$V_{av,e}$ : Διαθέσιμα ηλεκτρικά λεωφορεία.

$B_{5\text{NEAREST}}$ : Το σύνολο των πέντε πλησιέστερων στάσεων της (τυχαίας) στάσης B.

$A_{5\text{NEAREST}}$ : Το σύνολο των πέντε πλησιέστερων στάσεων της (τυχαίας) στάσης A.

## 4.2 Ανάλυση αντικειμενικής συνάρτησης και περιορισμών

### 4.2.1 Ανάλυση όρων αντικειμενικής συνάρτησης

Οι έξι όροι της αντικειμενικής συνάρτησης υπάγονται σε τρεις ευρύτερες κατηγορίες:

- (α) Στο κόστος χρήστη (όροι 1 και 2)
- (β) Στο κόστος συγκοινωνιακού φορέα (όροι 4, 5 και 6)
- (γ) Στο εξωτερικό – κοινωνικό κόστος (όρος 3).

Ακολουθεί αναλυτική εξήγηση των επιμέρους όρων που συνθέτουν την αντικειμενική συνάρτηση:

- 1)  $D_U$ : Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση. Εφόσον στόχος του συγκοινωνιακού δικτύου είναι η εξυπηρέτηση της μεταφορικής ζήτησης, είναι αυτονόητο πως το ποσοστό των επιβατών που δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν το συγκεκριμένο δίκτυο για τη μετακίνησή τους οφείλει να είναι το ελάχιστο δυνατό. Όπως θα αναλυθεί αργότερα, ένα ζεύγος Προέλευσης – Προορισμού θεωρείται εξυπηρετούμενο όταν είναι δυνατή η μετάβαση από την Προέλευση στον Προορισμό (και αντιστρόφως) είτε με απευθείας σύνδεση, είτε με μία – το πολύ – μετεπιβίβαση. Επιπλέον, θεωρείται ότι οι επιβάτες που σε πρώτη φάση δεν εξυπηρετούνται από το δίκτυο, μπορούν να εξυπηρετηθούν συνδυάζοντας το λεωφορείο με την πεζή – ή με άλλο μέσο – μετακίνηση.
- 2)  $\bar{T}$ : Ο μέσος χρόνος μετακίνησης ανά επιβάτη. Η παρουσία του ως όρου στην αντικειμενική συνάρτηση αντιπροσωπεύει την εύλογη επιθυμία του επιβατικού κοινού να μετακινηθεί όσο το δυνατόν γρηγορότερα, αποφεύγοντας περιττές καθυστερήσεις. Ο χρόνος μετακίνησης περιλαμβάνει το χρόνο κατά τον οποίο ο επιβάτης βρίσκεται εντός του οχήματος και το χρόνο αναμονής στη στάση.
- 3)  $\sum_n e_n$ : Η συνολική μάζα εκπεμπόμενου ρύπου- εν προκειμένω οξειδίων του αζώτου  $\text{NO}_x$  – που εκπέμπεται κάθε ώρα λειτουργίας του δικτύου. Η παρουσία των εκπεμπόμενων ρύπων στην αντικειμενική συνάρτηση εξυπηρετεί την ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης λόγω των μετακινήσεων. Η επιλογή μετακίνησης με δημόσια συγκοινωνία αποδίδει αφ' εαυτής περιβαλλοντικό όφελος, καθώς συντελεί στον περιορισμό της χρησιμοποίησης των ΙΧ και, κατ' επέκταση, στη μείωση των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων. Ωστόσο, η ποσοτικοποίηση των εκπεμπόμενων ρύπων από τα λεωφορεία αποτελεί ένα επιπλέον βήμα, το οποίο επιβάλλει περιβαλλοντικούς περιορισμούς εντός του ίδιου του συγκοινωνιακού δικτύου λεωφορείων. Συγκεκριμένα, τίθεται προτεραιότητα στη χρήση ηλεκτρικών λεωφορείων, τα οποία δεν επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα με την εκπομπή ρύπων εντός της πόλης. Κατά συνέπεια, η εξυπηρέτηση των μεγάλου μήκους και συχνότητας διαδρομών με ηλεκτρικά λεωφορεία αποτελεί δραστική μέθοδο περιορισμού των αερίων ρύπων που εκπέμπονται στον αστικό χώρο.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η ελαχιστοποίηση των εκπεμπόμενων οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) για δύο λόγους:

(α) Εξαιτίας των σοβαρών επιδράσεών τους στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, όπως εξηγήθηκαν στο υποκεφάλαιο 2.2.

(β) Λόγω του εξαιρετικά μεγάλου ποσοστού συμμετοχής των μεταφορών γενικότερα στη συνολική εκπομπή οξειδίων του αζώτου: Σύμφωνα με υπολογισμούς του ΕΕΑ, το 58% του εκπεμπόμενου  $\text{NO}_x$  προέρχεται από δραστηριότητες που υπάγονται στον τομέα των μεταφορών. Αντίστροφα, και πάλι σύμφωνα με τον ΕΕΑ, τα  $\text{NO}_x$  αποτελούν το 88% των οξειδωτικών ουσιών οι οποίες παράγονται από μεταφορικές δραστηριότητες.

4)  $N_{CS}$ : Το πλήθος των απαιτούμενων σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων (Number of Charging Stations). Παρ' όλο που η κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου μέρους του δικτύου από ηλεκτρικά λεωφορεία είναι επιθυμητή, πρέπει να ληφθεί υπόψη το κόστος κατασκευής των σταθμών φόρτισης, το οποίο, ανάλογα με το είδος του σταθμού, μπορεί να ανέρχεται έως €40.000. Κατά συνέπεια, είναι επιθυμητή η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση περισσότερων της μιας γραμμής από τον ίδιο σταθμό φόρτισης, προκειμένου να περιοριστεί το κόστος κατασκευής πολλών διαφορετικών σταθμών.

5-6)  $V_{req,c}$  και  $V_{req,e}$ : Απαιτούμενα συμβατικά και ηλεκτρικά οχήματα αντιστοίχως. Η κάλυψη της ζήτησης με όσο το δυνατόν λιγότερα οχήματα αποσκοπεί στον περιορισμό των λειτουργικών, κυρίως, δαπανών, οι οποίες, σύμφωνα με τους Καρλαύτη και Λυμπέρη (2009) υποδιαιρούνται στις εξής κατηγορίες:

- (α) Κόστος μισθοδοσίας προσωπικού
- (β) Κόστος καυσίμων-ενέργειας
- (γ) Κόστος αναλωσίμων (ελαστικών, λιπαντικών)
- (δ) Κόστος ανταλλακτικών
- (ε) Κόστος ασφάλισης – τέλη κυκλοφορίας

#### 4.2.2 Ανάλυση περιορισμών

#1) Δυνατότητα κυκλοφορίας ηλεκτρικών λεωφορείων αποκλειστικά σε συγκεκριμένες γραμμές: Θεωρείται ότι η κυκλοφορία ηλεκτρικών λεωφορείων επιτρέπεται μόνο σε γραμμές οι οποίες διαθέτουν κόμβο του συνόλου  $N_{PCS}$  σε τουλάχιστον ένα εκ των άκρων τους. Στις γραμμές αυτές αντιστοιχίζεται η τιμή  $G_{p,n}=1$ , ενώ στις υπόλοιπες ισχύει  $G_{p,n}=0$ . Επισημαίνεται ότι η ύπαρξη, στο άκρο μιας γραμμής, κόμβου με δυνατότητα κατασκευής σταθμού επαναφόρτισης δε λειτουργεί δεσμευτικά για τη γραμμή, καθώς σε αυτήν μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε συμβατικά ( $G_n=0$ ) είτε ηλεκτρικά λεωφορεία ( $G_n=1$ ). Ωστόσο, θεωρείται αδύνατη η χρησιμοποίηση ηλεκτρικού λεωφορείου σε γραμμή που δε διαθέτει σταθμό επαναφόρτισης σε ένα τουλάχιστον άκρο. Ο λόγος είναι απλός: Τα ηλεκτρικά λεωφορεία απαιτούν επαναφόρτιση σε τακτά χρονικά διαστήματα. Για να



αποφευχθούν, όμως, τυχόν καθυστερήσεις, καθώς επίσης και για να μειωθούν τα νεκρά οχηματοχιλιόμετρα, επιλέγεται η φόρτιση να γίνεται στην αφετηρία ή το τέρμα, κατά τη διάρκεια του χρόνου επαναφοράς.

#2) Μήκος γραμμών: Κάθε λεωφορειακή γραμμή πρέπει να είναι κατάλληλου μήκους ώστε να εξυπηρετείται όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα η ζήτηση και συγχρόνως να αποφεύγεται η συσσώρευση των καθυστερήσεων και, κατά συνέπεια, ο περιορισμός της αξιοπιστίας του δικτύου. Επομένως, για κάθε γραμμή  $n$  με μήκος  $L_n$ , πρέπει να ισχύει:

$$L_{min} \leq L_n \leq L_{max} \quad (4.9)$$

Το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της γραμμής, καθώς τα ηλεκτρικά λεωφορεία απαιτούν σχετικά συχνές επαναφορτίσεις λόγω της περιορισμένης εμβέλειας λειτουργίας τους. Η απόσταση που μπορούν να διανύσουν χωρίς ενδιάμεση φόρτιση διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο του λεωφορείου. Σε ένα μικρό σχετικά δίκτυο μπορούν να τεθούν ίσα ανώτατα όρια μήκους για συμβατικά ( $L_{max,c}$ ) και ηλεκτρικά ( $L_{max,e}$ ) λεωφορεία. Ωστόσο, προκειμένου να προληφθούν οι συνέπειες απρόβλεπτων συμβάντων (π. χ. υπερβολική καθυστέρηση εν μέσω της διαδρομής λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε εξάντληση της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας), είναι εύλογο να επιλεχθεί, υπέρ της ασφαλείας, μικρότερο μέγιστο μήκος για τα ηλεκτρικά λεωφορεία. Επομένως, ο περιορισμός διατυπώνεται ακριβέστερα ως:

$$L_{min} \leq L_{n,c} \leq L_{max,c} \quad (4.10)$$

$$L_{min} \leq L_{n,e} \leq L_{max,e} \quad (4.11)$$

Όπου ο δείκτης  $c$  αναφέρεται σε συμβατικό (conventional) λεωφορείο, ενώ ο δείκτης  $e$  σε ηλεκτρικό (electric) λεωφορείο.

#3) Συχνότητα διέλευσης λεωφορείων:

$$f_{min} \leq f_n \leq f_{max} \quad (4.12)$$

Τα όρια των συχνοτήτων αντιστοιχούν σε όρια χρονοαποστάσεων μεταξύ διαδοχικών διελεύσεων λεωφορείων της ίδιας γραμμής προς την ίδια κατεύθυνση σύμφωνα με τη σχέση

$$H_n = \frac{60}{f_n} \quad (4.13)$$

Όπου η χρονοαπόσταση  $H_n$  μετράται σε λεπτά/όχημα, ενώ η συχνότητα  $f_n$  σε οχήματα/ώρα.

#4) Διαθέσιμος στόλος οχημάτων: Τα απαιτούμενα οχήματα για τη λειτουργία του συγκοινωνιακού δικτύου δεν είναι δυνατό να υπερβαίνουν τα διαθέσιμα. Επομένως, το συνολικό πλήθος των απαιτούμενων συμβατικών λεωφορείων,  $V_{req,c}$  δεν πρέπει να υπερβαίνει τον αριθμό των διαθέσιμων συμβατικών λεωφορείων  $V_{av,c}$  και, αντιστοίχως, το συνολικό πλήθος των απαιτούμενων ηλεκτρικών λεωφορείων  $V_{req,e}$  δεν πρέπει να υπερβαίνει τον αριθμό των διαθέσιμων ηλεκτρικών  $V_{av,e}$ .

$$V_{req,c} \leq V_{av,c} \quad (4.14)$$

$$V_{req,e} \leq V_{av,e} \quad (4.15)$$

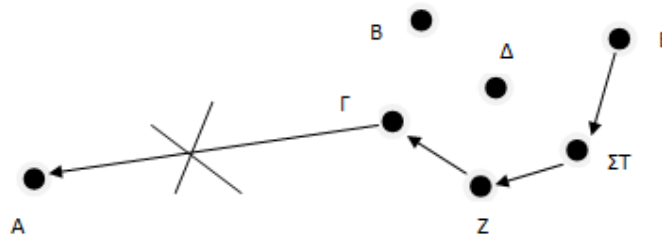
#5) Αλληλουχία στάσεων κατά μήκος λεωφορειακής γραμμής:

Η διαδοχική τοποθέτηση των στάσεων A και B σε μια γραμμή επιτρέπεται μόνο εάν ισχύει μία τουλάχιστον από τις ακόλουθες συνθήκες:

- (α) Η B περιέχεται στο σύνολο των 5 πλησιέστερων προς την A στάσεων.
- (β) Η A περιέχεται στο σύνολο των 5 πλησιέστερων προς τη B στάσεων.

Δηλαδή, δύο στάσεις του δικτύου επιτρέπεται να εισαχθούν ως διαδοχικές στην ίδια λεωφορειακή γραμμή μόνο εάν η μία εξ αυτών περιέχεται στο σύνολο με τις πέντε κοντινότερες της άλλης ή και αντιστρόφως. Ο κανόνας αυτός ελέγχει τη γεωμετρία των γραμμών αποκλείοντας την ένωση μακρινών μεταξύ τους στάσεων και κατ' επέκταση μειώνει, σε ένα βαθμό, την πιθανότητα εμφάνισης αναστροφών (U-turns), ελιγμών και μεγάλων αποκλίσεων από την κύρια διαδρομή.

Ο παραπάνω κανόνας περιγράφεται στο Σχήμα 4.1: Έστω οι στάσεις A, B, Γ, Δ, E, ΣΤ, Ζ εκ των οποίων οι B, Γ, Δ, E, ΣΤ, Ζ είναι μεταξύ τους γειτονικές, ενώ η A είναι απομονωμένη. Κατά συνέπεια, οι πέντε κοντινότερες στάσεις της B είναι οι Γ, Δ, E, ΣΤ, Ζ, οι πέντε κοντινότερες της Γ είναι οι B, Δ, E, ΣΤ, Ζ και ούτω καθεξής. Η A, δηλαδή, δεν περιέχεται στο σύνολο των 5 πλησιέστερων στάσεων καμίας άλλης. Οι πέντε πλησιέστερες στάσεις της ίδιας, ωστόσο, περιέχονται μεταξύ των B, Γ, Δ, E, ΣΤ, Ζ. Έστω ότι ο κανόνας ίσχυε μονομερώς, δηλαδή ότι κατά την κατασκευή των γραμμών επιτρεπόταν κάθε στάση να ακολουθείται μόνο από στάση που ανήκει στις 5 κοντινότερές της. Εάν, σε αυτήν την περίπτωση, η κατασκευή της γραμμής ξεκινούσε από μια εκ των B, Γ, Δ, E, ΣΤ, Ζ, θα ήταν αδύνατη η σύνδεσή τους με την A. Κατά συνέπεια, η A θα αποκλειόταν από το δίκτυο.

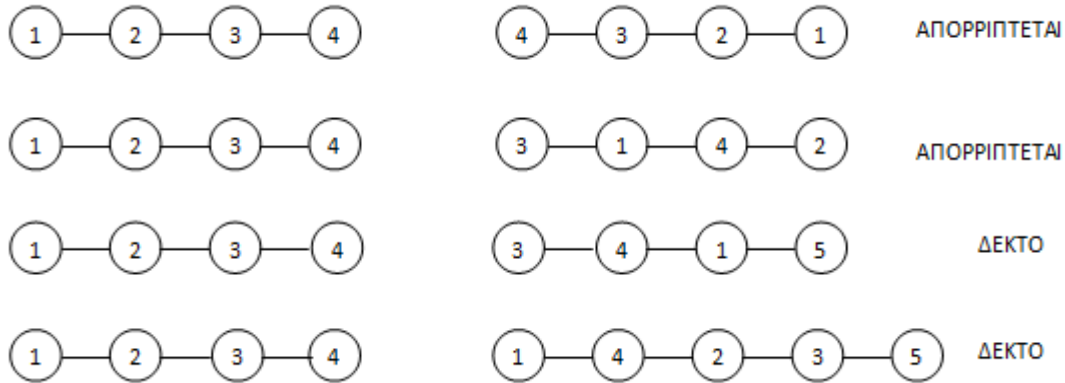


Σχήμα 4.1 Η λειτουργία του περιορισμού #5.

#6) Απαγόρευση γραμμών που περιέχουν το ίδιο ακριβώς σύνολο στάσεων:

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου είναι πιθανή η δημιουργία γραμμών οι οποίες περιέχουν τις ίδιες ακριβώς στάσεις, χωρίς αυτό να σημαίνει απαραίτητα ότι οι στάσεις αυτές είναι τοποθετημένες με την ίδια σειρά. Ωστόσο, επειδή σκοπός της επίλυσης είναι η κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου μέρους της ζήτησης με χρήση το πολύ δύο διαφορετικών γραμμών, συμπεραίνεται ότι είναι απαραίτητη η ύπαρξη ποικιλομορφίας στο δίκτυο. Με

άλλα λόγια, οι γραμμές του δικτύου πρέπει να είναι φτιαγμένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται όσο το δυνατόν περισσότεροι δυνατοί συνδυασμοί που ικανοποιούν τη ζήτηση κατά τον τρόπο που εξηγήθηκε προηγουμένως. Στο Σχήμα 4.2 εξηγείται με χρήση παραδειγμάτων ποιες γραμμές απορρίπτονται ως πρακτικά ίδιες και ποιες όχι:



Σχήμα 4.2 Περιορισμός #6.

Ωστόσο, με δεδομένο ότι είναι μειωμένη η πιθανότητα ύπαρξης στην ίδια λύση δύο ή περισσότερων τέτοιων γραμμών, και για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου, ο έλεγχος του περιορισμού αυτού δεν επαναλαμβάνεται σε κάθε επανάληψη του Γενετικού Αλγορίθμου, αλλά πραγματοποιείται μία φορά στο τέλος των επαναλήψεων.

### 4.3 Κανονικοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης

Όπως φάνηκε από τη μορφή της, η αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από έξι διαφορετικούς όρους καθώς το πρόβλημα είναι πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων (multi-objective optimization problem). Η μέθοδος που ακολουθείται είναι εκείνη του σταθμισμένου αθροίσματος (weighted sum method), κατά την οποία κάθε όρος της αντικειμενικής συνάρτησης πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή βάρους  $W_i$ . Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας κρίθηκε σκόπιμη η κανονικοποίηση (Normalization) των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης.

Οι νέοι όροι  $Z_{i,norm}$  προκύπτουν από τη σχέση των Proos et al. (2001):

$$Z_{i,norm} = \frac{Z_i}{|Z_{i,max}|} \quad (4.16)$$

όπου  $Z_{i,max}$  η μέγιστη δυνατή τιμή που μπορεί να λάβει το μέγεθος  $Z$  χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί του προβλήματος. Σύμφωνα με τους Marler and Arora (2004), η τιμή  $Z_{i,max}$  μπορεί να είναι είτε το απόλυτο μέγιστο της συνάρτησης  $Z$ , εάν υπάρχει, είτε μια προσέγγισή του βασιζόμενη στην κρίση του μηχανικού (engineering intuition). Το αποτέλεσμα της κανονικοποίησης αυτής είναι αδιάστατοι όροι που κυμαίνονται στο διάστημα  $[0,1]$  (προφανώς υπό την προϋπόθεση ότι  $Z_{i,max} \neq 0$ ).

Η κανονικοποίηση αυτής της μορφής παρέχει τα εξής πλεονεκτήματα:

(α) Περιορίζει κάθε όρο στο διάστημα  $[0, 1]$ , με αποτέλεσμα την εξάλειψη της διαφοράς στην τάξη μεγέθους που παρουσιάζεται συχνά μεταξύ των όρων. (Προφανώς, το γεγονός ότι οι όροι ανήκουν στο διάστημα  $[0, 1]$  δε συνεπάγεται από μόνο του την ύπαρξη ομοιομορφίας στην τάξη μεγέθους. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας οι όροι μεταβάλλονται κατά το πρώτο ή το δεύτερο δεκαδικό ψηφίο).

(β) Διευκολύνει την επιλογή των συντελεστών βάρους, οι οποίοι βασίζονται στη σχετική σημασία που αποδίδεται στους όρους και όχι στην τάξη μεγέθους καθενός.

(γ) Καθιστά περιττή τη μετατροπή των όρων σε χρηματικές μονάδες. Επομένως, παρέχει ευελιξία στην επιλογή των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς δεν απαιτείται επιλογή όρων για τους οποίους η βιβλιογραφία παρέχει συγκεκριμένες τιμές ανά μονάδα ούτε εκτίμηση του κόστους αυτού με αβέβαιες παραδοχές. Ακόμα και αν οι όροι πολλαπλασιάζονταν με χρηματική αξία (π.χ. €/μονάδα), αυτή θα απλοποιούνταν λόγω του κλάσματος.

δ) Καθιστά εύλογη την επιλογή της ποινής που επιβάλλεται στην αντικειμενική συνάρτηση (εδάφιο 4.4.2): Η ποινή η οποία προστίθεται κατά την παραβίαση των περιορισμών είναι τέτοιας τάξης μεγέθους ώστε να εξασφαλίζεται, σε μεγάλο βαθμό, η τήρηση των περιορισμών από τη βέλτιστη λύση. Η αυστηρότερη, δε, ποινή που επιβάλλεται κατά την παραβίαση του περιορισμού #1 προσαυξάνει την αντικειμενική συνάρτηση κατά τάξεις μεγέθους. Αυτό σημαίνει ότι, εάν η επίλυση ξεκινήσει από μία αρχική λύση η οποία τηρεί τον περιορισμό αυτόν, είναι πρακτικά αδύνατη η παραβίασή του από μια άλλη, βελτιωμένη λύση.

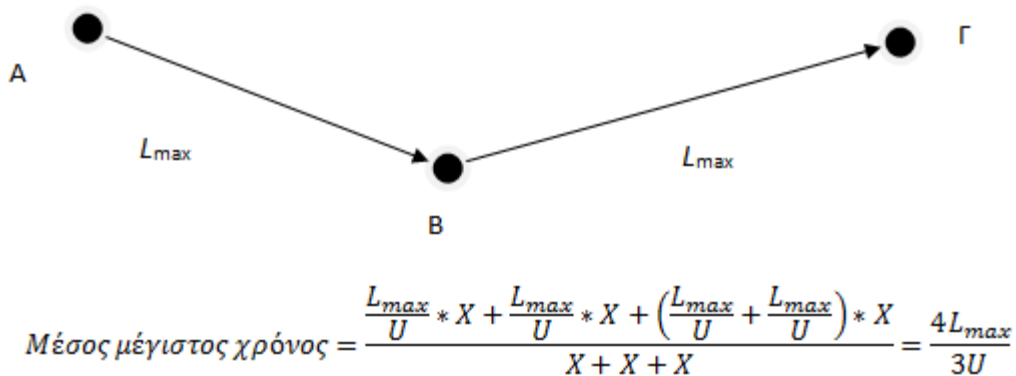
(ε) Δε μεταβάλλει την ουσία της αντικειμενικής συνάρτησης. Με δεδομένο ότι η αντικειμενική συνάρτηση μετατρέπεται σε ένα άθροισμα της μορφής  $\sum W_i \frac{Z_i}{Z_{i,max}}$ , όπου τα  $Z_{i,max}$  είναι σταθερά, συμπεραίνεται ότι η ελαχιστοποίηση κάθε όρου μπορεί να επιτευχθεί αποκλειστικά με ελαχιστοποίηση του ίδιου του  $Z_i$ .

(στ) Καθιστά ευκολότερη την εποπτεία των αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, τιμή 0,05 στον όρο της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης μεταφράζεται ως ποσοστό εξυπηρετούμενης ζήτησης 95%.

Κατά την κανονικοποίηση, κάθε όρος  $Z_i$  αντικαθίσταται από τον αντίστοιχό του  $Z_{i,norm} = \frac{Z_i}{Z_{i,max}}$ . Επομένως, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός ή εκτίμηση των μέγιστων και ελάχιστων δυνατών τιμών των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης. Ακολουθώς, περιγράφεται το σκεπτικό με το οποίο υπολογίζεται η μέγιστη τιμή κάθε όρου:

1)  $D_U$ : Στην ιδανική περίπτωση, το δίκτυο εξυπηρετεί το 100% της επιβατικής ζήτησης με απευθείας διαδρομές ή το πολύ μία μετεπιβίβαση. Επομένως, η μέγιστη τιμή της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης ισούται με τη συνολική.

2)  $\bar{T}$ : Η μέγιστη τιμή του χρόνου μετακίνησης προκύπτει εάν θεωρηθεί ένα υποθετικό ζεύγος Προέλευσης – Προορισμού A-B, το οποίο εξυπηρετείται με μετεπιβίβαση στον κόμβο K και συγχρόνως ισχύει  $L_{AK}=L_{KB}=L_{max}$ . Σε αυτήν την περίπτωση, οι μετακινούμενοι θα χρειάζονταν  $2 \cdot L_{max}/U$  λεπτά χρόνο μετακίνησης εντός του οχήματος και  $2 \cdot T_w$  λεπτά χρόνο αναμονής. Ωστόσο, μια τέτοια ακραία περίπτωση, μολονότι εφικτή για μεμονωμένα ζεύγη, είναι μάλλον αδύνατο να προκύψει ως μέση τιμή του μέγιστου χρόνου και οδηγεί σε αδικαιολόγητη μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Για το σκοπό αυτό, υιοθετείται ένα σκεπτικό που λαμβάνει υπόψη και τη ζήτηση που εξυπηρετείται σε λιγότερο χρόνο και συγχρόνως, υπέρ της ασφαλείας, αγνοεί το χρόνο αναμονής. Στο Σχήμα 4.3 εξηγείται η περίπτωση αυτή για ομοιόμορφη ζήτηση X σε όλα τα ζεύγη Π-Π.



Σχήμα 4.3 Εκτίμηση της μέγιστης τιμής του μέσου χρόνου μετακίνησης.

Για  $L_{max}=10$  km και  $U=15$  km/h (βασικό σενάριο) προκύπτει μέσος μέγιστος χρόνος διαδρομής ίσος με 53 λεπτά. Στο βασικό σενάριο (Κεφάλαιο 7) λαμβάνεται εν τέλει ίσος με 50 λεπτά. Άλλωστε, κατά τις πολλαπλές επιλύσεις του προβλήματος οι οποίες προηγήθηκαν των τελικών πειραμάτων δεν προέκυψαν χρόνοι μετακίνησης που να υπερβαίνουν τα 50 λεπτά.

3)  $\sum_n e_n$ : Η μάζα των εκπεμπόμενων ρύπων μηδενίζεται όταν σε όλο το δίκτυο κυκλοφορούν αποκλειστικά ηλεκτρικά λεωφορεία. Η μέγιστη δυνατή ποσότητα εκπεμπόμενων ρύπων, όμως, δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων. Μια εύλογη εκτίμησή της προκύπτει ως εξής: Με δεδομένο πως στο συγκεκριμένο δίκτυο έχει απλοποιητικά αγνοηθεί η διακύμανση της κλίσης κατά μήκος των οδικών στοιχείων, καθώς και όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκπομπή ρύπων από δεδομένο είδος οχήματος, συμπεραίνεται ότι οι εκπεμπόμενοι ρύποι σε ένα οδικό τμήμα κατά τη διέλευση ενός συμβατικού οχήματος είναι ανάλογοι του μήκους του τμήματος αυτού. Για το λόγο αυτό, άλλωστε, το μητρώο  $e$  προέκυψε με πολλαπλασιασμό των στοιχείων του μητρώου  $L$  με το συντελεστή EF. Κατά συνέπεια, οι εκπεμπόμενοι ρύποι μεγιστοποιούνται όταν μεγιστοποιείται το σύνολο των οχηματοχιλιόμετρων που διανύονται από συμβατικά οχήματα. Ωστόσο, δεδομένου ότι τα οχηματοχιλιόμετρα αυτά αποτελούν ποσοστό των συνολικών οχηματοχιλιόμετρων, επιλέχθηκε η θεώρηση μεταβλητής τιμής της μέγιστης μάζας ρύπων προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν υπερτίμηση του παρονομαστή και κατά συνέπεια τεχνητή μείωση της

τιμής του κανονικοποιημένου τρίτου όρου. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι σε κάθε επανάληψη του γενετικού αλγορίθμου η μέγιστη τιμή του όρου  $\sum_n e_n$  ισούται με τη μάζα των ρύπων που θα εκπέμπονταν εάν στο συγκεκριμένο δίκτυο κυκλοφορούσαν αποκλειστικά συμβατικά οχήματα.

4)  $N_{CS}$ : Το πλήθος των χρησιμοποιούμενων σταθμών επαναφόρτισης γίνεται μέγιστο εάν χρησιμοποιηθούν, σε ηλεκτρικές γραμμές, όλοι οι διαθέσιμοι σταθμοί. Επομένως, η μέγιστη τιμή του ισούται με το πλήθος των στοιχείων του συνόλου  $N_{PCS}$ .

5-6)  $V_{req,c}$  και  $V_{req,e}$ : Το μέγιστο πλήθος συμβατικών και ηλεκτρικών, αντιστοίχως, οχημάτων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο δίκτυο. Εύκολα συμπεραίνεται ότι το μέγιστο δυνατό πλήθος οχημάτων από κάθε είδος ισούται με το μέγεθος του αντίστοιχου διαθέσιμου στόλου.

## 4.4 Είδος περιορισμών – επιβαλλόμενες ποινές

### 4.4.1 Είδος περιορισμών

Οι περιορισμοί που τίθενται σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορούν να είναι είτε αυστηροί (hard) είτε εύκαμπτοι (soft) (Hicks et al., 2006).

Αυστηροί ονομάζονται οι περιορισμοί εκείνοι των οποίων η παραβίαση απαγορεύεται. Κάθε πιθανή λύση η οποία παραβιάζει αυστηρό περιορισμό θεωρείται ανέφικτη (Palisade Corporation, 2010) και απορρίπτεται.

Εύκαμπτοι (soft) ονομάζονται οι περιορισμοί εκείνοι των οποίων η παραβίαση οδηγεί σε επιβάρυνση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, χωρίς η λύση να απορρίπτεται ως ανέφικτη. Για παράδειγμα, σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης, η παραβίαση εύκαμπτου περιορισμού συνεπάγεται αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης κατά την προκαθορισμένη ποινή. Η τήρησή τους είναι επιθυμητή, αλλά η παραβίασή τους μπορεί να γίνει αποδεκτή εάν βελτιώνει σημαντικά την καταλληλότητα της λύσης (Palisade Corporation, 2010).

Στην παρούσα εργασία, όλοι οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί θεωρήθηκαν εύκαμπτοι (soft) για τρεις λόγους:

(α) Όταν προκύψει λύση που παραβιάζει αυστηρό περιορισμό, ο γενετικός αλγόριθμος την απορρίπτει εξ αρχής και δεν την εντάσσει στον πληθυσμό (population) των υποψήφιων λύσεων. Κατά συνέπεια, περιορίζεται σημαντικά η ποικιλομορφία (diversity) του πληθυσμού. Αντίθετα, οι λύσεις που παραβιάζουν εύκαμπτους περιορισμούς δεν απορρίπτονται (Palisade Corporation, 2010), αλλά αντιμετωπίζονται στο σύνολό τους ως εφικτές με αποτέλεσμα τη διατήρηση της ποικιλομορφίας στον πληθυσμό. Από εκεί και πέρα, καθώς βελτιώνονται τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου, παράγονται λύσεις

οι οποίες αφενός παρουσιάζονται βελτιωμένες ως προς την αντικειμενική συνάρτηση, αφετέρου τηρούν τους περιορισμούς.

(β) Αν οι περιορισμοί επιλέγονταν ως αυστηροί, είναι αμφίβολο εάν ο Γενετικός Αλγόριθμος θα μπορούσε να βρει εφικτή λύση – ακόμα και αν πράγματι έβρισκε, η καταλληλότητά της ως προς την αντικειμενική συνάρτηση είναι αμφίβολη λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος (Υποκεφάλαιο 1.1).

(γ) Ορισμένα μεγέθη (π.χ. τα μήκη των γραμμών) ενδέχεται να μπορούν να παραβιάσουν, σε ένα βαθμό, τον επιβαλλόμενο περιορισμό, χωρίς σημαντικές συνέπειες. Για παράδειγμα, μια λύση η οποία περιλαμβάνει μια λεωφορειακή γραμμή ελάχιστα μικρότερη ή μεγαλύτερη από το επιτρεπόμενο μήκος, ενδέχεται να προσδίδει τη βέλτιστη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση. Σε αυτήν την περίπτωση, το δίκτυο που προκύπτει μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό.

#### 4.4.2 Επιβαλλόμενες ποινές

Οι ποινές που αποδίδονται στην αντικειμενική συνάρτηση κατά την παραβίαση των περιορισμών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

(α) Σταθερές: Η τιμή της σταθερής ποινής δεν εξαρτάται από το μέγεθος της απόκλισης του τελικού μεγέθους από τα επιτρεπτά όρια. Σταθερή ποινή αποδίδεται στην αντικειμενική συνάρτηση όταν παραβιαστεί ο περιορισμός #1, ο οποίος αφορά στην κυκλοφορία ηλεκτρικών λεωφορείων σε συγκεκριμένες γραμμές.

(β) Μεταβλητές: Για τους περιορισμούς #2-#5, η επιβαλλόμενη ποινή εξαρτάται από το μέγεθος της απόκλισης του εκάστοτε μεγέθους από τα αντίστοιχα επιτρεπόμενα όρια και αυξάνεται εκθετικά όσο αυξάνεται και η αντίστοιχη απόκλιση. Με τον τρόπο αυτό, οι λύσεις που υπερβαίνουν σημαντικά τα επιτρεπόμενα όρια προσδίδουν δυσανάλογα υψηλότερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση, με αποτέλεσμα να καθίσταται πρακτικά αδύνατη η επιλογή τους ως βέλτιστων.

Η ποινή επιβάλλεται χωριστά για κάθε γραμμή και μέγεθος που παραβιάζεται και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$PENALTY(dev) = 100 * (e^{\frac{dev}{100}} - 1) \quad (4.17)$$

Με το συμβολισμό  $dev$ , δηλώνεται η απόκλιση (deviation) από το επιτρεπόμενο όριο του μεγέθους  $A$ . Αν το μέγεθος  $A$  υπερβαίνει το ανώτατο όριο  $A_{max}$ , τότε  $dev = A - A_{max}$ . Αν, αντίθετα, το μέγεθος  $A$  υπολείπεται του κατώτατου επιτρεπόμενου ορίου  $A_{min}$ , τότε  $dev = A_{min} - A$ .

Εννοείται ότι η επιβαλλόμενη ποινή λαμβάνει πάντα θετικές τιμές. Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται από την επίλυση της ανίσωσης

$$PENALTY < 0 \quad (4.18)$$

για τον παραπάνω ορισμό της συνάρτησης ποινής. Από την επίλυση προκύπτει ότι η συνάρτηση PENALTY θα λάμβανε αρνητικές τιμές αποκλειστικά στην περίπτωση όπου  $dev < 0$  – γεγονός αδύνατο, όπως προκύπτει από τον ορισμό της απόκλισης που δόθηκε προηγουμένως.

Ο Πίνακας 4.1 καταγράφει την εκθετική αύξηση της ποινής με την αύξηση της απόκλισης. Για παράδειγμα, αν σε μία και μόνο γραμμή, με μέγιστη επιτρεπόμενη συχνότητα διέλευσης λεωφορείων  $f_{max}=10$  λεωφορεία/ώρα, προκύψει συχνότητα ίση με  $f_n=12$  λεωφορεία/ώρα, μεγαλύτερη, δηλαδή, κατά 2 της επιτρεπόμενης, τότε η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης θα αυξηθεί κατά 2,02 μονάδες.

Πίνακας 4.1 Η τιμή της επιβαλλόμενης ποινής για διάφορες τιμές της αντίστοιχης απόκλισης.

dev	PENALTY
0,5	0,50
1	1,01
2	2,02
3	3,05
4	4,08
5	5,13
6	6,18
7	7,25
8	8,33
9	9,42
10	10,52

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η ακριβέστερη έκφραση της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η εξής:

$$\min Z' = \sum W_i Z_{i,norm} + \sum P_i \quad (4.19)$$

Όπου  $\sum W_i Z_{i,norm}$  η τιμή της κανονικοποιημένης αντικειμενικής συνάρτησης, χωρίς ποινές, και  $\sum P_i$  το σύνολο των προστιθέμενων ποινών λόγω της παραβίασης των περιορισμών. Στην υπόλοιπη εργασία, με τον όρο «τιμή αντικειμενικής συνάρτησης» θα εννοείται το άθροισμα  $\sum W_i Z_{i,norm}$ , χωρίς τις ποινές, ενώ η συνολική τιμή  $\sum W_i Z_{i,norm} + \sum P_i$  θα αναφέρεται ως διευρυμένη (augmented) αντικειμενική συνάρτηση (Καρλαύτης και Λαγαρός, 2010).



---

---

## 5 Μεθοδολογικά εργαλεία

---

---

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι μεθοδολογίες και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στις διάφορες φάσεις της εργασίας και συγκεκριμένα κατά τη διαμόρφωση του προβλήματος, τον υπολογισμό των εκπεμπόμενων ρύπων και την εύρεση της βέλτιστης λύσης.

### 5.2 Περιβάλλον υλοποίησης μοντέλου

Η διαμόρφωση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Microsoft Excel της σειράς Microsoft Office.

Η επίλυση του προβλήματος προϋποθέτει τη χρησιμοποίηση πολλών διαφορετικών δεδομένων τα οποία αλληλοσχετίζονται ποικιλοτρόπως ώστε να προκύψουν οι όροι της αντικειμενικής συνάρτησης. Για τις ανάγκες της εργασίας ο προγραμματισμός των συναρτήσεων οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των απαραίτητων ενδιάμεσων και τελικών μεγεθών πραγματοποιήθηκε με χρήση της Visual Basic for Applications σε περιβάλλον Microsoft Excel.

Η Visual Basic for Applications (VBA) αποτελεί εφαρμογή της υψηλού επιπέδου αντικειμενοστραφούς γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic σε ολοκληρωμένο προγραμματιστικό περιβάλλον (Integrated Development Environment – IDE). Η βασική ιδιότητα της VBA που αξιοποιήθηκε είναι η δυνατότητα που προσφέρει στο χρήστη να κατασκευάσει τις δικές του συναρτήσεις (User Defined Functions – UDFs), προγραμματίζοντάς τες σε Visual Basic (Microsoft, 2013).

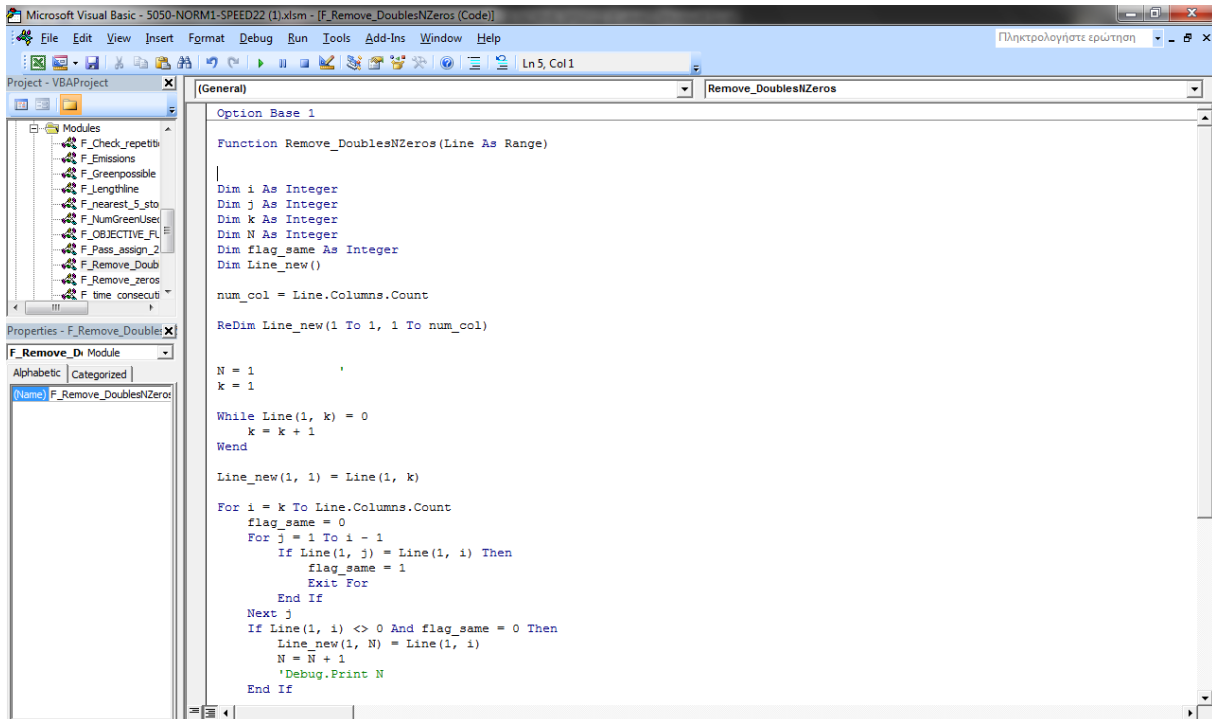
Για την κατασκευή μιας συνάρτησης UDF, ο χρήστης καθορίζει

(α) Την ονομασία της συνάρτησης, με την οποία η συνάρτηση θα καλείται στο φύλλο εργασίας.

(β) Τα ορίσματα της συνάρτησης. Πρακτικά, τα ορίσματα της συνάρτησης αποτελούν τις μεταβλητές εισόδου της. Ως όρισμα μπορεί να εισαχθεί όχι μόνο μεμονωμένη τιμή, αλλά και ολόκληρη περιοχή κελιών (range). Επιπλέον, καθορίζεται το είδος των μεταβλητών εισόδου: integer, single, double, string, boolean, long κ.λπ..

(γ) Τον κώδικα της συνάρτησης. Συνιστάται ο χρήστης να δηλώνει στην αρχή τις μεταβλητές που θα χρησιμοποιήσει στον κώδικα, καθώς και το είδος κάθε μίας εξ αυτών. Στη συνέχεια, γράφεται ο κώδικας της συνάρτησης.

Ενδεικτική απεικόνιση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της VBA περιέχεται στο Σχήμα 5.1:



```
Option Base 1

Function Remove_DoublesNZeros(Line As Range)

    Dim i As Integer
    Dim j As Integer
    Dim k As Integer
    Dim N As Integer
    Dim flag_same As Integer
    Dim Line_new()

    num_col = Line.Columns.Count

    ReDim Line_new(1 To 1, 1 To num_col)

    N = 1
    k = 1

    While Line(1, k) = 0
        k = k + 1
    Wend

    Line_new(1, 1) = Line(1, k)

    For i = k To Line.Columns.Count
        flag_same = 0
        For j = 1 To i - 1
            If Line(1, j) = Line(1, i) Then
                flag_same = 1
                Exit For
            End If
        Next j
        If Line(1, i) <> 0 And flag_same = 0 Then
            Line_new(1, N) = Line(1, i)
            N = N + 1
            'Debug.Print N
        End If
    Next i
End Function
```

Σχήμα 5.1 Το προγραμματιστικό περιβάλλον της VBA.

Έχοντας κατασκευάσει και αποθηκεύσει τη συνάρτηση, ο χρήστης μπορεί να την καλέσει στο φύλλο εργασίας με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που καλείται οποιαδήποτε προκατασκευασμένη συνάρτηση (Worksheet Function) του Microsoft Excel. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	4:W63	Destination	Line11	Line12	Common1	Time11	Time12	Time1	Line21
2	38	39	1	1	0	14,09091	0	14,09091	0
3	38	1	1	1	0	17,90909	0	17,90909	1
4	39	1	1	1	0	13,81818	0	13,81818	1
5	38	2	1	1	0	19,54545	0	19,54545	1
6	39	2	1	1	0	15,45455	0	15,45455	1
7	1	2	1	1	0	11,63636	0	11,63636	2
8	38	2	1	1	0	20,25254	0	20,25254	0

Σχήμα 5.2 Κλήση UDF συνάρτησης στο φύλλο εργασίας.

## 5.3 Μεθοδολογία επίλυσης

### 5.3.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι

#### (α) Γενικά

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), γνωστοί και ως Εξελικτικοί αλγόριθμοι (Evolutionary algorithms) ή και Εξελικτικά προγράμματα (Evolutionary programs) αποτελούν ευρετικές μεθόδους επίλυσης προβλημάτων οι οποίες επινοήθηκαν κατά τη δεκαετία του '60 και συχνά ταυτίζονται με τη θεωρία του εξελικτικού προγραμματισμού (Evolutionary Programming). Η κεντρική ιδέα του Γενετικού Αλγορίθμου βασίζεται στη θεωρία της Εξέλιξης (Evolution) του Δαρβίνου, σύμφωνα με την οποία ένας αρχικός πληθυσμός ατόμων εξελίσσεται σταδιακά σε ένα νέο πληθυσμό, κυρίως μέσω της διαδικασίας της «Φυσικής επιλογής» (Natural selection), σε συνδυασμό με τη χρήση διαδικασιών, των αποκαλούμενων «Γενετικών τελεστών» (Genetic Operators).

#### (β) Ιστορική αναδρομή

Η ακόλουθη ανασκόπηση της εξέλιξης των Γενετικών Αλγορίθμων βασίζεται στο βιβλίο An Introduction to Genetic Algorithms (Mitchell, 1998), όπου, μεταξύ άλλων, περιγράφεται η πορεία εξέλιξης των γενετικών αλγορίθμων από τη στιγμή της επινοήσεώς τους.

Σύμφωνα με τη Mitchell, η ιδέα της μελέτης των εξελικτικών συστημάτων (evolutionary systems) είχε ξεκινήσει από τη δεκαετία του 1950. Ήδη κατά τις δεκαετίες του 1950 και του 1960 διαδόθηκε η ιδέα ότι η μελέτη της εξέλιξης των οργανισμών μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη εργαλείων βελτιστοποίησης για την επίλυση προβλημάτων. Τη δεκαετία του

1960, ο Rechenberg (1965, 1973) παρουσίασε μια τέτοια μέθοδο, ονόματι «Εξελικτικές στρατηγικές» (Evolutionsstrategie στα γερμανικά). Η ιδέα του αναπτύχθηκε περαιτέρω από τον Schwefel (1975, 1977). Οι εξελικτικές στρατηγικές μελετούνταν και εξελίσσονταν παράλληλα και ανεξάρτητα από τους Γενετικούς Αλγορίθμους μέχρι και τη δεκαετία του 1990, οπότε και για πρώτη φορά άρχισε η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα δύο αυτά πεδία έρευνας.

Οι Fogel, Owens and Walsh (1966) ανέπτυξαν το λεγόμενο «Εξελικτικό Προγραμματισμό», ο οποίος αναπαριστά τη λύση του προβλήματος με τρόπο που εξαρτάται από το ίδιο το πρόβλημα. Για παράδειγμα, σε προβλήματα βελτιστοποίησης πραγματικών αριθμών, τα άτομα αναπαρίστανται ως διανύσματα πραγματικών αριθμών. Αντίστοιχα, για το πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή (travelling salesperson problem) χρησιμοποιούνται διατεταγμένες λίστες, ενώ για εφαρμογές μηχανών πεπερασμένων καταστάσεων χρησιμοποιούνται γράφοι. Ωστόσο, οι τεχνικές που πρότειναν οι Fogel, Owens και Walsh δεν έγιναν αποδεκτές από την επιστημονική κοινότητα της Τεχνητής Νοημοσύνης.

Στη διάρκεια των ίδιων δεκαετιών (1950 και 1960) πραγματοποιήθηκε επιπλέον έρευνα στον τομέα του εξελικτικού προγραμματισμού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Εξελικτική Εφαρμογή του Box (1957), η οποία, όμως, δεν έμοιαζε τόσο με Εξελικτικό Αλγόριθμο – σύμφωνα με την επικρατούσα έννοια του όρου – αλλά περισσότερο με κάποιου είδους τεχνική διοίκησης. Ωστόσο, η Εξελικτική Εφαρμογή αποτέλεσε πρόγονο άλλων τεχνικών τοπικής αναζήτησης, οι οποίες αναπτύχθηκαν μετέπειτα. Άλλες έρευνες, όπως των Bledsoe (1961) και Bremermann (1962), ήταν σαφώς πιο συναφείς με την τρέχουσα τότε αντίληψη περί Εξελικτικών Αλγορίθμων.

Παράλληλα, διαδόθηκε η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών στον κλάδο της εξελικτικής βιολογίας: Οι Baricelli (1957, 1962), Fraser (1957) και Martin και Cockerham (1960) αξιοποίησαν τις δυνατότητες του ηλεκτρονικού υπολογιστή προκειμένου να πραγματοποιήσουν ελεγχόμενα πειράματα όπου προσομοιωνόταν η εξέλιξη των φυσικών οργανισμών.

Εν τέλει, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι εφευρέθηκαν από τον Αμερικανό καθηγητή ψυχολογίας, ηλεκτρολόγο μηχανικό και επιστήμονα πληροφορικής John Henry Holland κατά τη δεκαετία του 1960, στο Πανεπιστήμιο του Michigan. Αρχικά, στόχος του Holland δεν ήταν ο σχεδιασμός αλγορίθμου επίλυσης προβλημάτων, αλλά η συστηματική μελέτη της διαδικασίας της φυσικής προσαρμογής και η σχεδίαση λογισμικού τεχνητών συστημάτων το οποίο διατηρεί τους πιο σημαντικούς από τους μηχανισμούς των φυσικών συστημάτων. Στο βιβλίο του «Adaptation in Natural and Artificial Systems» (Holland 1975), ο Holland παρουσίασε το Γενετικό Αλγόριθμο ως απλοποιημένη εκδοχή της βιολογικής εξέλιξης και περιέγραψε το θεωρητικό υπόβαθρο της χρήσης του: Συγκεκριμένα, η προσαρμογή πραγματοποιείται με τη μετάβαση από έναν αρχικό πληθυσμό χρωμοσωμάτων (συμβολοσειρές από 0 και 1 ή «bits») σε ένα νέο πληθυσμό με χρήση του κανόνα της «φυσικής επιλογής» (natural selection), σε συνδυασμό με τους γενετικούς τελεστές της διασταύρωσης (crossover), της μετάλλαξης (mutation) και της αντιστροφής (inversion).

Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από γονίδια (genes), καθένα εκ των οποίων καθορίζει ένα χαρακτηριστικό του ατόμου. Ο τελεστής της επιλογής διαλέγει τα χρωμοσώματα του πληθυσμού τα οποία θα διασταυρωθούν, με τα πιο «κατάλληλα» χρωμοσώματα να παράγουν γενικώς περισσότερους απογόνους σε σχέση με τα υπόλοιπα. Στη συνέχεια, ο τελεστής διασταύρωσης ανταλλάσει επιμέρους τμήματα μεταξύ δύο χρωμοσωμάτων, με τον ίδιο τρόπο που στη φύση διασταυρώνονται δύο απλοειδείς οργανισμοί. Ο τελεστής της μετάλλαξης αλλάζει τυχαία την τιμή ορισμένων γονιδίων και ο τελεστής της αντιστροφής αντιμεταθέτει τη σειρά εμφάνισης των γονιδίων σε ένα τμήμα του χρωμοσώματος.

Ο Γενετικός Αλγόριθμος του Holland αποτέλεσε καινοτομία στο χώρο της Τεχνητής Νοημοσύνης συγκρινόμενος με παλαιότερες έρευνες στον τομέα των Εξελικτικών Στρατηγικών. Για παράδειγμα, ο Rechenberg είχε χρησιμοποιήσει έναν αλγόριθμο στον οποίο η αρχική λύση αποτελούνταν από δύο μόνο άτομα, έναν γονέα και έναν απόγονο – ο οποίος προέκυπτε με μετάλλαξη του γονέα – οι Fogel, Owens και Walsh εξασφάλιζαν την ποικιλομορφία του πληθυσμού χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τον τελεστή της μετάλλαξης. Αντίθετα, η μέθοδος του Holland αξιοποιούσε περισσότερους γενετικούς τελεστές και η αρχική της λύση δεν περιελάμβανε όχι μόνο ένα ή δύο άτομα, αλλά ολόκληρο πληθυσμό. Εν τέλει, ο Holland είναι ο πρώτος ο οποίος θεμελίωσε θεωρητικά την υπολογιστική εξέλιξη.

Από τη δεκαετία του 1990, τα όρια μεταξύ Γενετικών Αλγορίθμων, Εξελικτικών Στρατηγικών και Εξελικτικού προγραμματισμού έχουν γίνει λιγότερο ευδιάκριτα, καθώς οι διαφορετικοί κλάδοι εξελίσσονται αλληλεπιδρώντας μεταξύ τους. Σήμερα, τελικά, ο όρος «Γενετικός Αλγόριθμος» έχει έννοια διαφορετική (και ευρύτερη) από εκείνη που είχε όταν πρωτοεμφανίστηκε στο έργο του Holland.

### **(γ) Διαδικασία εκτέλεσης**

Οι Γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της Φυσικής Γενετικής (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999):

Κάθε επανάληψη του αλγορίθμου οδηγεί στη δημιουργία μιας νέας γενιάς (generation) λύσεων. Κάθε σύνολο δημιουργούμενων υποψήφιας λύσεων ονομάζεται πληθυσμός (population). Κάθε υποψήφια λύση που περιέχεται στον πληθυσμό ονομάζεται άτομο (individual) ή γενότυπος (genotype). Κάθε άτομο ή γενότυπος αποτελείται από ένα σύνολο χρωμοσωμάτων (chromosomes). Συνηθίζεται, ωστόσο, κάθε άτομο να αποτελείται από ένα μόνο χρωμόσωμα, με αποτέλεσμα τα άτομα και τα χρωμοσώματα πρακτικά να ταυτίζονται. Με τη σειρά τους, τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γραμμικώς διατεταγμένα γονίδια (genes). Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του ατόμου βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωμοσώματος, οι οποίες αποκαλούνται loci. Οι διαφορετικές καταστάσεις των γονιδίων καλούνται alleles (τιμές χαρακτηριστικού γνωρίσματος). Το «αποκωδικοποιημένο» περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος καλείται φαινότυπος (phenotype) (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999). Για παράδειγμα, στην

παρούσα εργασία, κάθε χρωμόσωμα δημιουργεί ένα φαινότυπο που δεν είναι άλλος από το σύνολο των γραμμών του συγκοινωνιακού δικτύου.

Όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια, από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του γενετικού αλγορίθμου είναι η ταυτόχρονη αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις σε συνδυασμό με την αξιοποίηση της παραγόμενης πληροφορίας. Σε κάθε γενιά, αναπαράγονται οι «σχετικά καλές» λύσεις και απομακρύνονται οι «σχετικά κακές». Η καταλληλότητα μιας λύσης καθορίζεται από την τιμή που λαμβάνει η αντικειμενική συνάρτηση (Objective function ή fitness function) για τη λύση αυτή.

Συνοπτικά, τα βήματα που ακολουθεί ο Γενετικός Αλγόριθμος είναι τα εξής (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999):

- (α) Αρχικοποίηση πληθυσμού (Initialization)
- (β) Αξιολόγηση κάθε λύσης
- (γ) Επιλογή νέου πληθυσμού
- (δ) Εφαρμογή γενετικών τελεστών διασταύρωσης και μετάλλαξης
- (ε) Επιστροφή στο βήμα (β)
- (στ) Τερματισμός Γενετικού αλγορίθμου

Αναλυτικότερα:

(α) Αρχικοποίηση πληθυσμού (Initialization): Κατά την αρχικοποίηση δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός λύσεων, το μέγεθος του οποίου παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της επίλυσης.

(β) Αξιολόγηση κάθε λύσης: Η αξιολόγηση των λύσεων πραγματοποιείται με υπολογισμό της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε μία εξ αυτών. Αν πρόκειται για πρόβλημα ελαχιστοποίησης, οι λύσεις που προσδίδουν τη χαμηλότερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση θεωρούνται καλύτερες. Το αντίθετο ισχύει σε περίπτωση προβλήματος μεγιστοποίησης.

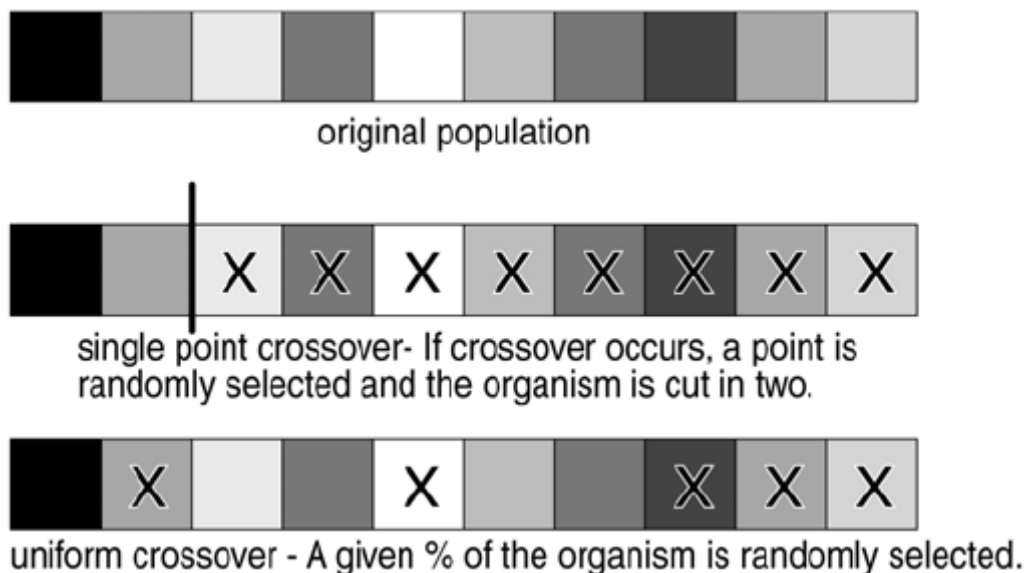
(γ) Επιλογή νέου πληθυσμού: Η συνηθέστερη μέθοδος επιλογής των ατόμων που θα επιβιώσουν μέχρι την επόμενη γενιά είναι η χρήση «ρουλέτας με σχισμές» (slotted roulette wheel): Κάθε άτομο τοποθετείται στη ρουλέτα καταλαμβάνοντας χώρο ανάλογο με την απόδοσή του. Κατά συνέπεια, η πιθανότητα επιλογής ενός ατόμου για την επόμενη γενιά είναι επίσης ανάλογη με την απόδοσή του. Επιπλέον, συνήθως εφαρμόζεται και η μέθοδος του ελιτισμού (elitism), σύμφωνα με την οποία η απόλυτα καλύτερη λύση κάθε γενιάς μεταφέρεται αυτούσια στην επόμενη.

(δ) Εφαρμογή γενετικών τελεστών διασταύρωσης (crossover) και μετάλλαξης (mutation): Σε κάθε επανάληψη, εφαρμόζεται πρώτα ο τελεστής της διασταύρωσης. Κάθε άτομο έχει δεδομένη πιθανότητα  $p_c$  να επιλεγεί για διασταύρωση. Σε καθένα αντιστοιχίζεται ένας τυχαίος πραγματικός αριθμός  $r$  τέτοιος ώστε  $0 < r < 1$ . Αν σε κάποιο άτομο ισχύει  $r < p_c$ , τότε αυτό επιλέγεται προς διασταύρωση. Επομένως, η αναμενόμενη τιμή

του πλήθους των διασταυρούμενων μελών δίνεται από τη σχέση  $p_c * N$ , όπου  $N$  το μέγεθος του πληθυσμού.

Τα μέλη που θα διασταυρωθούν τοποθετούνται σε ζεύγη και σε κάθε ζεύγος αντιστοιχίζεται ένας ομοιόμορφα επιλεγμένος τυχαίος ακέραιος αριθμός από το διάστημα  $[1, m-1]$ , όπου  $m$  το μήκος του χρωμοσώματος (μήκος χρωμοσώματος = πλήθος γονιδίων χρωμοσώματος). Ο αριθμός αυτός προσδιορίζει το λεγόμενο «σημείο διασταύρωσης» (crossover point), δηλαδή το σημείο στο οποίο το αρχικό χρωμόσωμα διασπάται σε δύο επιμέρους τμήματα. Έτσι, προκύπτουν δύο νέα άτομα (χρωμοσώματα).

Πολλοί σύγχρονοι γενετικοί αλγόριθμοι, όπως εκείνος στον οποίο βασίστηκε η επίλυση του παρόντος προβλήματος, πραγματοποιούν ομοιόμορφη διασταύρωση (uniform crossover) μεταξύ των ατόμων. Αντί, δηλαδή, κάθε γονέας να χωρίζεται σε δύο διακριτά μέρη, κληροδοτεί σε κάθε απόγονο ένα ορισμένο ποσοστό των γονιδίων του τα οποία βρίσκονται σε διάφορες θέσεις στο χρωμόσωμα – και όχι απαραίτητα διαδοχικές. Το Σχήμα 5.3 εξηγεί πώς πραγματοποιείται η ομοιόμορφη διασταύρωση:



Σχήμα 5.3 Ομοιόμορφη διασταύρωση (Πηγή: Guide to using Evolver, Version 5.7, Palisade Corporation, September 2010).

Στα άτομα που προκύπτουν από τη διασταύρωση εφαρμόζεται ο τελεστής της μετάλλαξης. Κατά τη μετάλλαξη, ο γενετικός αλγόριθμος επιλέγει και μεταβάλλει με τυχαίο τρόπο ορισμένα γονίδια των ατόμων του πληθυσμού.

(ε) Επιστροφή στο βήμα β (Αξιολόγηση κάθε λύσης): Τα άτομα που αποτελούν τη νέα γενιά αξιολογούνται ως προς την καταλληλότητά τους με υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης.

(στ) Τερματισμός γενετικού αλγορίθμου: Η εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου σταματά όταν καταστεί αληθής η συνθήκη τερματισμού του. Τέτοιες συνθήκες τερματισμού είναι οι ακόλουθες (Sivanandam and Deera, 2008):

(i) Το πλήθος των επαναλήψεων: Ο αλγόριθμος σταματάει με την πραγματοποίηση δεδομένου αριθμού επαναλήψεων και άρα με την πάροδο αντίστοιχου αριθμού γενεών).

(ii) Η συμπλήρωση δεδομένου χρονικού διαστήματος εκτέλεσης του αλγορίθμου.

(iii) Η απουσία περαιτέρω βελτίωσης των παραγόμενων λύσεων για δεδομένο αριθμό γενεών (stall generations) ή με την πάροδο καθορισμένου χρόνου (stall time limit).

Οι Sivanandam and Deera (2008) αναφέρουν, επίσης, τις ακόλουθες τεχνικές τερματισμού:

(i) Τεχνική του «καλύτερου ατόμου» (Best Individual), σύμφωνα με την οποία η αναζήτηση σταματά όταν η ελάχιστη τιμή καταλληλότητας στον πληθυσμό καταστεί μικρότερη (καλύτερη) της τιμής σύγκλισης (convergence value).

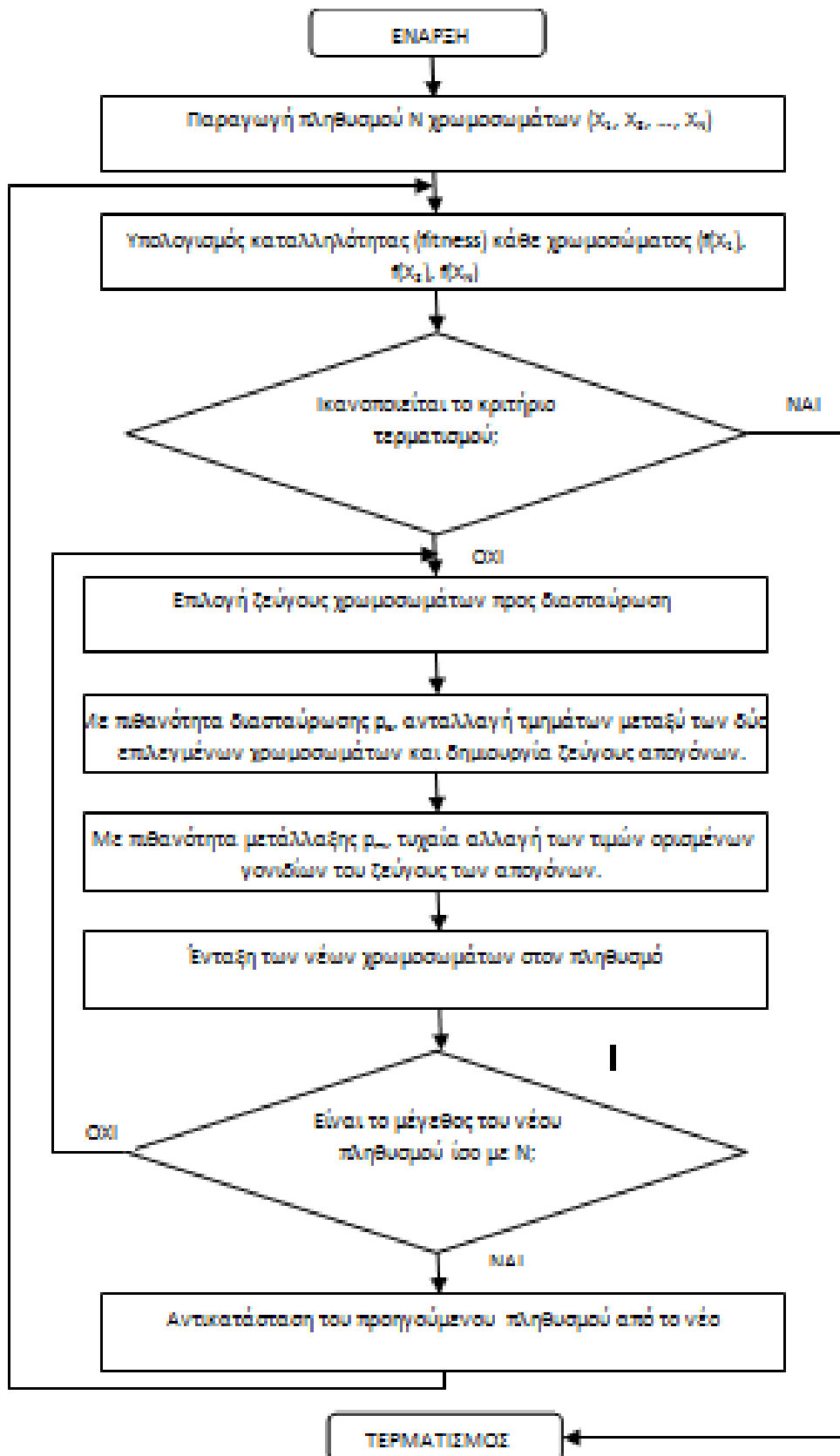
(ii) Τεχνική του «χειρότερου ατόμου» (Worst Individual), σύμφωνα με την οποία η αναζήτηση σταματά όταν η τιμή του λιγότερο κατάλληλου ατόμου του πληθυσμού παρουσιάζεται βελτιωμένη σε σχέση με την τιμή σύγκλισης.

(iii) Τεχνική του «αθροίσματος καταλληλότητας» (Sum of Fitness), σύμφωνα με την οποία η αναζήτηση σταματά όταν τα άθροισμα των τιμών των συναρτήσεων καταλληλότητας ολόκληρου του πληθυσμού είναι μικρότερο από την τιμή σύγκλισης.

(iv) Τεχνική της «διαμέσου καταλληλότητας» (Median Fitness), σύμφωνα με την οποία η αναζήτηση σταματά όταν τουλάχιστον τα μισά άτομα του πληθυσμού έχουν τιμή καταλληλότητας χαμηλότερη από την τιμή σύγκλισης.

Το Σχήμα 5.4 αναπαριστά τη διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος με χρήση γενετικού αλγορίθμου:





Σχήμα 5.4 Διάγραμμα ροής τυπικού Γενετικού Αλγορίθμου. (Πηγή: Μακρόπουλος και Ευστρατιάδης, 2011)

## **(δ) Πλεονεκτήματα**

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων είναι τα εξής (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999, Μακρόπουλος και Ευστρατιάδης, 2011):

(α) Υψηλή αποδοτικότητα: Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να επιλύσουν γρήγορα και αξιόπιστα πολύπλοκα προβλήματα με πολλές μεταβλητές και να εντοπίσουν το ακρότατο μιας συνάρτησης πραγματοποιώντας μικρό, σχετικά, αριθμό δοκιμών. Είναι δε ιδιαίτερα κατάλληλοι για συναρτήσεις που παρουσιάζουν έντονη διακύμανση, με αποτέλεσμα τη δυσκολία εύρεσης των ακροτάτων τους με παραδοσιακές μεθόδους. Η αποδοτικότητά τους στηρίζεται στην ταυτόχρονη επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων πληροφορίας. Πρακτικά, εξέταση 10 ατόμων από το γενετικό Αλγόριθμο ισοδυναμεί με εξέταση 1000 ατόμων από κάποια παραδοσιακή μέθοδο. Επιπλέον, ο γενετικός αλγόριθμος συνδυάζει την εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης με την εκμετάλλευση της παραγόμενης πληροφορίας. Αντίθετα, οι παλαιότερες μέθοδοι διέθεταν είτε το ένα χαρακτηριστικό, είτε το άλλο, αλλά όχι και τα δύο: Ο «αλγόριθμος του ορειβάτη», για παράδειγμα (Hill-Climbing algorithm), εκμεταλλεύεται σε υψηλό βαθμό την παραγόμενη πληροφορία, αλλά δεν αξιοποιεί το διαθέσιμο χώρο αναζήτησης. Από την άλλη, η τυχαία αναζήτηση (random search) εξερευνά ικανοποιητικά το διαθέσιμο χώρο, αλλά αγνοεί πλήρως την παραγόμενη πληροφορία. Τέλος, η αποδοτικότητά τους οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη δυνατότητα παράλληλης υλοποίησης και κατά συνέπεια στην εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που παρέχουν οι παράλληλες μηχανές.

(β) Εύκολος συνδυασμός με υπάρχοντα πρότυπα και συστήματα: Ακριβώς επειδή χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες που αφορούν στη συνάρτηση που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση προβλημάτων χωρίς να απαιτούνται τροποποιήσεις στον κώδικα της συνάρτησης.

(γ) Ευρύ πεδίο εφαρμογής: Ο εύκολος συνδυασμός τους με πρακτικά οποιαδήποτε πρότυπα διευκολύνει την ευρεία χρήση των γενετικών αλγορίθμων σε ποικίλους τομείς, όπως τα μαθηματικά, οι οικονομικές επιστήμες, πάσης φύσεως προβλήματα μηχανικού κ.λπ..

(δ) Επεκτασιμότητα και εξελισιμότητα: Ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε προβλήματος, ενδέχεται να απαιτείται τροποποίηση του γενετικού αλγορίθμου ώστε να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση. Οι γενετικοί αλγόριθμοι διαθέτουν τη δυνατότητα αλλαγών και εξελίξεων κατά την κρίση του σχεδιαστή.

(ε) Ευελιξία στο συνδυασμό με άλλες μεθόδους: Πολλές φορές η εύρεση της λύσης απαιτεί την «υβριδοποίηση» του Γενετικού Αλγορίθμου με άλλη μέθοδο. Ο γενετικός αλγόριθμος διαθέτει το πλεονέκτημα του εύκολου συνδυασμού με άλλες μεθόδους.

(στ) Ανεξαρτησία από ιδιότητες αντικειμενικής συνάρτησης: Οι παραδοσιακές μέθοδοι συχνά απαιτούν την ύπαρξη δεδομένων ιδιοτήτων στην αντικειμενική συνάρτηση, όπως η συνέχεια και η παραγωγισιμότητα. Αντιθέτως, ο γενετικός αλγόριθμος δε θέτει τέτοιου είδους περιορισμούς.

### 5.3.2 Εργαλείο επίλυσης: Evolver 5.5

#### **(α) Γενικά**

Η επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης μέσω του Evolver πραγματοποιείται με Γενετικό Αλγόριθμο. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του, η βασική του διαφοροποίηση από τη μεθοδολογία των Γενετικών Αλγορίθμων η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο έγκειται στη χρήση «σταθερής προσέγγισης» (steady-state approach). Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου δεν αντικαθίσταται ολόκληρη η γενιά των υποψήφιων λύσεων, αλλά μόνο ένας οργανισμός.

Κατά την επίλυση εφαρμόζονται οι γενετικοί τελεστές που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αναλυτικότερα:

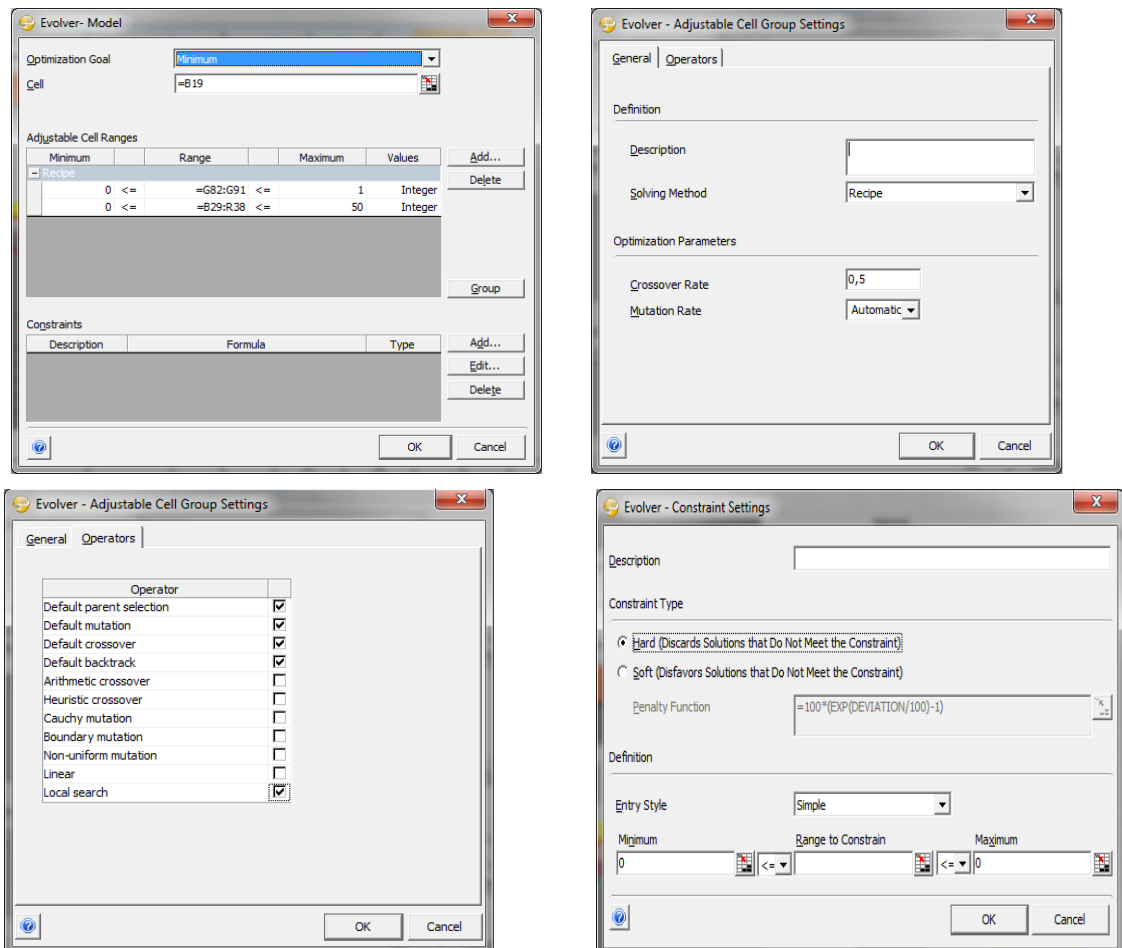
- **Επιλογή (Selection):** Από τον τρέχοντα πληθυσμό, επιλέγονται δύο «γονείς», με πιθανότητα επιλογής εξαρτώμενη με την τιμή που λαμβάνει η αντικειμενική συνάρτηση (fitness) για κάθε έναν από αυτούς. Σε αντίθεση με ορισμένες μεθοδολογίες, στις οποίες η πιθανότητα επιλογής των προς διασταύρωση ατόμων είναι ευθέως ανάλογη με την καταλληλότητά τους, στο Evolver χρησιμοποιείται μια πιο ομαλή καμπύλη πιθανότητας επιλογής (Palisade Corporation, 2010). Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η πρόωρη σύγκλιση του αλγορίθμου, η οποία ενδέχεται να παρουσιαστεί όταν ο πληθυσμός φτάσει στο σημείο να αποτελείται αποκλειστικά από άτομα υψηλής καταλληλότητας.
- **Διασταύρωση (Crossover):** Ο τρόπος με τον οποίο διασταυρώνονται μεταξύ τους τα άτομα ενός πληθυσμού διαφοροποιείται ανάλογα με την επιλεγόμενη μέθοδο επίλυσης. Στην παρούσα εργασία κρίθηκε κατάλληλη η επίλυση με τη μέθοδο της «συνταγής» (recipe), κατά την οποία οι μεταβλητές του προβλήματος μεταβάλλονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Η διασταύρωση είναι ομοιόμορφη και πραγματοποιείται με τον τρόπο που εξηγήθηκε στο υποκεφάλαιο 5.3.1.
- **Μετάλλαξη (Mutation):** Όπως συμβαίνει και με τη διασταύρωση, ο τρόπος εφαρμογής του τελεστή της μετάλλαξης επίσης διαφοροποιείται ανάλογα με τη μέθοδο επίλυσης. Στη μέθοδο επίλυσης με «συνταγή», ο αλγόριθμος αντιστοιχίζει σε κάθε μεταβλητή που περιέχεται στον οργανισμό έναν τυχαίο αριθμό που ανήκει στο διάστημα  $[0,1]$ . Όσες μεταβλητές αντιστοιχιστούν σε αριθμό μικρότερο ή ίσο με το προκαθορισμένο ποσοστό μετάλλαξης, υφίστανται μετάλλαξη – αντικαθίστανται, δηλαδή, από μια τυχαία τιμή, πάντα εντός του προκαθορισμένου εύρους (range) των επιτρεπτών τιμών.
- **Αντικατάσταση (Replacement):** Σε κάθε επανάληψη, ο οργανισμός που προσδίδει τη χειρότερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή εκείνος με τη χαμηλότερη καταλληλότητα, αντικαθίσταται από τον καινούργιο οργανισμό.

#### **(β) Διαδικασία επίλυσης**

##### **(β.1) Ορισμός του μοντέλου (προτύπου)**

Ο ορισμός του μοντέλου (Σχήμα 5.5) περιλαμβάνει:

- (i) Τον καθορισμό του είδους της βελτιστοποίησης (Optimization Goal), δηλαδή ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση.
- (ii) Τον προσδιορισμό του κελιού (Cell) όπου περιέχεται η ποσότητα που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί.
- (iii) Τον προσδιορισμό των κελιών τα οποία το Evolver θα μεταβάλλει κατά τη διαδικασία επίλυσης (Adjustable cell ranges). Κάθε διακριτή περιοχή κελιών αποτελεί ένα χρωμόσωμα.



Σχήμα 5.5 Ορισμός του μοντέλου στο Evolver.

- (iv) Τον καθορισμό των παραμέτρων βελτιστοποίησης: Συγκεκριμένα, για κάθε μεταβαλλόμενη περιοχή κελιών, επιλέγεται η μέθοδος επίλυσης μεταξύ έξι διαφορετικών διαθέσιμων μεθόδων: Budget, Grouping, Order, Project, Recipe και Schedule. Επιπλέον, καθορίζεται ο ρυθμός διασταύρωσης (crossover rate) και ο ρυθμός μετάλλαξης (mutation rate).
- (v) Εξειδικευμένους τελεστές (heuristic crossover, Cauchy mutation, local search κ.λπ) που θα χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου.
- (vi) Τον προσδιορισμό των επιβαλλόμενων περιορισμών: Διευκρινίζεται εάν κάθε περιορισμός είναι αυστηρός (hard) ή εύκαμπτος (soft). Καθορίζονται τα όρια

(Minimum – Maximum) εντός των οποίων κυμαίνονται οι επιτρεπτές τιμές της εκάστοτε επιλεγμένης περιοχής κελιών (Range to constrain). Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να ορίσει περιορισμό Boolean μορφής (True – False), εισάγοντας τον ακριβή του τύπο (Formula) στο αντίστοιχο πεδίο. Τέλος, σε περίπτωση εύκαμπτου περιορισμού, εισάγεται η ποινή που επιβάλλεται στην αντικειμενική συνάρτηση.

## (β.2) Ρυθμίσεις

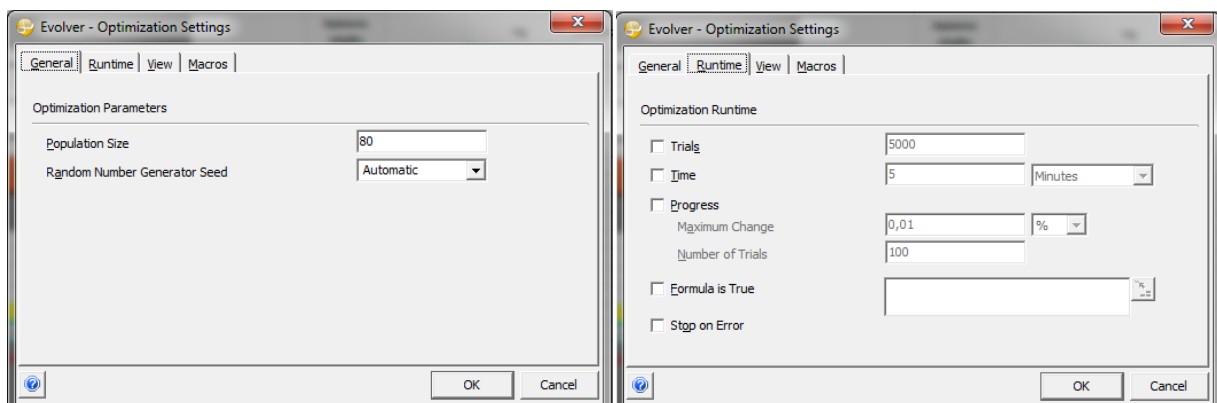
Ο χρήστης μπορεί να επέμβει στις ρυθμίσεις του Evolver και να τις προσαρμόσει σύμφωνα με το σκοπό του. Οι ρυθμίσεις αυτές διαιρούνται σε τέσσερις κατηγορίες (Σχήμα 5.6):

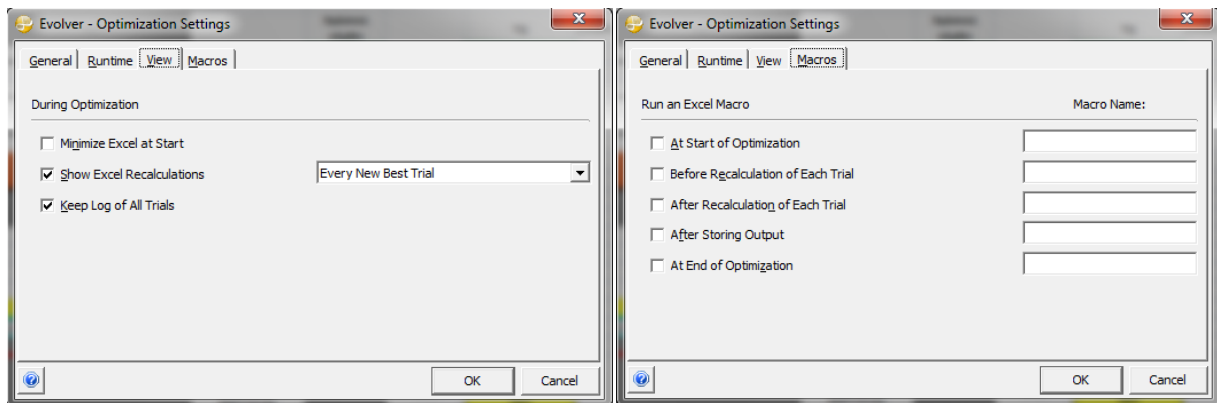
(i) Γενικές ρυθμίσεις: Περιλαμβάνουν παραμέτρους βελτιστοποίησης όπως το μέγεθος του πληθυσμού και η γεννήτρια τυχαίων (ψευδοτυχαίων) αριθμών που θα χρησιμοποιηθεί στην επίλυση.

(ii) Ρυθμίσεις τερματισμού της εκτέλεσης του αλγορίθμου: Επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου. Τέτοια κριτήρια είναι η πραγματοποίηση δεδομένου αριθμού δοκιμών, η συμπλήρωση δεδομένου χρόνου εκτέλεσης, η πραγματοποιηθείσα πρόοδος, η πραγματοποίηση μιας συγκεκριμένης συνθήκης επιλογής του χρήστη ή η ύπαρξη σφάλματος.

(iii) Ρυθμίσεις προβολής κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου: Ο χρήστης επιλέγει αν θα ελαχιστοποιείται το Excel κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου, εάν θα είναι αποτυπώνονται στο φύλλο εργασίας οι νέες τιμές που προκύπτουν σε κάθε επανάληψη και εάν το Evolver θα αποθηκεύει τα αποτελέσματα όλων των επαναλήψεων του αλγορίθμου, ώστε να είναι διαθέσιμα στο χρήστη αργότερα.

(iv) Ρυθμίσεις μακροεντολών: Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την εκτέλεση μακροεντολών κατά την έναρξη της βελτιστοποίησης, πριν ή μετά από κάθε επανάληψη, μετά την αποθήκευση των αποτελεσμάτων ή στο πέρας της βελτιστοποίησης.





Σχήμα 5.6 Ρυθμίσεις α) γενικές, β) τερματισμού, γ) προβολής και δ) μακροεντολών στο Evolver.

## 5.4 Μεθοδολογία υπολογισμού εκπεμπόμενων ρύπων

Στην παρούσα εργασία οι εκπεμπόμενοι ρύποι εισάγονται αυτούσιοι στην αντικειμενική συνάρτηση. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό τους περιέχεται στο EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook – 2009.

Το EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook προτείνει τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες, τις Tier 1, Tier 2 και Tier 3, η επιλογή μεταξύ των οποίων βασίζεται στα διαθέσιμα, κάθε φορά, δεδομένα. Τα περισσότερα δεδομένα απαιτούνται για τη μέθοδο Tier 3, η οποία, δίνει και ακριβέστερα αποτελέσματα, ενώ σε περίπτωση έλλειψης αναλυτικών στοιχείων χρησιμοποιείται η μέθοδος Tier 1. Στην εργασία αυτή εφαρμόζεται η μέθοδος Tier 3.

Η μέθοδος Tier 3 υπολογίζει τις συνολικές εκπομπές  $E_{TOTAL}$  ως εξής:

$$E_{TOTAL} = E_{HOT} + E_{COLD}$$

Όπου

$E_{TOTAL}$  = Συνολική μάζα (g) εκπεμπόμενου ρύπου

$E_{HOT}$  = Μάζα (g) εκπεμπόμενου ρύπου κατά το χρονικό διάστημα όπου η μηχανή λειτουργεί με την κανονική θερμοκρασία λειτουργίας της (μόνιμη λειτουργία).

$E_{COLD}$  = Μάζα (g) εκπεμπόμενου ρύπου κατά το χρονικό διάστημα όπου η μηχανή λειτουργεί με θερμοκρασία χαμηλότερη της κανονικής (μεταβατική λειτουργία). Οι εκπομπές αυτές αποδίδονται με τον όρο cold-start emissions.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας προϋποθέτει τη διαίρεση των οχημάτων του δικτύου σε κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο τους. Ακριβέστερα, κάθε κατηγορία οχημάτων διαιρείται σε υποκατηγορίες και για κάθε υποκατηγορία εφαρμόζεται διαφορετική μέθοδος (A, B, C, D) ανάλογα με το είδος του ρύπου προς υπολογισμό. Για τα λεωφορεία και τα υπόλοιπα βαρέα οχήματα εφαρμόζονται οι μέθοδοι B, C ή D. Ο προσδιορισμός των ρύπων για τις

συγκεκριμένες κατηγορίες οχημάτων πραγματοποιείται με χρήση των ακόλουθων σχέσεων (Σχήμα 5.7):

$$\begin{aligned}
 EF &= (a + (b \times V)) + ((c - b) \times (1 - \exp((-1) \times d) \times V)) / d \\
 EF &= (e + (a \times \exp((-1) \times b) \times V)) + (c \times \exp((-1) \times d) \times V) \\
 EF &= 1 / (((c \times (V^2)) + (b \times V)) + a) \\
 EF &= 1 / (a + (b \times (V^c))) \\
 EF &= 1 / (a + (b \times V)) \\
 EF &= a - (b \times \exp((-1) \times c) \times (V^d)) \\
 EF &= a + (b / (1 + \exp((-1) \times c) + (d \times \ln(x)) + (e \times V))) \\
 EF &= c + (a \times \exp((-1) \times b) \times V) \\
 EF &= c + (a \times \exp(b \times V)) \\
 EF &= \exp(a + (b / V)) + (c \times \ln(V))
 \end{aligned}$$

Σχήμα 5.7 Σχέσεις υπολογισμού ρύπων. (Πηγή: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook - 2009).

όπου

EF: Συντελεστής εκπομπής. Σύμφωνα με τη μέθοδο, οι ρύποι που εκπέμπονται σε δεδομένο χρονικό διάστημα υπολογίζονται από τη σχέση

$$\begin{aligned}
 mission[g] &= EF \left[ \frac{g}{km} \right] * number\ of\ vehicles[veh] \\
 & * mileage\ per\ vehicle \left[ \frac{km}{veh} \right]
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Επομένως, ο συντελεστής εκπομπής ισούται με τη μέση μάζα του ρύπου (σε g) που εκπέμπεται κατά τη διέλευση ενός οχήματος συγκεκριμένης τεχνολογίας, με συγκεκριμένη ταχύτητα, από οδικό τμήμα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και μήκος 1 km.

a, b, c, d, e: Συντελεστές με τιμές που διαφοροποιούνται ανάλογα με την περίπτωση.

V: Ταχύτητα οχήματος σε km/h.

Λόγω της πολυπλοκότητας των υπολογισμών, το EMEP/EEA Guidebook συνοδεύεται από ξεχωριστό παράρτημα, όπου υπολογίζεται ο συντελεστής εκπομπής EF ανάλογα με το είδος του λεωφορείου (κατηγορία και υποκατηγορία), την ταχύτητα, την κλίση του δρόμου, το φορτίο κ.λπ. με χρήση λογιστικού φύλλου (Excel).

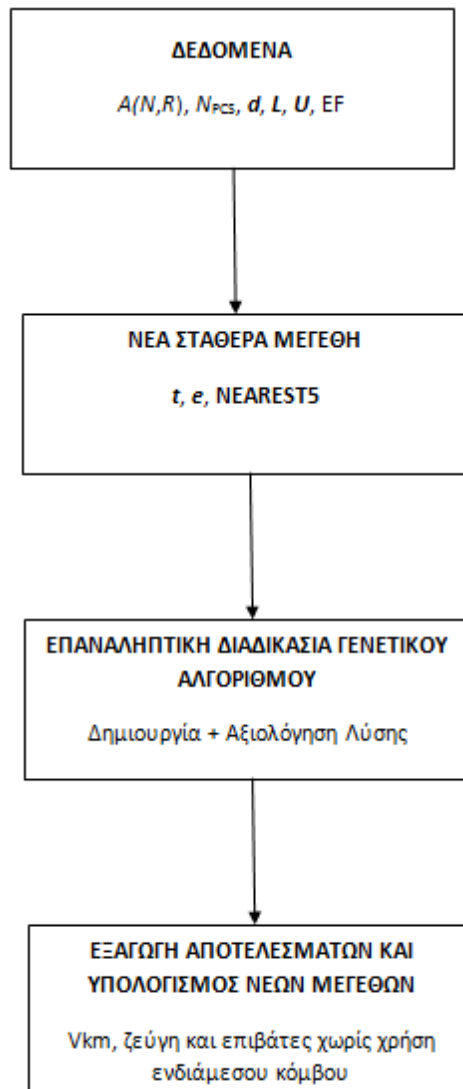




**6.1 Γενικά**

Μετά τον προσδιορισμό της μαθηματικής διατύπωσης του προβλήματος ακολουθεί η υλοποίησή του, η οποία περιλαμβάνει τέσσερις φάσεις: Την εισαγωγή των δεδομένων, την παραγωγή νέων σταθερών μεγεθών, την επαναληπτική διαδικασία του γενετικού αλγορίθμου και, μετά το πέρας της βελτιστοποίησης, των υπολογισμό χρήσιμων μεγεθών τα οποία δε συμμετέχουν στην επαναληπτική διαδικασία.

Συνοπτικά, το διάγραμμα ροής της διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1:



Σχήμα 6.1 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος.

## 6.2 Εισαγωγή δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην επίλυση του προβλήματος είναι τα ακόλουθα:

$A(N,R)$ : Το σύνολο των στάσεων και των οδικών τμημάτων τα οποία τις συνδέουν μεταξύ τους. Οι στάσεις και το οδικό δίκτυο αναπαρίστανται ως γράφος (graph), του οποίου οι κόμβοι (nodes) ταυτίζονται με τις λεωφορειακές στάσεις και οι σύνδεσμοι/ακμές (links/vertices) με τα οδικά τμήματα που τις συνδέουν. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν  $NUM\_OD = 50$  στάσεις. Κάθε στάση ταυτίζεται με ένα σημείο Π-Π και θεωρείται ότι αποτελεί το κεντροειδές της γεωγραφικής ζώνης της οποίας τη ζήτηση συγκεντρώνει. Εναλλακτικά, αντί για τον όρο «στάση» (stop) θα χρησιμοποιείται ο όρος «κόμβος».

$N_{PCS} \subset N$ : Το σύνολο των στάσεων όπου είναι δυνατή η κατασκευή σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων. Η κατασκευή των σταθμών αυτών απαιτεί χώρο, ο οποίος κατά πάσα πιθανότητα δεν είναι διαθέσιμος σε κάθε στάση του δικτύου. Για το σκοπό αυτό, το σύνολο  $N_{PCS}$  αποτελείται από τους κόμβους εκείνους όπου είτε υπάρχει ήδη διαθέσιμος χώρος προς κατασκευή σταθμού, είτε υπάρχει η προοπτική απελευθέρωσης χώρου.

**$d$** : Μητρώο ωριαίας ζήτησης μεταξύ σημείων Π-Π, διαστάσεων  $NUM\_OD * NUM\_OD$ . Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το μητρώο  **$d$**  είναι συμμετρικό: Η ζήτηση, δηλαδή, για μετακίνηση από τη στάση  $i$  στη στάση  $j$  ισούται με τη ζήτηση για μετακίνηση από τη στάση  $j$  προς τη στάση  $i$ . Επομένως, ισχύει

$$d_{ij} = d_{ji} \forall i, j \in N \quad (6.1)$$

Η ζήτηση μεταξύ των σημείων Π-Π καθορίστηκε με τυχαίο τρόπο, έτσι ώστε το άθροισμα των συνολικών ωριαίων μετακινήσεων  $\sum_{i,j} d_{ij}$  να προκύπτει ίσο με 10.000. Επισημαίνεται ότι η ζήτηση αυτή θεωρείται σταθερή και δε μεταβάλλεται με βάση το παρεχόμενο από το δίκτυο επίπεδο εξυπηρέτησης.

**$L$** : Μητρώο αποστάσεων, σε χιλιόμετρα, μεταξύ σημείων Π-Π, διαστάσεων  $NUM\_OD * NUM\_OD$ . Οι αποστάσεις αυτές υπολογίστηκαν με χρήση Google Maps και αντιπροσωπεύουν τις αποστάσεις των συντομότερων διαδρομών που συνδέουν τους κόμβους του δικτύου με χρήση της υπάρχουσας οδικής υποδομής. Για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών, το μητρώο  **$L$**  θεωρήθηκε επίσης συμμετρικό ως προς την κύρια διαγώνιο. Δηλαδή

$$L_{ij} = L_{ji} \forall i, j \in N \quad (6.2)$$

Πρόκειται για μια εύλογη απλοποιητική παραδοχή, καθώς η διαφορά στην απόσταση μεταξύ δύο στάσεων ανάλογα με την κατεύθυνση κίνησης (διαφορετική γεωμετρία, χρήση διαφορετικών οδών λόγω μονοδρομήσεων κ.λπ.) δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική, ώστε να καθιστά αναγκαία τη χρήση μη συμμετρικού μητρώου αποστάσεων.

**$U$** : Μητρώο (μέσων) ταχυτήτων, σε χιλιόμετρα ανά ώρα, στα οδικά τμήματα που συνδέουν τους κόμβους  $i, j$ , διαστάσεων  $NUM\_OD * NUM\_OD$ . Για λόγους απλούστευσης των υπολογισμών, η ταχύτητα του βασικού σεναρίου έχει ληφθεί παντού σταθερή. Στο βασικό σενάριο θεωρήθηκε ίση με 15 km/h, χαρακτηριστική τιμή της μέσης λειτουργικής ταχύτητας λεωφορείου σε αστικές περιοχές. Σε δίκτυα που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ετερογένεια ως προς τις κατηγορίες των οδών που τα απαρτίζουν, τα στοιχεία του μητρώου  **$U$**  διαφοροποιούνται αναλόγως. Για παράδειγμα, η ταχύτητα θα ήταν χαμηλότερη σε τοπικές αστικές οδούς, υψηλότερη σε συλλεκτήριες οδούς, ακόμα υψηλότερη σε αρτηρίες και ακόμα υψηλότερη σε ελεύθερες λεωφόρους.

### 6.3 Παραγωγή νέων σταθερών

Από την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων προκύπτουν νέα σταθερά μεγέθη, τα οποία επίσης παραμένουν αμετάβλητα κατά τη διάρκεια της επίλυσης. Αναλυτικότερα, ως νέα σταθερά μεγέθη θεωρούνται τα ακόλουθα:

**t**: Μητρώο χρονικής απόστασης, σε λεπτά, μεταξύ των κόμβων  $i, j$ , με χρήση του συνδέσμου  $i, j$ , διαστάσεων NUM\_OD\*NUM\_OD. Προκύπτει από τη στοιχείο προς στοιχείο διαίρεση των μητρώων **L** και **U**. Επομένως, ισχύει

$$t_{ij} = \frac{L_{ij}}{U_{ij}} / 60 \quad (6.3)$$

με το  $t_{ij}$  υπολογισμένο σε λεπτά, το  $L_{ij}$  μετρημένο σε km και το  $U_{ij}$  μετρημένο σε km/h.

**EF**: Συντελεστής εκπομπής ρύπου (Emission Factor), ο οποίος ισούται με την ανά χιλιόμετρο εκπεμπόμενη μάζα ρύπου κατά την κίνηση ενός δεδομένου λεωφορείου με δεδομένη ταχύτητα σε οδικό τμήμα με δεδομένα χαρακτηριστικά. Για τους σκοπούς της εργασίας, καθώς και για απλοποίηση των υπολογισμών, γίνεται παραδοχή ομοιόμορφης και αμελητέας κλίσης σε όλη την έκταση του διαθέσιμου οδικού δικτύου. Αμελητέα θεωρείται, επίσης, η επίδραση του ποσοστού πλήρωσης κάθε οχήματος. Ο υπολογισμός του συντελεστή EF πραγματοποιείται σύμφωνα με το παράρτημα Road Transport Annex HDV files του EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook - 2009. Το παράρτημα αυτό περιέχεται σε ένα αρχείο Microsoft Excel και υπολογίζει το συντελεστή EF για διάφορους τύπους βαρέων οχημάτων, κατηγορίες ρύπων, κλίσεις δρόμου και ταχύτητες, χρησιμοποιώντας τον τύπο του σχήματος 4-10 που αντιστοιχεί στον εκάστοτε συνδυασμό παραμέτρων. Στην παρούσα εργασία θεωρούνται λεωφορεία κατηγορίας Urban Buses Standard 15 - 18 t, τεχνολογίας HD Euro VI, κινούμενα σε οδούς με μηδενική κατά μήκος κλίση και ταχύτητα (στο βασικό σενάριο) 15 km/h. Προκύπτει συντελεστής εκπομπής NO<sub>x</sub> ίσος με 1 g ανά χιλιόμετρο και διερχόμενο όχημα για όλους τους συνδέσμους (οδικά τμήματα) του δικτύου.

**e**: Με γνωστό το συντελεστή εκπομπής ρύπων EF για κάθε σύνδεσμο, μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα του εκπεμπόμενου ρύπου  $e_{ij}$  κατά τη διέλευση ενός οχήματος σε κάθε σύνδεσμο με απλό πολλαπλασιασμό επί το μήκος του συνδέσμου:

$$e_{ij} = EF_{ij} * L_{ij} \quad (6.4)$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, με ομοιόμορφο μητρώο **EF** και συμμετρικό **L**, το μητρώο **e** που προκύπτει είναι επίσης συμμετρικό και, όπως είναι λογικό, επίσης διαστάσεων NUM\_OD\* NUM\_OD.

**NEAREST5**: Με δεδομένες τις αποστάσεις  $L_{ij}$  για όλα τα ζεύγη  $(i, j)$  των στάσεων του δικτύου, για κάθε στάση βρίσκονται οι πέντε πλησιέστερές της, με χρήση της συνάρτησης **F\_NEAREST\_5\_STOPS**. Η συνάρτηση αυτή διατρέχει τον πίνακα **L** και, για κάθε στάση, εντοπίζει τις 5 κοντινότερές της. Η πληροφορία αυτή είναι απαραίτητη για τον έλεγχο του περιορισμού 5 (αλληλουχία στάσεων κατά μήκος λεωφορειακής γραμμής). Το αποτέλεσμα

είναι η παραγωγή ενός πίνακα με NUM\_OD στήλες και 10 γραμμές. Κάθε στήλη αντιστοιχεί σε μία στάση (από 1 μέχρι NUM\_OD). Οι πέντε πρώτες γραμμές περιέχουν τους πέντε κοντινότερους κόμβους κάθε στάσης και οι πέντε επόμενες γραμμές περιέχουν τις αντίστοιχες αποστάσεις σε km.

Στο Σχήμα 6.2 απεικονίζεται η λειτουργία της συνάρτησης **F\_NEAREST\_5\_STOPS** για ένα υποθετικό συμμετρικό μητρώο **L** διαστάσεων 7\*7:

L (km)	1	2	3	4	5	6	7
1		0,6	0,9	1,2	0,35	1,4	1,6
2	0,6		0,3	0,6	0,29	0,75	1,2
3	0,9	0,3		0,4	0,6	0,55	0,85
4	1,2	0,6	0,4		0,9	0,23	0,6
5	0,35	0,29	0,6	0,9		1,1	1,5
6	1,4	0,75	0,55	0,23	1,1		0,5
7	1,6	1,2	0,85	0,6	1,5	0,5	

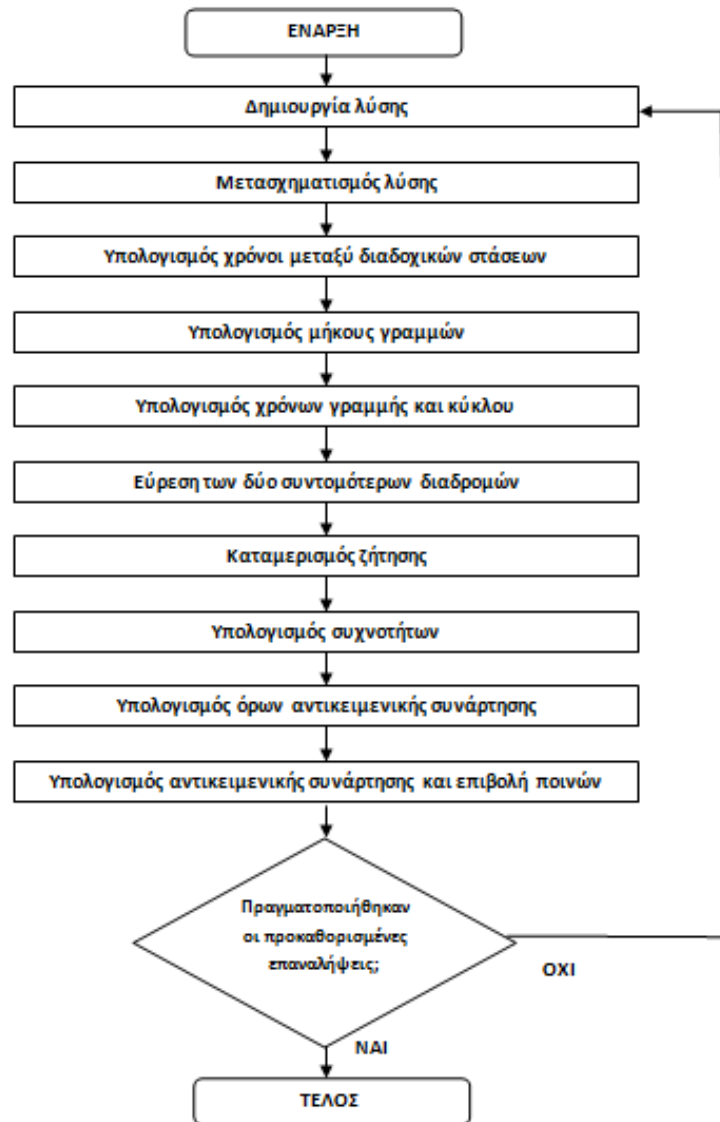
↓ F\_NEAREST\_5\_STOPS

NEARESTS	1	2	3	4	5	6	7
Στάσεις	2	1	7	7	1	7	6
	3	3	2	2	2	2	2
	4	4	4	3	3	3	3
	5	5	5	5	4	4	4
	6	6	6	6	6	6	5
Αποστάσεις (km)	0,6	0,6	0,85	0,6	0,35	0,5	0,5
	0,9	0,3	0,3	0,6	0,29	0,75	1,2
	1,2	0,6	0,4	0,4	0,6	0,55	0,85
	0,35	0,29	0,6	0,9	0,9	0,23	0,6
	1,4	0,75	0,55	0,23	1,1	1,1	1,5

Σχήμα 6.2 Η λειτουργία της συνάρτησης F\_NEAREST\_5\_STOPS.

## 6.4 Επαναληπτική διαδικασία

Η επαναληπτική διαδικασία συνοψίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής (Σχήμα 6.3):



Σχήμα 6.3 Διάγραμμα ροής της επαναληπτικής διαδικασίας.

#### 6.4.1 Δημιουργία λύσης

Σε κάθε επανάληψη του γενετικού αλγορίθμου, προκύπτει το άτομο-λύση το οποίο προσδίδει στην αντικειμενική συνάρτηση τη βέλτιστη (ελάχιστη) τιμή, συγκρινόμενη με τα υπόλοιπα άτομα του πληθυσμού. Η παραγόμενη λύση αποτελείται από δύο διακριτά μητρώα:

Το πρώτο (**TOTALNETWORKBEFORE**) αποτελείται από NUM\_LINES γραμμές και MAX\_NUM\_STOPS στήλες, όπου NUM\_LINES το πλήθος των λεωφορειακών γραμμών, όπως επιλέχθηκε κατά την επίλυση, και MAX\_NUM\_STOPS το μέγιστο δυνατό πλήθος διαφορετικών στάσεων που μπορεί να περιέχονται σε μία λεωφορειακή γραμμή. Κάθε γραμμή του μητρώου αντιστοιχεί σε μία λεωφορειακή γραμμή και κάθε στήλη σε μία λεωφορειακή στάση. Ωστόσο, το μητρώο αυτό δεν αντιστοιχίζεται υποχρεωτικά σε πραγματικό δίκτυο για δύο λόγους: Πρώτον, κατά τη διαδικασία επίλυσης, ο Γενετικός

Αλγόριθμος ενδέχεται να τοποθετήσει στην ίδια γραμμή την ίδια στάση περισσότερες από μία φορές. Δεύτερον, ο γενετικός αλγόριθμος ενδέχεται να θέσει σε ορισμένα κελιά την τιμή 0, η οποία δεν αντιστοιχεί σε καμία στάση και έχει νόημα μόνο όταν συμπληρώνει τα κενά στο τέλος μια γραμμής με πλήθος στάσεων μικρότερο από MAX\_NUM\_STOPS. Επομένως, τα στοιχεία του μητρώου λαμβάνουν ακέραιες τιμές που ανήκουν στο διάστημα [0, NUM\_OD].

Το δεύτερο μητρώο (**G**) είναι μια στήλη με NUM\_LINES γραμμές. Σε κάθε κελί περιέχεται η τιμή του δείκτη  $G_n$  για την αντίστοιχη λεωφορειακή γραμμή. Τιμή του  $G_n$  ίση με 1 σημαίνει ότι από τη γραμμή  $n$  διέρχονται μόνο ηλεκτρικά λεωφορεία, ενώ τιμή ίση με 0 σημαίνει ότι από τη γραμμή  $n$  διέρχονται μόνο συμβατικά λεωφορεία.

#### 6.4.2 Μετασχηματισμός λύσης

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, η πρωτότυπη μορφή της λύσης που προκύπτει από τον αλγόριθμο δεν αναπαριστά υποχρεωτικά ένα εφικτό δίκτυο, είτε λόγω της επανάληψης στάσεων, είτε λόγω της ύπαρξης μηδενικών μεταξύ μη μηδενικών κελιών στον πίνακα **TOTALNETWORKBEFORE**. Προκειμένου, επομένως, να παραχθεί ένα σύνολο γραμμών χωρίς επανάληψη στάσεων και χωρίς μηδενικά στοιχεία ανάμεσα σε μη μηδενικά, το **TOTALNETWORKBEFORE** μετασχηματίζεται στο **TOTALNETWORK** μέσω της συνάρτησης **F\_REMOVE\_DOUBLES\_N\_ZEROS**. Η συνάρτηση αυτή έχει διπλό ρόλο:

(α) Εξασφαλίζει ότι κάθε στάση του συνόλου  $N$  περιέχεται σε κάθε γραμμή το πολύ μία φορά. Αυτό επιτυγχάνεται διατρέχοντας κάθε γραμμή του **TOTALNETWORKBEFORE** από τα αριστερά προς τα δεξιά και διαγράφοντας το δεύτερο (και τρίτο, τέταρτο κ.λπ., αν υπάρχει) αντίγραφο της ίδιας στάσης.

(β) Διαγράφει τα μηδενικά που περιέχονται σε μία γραμμή, εάν αυτά ακολουθούνται (όχι απαραίτητα διαδοχικά) από μη μηδενικά στοιχεία. Με τον τρόπο αυτό, τα μη μηδενικά κελιά πρακτικά «μετακινούνται» προς τα αριστερά, προκειμένου να καταλάβουν τα κελιά όπου αρχικά περιέχονταν τα μηδενικά. Τα υπόλοιπα κελιά – ξεκινώντας από το πρώτο κελί μετά το τελευταίο μη μηδενικό κάθε γραμμής και καταλήγοντας στο τελευταίο – συμπληρώνονται με μηδενικά.

Στο Σχήμα 6.4 απεικονίζεται ο τρόπος λειτουργίας της συνάρτησης **F\_REMOVE\_DOUBLES\_N\_ZEROS** για ένα υποθετικό δίκτυο δύο γραμμών:

**TOTALNETWORKBEFORE**

40	45	42	8	0	45	32	0	27	25
35	36	0	37	0	41	42	36	48	0

**F\_REMOVE\_DOUBLESNZEROS****TOTALNETWORK**

40	45	42	8	32	27	25	0	0	0
35	36	37	41	42	48	0	0	0	0

Σχήμα 6.4 Η λειτουργία της συνάρτησης F\_REMOVE\_DOUBLES\_N\_ZEROS.

### 6.4.3 Υπολογισμός χρόνου μεταξύ διαδοχικών στάσεων

Ο υπολογισμός του χρόνου κίνησης του λεωφορείου μεταξύ διαδοχικών στάσεων αποτελεί βασικό βήμα για την αξιολόγηση του συγκοινωνιακού δικτύου, καθώς διαθέτει τριπλή χρησιμότητα:

(α) Χρησιμοποιείται για την εύρεση του χρόνου κύκλου της γραμμής. Ο χρόνος κύκλου της γραμμής είναι ο αθροιστικός χρόνος που απαιτείται προκειμένου το λεωφορείο να μεταβεί από την αφετηρία στο τέρμα και αντιστρόφως, συμπεριλαμβανομένου του χρόνου επαναφοράς, δηλαδή του χρόνου κατά τον οποίο τον λεωφορείο παραμένει στην αφετηρία ή στο τέρμα. Με γνωστό το χρόνο κύκλου, υπολογίζεται ο απαιτούμενος αριθμός οχημάτων ανά γραμμή και κατ' επέκταση συνολικά.

(β) Καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι επιβάτες θα επιλέξουν να μετακινηθούν: Βασικό κριτήριο επιλογής διαδρομής για κάθε επιβάτη είναι ο αναμενόμενος χρόνος μετακίνησης, ο οποίος και επιδιώκεται να είναι ο ελάχιστος δυνατός. Η φόρτιση του δικτύου, δηλαδή, θα βασιστεί στους απαιτούμενους χρόνους για την κυκλοφορία μεταξύ των σημείων Π-Π.

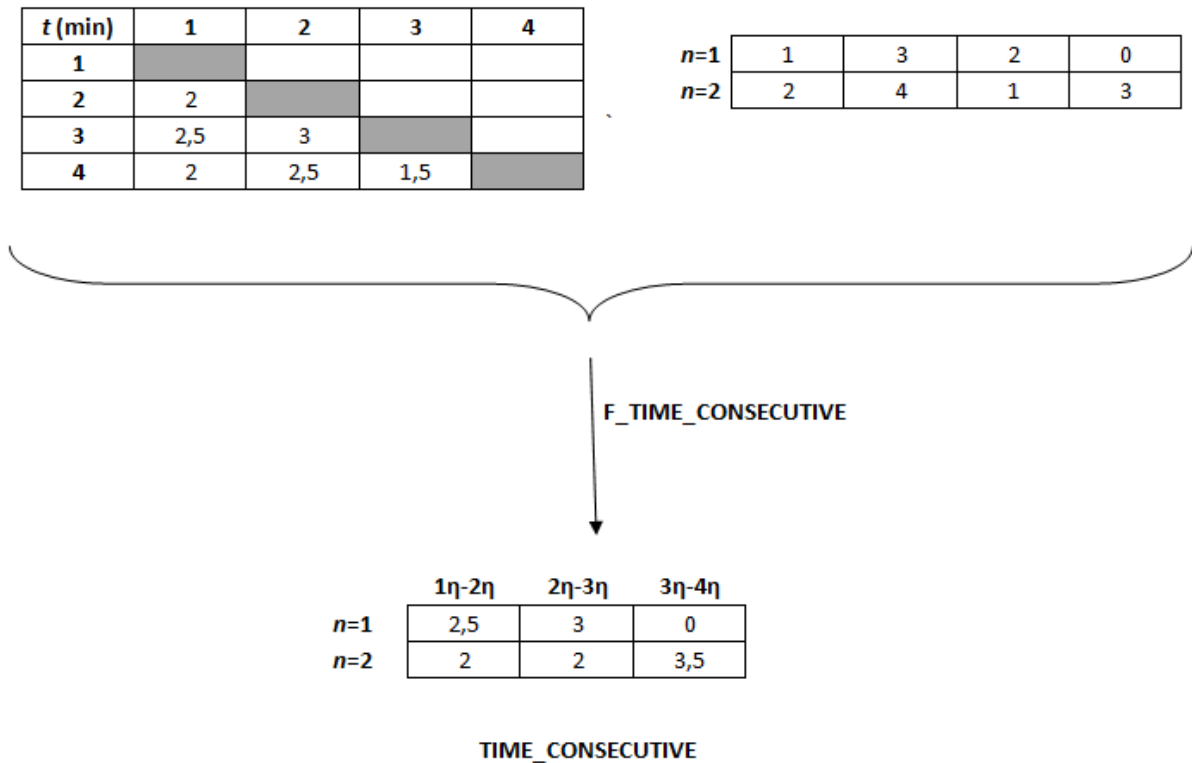
(γ) Μετά τη φόρτιση του δικτύου, χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του μέσου χρόνου μετακίνησης, ο οποίος εισάγεται ως όρος στην αντικειμενική συνάρτηση.

Ο χρόνος κίνησης από στάση σε στάση απεικονίζεται στο μητρώο **TIME\_CONSECUTIVE**, διαστάσεων  $NUM\_LINES * (MAX\_NUM\_STOPS - 1)$ . Η κατασκευή του βασίζεται στο μητρώο  $t$ . Για την εύρεση του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών στάσεων καλείται η συνάρτηση **F\_TIME\_CONSECUTIVE**, η οποία διαβάσει διαδοχικά τις στάσεις ανά δύο και ανατρέχει στον πίνακα  $t$  προκειμένου να εντοπίσει τον αντίστοιχο χρόνο. Στην περίπτωση που ο  $t$  είναι συμμετρικός ως προς την κύρια διαγώνιο, δηλαδή αν  $t(i,j) = t(j,i)$ , και απεικονίζεται ως κάτω τριγωνικός, η συνάρτηση αποδίδει την τιμή  $t(i,j)$  αν  $i > j$  ή την τιμή  $t(j,i)$  αν  $i < j$ . Η διαδικασία τερματίζεται μόλις η συνάρτηση διαβάσει μηδενικό κελί. Τα κελιά που δεν αντιστοιχούν σε



υπαρκτές στάσεις (δηλαδή, όσα αντιστοιχούν σε κελιά του **TOTALNETWORK** με τιμή 0) πληρούνται με μηδενικά επίσης.

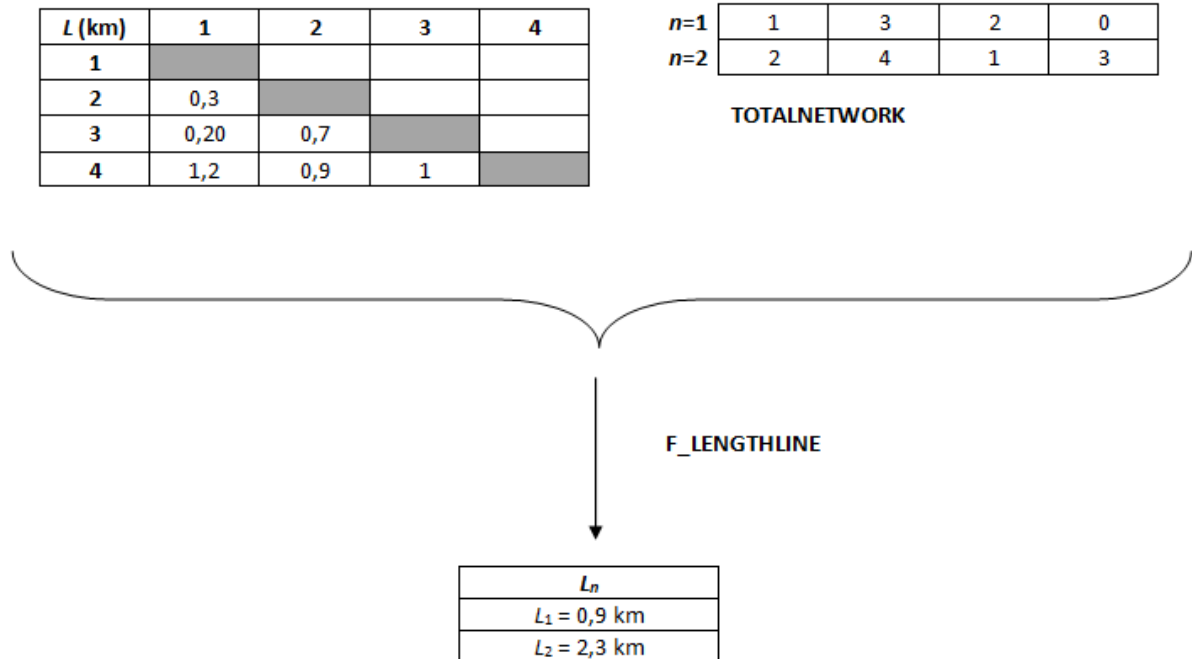
Στο Σχήμα 6.5 απεικονίζεται η λειτουργία της **F\_TIME\_CONSECUTIVE** για ένα υποθετικό δίκτυο αποτελούμενο από δύο λεωφορειακές γραμμές και τέσσερις διαφορετικές λεωφορειακές στάσεις.



Σχήμα 6.5 Η λειτουργία της συνάρτησης **F\_TIME\_CONSECUTIVE**.

#### 6.4.4 Υπολογισμός μήκους γραμμών

Το μήκος κάθε γραμμής ισούται με το άθροισμα των επιμέρους αποστάσεων μεταξύ των διαδοχικών της στάσεων και υπολογίζεται από τη συνάρτηση **F\_LENGTHLINE**. Η συνάρτηση αυτή διαβάζει την αλληλουχία των στάσεων και αντιστοιχίζει τα μέλη κάθε διαδοχικού ζεύγους σε δείκτες  $i, j$  των συντεταγμένων του μητρώου **L**. Το άθροισμα των επιμέρους αποστάσεων ισούται με το μήκος  $L_n$  κάθε γραμμής. Ένα παράδειγμα χρησιμοποίησης της συνάρτησης **F\_LENGTHLINE** απεικονίζεται στο Σχήμα 6.6:



Σχήμα 6.6 Η λειτουργία της συνάρτησης F\_LENGTHLINE.

Τονίζεται ότι η ύπαρξη της συνάρτησης **F\_TIME\_CONSECUTIVE** δεν καθιστά περιττή τη συνάρτηση **F\_LENGTHLINE**. Σε ένα απλοποιημένο πρόβλημα, όπου η ταχύτητα κίνησης του λεωφορείου δε διαφοροποιείται κατά μήκος διαφορετικών οδικών τμημάτων, ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών στάσεων αντιστοιχίζεται αμφιμονοσήμαντα σε απόσταση μέσω της σταθερής και ομοιόμορφης παντού ταχύτητας  $U$ . Επομένως, για κάθε ζεύγος προέλευσης-προορισμού  $(i, j)$  ισχύει  $L_{ij}=t_{ij}*U$  και, αντιστρόφως,  $t_{ij}=L_{ij}/U$ . Σε πιο σύνθετα προβλήματα, όμως, η ταχύτητα διαφοροποιείται ανάλογα με το οδικό τμήμα όπου κινείται το λεωφορείο. Για παράδειγμα, η ταχύτητα αναμένεται υψηλότερη σε έναν αυτοκινητόδρομο σε σχέση με μια αστική οδό εντός κατοικημένης περιοχής. Σε αυτήν την περίπτωση, κάθε σύνδεσμος του γράφου διαθέτει δική του ταχύτητα  $U_{ij}$  και, επομένως, είναι απαραίτητη η ύπαρξη δύο ανεξάρτητων μητρώων  $L$  και  $U$  με βάση τα οποία υπολογίζεται και το μητρώο  $t$ . Προφανώς, για κάθε στοιχείο του ισχύει

$$t_{ij} = 60 * \frac{L_{ij}}{U_{ij}} \quad (6.5)$$

Όπου το  $t_{ij}$  μετράται σε λεπτά, το  $L_{ij}$  σε km και το  $U_{ij}$  σε km/h.

#### 6.4.5 Υπολογισμός χρόνων γραμμής και κύκλου

Ο χρόνος  $T_{d,n}$  που απαιτείται για να κινηθεί το λεωφορείο από την αφετηρία μέχρι το τέρμα της γραμμής προκύπτει με απλή άθροιση του χρόνου κίνησης από στάση σε στάση, ενώ ο χρόνος κύκλου  $T_{c,n}$  μιας γραμμής  $n$ , η οποία διανύει την απόσταση από την αφετηρία ως το τέρμα σε χρόνο  $T_{d,n}$  και με απλό χρόνο επαναφοράς  $T_r$  δίνεται από τη σχέση:

$$T_{c,n} = 2 * T_{d,n} + 2 * T_r \quad (6.6)$$

Θεωρείται ότι ο χρόνος επαναφοράς ισομοιράζεται στα δύο άκρα της γραμμής και εν προκειμένω τέθηκε  $T_r = 5$  λεπτά.

#### 6.4.6 Εύρεση των δύο συντομότερων διαδρομών

Το πρώτο βήμα για τον καταμερισμό της ζήτησης στο δίκτυο είναι ο καθορισμός του κριτηρίου επιλογής διαδρομής από τους επιβάτες. Στην παρούσα εργασία λαμβάνεται ως κριτήριο επιλογής ο συνολικός χρόνος μετακίνησης. Επομένως, εξετάζονται όλοι οι δυνατοί τρόποι μετακίνησης μεταξύ ενός σημείου προέλευσης και ενός σημείου προορισμού για το εκάστοτε δίκτυο και, μεταξύ αυτών, επιλέγονται οι δύο με τους χαμηλότερους χρόνους μετακίνησης. Η επιλογή δύο – και όχι περισσότερων – τρόπων πραγματοποιείται για δύο λόγους:

(α) Στην πράξη οι επιβάτες «συγκεντρώνονται» στις διαδρομές εκείνες που τους εξυπηρετούν γρηγορότερα.

(β) Για υπολογιστικούς λόγους: Η διατήρηση περισσότερων τρόπων μετακίνησης μεταξύ του ίδιους ζεύγους Π-Π αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο.

Επιπλέον, για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών και μείωσης του υπολογιστικού χρόνου, η ζήτηση ενός ζεύγους Π-Π θεωρείται εξυπηρετούμενη εάν οι επιβάτες μπορούν να μεταβούν από την προέλευση στον προορισμό είτε με απευθείας διαδρομή, είτε με μία ακριβώς μετεπιβίβαση.

Οι δύο συντομότερες διαδρομές υπολογίζονται από τη συνάρτηση **F\_ROUTE\_TIME**. Η **F\_ROUTE\_TIME** διατρέχει το **TOTALNETWORK** γραμμή προς γραμμή και στάση προς στάση και εντοπίζει τα εξυπηρετούμενα ζεύγη Π-Π. Στάσεις που ανήκουν στην ίδια γραμμή σχηματίζουν ζεύγη Π-Π που εξυπηρετούνται απευθείας. Διατρέχοντας, για παράδειγμα, τη γραμμή 1-2-3-4, η **F\_ROUTE\_TIME** εντοπίζει τα απευθείας εξυπηρετούμενα ζεύγη 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4 (προφανώς εξυπηρετούνται και τα αντίστροφα ζεύγη 2-1, 3-1, 4-1, 3-2, 4-2, 4-3). Μόλις εντοπίσει ένα ζεύγος, ανατρέχει στον πίνακα **TIME\_CONSECUTIVE** και διαδοχικά αθροίζει τους χρόνους από τη στάση προέλευσης στη στάση προορισμού.

Αφότου η **F\_ROUTE\_TIME** διατρέξει μια γραμμή του δικτύου (δηλαδή, είτε εξαντλήσει όλες τις **MAX\_NUM\_STOPS**, αν δε συναντήσει το στοιχείο 0, είτε μόλις συναντήσει το πρώτο μηδενικό), προχωράει στην αμέσως επόμενη. Αυτό σημαίνει ότι είναι πλέον δυνατή η εύρεση ζευγών που εξυπηρετούνται με μετεπιβίβαση. Προϋπόθεση για την ύπαρξη διαδρομής με μετεπιβίβαση μεταξύ δύο κόμβων A, B που ανήκουν στις γραμμές  $L_1$ ,  $L_2$  αντιστοίχως, είναι η ύπαρξη ενός τρίτου κοινού κόμβου C των  $L_1$  και  $L_2$ . Τότε, η ζήτηση με προέλευση το A και προορισμό το B μπορεί να εξυπηρετηθεί από τη διαδρομή  $A \rightarrow C \rightarrow B$ . Επομένως, ο χρόνος μετακίνησης από το A στο B δίνεται από τη σχέση:

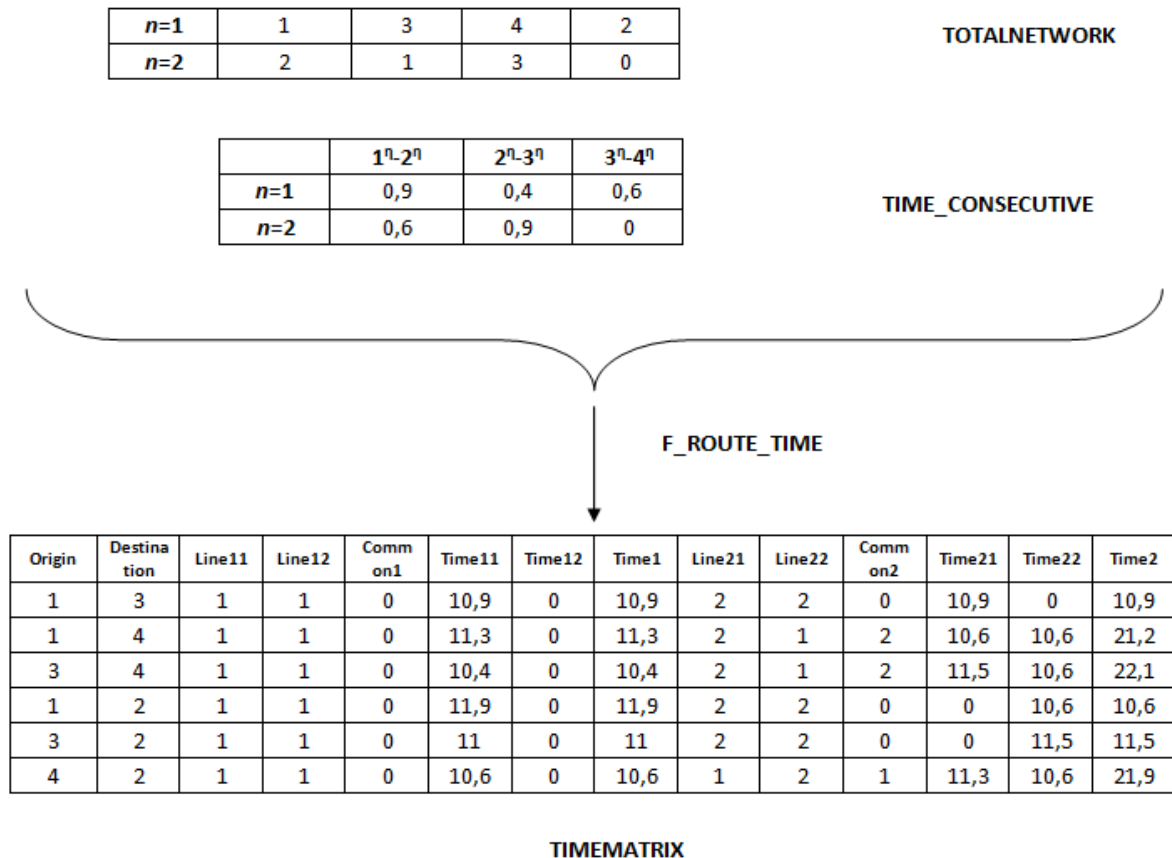
$$T_{AB} = T_{AC} + T_W + T_{CB} + T_W = T_{AC} + T_{CB} + 2T_W \quad (6.7)$$

όπου  $T_W$  ο χρόνος αναμονής στη στάση.

Η συνάρτηση συνεχίζει να διατρέχει το δίκτυο ώσπου να εντοπίσει όλα τα ζεύγη που εξυπηρετούνται απευθείας ή με μία μετεπιβίβαση και κρατά τους δύο συντομότερους χρόνους διαδρομής για το καθένα. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία του 14στηλου πίνακα **TIMEMATRIX**.

Μόλις εντοπιστεί ένα εξυπηρετούμενο ζεύγος Π-Π εισέρχεται αυτόματα στον **TIMEMATRIX**. Παρόμοια, εάν εντοπιστεί δεύτερη δυνατή διαδρομή για ένα ζεύγος το οποίο περιέχεται ήδη στον πίνακα, καταχωρίζεται και εκείνη. Από εκεί και πέρα, ο χρόνος κάθε νέας διαδρομής που εντοπίζεται για το ίδιο ζεύγος συγκρίνεται με το δεύτερο μεγαλύτερο χρόνο του που έχει ήδη καταχωριστεί στον πίνακα. Αν η διάρκεια της νέας διαδρομής είναι μικρότερη από το χρόνο αυτό, τότε η νέα διαδρομή εισέρχεται στον πίνακα, αντικαθιστώντας εκείνη με τον μέχρι πρότινος δεύτερο μεγαλύτερο χρόνο.

Ακολούθως (Σχήμα 6.7) περιγράφεται σχηματικά η λειτουργία της συνάρτησης **F\_ROUTE\_TIME** για ένα υποθετικό δίκτυο δύο γραμμών και τεσσάρων διαφορετικών στάσεων και εξηγείται στήλη προς στήλη το περιεχόμενο του πίνακα **TIMEMATRIX**.



Σχήμα 6.7 Κατασκευή του πίνακα TIMEMATRIX από τη συνάρτηση F\_ROUTE\_TIME.

Οι στήλες 1-2 αναφέρονται στο εκάστοτε ζεύγος Π-Π.

Στήλη 1 - Origin: Η στάση προέλευσης.

Στήλη 2 - Destination: Η στάση προορισμού.

Οι στήλες 3-8 αναφέρονται στον πρώτο τρόπο μετάβασης από την προέλευση στον προορισμό.

Στήλη 3 - Line11: Η λεωφορειακή γραμμή που συνδέει είτε την προέλευση με τον κοινό κόμβο, αν υπάρχει μετεπιβίβαση, είτε την προέλευση με τον προορισμό απευθείας.

Στήλη 4 - Line12: Η λεωφορειακή γραμμή που συνδέει είτε τον κοινό κόμβο με τον προορισμό, αν υπάρχει μετεπιβίβαση, είτε την προέλευση με τον προορισμό απευθείας. Στην τελευταία περίπτωση ισχύει  $Line12=Line11$ .

Στήλη 5 - Common1: Ο κοινός κόμβος όπου γίνεται η μετεπιβίβαση. Αν  $Common1=0$ , τότε η διαδρομή δεν απαιτεί μετεπιβίβαση και κατά συνέπεια ισχύει επίσης  $Line11=Line12$ .

Στήλη 6 - Time11: Ο χρόνος που απαιτείται είτε για τη μετάβαση από την προέλευση στον κοινό κόμβο, αν απαιτείται μετεπιβίβαση, είτε από την προέλευση στον προορισμό, αν δεν υπάρχει μετεπιβίβαση. Συμπεριλαμβάνεται ο χρόνος αναμονής.

Στήλη 7 - Time 12: Ο χρόνος που απαιτείται είτε για τη μετάβαση από τον κοινό κόμβο στον προορισμό, αν απαιτείται μετεπιβίβαση. Συμπεριλαμβάνεται ο χρόνος αναμονής. Αν δεν απαιτείται μετεπιβίβαση, τότε  $Time12=Common1=0$ .

Στήλη 8 - Time1: Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση από την προέλευση στο προορισμό. Ισούται με το άθροισμα των χρόνων Time11 και Time12.

Οι στήλες 9-14 αναφέρονται στο δεύτερο τρόπο μετάβασης από την προέλευση στον προορισμό. Επισημαίνεται ότι, σε περίπτωση που δεν εντοπιστεί δεύτερος τρόπος, είναι όλες μηδενικές.

Στήλη 9 - Line21: Η λεωφορειακή γραμμή που συνδέει είτε την προέλευση με τον κοινό κόμβο, αν υπάρχει μετεπιβίβαση, είτε την προέλευση με τον προορισμό απευθείας.

Στήλη 10 - Line22: Η λεωφορειακή γραμμή που συνδέει είτε τον κοινό κόμβο με τον προορισμό, αν υπάρχει μετεπιβίβαση, είτε την προέλευση με τον προορισμό απευθείας. Στην τελευταία περίπτωση ισχύει  $Line22=Line21$ .

Στήλη 11 - Common2: Ο κοινός κόμβος όπου γίνεται η μετεπιβίβαση. Αν  $Common2=0$ , τότε η διαδρομή δεν απαιτεί μετεπιβίβαση και κατά συνέπεια ισχύει επίσης  $Line21=Line22$ .

Στήλη 12 - Time21: Ο χρόνος που απαιτείται είτε για τη μετάβαση από την προέλευση στον κοινό κόμβο, αν απαιτείται μετεπιβίβαση, είτε από την προέλευση στον προορισμό, αν δεν υπάρχει μετεπιβίβαση. Συμπεριλαμβάνεται ο χρόνος αναμονής.

Στήλη 13 - Time 22: Ο χρόνος που απαιτείται είτε για τη μετάβαση από τον κοινό κόμβο στον προορισμό, αν απαιτείται μετεπιβίβαση. Συμπεριλαμβάνεται ο χρόνος αναμονής. Αν δεν απαιτείται μετεπιβίβαση, τότε  $Time22=Common2=0$ .

Στήλη 14 - Time2: Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση από την προέλευση στο προορισμό. Ισούται με το άθροισμα των χρόνων Time21 και Time22.

#### 6.4.7 Καταμερισμός της ζήτησης

Η κατανομή των επιβατών στις δύο δυνατές διαδρομές του πίνακα **TIMEMATRIX** πραγματοποιείται με χρήση της συνάρτησης **F\_PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST**. Η **F\_PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST** δημιουργεί έναν πίνακα με 2 στήλες και πλήθος γραμμών ίσο με του **TIMEMATRIX**. Η πρώτη στήλη περιέχει το πλήθος των επιβατών που θα χρησιμοποιήσουν την πρώτη διαδρομή του πίνακα **TIMEMATRIX** για το αντίστοιχο ζεύγος, ενώ η δεύτερη εκείνους που θα χρησιμοποιήσουν τη δεύτερη διαδρομή.

Όπως αναφέρθηκε, οι δύο δυνατές διαδρομές για κάθε ζεύγος Π-Π επιλέχθηκαν με κριτήριο το χρόνο. Ο καταμερισμός των επιβατών στις δύο αυτές διαδρομές πραγματοποιείται σύμφωνα με τους εξής κανόνες:

(α) Αν ο πίνακας **TIMEMATRIX** περιέχει μόνο μία διαδρομή που συνδέει την προέλευση με τον προορισμό, τότε όλη η ζήτηση θα εξυπηρετηθεί από τη διαδρομή αυτή.

(β) Αν ο **TIMEMATRIX** περιέχει δύο διαδρομές που συνδέουν την προέλευση με τον προορισμό, τότε:

(i) Αν οι δύο τρόποι σύνδεσης είναι ομοειδείς, δηλαδή είτε είναι και οι δύο απευθείας διαδρομές, είτε και οι δύο απαιτούν μετεπιβίβαση, τότε η ζήτηση θα μοιραστεί αντιστρόφως ανάλογα με το συνολικό χρόνο διαδρομής.

(ii) Αν ο ένας εκ των δύο τρόπων είναι απευθείας διαδρομή και ο άλλος περιλαμβάνει μετεπιβίβαση, τότε θεωρείται ότι η ζήτηση επιλέγει στο σύνολό της τον απευθείας τρόπο.

Σε πρώτη φάση, εξυπηρετούμενα θεωρούνται τα ζεύγη που περιέχονται στον πίνακα **TIMEMATRIX**. Ωστόσο, πραγματοποιείται η παραδοχή ότι η ζήτηση σε πρώτη φάση μη εξυπηρετούμενων ζευγών Προέλευσης – Προορισμού μπορεί να μετατραπεί σε εξυπηρετούμενη αν κατανεμηθεί σε διαδρομές που συνδέουν άλλα ζεύγη Π-Π. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι ο επιβάτης θα διανύσει πεζός (ή με οποιοδήποτε διαθέσιμο μέσο) όση απόσταση απαιτείται προκειμένου να επιβιβαστεί στο λεωφορείο. Συγκεκριμένα, έχει δύο εναλλακτικές επιλογές:

(α) Να μεταβεί πεζός (ή με άλλο μέσο) από τον κόμβο προέλευσης σε έναν άλλο κόμβο («ενδιάμεσο») ο οποίος συνδέεται με τον κόμβο προορισμού, να επιβιβαστεί στον ενδιάμεσο κόμβο και να αποβιβαστεί στον κόμβο προορισμού.

(β) Να επιβιβαστεί στον κόμβο προέλευσης, να αποβιβαστεί σε έναν κόμβο διάφορο του κόμβου προορισμού («ενδιάμεσο») ο οποίος συνδέεται με τον κόμβο προέλευσης και να μεταβεί πεζός (ή με άλλο μέσο) στον κόμβο προορισμού.

Θεωρείται, επιπλέον, ότι η απόσταση προέλευσης-ενδιάμεσου κόμβου (περίπτωση α) και ενδιάμεσου κόμβου-προορισμού (περίπτωση β) δεν μπορεί να υπερβαίνει μια δεδομένη τιμή  $L_{W,E}$ .

Για το σκοπό αυτό, η συνάρτηση **F\_PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST** εντοπίζει τα μη εξυπηρετούμενα ζεύγη Π-Π. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας συνδυαστικά τον πίνακα **TIMEMATRIX** και τον πίνακα αποστάσεων **L** εντοπίζει:

(α) Τους κόμβους που συνδέονται με τον κόμβο προορισμού («συνδέονται», πρακτικά, σημαίνει ότι υπάρχει αντίστοιχη καταχώριση στον πίνακα **TIMEMATRIX**), με την προϋπόθεση ότι η απόστασή τους από τον κόμβο προέλευσης δεν υπερβαίνει την απόσταση  $L_{W,E}$ . Έστω  $wdist_1$  το σύνολο των αποστάσεων αυτών, οι οποίες συμβολίζονται ως  $wdist_{i1}$ .

(β) Τους κόμβους που συνδέονται με τον κόμβο προέλευσης με την προϋπόθεση ότι η απόστασή τους από τον κόμβο προορισμού δεν υπερβαίνει την απόσταση  $L_{W,E}$ . Έστω  $wdist_2$  το σύνολο των αποστάσεων αυτών, οι οποίες συμβολίζονται αντίστοιχα  $wdist_{i2}$ .

Η απόσταση που είναι αναγκασμένος να διανύσει πεζός ο επιβάτης είναι η

$$d_w = \min (wdist_{i1} \in wdist_1, wdist_{i2} \in wdist_2). \quad (6.8)$$

Στο Σχήμα 6.8 απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο η συνάρτηση **F\_PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST** δημιουργεί τον πίνακα δύο στηλών **PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST**. Με γνωστές, πλέον, τις διαδρομές που επιλέγουν, οι επιβάτες κατανέμονται στο συγκοινωνιακό δίκτυο. Η φόρτιση του δικτύου είναι απαραίτητη προκειμένου να εντοπιστεί το κρίσιμο τμήμα κάθε γραμμής. Με τον όρο «κρίσιμο» εννοείται το τμήμα της γραμμής μεταξύ δύο διαδοχικών στάσεων το οποίο φέρει το μεγαλύτερο επιβατικό φόρτο. Ο επιβατικός φόρτος του κρίσιμου τμήματος είναι εκείνος που θα καθορίσει τη συχνότητα κάθε γραμμής.

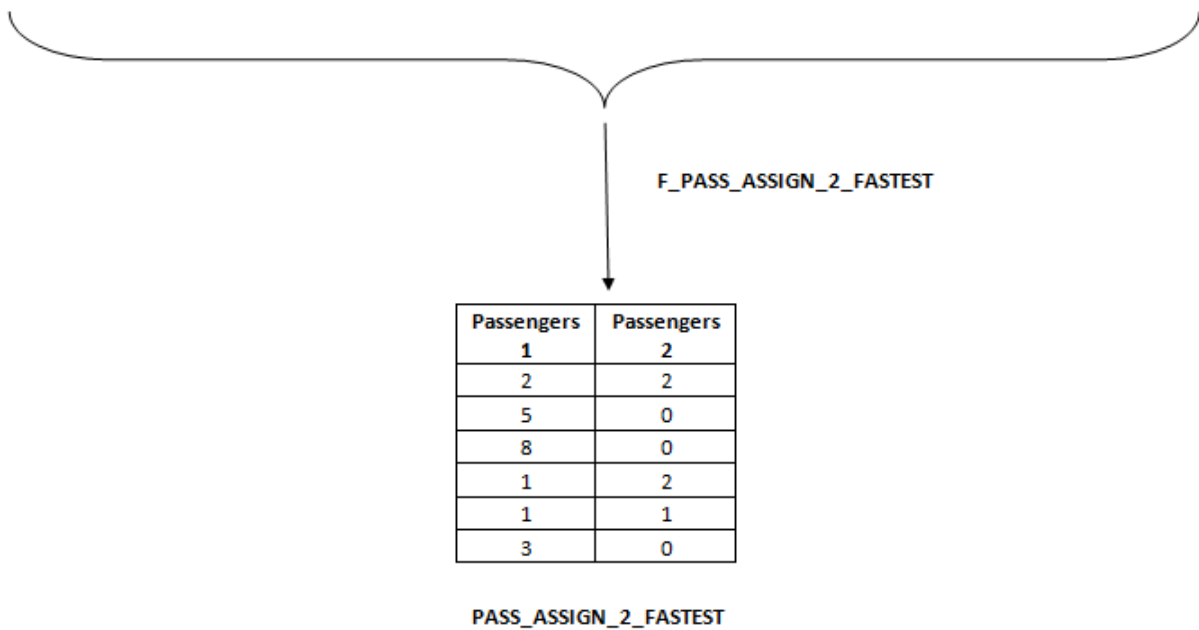
Η συνάρτηση που φορτίζει το δίκτυο με επιβάτες είναι η **F\_PASSENGERS\_BETWEEN\_STOPS**. Η **F\_PASSENGERS\_BETWEEN\_STOPS** διατρέχει τον πίνακα **TIMEMATRIX** γραμμή προς γραμμή. Σε κάθε γραμμή διαβάζει πρώτα τον πρώτο τρόπο μετάβασης από την προέλευση στον προορισμό, δηλαδή τη χρησιμοποιούμενη γραμμή, αν πρόκειται για απευθείας σύνδεση, ή τις δύο χρησιμοποιούμενες γραμμές και τον κοινό κόμβο, αν πρόκειται για σύνδεση με μετεπιβίβαση. Από τον πίνακα **PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST** εντοπίζει στην αντίστοιχη σειρά τους επιβάτες που θα χρησιμοποιήσουν τον πρώτο τρόπο και από το **TOTALNETWORK** εντοπίζει την ακριβή θέση των στάσεων προέλευσης προορισμού και, αν υπάρχει, του κοινού κόμβου. Έτσι, αν πρόκειται για απευθείας σύνδεση, φορτίζει όλο το τμήμα της γραμμής μεταξύ προέλευσης και προορισμού. Αν, πάλι, πρόκειται για μετεπιβίβαση, φορτίζει όλο το τμήμα της Line11 από την προέλευση μέχρι τον κοινό κόμβο και όλο το τμήμα της Line12 από τον κοινό κόμβο μέχρι τον προορισμό. Με ακριβώς ίδιο τρόπο η συνάρτηση διαχειρίζεται τους επιβάτες που αντιστοιχούν στο δεύτερο τρόπο μετακίνησης. Το αποτέλεσμα είναι η κατασκευή του πίνακα **PASSENGERS\_BETWEEN\_STOPS**, διαστάσεων  $NUM\_LINES * (MAX\_NUM\_STOPS - 1)$ .

Origin	Destination	Line11	Line12	Common1	Time1 1	Time1 2	Time1	Line21	Line22	Common2	Time2 1	Time2 2	Time2
1	3	1	1	0	10,9	0	10,9	2	2	0	10,9	0	10,9
1	4	1	1	0	11,3	0	11,3	2	1	2	10,6	10,6	21,2
3	4	1	1	0	10,4	0	10,4	2	1	2	11,5	10,6	22,1
1	2	1	1	0	11,9	0	11,9	2	2	0	0	10,6	10,6
3	2	1	1	0	11	0	11	2	2	0	0	11,5	11,5
4	2	1	1	0	10,6	0	10,6	1	2	1	11,3	10,6	21,9

<i>n=1</i>	1	3	4	2
<i>n=2</i>	2	1	3	0

<i>d</i>	1	2	3	4
1				
2	3			
3	4	2		
4	5	3	8	

<i>L (km)</i>	1	2	3	4
1				
2	0,6			
3	0,9	0,3		
4	1,2	0,6	0,4	



Σχήμα 6.8 Κατασκευή του πίνακα PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST από τη συνάρτηση F\_PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST.

Το Σχήμα 6.9 εξηγεί με παράδειγμα τον τρόπο φόρτισης του δικτύου από τη συνάρτηση F\_PASSENGERS\_BETWEEN\_STOPS:



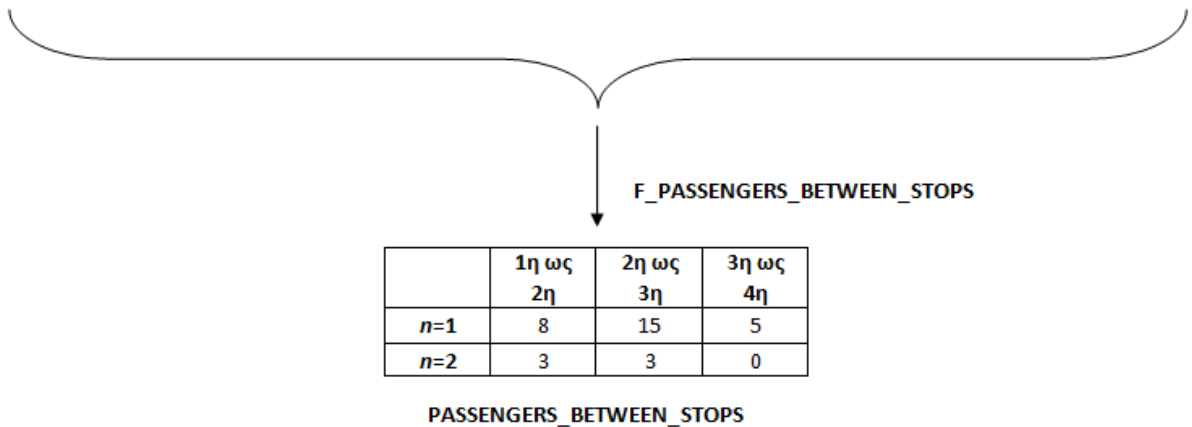
<i>n</i> =1	1	3	4	2	TOTALNETWORK
<i>n</i> =2	2	1	3	0	

Origin	Destination	Line11	Line12	Comm on1	Time1 1	Time1 2	Time1	Line21	Line22	Comm on2	Time2 1	Time2 2	Time2
1	3	1	1	0	10,9	0	10,9	2	2	0	10,9	0	10,9
1	4	1	1	0	11,3	0	11,3	2	1	2	10,6	10,6	21,2
3	4	1	1	0	10,4	0	10,4	2	1	2	11,5	10,6	22,1
1	2	1	1	0	11,9	0	11,9	2	2	0	0	10,6	10,6
3	2	1	1	0	11	0	11	2	2	0	0	11,5	11,5
4	2	1	1	0	10,6	0	10,6	1	2	1	11,3	10,6	21,9

TIMEMATRIX

Passengers 1	Passengers 2
2	2
5	0
8	0
1	2
1	1
3	0

PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST



Σχήμα 6.9 Κατασκευή του πίνακα PASSENGERS\_BETWEEN\_STOPS από τη συνάρτηση F\_PASSENGERS\_BETWEEN\_STOPS.

#### 6.4.8 Υπολογισμός συχνοτήτων γραμμών

Η συχνότητα κάθε γραμμής *n*, όπως αναφέρθηκε, εξαρτάται από τον επιβατικό φόρτο  $Q_{max,n}$  στο κρίσιμο τμήμα της γραμμής και από την επιθυμητή πληρότητα του λεωφορείου. Η επιθυμητή πληρότητα κάθε οχήματος ισούται με τη χωρητικότητά του *C* πολλαπλασιασμένη με ένα μειωτικό συντελεστή *p*. Η χρήση του μειωτικού συντελεστή εξυπηρετεί τη διατήρηση ενός επιπέδου άνεσης κατά τη μεταφορά των επιβατών: Εάν οι

υπολογισμοί διεξάγονταν θεωρώντας ότι τα λεωφορεία στο κρίσιμο τμήμα κινούνται με τη μέγιστη πληρότητά τους, θα σήμαινε ότι οι επιβάτες πρακτικά συνωστίζονται εντός των οχημάτων. Η συχνότητα  $f_n$  κάθε γραμμής  $n$  υπολογίζεται από τη σχέση

$$f_n = \frac{Q_{max,n}}{p * C} \quad (6.9)$$

Όπου  $f_n$  η συχνότητα κάθε γραμμής σε λεωφορεία/ώρα,  $Q_{max,n}$  ο επιβατικός φόρτος στο κρίσιμο τμήμα της γραμμής σε επιβάτες/ώρα,  $p$  ο αδιάστατος μειωτικός συντελεστής της πληρότητας του λεωφορείου και  $C$  η χωρητικότητα του λεωφορείου σε επιβάτες/λεωφορείο.

#### 6.4.9 Υπολογισμός όρων αντικειμενικής συνάρτησης

1)  $D_U$ : Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση. Η εξυπηρετούμενη ζήτηση  $D_S$  υπολογίζεται ως το διπλάσιο (λόγω συμμετρίας) του αθροίσματος όλων των στοιχείων του πίνακα **PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST**. Επομένως, η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση  $D_U$  προκύπτει με αφαίρεση της εξυπηρετούμενης από τη συνολική ζήτηση:

$$D_U = D_T - D_S \quad (6.10)$$

Το Σχήμα 6.10 περιέχει ένα παράδειγμα υπολογισμού της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης για υποθετική ωραία ζήτηση  $\sum_{i,j} d_{ij} = 400$  μετακινήσεις.

Passengers 1	Passengers 2
10	9
15	20
20	18
25	14
32	17

**PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST**

Εξυπηρετούμενη ζήτηση:  
2\*180=360

Συνολική ζήτηση: 400

Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση: 400-360=40

Σχήμα 6.10 Υπολογισμός μη εξυπηρετούμενης ζήτησης.

2)  $\bar{T}$ : Μέσος χρόνος μετακίνησης ανά επιβάτη. Ο μέσος χρόνος μετακίνησης ανά επιβάτη υπολογίζεται με χρήση της συνάρτησης **F\_AVERAGE\_TIME**. Η **F\_AVERAGE\_TIME**, αφού διατρέξει τον πίνακα **TIMEMATRIX** και τον πίνακα **PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST**, υπολογίζει το μέσο χρόνο μετακίνησης ανά επιβάτη σύμφωνα με τη σχέση

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i,j \text{ in } TimeMatrix} (d_{ij,1} * T_1 + d_{ij,2} * T_2)}{\sum_{i,j \text{ in } TimeMatrix} d_{ij}} \quad (6.11)$$

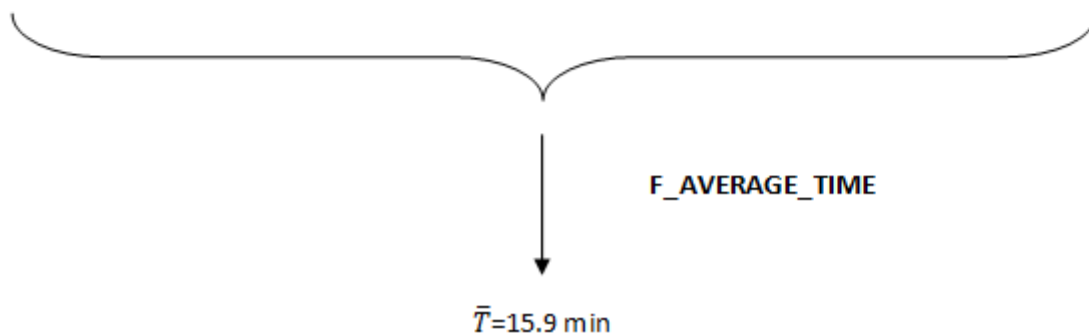
Όπου  $d_{ij,1}$   $d_{ij,2}$  η εξυπηρετούμενη ζήτηση με τον πρώτο και το δεύτερο τρόπο, αντιστοίχως, σύμφωνα με τον πίνακα **TIMEMATRIX** και  $T_1$ ,  $T_2$  οι αντίστοιχοι χρόνοι μετακίνησης.

Ένα απλοποιημένο παράδειγμα εύρεσης του μέσου χρόνου μετακίνησης με χρήση της συνάρτησης **F\_AVERAGE\_TIME** απεικονίζεται στο Σχήμα 6.11:

Origin	Destination	Line11...Time12	Time1	Line21...Time22	Time2
38	39		16		0
38	41		18,8		0
39	41		12,8		0
38	29		21,2		34
29	2		14,0		13,4
1	2		12,6		22,6

Passengers 1	Passengers 2
7	0
5	0
4	0
1	0
1	1
1	0

**PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST**



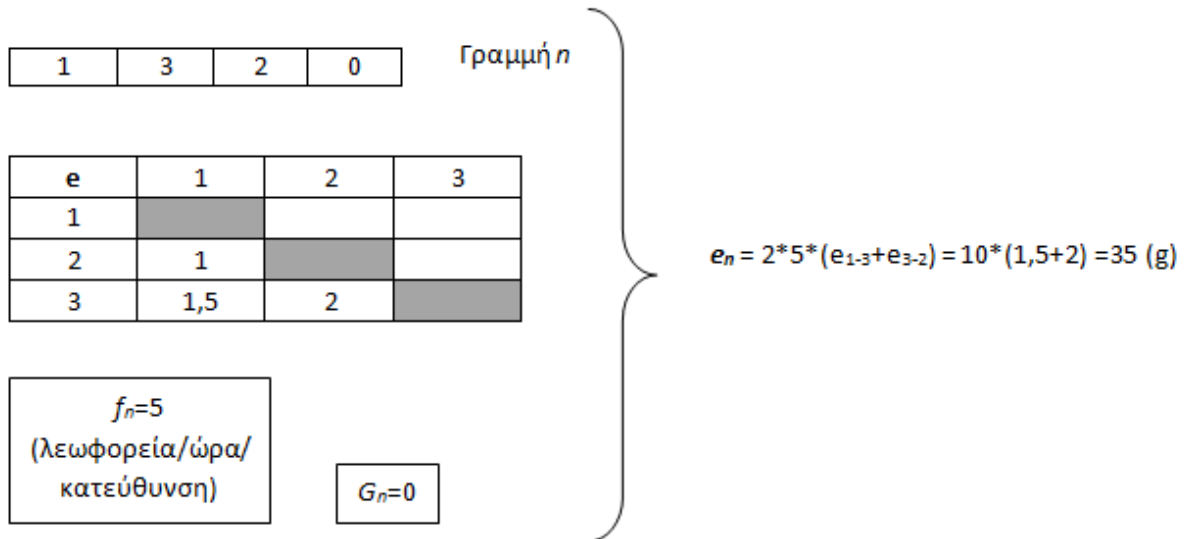
Σχήμα 6.11 Υπολογισμός του μέσου χρόνου διαδρομής με χρήση της συνάρτησης **F\_AVERAGE\_TIME**.

3)  $\sum_n e_n$ : Η συνολική μάζα εκπεμπόμενου ρύπου ανά ώρα λειτουργίας του δικτύου. Ο όρος προκύπτει με άθροιση των εκπεμπόμενων ρύπων για κάθε γραμμή συμβατικών λεωφορείων χωριστά, όπως αυτοί προκύπτουν με τη συνάρτηση **F\_EMISSIONS**. Σε κάθε τμήμα μεταξύ δύο διαδοχικών στάσεων  $i, j$  αντιστοιχεί δεδομένη μάζα ρύπου  $e_{ij}$ . Επομένως, όταν ένα συμβατικό λεωφορείο κινείται από την αφετηρία μέχρι το τέρμα μιας γραμμής, εκπέμπει ρύπους των οποίων η μάζα ισούται με το άθροισμα των μαζών που εκπέμπονται σε καθένα εκ των επιμέρους τμημάτων της γραμμής – έστω  $\sum_{i,j} e_{ij,n}$ . Αν σε μία γραμμή, σε διάστημα μιας ώρας, διέρχονται  $f_n$  λεωφορεία ανά κατεύθυνση, τότε και στις δύο κατευθύνσεις σημειώνονται  $2 \cdot f_n$  διελεύσεις στον ίδιο χρόνο. Εύκολα υπολογίζονται οι εκπεμπόμενοι ρύποι  $e_n$  ανά ώρα και λεωφορειακή γραμμή σύμφωνα με τη σχέση

$$e_n = 2 * f_n * \sum e_{ij,n} \quad (6.12)$$

Το άθροισμα  $\sum_n e_n$  ισούται με τη συνολική ποσότητα ρύπου που εκπέμπεται από το δίκτυο των λεωφορειακών γραμμών στη διάρκεια μίας ώρας.

Στο Σχήμα 6.12 εξηγείται με χρήση παραδείγματος ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η συνάρτηση **F\_EMISSIONS**:



Σχήμα 6.12 Η λειτουργία της συνάρτησης **F\_EMISSIONS**.

Στο Σχήμα 6.13 υπολογίζεται ο τρίτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης για ένα υποθετικό δίκτυο τεσσάρων λεωφορειακών γραμμών, υποθέτοντας ότι στις δύο από αυτές κυκλοφορούν συμβατικά λεωφορεία και στις άλλες δύο ηλεκτρικά:

Γραμμή	$G_n$	$e_n$ (g/ γραμμή)
$n=1$	0	500
$n=2$	1	0
$n=3$	1	0
$n=4$	0	1200

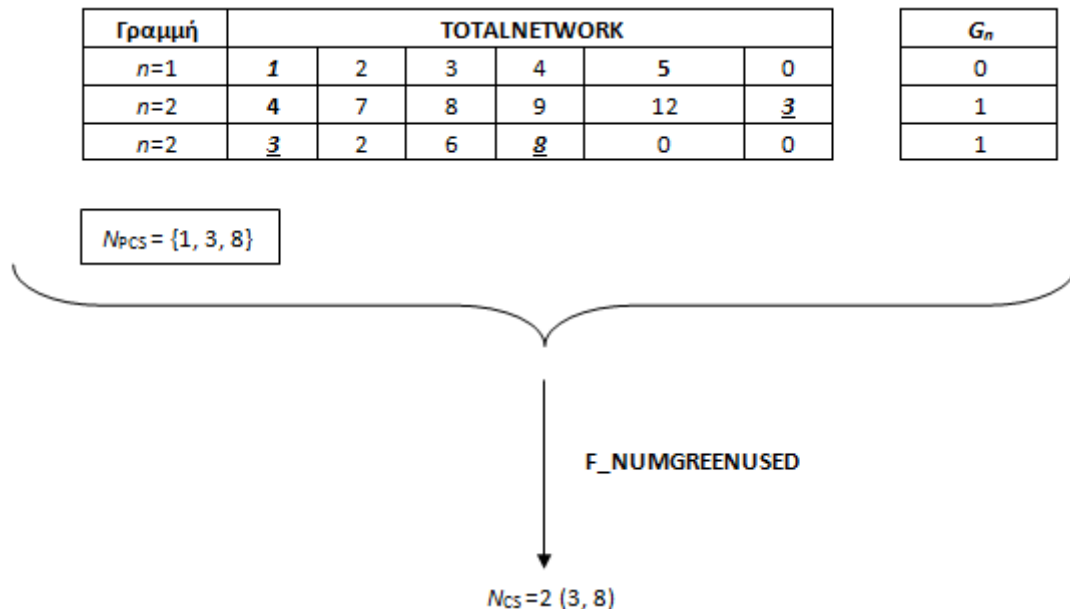
$$\sum_n e_n = 1700 \text{ g}$$

Σχήμα 6.13 Υπολογισμός μάζας ρύπων από τη συνάρτηση **F\_EMISSIONS**.

4)  $N_{CS}$ : Το πλήθος των απαιτούμενων σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων. Ο υπολογισμός του πραγματοποιείται από τη συνάρτηση **F\_NUMGREENUSED**. Η **F\_NUMGREENUSED** διαβάζει έναν – έναν τους κόμβους του συνόλου  $N_{PCS}$  και για καθέναν διατρέχει το **TOTALNETWORK**. Μόλις εντοπίσει τον τρέχοντα κόμβο του  $N_{PCS}$  είτε στην αρχή

είτε στο τέλος μιας γραμμής με  $G_n=1$ , ο κόμβος θεωρείται χρησιμοποιούμενος σταθμός επαναφόρτισης, προστίθεται στο σύνολο  $N_{CS}$  και η συνάρτηση προχωράει στον επόμενο κόμβο του  $N_{PCS}$ . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ελεγχθούν όλοι οι κόμβοι του  $N_{PCS}$ .

Στο Σχήμα 6.14 εξηγείται η λειτουργία της συνάρτησης **F\_NUMGREENUSED** για ένα υποθετικό δίκτυο τριών λεωφορειακών γραμμών.



Σχήμα 6.14 Η λειτουργία της συνάρτησης F\_NUMGREENUSED. Παρ' όλο που η στάση 1 ανήκει στο σύνολο  $N_{PCS}$ , δεν προσμετράται στο σύνολο των σταθμών επαναφόρτισης, γιατί η μόνη γραμμή στην οποία ανήκει ως αφετηρία ή τέρμα, δηλαδή η γραμμή 1, έχει  $G_1=0$ .

5-6)  $V_{req,c}$  και  $V_{req,e}$ : Απαιτούμενα συμβατικά και ηλεκτρικά οχήματα αντιστοίχως. Το πλήθος των οχημάτων που απαιτείται για την εξυπηρέτηση κάθε γραμμής εξαρτάται από τη συχνότητά της και από το χρόνο κύκλου της. Με γνωστά τα δύο παραπάνω στοιχεία για κάθε λεωφορειακή γραμμή, τα απαιτούμενα οχήματα  $V_n$  δίνονται από τη σχέση

$$V_n = \frac{2 * f_n * T_n}{60} \quad (6.13)$$

Όπου  $f_n$  η συχνότητα (ανά κατεύθυνση) σε λεωφορεία/ώρα και  $T_n$  χρόνος απλής διαδρομής του λεωφορείου σε λεπτά. Επισημαίνεται ότι στο χρόνο αυτό συμπεριλαμβάνεται ο χρόνος κίνησης  $T_{d,n}$  από την αφετηρία μέχρι το τέρμα και ο απλός χρόνος επαναφοράς  $T_r$  κατά τον οποίο το όχημα παραμένει είτε στη αφετηρία είτε στο τέρμα. Δηλαδή,

$$T_n = T_{d,n} + T_r \quad (6.14)$$

Εάν προκύψει δεκαδική τιμή  $V_n$ , στρογγυλοποιείται στον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο.

Το Σχήμα 6.15 εξηγεί με χρήση ενός παραδείγματος τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται το πλήθος των απαιτούμενων οχημάτων ανά γραμμή:

	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	TOTALNETWORK
n=1	10	4	6	0	
n=2	5	7	8	9	

	1 <sup>η</sup> - 2 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup> - 3 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup> - 4 <sup>η</sup>	PASSENGERS_BETWEEN_STOPS
n=1	120	230	-	
n=2	95	183	100	

	Q <sub>max,n</sub>	f <sub>n</sub>	T <sub>n</sub> (min)	V <sub>n</sub>
n=1	230	2,9	80	6
n=2	183	2,3	110	9

Σχήμα 6.15 Υπολογισμός απαιτούμενων οχημάτων ανά γραμμή.

Με γνωστό το πλήθος των οχημάτων που απαιτούνται για κάθε γραμμή  $n$ , τα οχήματα αθροίζονται ανά είδος, ανάλογα με την τιμή του δείκτη  $G_n$ . Δηλαδή, τα οχήματα αθροίζονται ως συμβατικά σε γραμμές όπου  $G_n=0$  και ως ηλεκτρικά σε γραμμές όπου  $G_n=1$ . Η άθροιση γίνεται όπως εξηγείται στο Σχήμα 6.16:

Γραμμή	G	V <sub>req</sub>
n=1	1	8
n=2	0	10
n=3	1	6

V <sub>req,c</sub> :	10
V <sub>req,e</sub> :	14

Σχήμα 6.16 Υπολογισμός απαιτούμενων οχημάτων ανά είδος.

Αφού υπολογιστεί κάθε όρος  $Z_i$ , αντικαθίσταται από τον αντίστοιχο κανονικοποιημένο όρο

$$Z_{i,norm} = \frac{Z_i}{Z_{i,max}} \quad (6.15)$$

#### 6.4.10 Υπολογισμός αντικειμενικής συνάρτησης και επιβολή ποινών

Για τον υπολογισμό της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης καλείται η συνάρτηση **F\_OBJECTIVE**. Η **F\_OBJECTIVE** υπολογίζει αρχικά το άθροισμα  $\sum_{i=1}^6 W_i Z_{i,norm}$  και στη συνέχεια καλεί πέντε επιμέρους συναρτήσεις ελέγχου για να ελέγξει την τήρηση των περιορισμών και να επιβάλει τις αντίστοιχες ποινές. Ο Πίνακας 6.1 περιέχει τις συναρτήσεις αυτές:

Πίνακας 6.1 Οι συναρτήσεις ελέγχου των περιορισμών.

#	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ	ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ
1	Γραμμές με ηλεκτρικά λεωφορεία	F_CHECK_GREEN
2	Μήκος γραμμών	F_CHECK_LENGTH
3	Συχνότητα γραμμών	F_CHECK_FREQUENCY
4	Διαθέσιμος στόλος	F_CHECK_VEHICLES
5	Αλληλουχία στάσεων (5 κοντινότερες)	-
6	Όμοιες γραμμές	F_CHECK_SAME

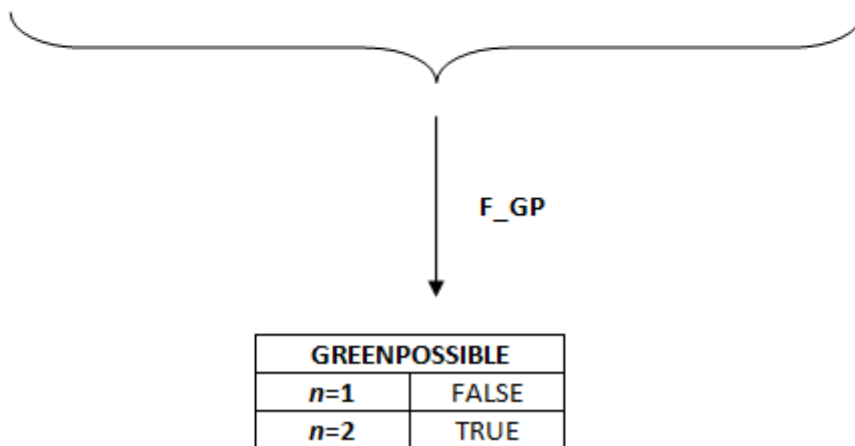
Κάθε συνάρτηση ελέγχει τον αντίστοιχο περιορισμό και επιστρέφει αποτέλεσμα 0 (FALSE), εάν ο περιορισμός παραβιάζεται, ή 1 (TRUE), εάν ο περιορισμός τηρείται. Ο μόνος περιορισμός που δε διαθέτει ξεχωριστή συνάρτηση ελέγχου είναι ο περιορισμός #5 (αλληλουχία στάσεων), ο οποίος – σε αντίθεση με τους υπόλοιπους περιορισμούς – δεν αναφέρεται στο σύνολο της γραμμής, αλλά στα επιμέρους διαδοχικά ζεύγη στάσεων που την αποτελούν.

Από όλους τους περιορισμούς, η παραβίαση του #1 επιβαρύνει την αντικειμενική συνάρτηση με σταθερή ποινή, ενώ η παραβίαση των περιορισμών #2, #3, #4 και #5 την επιβαρύνει με ποινή εξαρτώμενη από το μέγεθος της απόκλισης από τις επιτρεπόμενες τιμές. Υπενθυμίζεται ότι ο περιορισμός #6, του οποίου η παραβίαση είναι εξαιρετικά απίθανη και ο έλεγχος χρονοβόρος, ελέγχεται μία φορά, στο τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας. Αναλυτικότερα:

1) Περιορισμός #1 (Δυνατότητα κυκλοφορίας ηλεκτρικών λεωφορείων αποκλειστικά σε συγκεκριμένες γραμμές): Μόλις κατασκευαστεί μια γραμμή, η συνάρτηση **F\_GP** ελέγχει εάν ο πρώτος ή ο τελευταίος κόμβος κάθε γραμμής ανήκει στο σύνολο  $N_{PCS}$  και επιστρέφει την τιμή  $G_{p,n}=1$  εάν είναι δυνατή η κυκλοφορία ηλεκτρικών λεωφορείων ή  $G_{p,n}=0$  εάν απαγορεύεται. Η λειτουργία της εξηγείται στο Σχήμα 6.17:

$n=1$	9	7	1	2	8
$n=2$	10	2	1	3	0

$N_{Pcs}$
1
2
3
4
5



Σχήμα 6.17 Η συνάρτηση  $F\_GP$ .

Σε περίπτωση που από το Γενετικό Αλγόριθμο προκύψει λύση η οποία περιλαμβάνει ηλεκτρικά λεωφορεία σε γραμμές όπου απαγορεύεται η διέλευσή τους – δηλαδή όταν σε μια λεωφορειακή γραμμή η συνάρτηση  $F\_GP$  λαμβάνει την τιμή 0, τη στιγμή που η μεταβλητή  $G_n$  λαμβάνει την τιμή 1 – η συνάρτηση ελέγχου  $F\_CHECK\_GREEN$  λαμβάνει την τιμή 0. Τότε, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προσαυξάνεται με πρόσθεση ποινής 100 μονάδων για κάθε γραμμή που δεν τηρεί τον περιορισμό. Η ποινή αυτή των 100 μονάδων υπερβαίνει σημαντικά τόσο την εφικτή τιμή της κανονικοποιημένης αντικειμενικής συνάρτησης (που με τα επιλεχθέντα βάρη δεν μπορεί να υπερβεί τη μονάδα) όσο και, σε γενικές γραμμές, των υπόλοιπων ποινών που επιβάλλονται στη συνάρτηση. Το μέγεθος αυτό της επιβαλλόμενης ποινής επιλέγεται ώστε, χωρίς να επιβληθεί αυστηρός (hard) περιορισμός, να αποκλείεται, πρακτικά, η επιλογή λύσης που τον παραβιάζει.

2) Περιορισμός #2 (Μήκος γραμμών): Για τον έλεγχο του περιορισμού 2 καλείται η συνάρτηση  $F\_CHECK\_LENGTH$ . Η  $F\_CHECK\_LENGTH$  ελέγχει εάν το μήκος κάθε γραμμής  $n$  βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων. Σε περίπτωση που ο περιορισμός παραβιάζεται, η συνάρτηση λαμβάνει την τιμή 0, ενώ αν δεν παραβιάζεται, λαμβάνει την τιμή 1. Τότε, η  $F\_OBJECTIVE$  ελέγχει την απόκλιση  $den$  του μήκους  $L_n$  κάθε γραμμής από τα επιτρεπόμενα όρια. Συγκεκριμένα, η  $den$  υπολογίζεται ως εξής:



$$\text{Av } L_n > L_{max} \rightarrow \text{dev}L_n = L_n - L_{max} \quad (6.16)$$

$$\text{Av } L_n < L_{min} \rightarrow \text{dev}L_n = L_{min} - L_n \quad (6.17)$$

Όπου το  $L_{max}$  ισούται με  $L_{max,c}$  ή  $L_{max,e}$ , ανάλογα με την τιμή της μεταβλητής  $G_n$ .

3) Περιορισμός #3 (Συχνότητα διέλευσης λεωφορείων). Η συνάρτηση **F\_CHECK\_FREQUENCY** ελέγχει εάν η συχνότητα κάθε γραμμής  $n$  βρίσκεται εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Παρόμοια με προηγουμένως, η απόκλιση  $dev$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Av } f_n > f_{max} \rightarrow \text{dev}f_n = f_n - f_{max} \quad (6.18)$$

$$\text{Av } f_n < f_{min} \rightarrow \text{dev}f_n = f_{min} - f_n \quad (6.19)$$

4) Περιορισμός #4 (Διαθέσιμος στόλος οχημάτων): Ο περιορισμός αυτός ελέγχεται από τη συνάρτηση **F\_CHECK\_VEHICLES**, η οποία εξετάζει εάν είναι διαθέσιμα τα απαιτούμενα οχήματα για τη λειτουργία του δικτύου. Επομένως, η απόκλιση υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Av } V_{req,c} > V_{av,c} \rightarrow \text{dev}V_c = V_{req,c} - V_{av,c} \quad (6.20)$$

$$\text{Av } V_{req,e} > V_{av,e} \rightarrow \text{dev}V_e = V_{req,e} - V_{av,e} \quad (6.21)$$

5) Περιορισμός #5 (Αλληλουχία στάσεων κατά μήκος λεωφορειακής γραμμής):

Για τον υπολογισμό της απόκλισης, αρχικά εντοπίζονται στον πίνακα **NEAREST5** οι δύο συνδεόμενες στάσεις οι οποίες παραβιάζουν τον περιορισμό καθώς και οι αποστάσεις κάθε μιας εκ των δύο από τις πέντε πλησιέστερες της. Η απόκλιση  $dev$  ισούται με τη διαφορά της μέγιστης εκ των αποστάσεων αυτών από την απόσταση μεταξύ των συνδεόμενων στάσεων.

Τέλος, υπολογίζεται η τιμή της διευρυμένης αντικειμενικής ως

$$\sum_{i=1}^6 W_i Z_{i,norm} + \sum P_i \quad (6.22)$$

## 6.5 Υπολογισμός μεγεθών που δε συμμετέχουν στην επαναληπτική διαδικασία

Με γνωστά τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι δυνατό ο υπολογισμός και άλλων μεγεθών, τα οποία, ενώ δε συμμετέχουν στην αντικειμενική συνάρτηση, παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του συγκοινωνιακού δικτύου. Τέτοια μεγέθη είναι:

(α) Τα διανυόμενα οχηματοχιλιόμετρα ανά ώρα λειτουργίας του δικτύου, τόσο συνολικά, όσο και ανά είδος λεωφορείων.

(β) Το πλήθος των εξυπηρετούμενων χωρίς ενδιάμεσο κόμβο ζευγών Προέλευσης – Προορισμού.

(γ) Το πλήθος των αντίστοιχων επιβατών.

Στη συνέχεια αναλύονται περαιτέρω τα τρία παραπάνω μεγέθη.

#### 6.5.1 Υπολογισμός οχηματοχιλιόμετρων

Ο υπολογισμός των οχηματοχιλιόμετρων ανά γραμμή  $n$ , μήκους  $L_n$  και συχνότητας  $f_n$  δίνεται από τη σχέση

$$(Vkm)_n = 2 * f_n * L_n \quad (6.23)$$

Όπου  $(Vkm)_n$  τα διανυόμενα οχηματοχιλιόμετρα ανά ώρα στη γραμμή  $n$ ,  $f_n$  η συχνότητα της γραμμής  $n$  σε οχήματα/ώρα και  $L_n$  το μήκος της γραμμής  $n$  σε km.

Με γνωστά τα οχηματοχιλιόμετρα ανά γραμμή, μπορούν να υπολογιστούν τα συνολικά ωριαία οχηματοχιλιόμετρα, τόσο για ολόκληρο το δίκτυο όσο και ανά είδος οχημάτων (συμβατικών και ηλεκτρικών).

#### 6.5.2 Υπολογισμός πλήθους επιβατών που εξυπηρετούνται με/χωρίς περπάτημα

Για τον υπολογισμό των επιβατών που εξυπηρετούνται από το συγκοινωνιακό δίκτυο χωρίς να αναγκαστούν να μεταβούν σε άλλη στάση πέρα από εκείνη της προέλευσης ή του προορισμού τους, χρησιμοποιείται η συνάρτηση **F\_PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST\_BEFORE**. Η **F\_PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST\_BEFORE** κατανέμει τους επιβάτες κάθε ζεύγους Προέλευσης – Προορισμού στις δύο συντομότερες διαδρομές με τον ίδιο τρόπο που τους κατανέμει και η **F\_PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST**, με τη διαφορά ότι αγνοεί πλήρως τη δυνατότητα των επιβατών να εξυπηρετηθούν χρησιμοποιώντας άλλη στάση πέρα από εκείνες της Προέλευσης και του Προορισμού τους. Δημιουργείται, επομένως, ένας πίνακας **PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST\_BEFORE**, ο οποίος έχει το ίδιο πλήθος γραμμών και στηλών και προφανώς στοιχεία μικρότερα ή ίσα από τα αντίστοιχα στοιχεία του πίνακα **PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST**.

Το άθροισμα των στοιχείων του **PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST\_BEFORE**, διπλασιασμένο, λόγω συμμετρίας, ισούται με το πλήθος των επιβατών που εξυπηρετούνται χωρίς να χρειαστεί να περπατήσουν σε άλλη στάση. Όπως έχει αναφερθεί, η συνολική εξυπηρετούμενη ζήτηση ισούται με το διπλάσιο άθροισμα των στοιχείων του **PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST**. Αφαιρώντας, επομένως, τα δύο αυτά αθροίσματα, προκύπτει το πλήθος των επιβατών  $pass_w$  οι οποίοι χρησιμοποιούν «ενδιάμεσο» κόμβο για τη μετακίνησή τους. Δηλαδή

$$pass_w = 2 * \left( \sum PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST - \sum PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST\_BEFORE \right) \quad (6.24)$$

### 6.5.3 Υπολογισμός ζευγών Π-Π που εξυπηρετούνται χωρίς περπάτημα

Το πλήθος των ζευγών Προέλευσης – Προορισμού που εξυπηρετούνται χωρίς επιβίβαση ή αποβίβαση σε ενδιάμεσο κόμβο ισούται με το πλήθος των σειρών του πίνακα **PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST\_BEFORE**, φυσικά πολλαπλασιασμένο επί δύο, λόγω συμμετρίας.

## 6.6 Έλεγχος περιορισμού 6

Με το πέρας της βελτιστοποίησης, καλείται η συνάρτηση **F\_CHECK\_SAME**, η οποία ελέγχει την τήρηση του περιορισμού #6. Υπενθυμίζεται ότι, σύμφωνα με αυτόν, απαγορεύεται η ύπαρξη στο δίκτυο δύο ή περισσότερων γραμμών οι οποίες περιέχουν τις ίδιες ακριβώς στάσεις και μόνο αυτές, ανεξάρτητα από την αλληλουχία των στάσεων εντός της γραμμής. Η συνάρτηση εξετάζει τις γραμμές ανά ζεύγη και συγκρίνει τις στάσεις που περιέχουν. Προκειμένου να εξοικονομηθεί υπολογιστικός χρόνος, η συνάρτηση αποκλείει εκ των προτέρων τις γραμμές που είναι αδύνατο να περιέχουν τις ίδιες ακριβώς στάσεις και ελέγχει μόνο εκείνες που ενδέχεται να είναι όμοιες. Τέτοιες είναι οι γραμμές οι οποίες συγχρόνως:

(α) Περιέχουν τον ίδιο αριθμό στάσεων.

(β) Παρουσιάζουν το ίδιο άθροισμα αυξόντων αριθμών των στάσεών τους: Εάν το άθροισμα των αυξόντων αριθμών των στάσεων δύο γραμμών είναι διαφορετικό, τότε αποκλείεται οι γραμμές να περιέχουν τις ίδιες ακριβώς στάσεις. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει λόγος να ελεγχθούν.

Εάν η συνάρτηση **F\_CHECK\_SAME** εντοπίσει δύο ή περισσότερες γραμμές που παραβιάζουν τον περιορισμό, η λύση απορρίπτεται.



---

---

## 7 Αποτελέσματα

---

---

### 7.1 Γενικά

Για τις ανάγκες της εργασίας το πρόβλημα επιλύθηκε σε δύο επίπεδα:

(α) Διερευνήθηκαν παραλλαγές στις παραμέτρους του Γενετικού Αλγορίθμου (ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων γενετικού αλγορίθμου). Συγκεκριμένα, ελέγχθηκαν τα αποτελέσματα της επίλυσης για τιμή του ποσοστού διασταύρωσης (crossover rate) ίση με 0,2, 0,5, και 0,7. Ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για την επίλυση των σεναρίων που περιγράφονται στο (β).

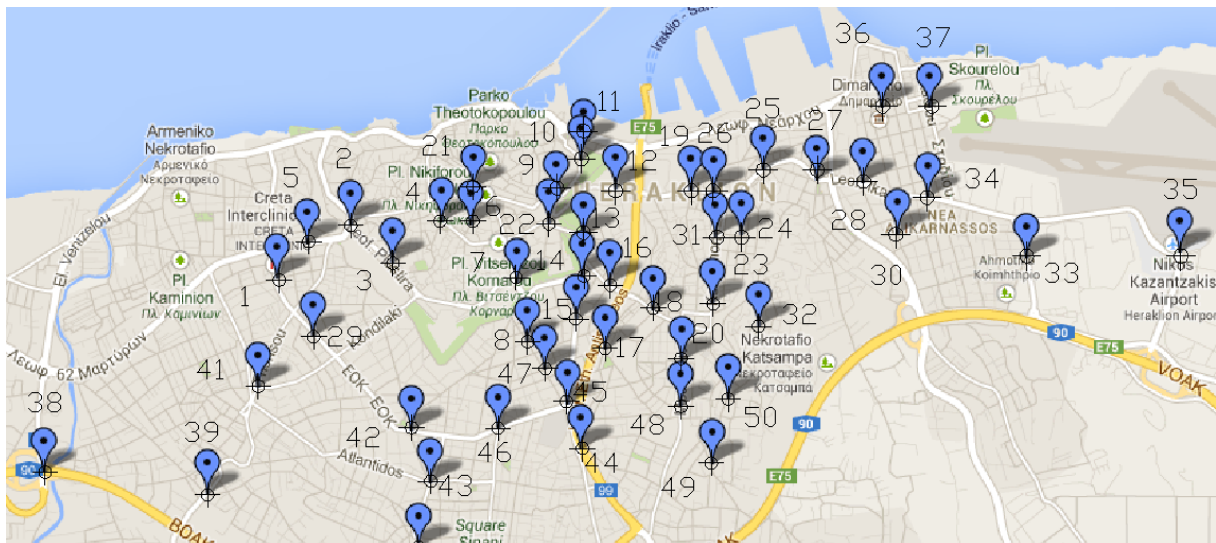
(β) Εξετάστηκαν παραλλαγές στα δεδομένα και τις παραμέτρους του προβλήματος (ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων προτύπου). Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση με ρυθμό διασταύρωσης 0,5 ήταν καλύτερα συγκρινόμενα με εκείνα των υπόλοιπων επιλύσεων, στα πειράματα των εναλλακτικών σεναρίων διατηρήθηκε σταθερό ρυθμό διασταύρωσης ίσο με 0,5 και πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων του προβλήματος. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η βέλτιστη λύση σε περίπτωση μεταβολής της ωριαίας ζήτησης, της μέσης ταχύτητας κίνησης των λεωφορείων και της παραμέτρου  $L_{W,E}$ .

Όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 5, η υλοποίηση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε στην εφαρμογή λογιστικού φύλλου Microsoft Excel. Τα αρχικά δεδομένα του προβλήματος εισήχθησαν στο λογιστικό φύλλο και υπέστησαν επεξεργασία. Ο συνδυασμός και η συσχέτιση των σταθερών και των μεταβλητών εμπλεκόμενων μεγεθών πραγματοποιήθηκε με την κατασκευή συναρτήσεων (UDFs) σε Visual Basic for Applications, ενώ ο Γενετικός Αλγόριθμος εκτελέστηκε από το Evolver 5.5.

### 7.2 Πειραματικό δίκτυο

Για την απεικόνιση της λύσης χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης του Ηρακλείου Κρήτης (Σχήμα 7.1). Ωστόσο, διευκρινίζεται ότι τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία προέκυψαν με εύλογες παραδοχές, όπως η θεώρηση ως δεδομένου ενός υποθετικού συνόλου  $NUM\_OD=50$  στάσεων, παραδοχή ωριαίας ζήτησης 10000 μετακινήσεων και θεώρηση των μητρώων ως συμμετρικών. Οι απλοποιήσεις αυτές αφενός διευκολύνουν τους υπολογισμούς και αφετέρου εξυπηρετούν το σκοπό της εργασίας, που δεν είναι μια ακριβής συγκοινωνιακή μελέτη για το Δήμο Ηρακλείου, αλλά η ανάπτυξη μιας ευρύτερης και ευέλικτης μεθοδολογίας προσέγγισης του προβλήματος του συγκοινωνιακού σχεδιασμού. Έτσι, η

απεικόνιση της λύσης αποτελεί μια παραστατική απεικόνιση της εφαρμογής της μεθοδολογίας σε οποιαδήποτε περιοχή με γνωστά στοιχεία.



Σχήμα 7.1 Το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων.

### 7.3 Καθορισμός αρχικής λύσης

Σε ένα γενετικό αλγόριθμο, η αρχική λύση του προβλήματος επηρεάζει την ποιότητα της βέλτιστης λύσης η οποία θα προκύψει από τη διαδικασία της επίλυσης, καθώς και την ταχύτητα με την οποία ο γενετικός αλγόριθμος θα συγκλίνει στη βέλτιστη λύση. Επομένως είναι απαραίτητη η κατασκευή μιας λύσης η οποία να προσδίδει στην αντικειμενική συνάρτηση μια «σχετικά καλή» τιμή. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα του προβλήματος καθιστά δύσκολη την κατασκευή μιας αρχικής λύσης που πληροί όλους τους επιβαλλόμενους περιορισμούς. Η δυσκολία αυτή οφείλεται στην αδυναμία εποπτείας από το χρήστη ορισμένων μεγεθών, όπως π.χ. ο μέγιστος επιβατικός φόρτος ανά γραμμή  $Q_{\max,n}$ , ο οποίος καθορίζει τη συχνότητα και που εξαρτάται από την κατανομή των επιβατών στις δύο συντομότερες διαδρομές του δικτύου.

Στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκε μια αρχική λύση αποτελούμενη από  $NUM\_LINES = 10$  γραμμές, έτσι ώστε να πληρούνται οι εύκολα ελεγχόμενοι περιορισμοί 1, 2, 5 και 6 (Κεφάλαιο 4). Οι δέκα αυτές γραμμές περιελάμβαναν – τουλάχιστον από μία φορά – όλες τις στάσεις του δικτύου. Το αποτέλεσμα ήταν η αντικειμενική συνάρτηση στις αρχικές λύσεις των δύο πρώτων πειραμάτων, τα οποία διεξήχθησαν με στόχο την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων του γενετικού Αλγορίθμου, να λάβει την τιμή 11,32, με τις 10,85 μονάδες να προέρχονται από επιβολή ποινών.

Ακολούθως (Πίνακας 7.1) απεικονίζεται η αρχική λύση, η οποία αποτελείται από το αρχικό **TOTALNETWORKBEFORE** και τον αρχικό πίνακα **G**:

Πίνακας 7.1 Η κοινή για όλα τα πειράματα αρχική λύση.

TOTALNETWORKBEFORE																	G
38	39	0	0	0	1	0	0	5	4	3	0	4	0	0	6	21	1
0	40	43	42	29	1	5	0	2	4	0	0	21	9	10	12	0	1
40	0	0	0	46	0	0	47	8	7	0	22	9	0	0	0	11	1
40	0	43	47	0	0	47	15	0	0	13	0	0	9	0	0	21	1
44	45	17	16	0	15	0	13	0	22	9	0	0	0	0	11	0	1
49	0	50	20	23	31	26	0	0	23	27	0	0	0	0	34	0	1
0	0	33	0	0	37	28	27	0	25	26	0	0	19	10	0	0	0
35	33	0	0	0	0	0	0	36	0	0	27	25	11	0	11	0	0
1	29	0	0	42	0	46	0	0	0	44	0	0	0	49	50	0	0
0	24	31	23	0	18	17	8	0	42	29	0	0	0	0	1	0	0

#### 7.4 Καθορισμός παραμέτρων επίλυσης

Το **TOTALNETWORKBEFORE** καταλαμβάνει εύρος κελιών που αντιστοιχούν σε 10 γραμμές και 17 στήλες. Επομένως, NUM\_LINES = 10 και MAX\_NUM\_STOPS = 17.

Οι παρακάτω παράμετροι (Πίνακας 7.2) διατηρήθηκαν σταθερές σε όλα τα εναλλακτικά σενάρια του προβλήματος:

Πίνακας 7.2 Σταθερές τιμές παραμέτρων στα εναλλακτικά σενάρια.

Παράμετρος	Συμβολισμός	Τιμή
Αριθμός στάσεων	NUM_OD	50
Αριθμός γραμμών	NUM_LINES	10
Μέγιστος αριθμός στάσεων ανά γραμμή	MAX_NUM_STOPS	17
Στόλος συμβατικών λεωφορείων	$V_{av,c}$	50
Στόλος ηλεκτρικών λεωφορείων	$V_{av,e}$	50
Ελάχιστη συχνότητα (λεωφορεία/h)	$f_{min}$	1
Μέγιστη συχνότητα (λεωφορεία/h)	$f_{max}$	10
Ελάχιστο μήκος γραμμής (km)	$L_{min}$	3
Μέγιστο μήκος συμβατικής γραμμής (km)	$L_{cmax}$	10
Μέγιστο μήκος ηλεκτρικής γραμμής (km)	$L_{gmax}$	8
Χωρητικότητα λεωφορείου (επιβάτες)	$\rho * C$	80
Χρόνος αναμονής (min)	$T_w$	10
Χρόνος επαναφοράς απλός (min)	$T_r$	5

Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι το σύνολο των δυνατών θέσεων κατασκευής σταθμών φόρτισης  $N_{PCS}$  περιλαμβάνει τους ακόλουθους κόμβους (Πίνακας 7.3):

Πίνακας 7.3 Το σύνολο  $N_{PCS}$  των κόμβων όπου είναι δυνατή η κατασκευή σταθμού επαναφόρτισης.

$N_{PCS}$
21
38
40
44
49

Τα βάρη  $W_i$  που αντιστοιχούν στους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης είναι τα εξής (Πίνακας 7.4):

Πίνακας 7.4 Οι τιμές των συντελεστών βάρους  $W_i$ .

ΟΡΟΣ $Z_i$	Ερμηνεία	$W_i$
1	Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	0,3
2	Μέσος χρόνος μετακίνησης	0,05
3	Μάζα εκπεμπόμενων ρύπων	0,3
4	Σταθμοί επαναφόρτισης	0,25
5	Συμβατικά λεωφορεία	0,05
6	Ηλεκτρικά λεωφορεία	0,05

Τέλος, ο Πίνακας 7.5 περιέχει τις μέγιστες τιμές των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά την κανονικοποίηση στο Βασικό σενάριο:

Πίνακας 7.5 Οι μέγιστες τιμές των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης στο Βασικό σενάριο.

ΟΡΟΣ $Z_i$	$Z_{i,max}$
$D_U$ (μετακινούμενοι)	10000
$\bar{T}$ (λεπτά)	53
$\sum_n e_n$ (γραμμάρια)	[Ανάλογα με τη λύση]
$N_{CS}$ (σταθμοί)	5
$V_{req,c}$ (συμβατικά οχήματα)	50
$V_{req,e}$ (ηλεκτρικά οχήματα)	50



## 7.5 Παραλλαγές στις παραμέτρους του Γενετικού Αλγορίθμου

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάστηκε η επίδραση του ρυθμού διασταύρωσης (crossover rate) στην τελική λύση. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα επιλύθηκε με ρυθμό διασταύρωσης 0,2, 0,5 και 0,7. Όπως διευκρινίστηκε στο κεφάλαιο 4, το Evolver πραγματοποιεί ομοιόμορφη διασταύρωση (Uniform crossover). Επιπλέον, ο ρυθμός διασταύρωσης στη συγκεκριμένη περίπτωση δηλώνει – χονδρικά – το ποσοστό των γονιδίων τα οποία κληρονομεί κάθε απόγονος από το γονέα. Για παράδειγμα, ρυθμός διασταύρωσης ίσος με 0,5 σημαίνει χονδρικά ότι ο κάθε γονέας κληροδοτεί σε κάθε έναν εκ των δύο απογόνων το 50% των γονιδίων του.

Με εξαίρεση το ρυθμό διασταύρωσης, οι υπόλοιπες παράμετροι του Γενετικού Αλγορίθμου διατηρήθηκαν ίδιες. Συγκεκριμένα, το μέγεθος του πληθυσμού τέθηκε ίσο με 100 και χρησιμοποιήθηκε ο «αυτόματος» ρυθμός μετάλλαξης. Ο αυτόματος ρυθμός μετάλλαξης έχει την ιδιότητα να αναπροσαρμόζεται κατά την διάρκεια της επίλυσης του προβλήματος. Εάν, δηλαδή, ο γενετικός αλγόριθμος δε σημειώσει καμία πρόοδο κατά την αναζήτηση λύσης μετά την ολοκλήρωση πολλών επαναλήψεων, ο ρυθμός μετάλλαξης αυξάνεται, προκειμένου να αποφευχθεί εγκλωβισμός της λύσης σε τοπικό βέλτιστο. Επιπλέον, σε όλα τα πειράματα επιλέχθηκε τερματισμός της εκτέλεσης της διαδικασίας με την ολοκλήρωση 6000 επαναλήψεων, ενώ η γεννήτρια τυχαίων αριθμών επιλέχθηκε τυχαία.

Ο Πίνακας 7.6 συνοψίζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των πειραμάτων.

Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα του βασικού πειράματος για παραλλαγές στις παραμέτρους του Γενετικού Αλγορίθμου.

		Πείραμα 1	Πείραμα 2	Πείραμα 3	Ποσοστιαία διαφορά	
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Μέγεθος πληθυσμού:		100		2 ως προς 1	3 ως προς 1
	Γεννήτρια τυχαίων αριθμών:		Τυχαία			
	Συνθήκη τερματισμού		6000 δοκιμές			
	Ρυθμός διασταύρωσης	0,5	0,7	0,2		
	Ρυθμός μετάλλαξης		Αυτόματος			
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	Τιμή διευρυμένης αντικειμενικής συνάρτησης	1,46	2,37	1,65	62,33%	13,01%
	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,36	0,36	0,39	0,00%	8,33%
	Σύνολο ποινών	1,1	2,01	1,26	82,73%	14,55%
	Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	210	448	638	53,13%	203,81%
	Μέσος χρόνος διαδρομής (λεπτά)	28	27,5	27,6	-1,82%	-1,43%
	Ρύποι (g)	378,5	295,89	318,43	-27,91%	-15,86%
	Σταθμοί επαναφόρτισης	1	2	2	50,00%	100,00%
Συμβατικά οχήματα	37	28	31	-32,14%	-16,22%	

	Ηλεκτρικά οχήματα	11	19	17	42,11%	54,55%
ΠΟΙΝΕΣ	Περιορισμός 1 (Διέλευση ηλεκτρικών)	0	0	0	-	-
	Περιορισμός 2 (Μήκος)	0,25	0	0	-	-100,00%
	Περιορισμός 3 (Συχνότητα)	0	0	0	-	-
	Περιορισμός 4 (Στόλος)	0	0	0	-	-
	Περιορισμός 5 (Αλληλουχία στάσεων)	0,85	2,01	1,26	57,71%	48,24%
	Περιορισμός 6 (Ιδίες στάσεις)	0	0	0	-	-

Εξετάζοντας αναλυτικά τους περιορισμούς, διαπιστώνεται ότι οι τελικές λύσεις όλων των πειραμάτων παραβιάζουν τον περιορισμό #5 (Αλληλουχία στάσεων κατά μήκος λεωφορειακής γραμμής). Επιπλέον, η γραμμή 5 της λύσης 1 παραβιάζει τον περιορισμό μήκους, καθώς από την επίλυση προέκυψε  $L_5=2,75$  km, τη στιγμή που το ελάχιστο επιτρεπόμενο μήκος είναι  $L_{min}=3$  km. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι παραβιάζει δύο διαφορετικούς περιορισμούς, η λύση 1 επιβαρύνεται με 45% λιγότερες ποινές από τη λύση 2 και με 12,7% λιγότερες από τη λύση 3.

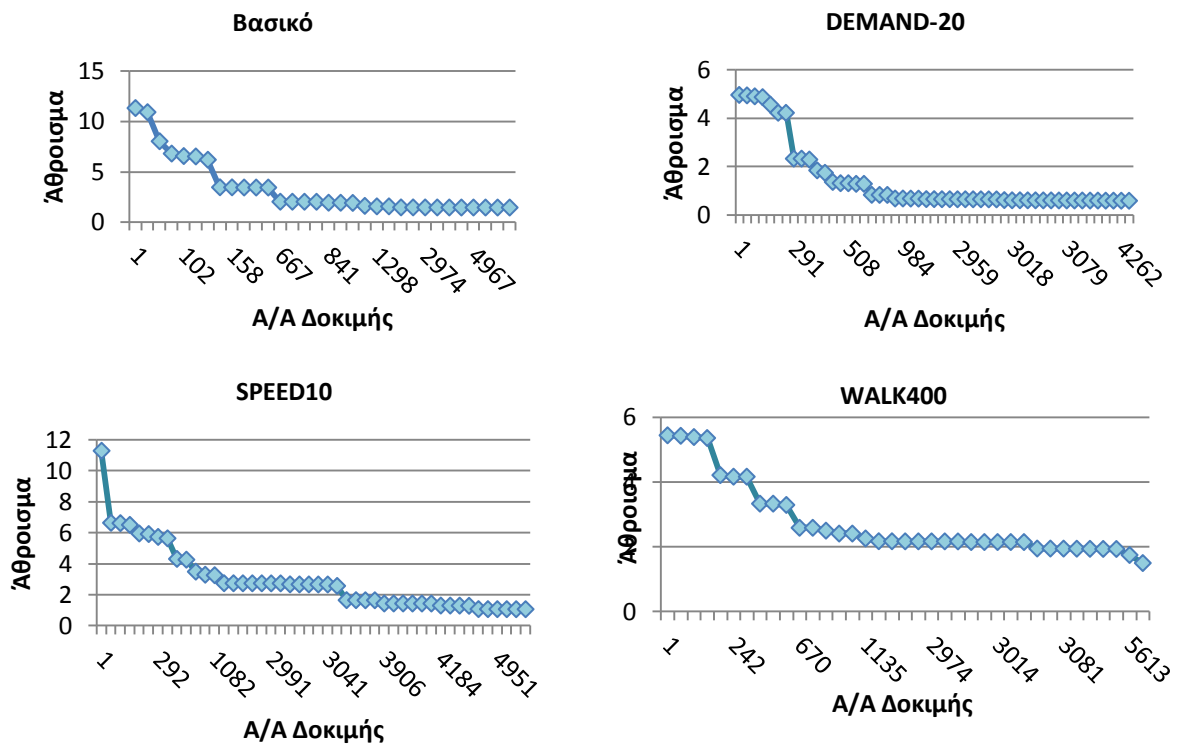
Επομένως, μεταξύ των δύο πειραμάτων, επιλέγονται οι παραμέτροι του πειράματος 1. Το πείραμα 1 θα αντιπροσωπεύει στο εξής το Βασικό σενάριο επίλυσης. Στη συνέχεια, σε όλα τα εναλλακτικά σενάρια θα χρησιμοποιηθεί ρυθμός διασταύρωσης ίσος με 0,5 και ρυθμός μετάλλαξης αυτόματα προσαρμοζόμενος από το πρόγραμμα.

## 7.6 Εναλλακτικά σενάρια

Έχοντας προσδιορίσει τις παραμέτρους του γενετικού αλγορίθμου, διαμορφώνονται εναλλακτικά σενάρια προκειμένου να πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας. Θα εξεταστεί, δηλαδή, ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η λύση όταν αλλάζουν οι τιμές των δεδομένων και των παραμέτρων του προβλήματος. Τα εναλλακτικά σενάρια είναι τα ακόλουθα:

- (α) DEMAND+10: Αύξηση της ωριαίας ζήτησης κατά 10%.
- (β) DEMAND+20: Αύξηση της ωριαίας ζήτησης κατά 20%.
- (γ) DEMAND-10: Μείωση της ωριαίας ζήτησης κατά 10%.
- (δ) DEMAND-20: Μείωση της ωριαίας ζήτησης κατά 20%.
- (ε) SPEED22: Αύξηση της μέσης ταχύτητας κίνησης σε 22 km/h.
- (στ) SPEED10: Μείωση της μέσης ταχύτητας κίνησης σε 10 km/h.
- (ζ) WALK400: Μείωση του  $L_{W,E}$  σε 400 m.
- (η) WALK700: Μείωση του  $L_{W,E}$  σε 700 m.

Τα ακόλουθα διαγράμματα (Σχήμα 7.2) απεικονίζουν την πρόοδο της λύσης κατά την πραγματοποίηση των επαναλήψεων. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε όλες τις γραφικές παραστάσεις η κλίση μειώνεται με την πραγματοποίηση περισσότερων δοκιμών και το διάγραμμα τείνει προς την οριζόντιο. Επομένως, η λύση του προβλήματος συγκλίνει προς την εκάστοτε βέλτιστη τιμή.



Σχήμα 7.2: Τα διαγράμματα προόδου των επιλύσεων για διάφορα σενάρια.

### 7.6.1 DEMAND+10: Αύξηση της ζήτησης κατά 10%

Στο εναλλακτικό σενάριο DEMAND+10 η ωριαία ζήτηση των 10000 μετακινήσεων αυξάνεται κατά 10%. Πολλαπλασιάζοντας κάθε όρο του μητρώου  $d$  επί τον αυξητικό συντελεστή 1,1 και στρογγυλοποιώντας προς τον πλησιέστερο ακέραιο, προκειμένου να αποκτήσουν φυσικό νόημα τα στοιχεία του μητρώου, το τελικό άθροισμα των μετακινούμενων δεν προκύπτει ακριβώς ίσο με 11000, όπως θα ίσχυε για αύξηση ακριβώς ίση με 10% στις μετακινήσεις. Για την ακρίβεια, προκύπτει αθροιστική ζήτηση ίση με 10952 μετακινήσεις, την οποία και διατηρούμε χάριν απλότητας.

Παρά το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της επίλυσης θα εξαρτώνται από τα τελικά **TOTALNETWORK** και **G**, σε γενικές γραμμές αναμένεται αύξηση των συνολικών απαιτούμενων οχημάτων.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του σεναρίου (

Πίνακας 7.7):

Πίνακας 7.7 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων DEMAND+10 και Βασικού.

		ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND+10	Ποσοστιαία μεταβολή
ΓΕΝΙΚΑ	Τιμή διευρυμένης αντικειμενικής συνάρτησης	1,46	1,33	-8,90%
	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,36	0,36	0,00%
	Σύνολο ποινών	1,1	0,97	-11,82%
ΟΡΟΙ	Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	210	852	305,71%
	Μέσος χρόνος διαδρομής (λεπτά)	28,0	27	-3,57%
	Ρύποι (g)	378,46	268,04	-29,18%
	Σταθμοί επαναφόρτισης	1	2	100,00%
	Συμβατικά οχήματα	37	28	-24,32%
	Ηλεκτρικά οχήματα	11	20	81,82%
ΠΟΙΝΕΣ	Περιορισμός 1 (Διέλευση ηλεκτρικών)	0	0	-
	Περιορισμός 2 (Μήκος)	0,25	0,02	-92,00%
	Περιορισμός 3 (Συχνότητα)	0	0	-
	Περιορισμός 4 (Στόλος)	0	0	-
	Περιορισμός 5 (Αλληλουχία στάσεων)	0,85	0,95	11,76%
	Περιορισμός 6 (Ίδιες στάσεις)	0	0	-

Η διευρυμένη αντικειμενική συνάρτηση παρουσιάζει βελτίωση της τάξης του 8,90%, η οποία οφείλεται αποκλειστικά στην προσθήκη 11,82% λιγότερων μονάδων ποινής.

Παρατηρείται ότι, σε αντίθεση με την αρχική εικασία ότι τα απαιτούμενα οχήματα που θα προέκυπταν από την επίλυση του σεναρίου DEMAND+10 θα είναι περισσότερα από εκείνα του βασικού σεναρίου, εν τέλει προέκυψε ακριβώς ο ίδιος αριθμός απαιτούμενων οχημάτων. Συγκεκριμένα, στο σενάριο DEMAND+10 απαιτούνται 28 συμβατικά λεωφορεία – έναντι 37 του βασικού σεναρίου – και 20 ηλεκτρικά οχήματα – έναντι 11 του βασικού σεναρίου. Αθροιστικά, όμως, και οι δύο λύσεις απαιτούν 48 οχήματα.

Αναζητώντας τις αιτίες της απόκλισης αυτής από τα αναμενόμενα αποτελέσματα, διερευνώνται οι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος του χρησιμοποιούμενου στόλου:

(α) Συνολική εξυπηρετούμενη ζήτηση: Στο βασικό σενάριο εξυπηρετούνται  $10000 - 210 = 9790$  επιβάτες, ενώ στο εναλλακτικό εξυπηρετούνται  $10952 - 852 = 10100$ . Έτσι, παρά το γεγονός ότι η συνολική ζήτηση στο DEMAND+10 υπερβαίνει εκείνη του βασικού σεναρίου κατά 9,52%, η εξυπηρετούμενη (υφιστάμενη) ζήτηση του DEMAND+10 υπερβαίνει την αντίστοιχη του βασικού σεναρίου μόλις κατά 310 επιβάτες, δηλαδή κατά 3,2%.

(β) Μέγιστος φόρτος επιβατών  $Q_{\max,n}$ , συχνότητα  $f$  και χρόνος απλής διαδρομής  $T_n$ : Τα μεγέθη αυτά περιέχει ο Πίνακας 7.8.

Πίνακας 7.8 Οι μέγιστοι φόρτοι επιβατών, οι συχνότητες, οι χρόνοι απλής διαδρομής και τα απαιτούμενα οχήματα ανά γραμμή για τα σενάρια Βασικό και DEMAND+10.

# ΓΡΑΜΜΗΣ	$Q_{\max,n}$		$f_n$		$T_n$		$V_n$	
	ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND+ 10	ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND +10	ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND+ 10	ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND +10
1	309	170	3,9	2,1	26,5	19,2	4	2
2	800	780	10,0	9,8	24,0	21,5	8	7
3	403	553	5,0	6,9	17,7	21,4	3	5
4	199	207	2,5	2,6	17,6	18,0	2	2
5	523	725	6,5	9,1	16,0	16,9	4	6
6	664	782	8,3	9,8	17,8	23,4	5	8
7	564	669	7,1	8,4	20,5	17,2	5	5
8	494	524	6,2	6,6	24,6	17,5	6	4
9	473	356	5,9	4,5	19,8	18,4	4	3
10	785	636	9,8	8,0	20,0	20,2	7	6
<b>Μέση τιμή</b>	521,4	540,2	6,5	6,5	20,4	19,4	4,8	4,8

Παρατηρείται ότι η μέση τιμή του μέγιστου φόρτου επιβατών ανά γραμμή,  $Q_{\max,n}$ , είναι αυξημένη κατά 3,6% στο εναλλακτικό σενάριο DEMAND+10. Ωστόσο, ο μέσος όρος των συχνοτήτων ισούται με 6,5 λεωφορεία/ώρα/κατεύθυνση και στις δύο περιπτώσεις. Είναι επίσης χαρακτηριστικό ότι η βέλτιστη λύση για το εναλλακτικό σενάριο περιλαμβάνει εν γένει γραμμές μικρότερου μήκους. Το αποτέλεσμα είναι να μην υπάρξει διαφοροποίηση στο συνολικό αριθμό των απαιτούμενων οχημάτων.

Αναλύοντας τους επιμέρους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης, διαπιστώνεται ότι η βασική λύση υπερτερεί του DEMAND+10 ως προς τους όρους 1 (μη εξυπηρετούμενη ζήτηση), 4 (απαιτούμενοι σταθμοί επαναφόρτισης) και 6 (ηλεκτρικά οχήματα) και υστερεί ως προς τους όρους 2 (μέσος χρόνος μετακίνησης), 3 (εκπεμπόμενοι ρύποι) και 5 (συμβατικά οχήματα).

Κατ' αρχάς, η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση του βασικού σεναρίου ισούται με το 2,1% της συνολικής, ενώ εκείνη του εναλλακτικού ισούται με το 7,78% της συνολικής. Τα αίτια της διαφοράς αυτής πρέπει να αναζητηθούν στην αλληλουχία στάσεων που περιλαμβάνουν οι γραμμές του σεναρίου DEMAND+10. Ακριβέστερα, στο βασικό σενάριο οι γραμμές περιλαμβάνουν κατά μέσο όρο 8,2 στάσεις η κάθε μία, ενώ στο εναλλακτικό σενάριο μόλις 7,2 η κάθε μία. Η διαφορά αυτή, παρ' όλο που δεν αποτελεί απόλυτο δείκτη – καθώς δε δίνει πληροφορία για το ποιες στάσεις συμπεριλαμβάνονται στις γραμμές, αλλά μόνο για το πλήθος τους – είναι ενδεικτική της ύπαρξης περισσότερων τρόπων σύνδεσης μεταξύ των γραμμών και άρα της δυνατότητας εξυπηρέτησης περισσότερων ζευγών Προέλευσης – Προορισμού. Για παράδειγμα, στο σενάριο DEMAND+10 ορισμένες στάσεις (όπως η 39) έχουν τεθεί εκτός δικτύου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι απίθανο να μπορεί να ικανοποιηθεί εξ ολοκλήρου η ζήτησή τους με χρήση άλλων διαδρομών. Εξετάζοντας, επίσης, τα αποτελέσματα της συνάρτησης **F\_PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST\_BEFORE**,

διαπιστώνεται ότι τα ζεύγη που εξυπηρετούνται από το δίκτυο – χωρίς να απαιτείται από τους επιβάτες να μεταβούν σε διαφορετική στάση από εκείνη της προέλευσης ή του προορισμού τους – είναι 824 στο βασικό σενάριο και μόλις 610 στο DEMAND+10. Αυτή η διαφορά είναι συνέπεια της ένταξης λιγότερων στάσεων στο δίκτυο και της δημιουργίας γραμμών μικρότερου μήκους κατά το εναλλακτικό σενάριο DEMAND+10.

Σημειώνεται επίσης αμελητέα μείωση του μέσου χρόνου διαδρομής στο σενάριο DEMAND+10 (από 28 λεπτά ανά επιβάτη σε 27).

Τα εκπεμπόμενα οξείδια του αζώτου επίσης παρουσίασαν μείωση στο εναλλακτικό σενάριο, αφού η μάζα τους ισούται με 268,04 g ανά ώρα λειτουργίας του δικτύου – έναντι 378,46 g στην αρχή. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην αντίστοιχη αύξηση των οχηματοχιλιομέτρων ηλεκτρικών λεωφορείων (227 έναντι 127 του βασικού σεναρίου). Χαρακτηριστικό είναι ότι, ενώ στο βασικό σενάριο χρησιμοποιείται μόνο ένας σταθμός επαναφόρτισης – συγκεκριμένα ο κόμβος 40 στις γραμμές 2 και 3 – στο DEMAND+10 χρησιμοποιείται επιπλέον ο κόμβος 49 στη γραμμή 6. Σημειώνεται επίσης ότι, παρά το γεγονός ότι μόνο 3 από τις 10 γραμμές του εναλλακτικού σεναρίου χρησιμοποιούν ηλεκτρικά λεωφορεία, τα οχηματοχιλιόμετρα των ηλεκτρικών λεωφορείων αποτελούν σχεδόν το 46% του συνόλου, καθώς οι γραμμές 2, 3 και 6 είναι εκείνες στις οποίες αντιστοιχούν τα περισσότερα οχηματοχιλιόμετρα σε σχέση με τις υπόλοιπες (80, 57 και 90 οχηματοχιλιόμετρα αντιστοίχως).

Η παραπάνω παρατήρηση εξηγεί τη χρησιμοποίηση λιγότερων συμβατικών οχημάτων και περισσότερων ηλεκτρικών στο εναλλακτικό σενάριο DEMAND+10. Δεδομένης, επίσης, της αμελητέας μεταβολής στην τελική εξυπηρετούμενη ζήτηση, εύκολα εξηγείται γιατί τα συνολικά οχήματα παραμένουν 48 και στο εναλλακτικό σενάριο.

#### 7.6.2 DEMAND+20: Αύξηση της ζήτησης κατά 20%

Συνεχίζοντας τον έλεγχο της ευαισθησίας της αντικειμενικής συνάρτησης σε μεταβολές της ζήτησης, η συνολική μεταφορική ζήτηση αυξάνεται κατά 20%. Για διευκόλυνση των πράξεων, κάθε στοιχείου του μητρώου  $d$  πολλαπλασιάζεται επί το συντελεστή 1,2. Εν τέλει προκύπτει τελική αθροιστική ζήτηση ίση με 12008 μετακινήσεις.

Η νέα αύξηση της μεταφορικής ζήτησης αναμένεται να προκαλέσει αύξηση των απαιτούμενων οχημάτων. Προφανώς, το πλήθος τους εξαρτάται και από τη νέα εξυπηρετούμενη ζήτηση, η οποία δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί εκ των προτέρων.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση είναι τα ακόλουθα (Πίνακας 7.9):

Πίνακας 7.9 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων DEMAND+20 και Βασικού.

		ΒΑΣΙΚΟ DEMAND+20 Ποσοστιαία μεταβολή		
ΓΕΝΙΚΑ	Τιμή διευρυμένης αντικειμενικής συνάρτησης	1,46	2,09	43,15%
	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,36	0,39	8,33%
	Σύνολο ποινών	1,1	1,7	54,55%
ΟΡΟΙ	Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	210	1468	599,05%
	Μέσος χρόνος διαδρομής (λεπτά)	28	27,1	-3,21%
	Ρύποι (g)	378,46	272,53	-27,99%
	Σταθμοί επαναφόρτισης	1	2	100,00%
	Συμβατικά οχήματα	37	28	-24,32%
	Ηλεκτρικά οχήματα	11	20	81,82%
ΠΟΙΝΕΣ	Περιορισμός 1 (Διέλευση ηλεκτρικών)	0	0	-
	Περιορισμός 2 (Μήκος)	0,25	0	-100,00%
	Περιορισμός 3 (Συχνότητα)	0	0	-
	Περιορισμός 4 (Στόλος)	0	0	-
	Περιορισμός 5 (Αλληλουχία στάσεων)	0,85	1,7	100,00%
	Περιορισμός 6 (Ίδιες στάσεις)	0	0	-

Η λύση του σεναρίου DEMAND+20 προσδίδει υψηλότερη τιμή στο άθροισμα  $\sum W_i Z_{i,norm} + \sum P_i$  σε σχέση με εκείνη του βασικού σεναρίου. Η αύξηση αυτή οφείλεται σε μικρό βαθμό στην αύξηση της αντικειμενικής συνάρτησης κατά 8,33% και, κυρίως, στην αύξηση των επιβαλλόμενων ποινών κατά 54,55%.

Η εξυπηρετούμενη ζήτηση στο σενάριο αυτό φτάνει τους 10540 επιβάτες, υπερβαίνοντας με τον τρόπο αυτό κατά 7,7% την εξυπηρετούμενη ζήτηση του βασικού σεναρίου (9790 επιβάτες) και κατά 4,4% εκείνη του εναλλακτικού σεναρίου DEMAND+10 (10100 επιβάτες).

Παρά την αρχική εκτίμηση περί αύξησης των απαιτούμενων οχημάτων και την αύξηση της εξυπηρετούμενης ζήτησης, προέκυψαν και πάλι 48 απαιτούμενα οχήματα. Προκειμένου να εξηγηθεί η απουσία μεταβολής, εξετάζονται – όπως και στο σενάριο DEMAND+10 – οι παράγοντες που επηρεάζουν το πλήθος των απαιτούμενων λεωφορείων, δηλαδή η συχνότητα και ο χρόνος διαδρομής (Πίνακας 7.10):

Πίνακας 7.10 Οι τιμές των  $Q_{\max}$ ,  $f_n$ ,  $T_n$  και  $V_n$  στα σενάρια Βασικό και DEMAND+20.

# ΓΡΑΜΜΗΣ	$Q_{\max}$		$f_n$		$T_n$		$V_n$	
	ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND+20	ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND+20	ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND+20	ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND+20
1	309	302	3,9	3,8	26,5	24,4	4	4
2	800	524	10,0	6,6	24,0	19,4	8	5
3	403	675	5,0	8,4	17,7	20,1	3	6
4	199	603	2,5	7,5	17,6	17,3	2	5
5	523	323	6,5	4,0	16,0	19,7	4	3
6	664	671	8,3	8,4	17,8	22,6	5	7
7	564	792	7,1	9,9	20,5	17,7	5	6
8	494	135	6,2	1,7	24,6	18,0	6	2
9	473	466	5,9	5,8	19,8	18,4	4	4
10	785	751	9,8	9,4	20,0	17,0	7	6
<b>Μέση τιμή</b>	<b>521,4</b>	<b>524,2</b>	<b>6,5</b>	<b>6,5</b>	<b>20,4</b>	<b>19,4</b>	<b>4,8</b>	<b>4,8</b>

Διαπιστώνεται ότι η μέση τιμή του μέγιστου φόρτου  $Q_{\max}$  μεταβλήθηκε κατά μόλις 0,5%. Η οριακή αυτή αύξηση σημαίνει ότι υπήρξε ομοιόμορφη κατανομή της πρόσθετης ζήτησης μεταξύ των στάσεων. Ταυτόχρονα, ο χρόνος  $T_n$  μειώθηκε ελαφρώς (κατά 7%). Το αποτέλεσμα είναι να μην απαιτούνται επιπλέον οχήματα για το σενάριο DEMAND+20.

Συνεχίζοντας με τους υπόλοιπους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης, διαπιστώνεται ότι, λόγω της δομής του δικτύου, η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση αυξήθηκε κατά σχεδόν 600% σε σχέση με το βασικό σενάριο. Αντίθετα, ο μέσος χρόνος διαδρομής παρουσιάζεται ελάχιστα μειωμένος κατά 3,21%. Σημαντική μείωση παρουσιάζουν οι ρύποι, οι οποίοι ελαττώθηκαν κατά 27,99%. Η μείωση αυτή μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη τεσσάρων γραμμών με ηλεκτρικά λεωφορεία (γραμμές 1, 2, 3 και 4), οι οποίες αντιστοιχούν στο 42% των πραγματοποιούμενων οχηματοχιλιομέτρων.

Η δυνατότητα χρησιμοποίησης ηλεκτρικών λεωφορείων σε τέσσερις γραμμές οφείλεται στην αποτελεσματική χρησιμοποίηση 2 σταθμών επαναφόρτισης, των 21 και 40. Ο 21 εξυπηρετεί τη γραμμή 1, ενώ ο 40 εξυπηρετεί τις υπόλοιπες τρεις.

Τέλος, ενώ το σύνολο των οχημάτων παραμένει σταθερό, σημειώνεται αύξηση κατά 81,82% περίπου του πλήθους των ηλεκτρικών οχημάτων, ενώ το αντίστοιχο πλήθος των συμβατικών οχημάτων μειώνεται κατά 24,32%. Ωστόσο, ο στόλος εξακολουθεί να αποτελείται σε μεγαλύτερο ποσοστό (58,33%) από συμβατικά λεωφορεία.

Για άλλη μία φορά, ο μόνος περιορισμός ο οποίος παραβιάζεται είναι ο περιορισμός #5 περί αλληλουχίας των στάσεων, ο οποίος επιβαρύνει την αντικειμενική συνάρτηση με πρόσθεση 1,7 μονάδων.



### 7.6.3 DEMAND-10: Μείωση της ζήτησης κατά 10%

Στο εναλλακτικό σενάριο DEMAND-10 η ωριαία ζήτηση των 10000 μετακινήσεων ελαττώνεται κατά 10%. Αντίστοιχα με το σενάριο DEMAND+10, πολλαπλασιάζοντας κάθε όρο του μητρώου  $d$  επί το μειωτικό συντελεστή 0,9 και στρογγυλοποιώντας προς τον πλησιέστερο ακέραιο, το τελικό άθροισμα των μετακινούμενων δεν προκύπτει ακριβώς ίσο με 9000, όπως θα ίσχυε για μείωση ακριβώς ίση με 10% στις μετακινήσεις, αλλά ίσο με 9332 μετακινήσεις, το οποίο και διατηρείται χάριν απλότητας.

Παρά το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της επίλυσης θα εξαρτώνται από τα τελικά **TOTALNETWORK** και **G**, σε γενικές γραμμές αναμένεται μείωση των συνολικών απαιτούμενων οχημάτων.

Ο Πίνακας 7.11 καταγράφει τα αποτελέσματα της επίλυσης του DEMAND-10.

Πίνακας 7.11 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων DEMAND-10 και Βασικού.

		ΒΑΣΙΚΟ DEMAND-10 Ποσοστιαία μεταβολή		
ΓΕΝΙΚΑ	Τιμή διευρυμένης αντικειμενικής συνάρτησης	1,46	1,78	21,92%
	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,36	0,38	5,56%
	Σύνολο ποινών	1,1	1,4	27,27%
ΟΡΟΙ	Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	210	474	125,71%
	Μέσος χρόνος διαδρομής (λεπτά)	28	27,5	-1,79%
	Ρύποι (g)	378,46	341,59	-9,74%
	Σταθμοί επαναφόρτισης	1	1	0,00%
	Συμβατικά οχήματα	37	34	-8,11%
	Ηλεκτρικά οχήματα	11	10	-9,09%
ΠΟΙΝΕΣ	Περιορισμός 1 (Διέλευση ηλεκτρικών)	0	0	-
	Περιορισμός 2 (Μήκος)	0,25	0	-100,00%
	Περιορισμός 3 (Συχνότητα)	0	0	-
	Περιορισμός 4 (Στόλος)	0	0	-
	Περιορισμός 5 (Αλληλουχία στάσεων)	0,85	1,4	64,71%
	Περιορισμός 6 (Ίδιες στάσεις)	0	0	-

Όπως προέκυψε, η συνολικά η βέλτιστη λύση παρουσιάζεται επιδεινωμένη σε σχέση με εκείνη του βασικού σεναρίου: Η αθροιστική τιμή  $\sum W_i Z_{i,norm} + \sum P_i$  αυξήθηκε κατά 21,92%, ενώ η ίδια η αντικειμενική συνάρτηση έφτασε το 0,38, επομένως αυξήθηκε κατά 5,56%. Τέλος, επιβλήθηκαν 27,27% περισσότερες μονάδες ποινής, οι οποίες και οφείλονται στην παραβίαση του περιορισμού #5.

Τα συνολικά απαιτούμενα οχήματα εν τέλει πράγματι μειώθηκαν, καθώς απαιτούνται 44 λεωφορεία, έναντι 48 του βασικού σεναρίου. Η μείωση αυτή, όμως, δεν οφείλεται μόνο στη συνολική μείωση της ζήτησης, αλλά και στην αύξηση – όχι μόνο ως ποσοστού της συνολικής αλλά και κατ' απόλυτη τιμή – της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης. Συγκεκριμένα, η μη

εξυπηρετούμενη ζήτηση έφτασε τους 474 επιβάτες, δηλαδή το 5% της συνολικής. Επομένως, το δίκτυο εξυπηρετεί 8858 επιβάτες, σε αντίθεση με τους 9790 της βασικής λύσης. Οι 8858 εξυπηρετούμενοι επιβάτες αποτελούν το 94,92% της συνολικής ζήτησης.

Ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή ο μέσος χρόνος διαδρομής, παρουσιάζει αμελητέα μείωση της τάξης του 1,79% στο εναλλακτικό σενάριο DEMAND-10. Η μείωση αυτή μπορεί εν μέρει να αποδοθεί στη μείωση του μέσου μήκους γραμμών από 3,9 σε 3,58 km. Περισσότερο, όμως, οφείλεται στην ήπια κατά μέσο όρο μείωση του χρόνου που απαιτείται για τη μετακίνηση μεταξύ ζευγών Προέλευσης – Προορισμού με υψηλούς επιβατικούς φόρτους.

Ελαττωμένη κατά 9,74% παρουσιάζεται στο σενάριο DEMAND-10 και η εκπομπή ρύπων. Όπως και στο βασικό σενάριο, έτσι και στο DEMAND-10 χρησιμοποιείται μόνο ένας σταθμός επαναφόρτισης – εκείνος του κόμβου #40 – ο οποίος εξυπηρετεί τις γραμμές #2 και #3. Σε αυτές αντιστοιχεί το 24,4% των συνολικών οχηματοχιλιομέτρων. Η βελτίωση οφείλεται στη μείωση των οχηματοχιλιομέτρων συμβατικών λεωφορείων από 378 σε 342.

Το πλήθος των συμβατικών οχημάτων παρουσιάζει μείωση από 37 σε 34, ενώ των ηλεκτρικών από 11 σε 10. Η μεταβολή στην ποσοστιαία σύνθεση του στόλου παραμένει αμελητέα: Το ποσοστό των συμβατικών οχημάτων στο DEMAND-10 ισούται με 77,27%, ενώ των ηλεκτρικών με 22,73%, έναντι 77,08% και 22,92% αντιστοίχως στο βασικό σενάριο.

#### 7.6.4 DEMAND-20: Μείωση της ωριαίας ζήτησης κατά 20%

Για το σενάριο αυτό κάθε όρος του μητρώου  $d$  πολλαπλασιάζεται επί το μειωτικό συντελεστή 0,80. Λόγω των στρογγυλοποιήσεων, προκύπτει συνολική ωριαία ζήτηση ίση με 7992 μετακινήσεις.

Όπως και στην περίπτωση του σεναρίου DEMAND-10, το βασικό αναμενόμενο αποτέλεσμα είναι η μείωση του απαιτούμενου αριθμού οχημάτων. Ο Πίνακας 7.12 αναγράφει τα αποτελέσματα της επίλυσης του σεναρίου DEMAND-20:

Πίνακας 7.12 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων DEMAND-20 και Βασικού.

		ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND-20	Ποσοστιαία μεταβολή
ΓΕΝΙΚΑ	Τιμή διευρυμένης αντικειμενικής συνάρτησης	1,46	0,6	-58,90%
	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,36	0,35	-2,78%
	Σύνολο ποινών	1,1	0,25	-77,27%
ΟΡΟΙ	Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	210	608	189,52%
	Μέσος χρόνος διαδρομής (λεπτά)	28	27,1	-3,21%
	Ρύποι (g)	378,46	215,26	-43,12%
	Σταθμοί επαναφόρτισης	1	2	100,00%
	Συμβατικά οχήματα	37	23	-37,84%
	Ηλεκτρικά οχήματα	11	17	54,55%
ΠΟΙΝΕΣ	Περιορισμός 1 (Διέλευση ηλεκτρικών)	0	0	-
	Περιορισμός 2 (Μήκος)	0,25	0	-100,00%
	Περιορισμός 3 (Συχνότητα)	0	0	-
	Περιορισμός 4 (Στόλος)	0	0	-
	Περιορισμός 5 (Αλληλουχία στάσεων)	0,85	0,25	-70,59%
	Περιορισμός 6 (Ιδίες στάσεις)	0	0	-

Η διευρυμένη αντικειμενική συνάρτηση προκύπτει σημαντικά βελτιωμένη, με τιμή μικρότερη κατά 58,90% από εκείνη του βασικού σεναρίου: Η τιμή της αντικειμενικής μειώθηκε κατά 2,78%, και οι επιβαλλόμενες ποινές κατά 77,27%.

Όπως αναμενόταν, τα συνολικά οχήματα μειώθηκαν κατά περίπου 17% σε σχέση με το βασικό σενάριο (από 48 σε 40), κυρίως λόγω της μείωσης της εξυπηρετούμενης ζήτησης, η οποία ισούται με 7384 επιβάτες, δηλαδή με το 92,39% της συνολικής. Παρά το γεγονός ότι τα τελικά δίκτυα των δύο λύσεων δεν είναι όμοια, είναι εμφανής η επίδραση της μείωσης αυτής στο μέγιστο φόρτο  $Q_{\max}$  των γραμμών, του οποίου η μέση τιμή ισούται με 521 επιβάτες στο βασικό σενάριο και με μόλις 421 επιβάτες στο DEMAND-20. Συγχρόνως, η αντίστοιχη μέση διάρκεια απλής διαδρομής από την αφετηρία μέχρι το τέρμα παρουσιάζει ήπια μείωση από 20,4 σε 19,6 λεπτά. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζει αναλυτικά ο Πίνακας 7.13. Το αποτέλεσμα είναι η απαίτηση μικρότερου αριθμού λεωφορείων.

Πίνακας 7.13 Οι τιμές των  $Q_{max}$ ,  $f_n$ ,  $T_n$  και  $V_n$  στα σενάρια Βασικό και DEMAND-20.

# ΓΡΑΜΜΗΣ	$Q_{max}$		$f_n$		$T_n$		$V_n$	
	ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND-20	ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND-20	ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND-20	ΒΑΣΙΚΟ	DEMAND-20
1	309	228	3,9	2,9	26,5	18,4	4	2
2	800	606	10,0	7,6	24,0	22,5	8	6
3	403	269	5,0	3,4	17,7	17,6	3	2
4	199	172	2,5	2,2	17,6	17,6	2	2
5	523	444	6,5	5,6	16,0	17,4	4	4
6	664	782	8,3	9,8	17,8	26,2	5	9
7	564	486	7,1	6,1	20,5	19,6	5	4
8	494	171	6,2	2,1	24,6	19,4	6	2
9	473	375	5,9	4,7	19,8	19,8	4	4
10	785	673	9,8	8,4	20,0	17,8	7	5
<b>Μέση τιμή</b>	521,4	420,6	6,5	5,3	20,4	19,6	4,8	4

Η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση παρουσιάζει αύξηση κατά 189,52% σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Ακόμα μεγαλύτερη από την αύξηση της απόλυτης τιμής της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης είναι η αύξηση του ποσοστού της επί της συνολικής. Συγκεκριμένα, το ποσοστό της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης αυξήθηκε από 2,10% σε 7,61%. Η μεταβολή αυτή αποδίδεται στη μορφολογία του δικτύου, η οποία με τη σειρά της επηρεάζεται από την τυχαιότητα που ούτως ή άλλως εμπεριέχεται στο γενετικό αλγόριθμο.

Ο μέσος χρόνος διαδρομής εξακολουθεί να μην παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή, καθώς μειώθηκε κατά μόλις 3,21% σε σχέση με τον αρχικό.

Η μάζα του εκπεμπόμενου  $NO_x$ , αντίθετα, παρουσιάζει σημαντική μείωση, σε ποσοστό 43,12% σε σχέση με το βασικό σενάριο. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στη μείωση των οχηματοχιλιομέτρων που αντιστοιχούν σε συμβατικά οχήματα και αύξηση εκείνων που αντιστοιχούν σε ηλεκτρικά. Συγκεκριμένα, τα πραγματοποιούμενα οχηματοχιλιόμετρα ηλεκτρικών λεωφορείων αγγίζουν το 47% των συνολικών. Το υψηλό αυτό ποσοστό είναι αποτέλεσμα της αποδοτικής χρησιμοποίησης ενός επιπλέον σταθμού επαναφόρτισης: Συγκεκριμένα, ο σταθμός 40 εξυπηρετεί τις γραμμές 2 και 3, ενώ ο σταθμός 49 εξυπηρετεί τη γραμμή 6.

Επομένως, τα απαιτούμενα ηλεκτρικά οχήματα αυξάνονται από 11 σε 17, ενώ τα συμβατικά, με δεδομένη τη μείωση του συνολικού στόλου, μειώνονται από 37 σε 23.

#### 7.6.5 SPEED22: Αύξηση της μέσης ταχύτητας κίνησης σε 22 km/h

Στο εναλλακτικό σενάριο SPEED22 η μέση ταχύτητα κίνησης των λεωφορείων αυξάνεται σε 22 km/h (από 15 km/h στο βασικό σενάριο).

Η μέση ταχύτητα επηρεάζει δύο βασικές εσωτερικές μεταβλητές του προβλήματος:

(α) Το χρόνο μετακίνησης από στάση σε στάση. Ομοιόμορφη αύξηση της μέσης ταχύτητας  $U_{ij}$  αναμένεται να προκαλέσει μείωση του χρόνου κίνησης μεταξύ των στάσεων και, κατ' επέκταση, μείωση του μέσου χρόνου μετακίνησης ανά επιβάτη. Σημειώνεται ότι, παρ' όλο που ο χρόνος και η μέση ταχύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη σε ένα δεδομένο οδικό τμήμα μήκους  $L_{ij}$ , δεν αναμένεται ο νέος μέσος χρόνος μετακίνησης  $t_2$  να ισούται με το χρόνο μετακίνησης  $t_1$  του βασικού σεναρίου πολλαπλασιασμένο με έναν (αυξητικό, σε περίπτωση αύξησης της ταχύτητας) συντελεστή  $\frac{U_2}{U_1}$ . Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στο γεγονός ότι το νέο δίκτυο που θα προκύψει δε θα είναι ίδιο με το αρχικό. Επιπλέον, η μέγιστη τιμή του μέσου χρόνου μετακίνησης, η οποία χρησιμοποιείται κατά την κανονικοποίηση, θεωρείται ίση με 40 λεπτά. Τέλος, η μείωση του χρόνου κίνησης αναμένεται να ελαττώσει το αναγκαίο πλήθος οχημάτων.

(β) Το συντελεστή εκπομπής EF. Η ταχύτητα κίνησης ενός οχήματος επηρεάζει τη μάζα των ρυπογόνων ουσιών οι οποίες εκπέμπονται κατά την κατανάλωση του καυσίμου. Διαφοροποιώντας τη μέση ταχύτητα κίνησης σε 22 km/h, προκύπτει μείωση του συντελεστή εκπομπής  $NO_x$  από 1 σε 0,6 g/km/όχημα. Επομένως, η μάζα των εκπεμπόμενων ρύπων αναμένεται μειωμένη στην τελική λύση – και πάλι, όμως, χωρίς να ισχύει ακριβής αναλογία στη μείωση, δεδομένου ότι οι πίνακες **TOTALNETWORK** και **G** θα διαφέρουν από εκείνους του βασικού σεναρίου.

Από την επίλυση του εναλλακτικού σεναρίου SPEED22 προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα (Πίνακας 7.14):

Πίνακας 7.14 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων SPEED22 και Βασικού.

		ΒΑΣΙΚΟ	SPEED 22	Ποσοστιαία μεταβολή
ΓΕΝΙΚΑ	Τιμή διευρυμένης αντικειμενικής συνάρτησης	1,46	1,88	28,77%
	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,36	0,43	19,44%
	Σύνολο ποινών	1,1	1,45	31,82%
ΟΡΟΙ	Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	210	16	-92,38%
	Μέσος χρόνος διαδρομής (λεπτά)	28	24,2	-13,57%
	Ρύποι (g)	378,46	243,20	-35,74%
	Σταθμοί επαναφόρτισης	1	3	200,00%
	Συμβατικά οχήματα	37	29	-21,62%
	Ηλεκτρικά οχήματα	11	14	27,27%
ΠΟΙΝΕΣ	Περιορισμός 1 (Διέλευση ηλεκτρικών)	0	0	-
	Περιορισμός 2 (Μήκος)	0,25	0	-100,00%
	Περιορισμός 3 (Συχνότητα)	0	0	-
	Περιορισμός 4 (Στόλος)	0	0	-
	Περιορισμός 5 (Αλληλουχία στάσεων)	0,85	1,45	70,59%
	Περιορισμός 6 (Ίδιες στάσεις)	0	0	-

Η τιμή του αθροίσματος  $\sum W_i Z_i + \sum P_i$  προέκυψε κατά 28,77% υψηλότερη σε σχέση με το βασικό σενάριο: Αφενός η αντικειμενική συνάρτηση έχει αυξηθεί κατά 19,44%, αφετέρου οι ποινές που προστέθηκαν υπερβαίνουν εκείνες του βασικού σεναρίου κατά 31,82%.

Από την ανάλυση της αντικειμενικής συνάρτησης, παρατηρείται βελτίωση στους τέσσερις από τους έξι όρους: Συγκεκριμένα, οι όροι 1, 2, 3 και 5 παρουσιάζουν μείωση, ενώ οι όροι 4 και 6 αύξηση.

Εξετάζοντας τον πρώτο όρο της αντικειμενικής συνάρτησης, διαπιστώνεται ότι η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση παρουσιάζει μείωση κατά 92,38% σε σχέση με το βασικό σενάριο. Εξυπηρετούνται, δηλαδή, 9984 επιβάτες – 194 περισσότεροι, δηλαδή, από τους 9790 του βασικού σεναρίου.

Ο μέσος χρόνος μετακίνησης πράγματι παρουσιάζεται μειωμένος, όπως ήταν το αναμενόμενο. Η μείωση φτάνει το 13,57% σε σχέση με εκείνον του βασικού σεναρίου. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, μια μείωση της τάξης του 47% - όσο, δηλαδή, αυξήθηκε η ταχύτητα – δε θα ήταν ρεαλιστική, καθώς ο μέσος χρόνος διαδρομής εξαρτάται άμεσα από τη μορφολογία του δικτύου που προκύπτει σε κάθε περίπτωση ως βέλτιστη λύση.

Όπως επίσης αναμενόταν, η αύξηση της ταχύτητας επέφερε μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, η οποία οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη μείωση του συντελεστή εκπομπής EF. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι 4 από τις συνολικά 10 γραμμές του δικτύου χρησιμοποιούν ηλεκτρικά λεωφορεία – συγκεκριμένα οι γραμμές 2, 3, 5 και 6. Σε αυτές τις τέσσερις αντιστοιχεί το 32,27% των πραγματοποιούμενων οχηματοχιλιομέτρων του δικτύου (193 από τα 598).

Επιπρόσθετα, στο συγκεκριμένο δίκτυο χρησιμοποιούνται τρεις σταθμοί: Ο 44, στα άκρα των γραμμών 2 και 5, ο 40, στο άκρο της γραμμής 3 και ο 49, στο άκρο της γραμμής 6. Επομένως, η χωροθέτησή τους είναι αποτελεσματική: Αφενός το 1/3 των πραγματοποιούμενων οχηματοχιλιομέτρων αντιστοιχεί σε ηλεκτρικά λεωφορεία, αφετέρου οι σταθμοί αξιοποιούνται αποτελεσματικά, αφού ορισμένοι εξυπηρετούν περισσότερες από μία γραμμές ο καθένας.

Κατά συνέπεια, η αυξημένη χρησιμοποίηση ηλεκτρικών λεωφορείων ανεβάζει το απαιτούμενο πλήθος τους σε 14 και συγχρόνως μειώνει τα συμβατικά λεωφορεία σε 29.

Το άθροισμα συμβατικών και ηλεκτρικών λεωφορείων ισούται με 43 οχήματα – δηλαδή 10,42% λιγότερα από εκείνα του βασικού σεναρίου. Η μείωση αυτή μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση της μέσης ταχύτητας κίνησης των λεωφορείων (υπενθυμίζεται ότι το απαιτούμενο πλήθος οχημάτων ανά γραμμή δίνεται από τη σχέση  $V_n = \frac{2 * f_n * T_n}{60}$  και ότι αυξημένη ταχύτητα συνεπάγεται μειωμένο χρόνο  $T_n$ ). Είναι χαρακτηριστικό ότι η αυξημένη ταχύτητα οδηγεί σε μείωση των απαιτούμενων οχημάτων παρά την – έστω και μικρή (1,98%) – αύξηση της εξυπηρετούμενης ζήτησης.

### 7.6.6 SPEED10: Μείωση της μέσης ταχύτητας κίνησης σε 10 km/h

Όπως εξηγήθηκε στο υποκεφάλαιο 7.6.5, η μέση ταχύτητα κίνησης επηρεάζει αφενός το χρόνο που απαιτείται για τη μεταφορά των επιβατών από στάση σε στάση και αφετέρου τη μάζα των ρύπων που εκπέμπονται κατά την καύση. Επομένως, τα αναμενόμενα αποτελέσματα της μείωσης της ταχύτητας κίνησης των λεωφορείων σε 10 km/h είναι η αύξηση του μέσου χρόνου μετακίνησης ανά επιβάτη, η αύξηση του πλήθους των απαιτούμενων οχημάτων και η αύξηση των εκπεμπόμενων ρύπων.

Η μείωση της μέσης ταχύτητας κίνησης προκαλεί δύο βασικές αλλαγές στις παραμέτρους επίλυσης:

- (α) Αύξηση του μέγιστου μέσου χρόνου κίνησης σε 70 λεπτά.
- (β) Αύξηση του συντελεστή εκπομπής ρύπων σε 2 g/km/όχημα.

Ο Πίνακας 7.15 περιέχει τα αποτελέσματα της επίλυσης του εναλλακτικού σεναρίου SPEED10:

Πίνακας 7.15 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων SPEED10 και Βασικού.

		<b>ΒΑΣΙΚΟ</b>	<b>SPEED10</b>	<b>Ποσοστιαία μεταβολή</b>
<b>ΓΕΝΙΚΑ</b>	Τιμή διευρυμένης αντικειμενικής συνάρτησης	1,46	1,09	-25,34%
	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,36	0,34	-5,56%
	Σύνολο ποινών	1,1	0,75	-31,82%
<b>ΠΟΙΝΕΣ</b>	Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	210	598	184,76%
	Μέσος χρόνος διαδρομής (λεπτά)	28	33,3	18,93%
	Ρύποι (g)	378,46	590,33	55,98%
	Σταθμοί επαναφόρτισης	1	1	0,00%
	Συμβατικά οχήματα	37	38	2,70%
	Ηλεκτρικά οχήματα	11	24	118,18%
<b>ΠΟΙΝΕΣ</b>	Περιορισμός 1 (Διέλευση ηλεκτρικών)	0	0	-
	Περιορισμός 2 (Μήκος)	0,25	0	-100,00%
	Περιορισμός 3 (Συχνότητα)	0	0	-
	Περιορισμός 4 (Στόλος)	0	0	-
	Περιορισμός 5 (Αλληλουχία στάσεων)	0,85	0,75	-11,76%
	Περιορισμός 6 (Ιδίες στάσεις)	0	0	-

Συνολικά, η τιμή του αθροίσματος αντικειμενικής συνάρτησης και ποινών παρουσιάζεται βελτιωμένη κατά 25,34% σε σχέση με εκείνη του βασικού σεναρίου. Η μείωση αυτή οφείλεται εν μέρει στη μείωση κατά 5,56% της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά, κυρίως, στην κατά 31,82% μείωση των επιβαλλόμενων ποινών.

Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι και οι έξι μη κανονικοποιημένοι όροι λαμβάνουν υψηλότερη τιμή στο εναλλακτικό σενάριο SPEED10, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης

παρουσιάζεται μειωμένη. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται εάν εξεταστούν οι κανονικοποιημένοι όροι των τελικών λύσεων για κάθε ένα από τα δύο σενάρια (Πίνακας 7.16):

Πίνακας 7.16 Κανονικοποιημένοι όροι αντικειμενικής συνάρτησης στα σενάρια Βασικό και SPEED10.

	ΒΑΣΙΚΟ	SPEED10	Ποσοστιαία μεταβολή
Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	0,02	0,06	184,76%
Μέσος χρόνος διαδρομής (λεπτά)	0,53	0,48	<b>-9,44%</b>
Ρύποι (g)	0,75	0,61	<b>-19,03%</b>
Σταθμοί επαναφόρτισης	0,20	0,20	0,00%
Συμβατικά οχήματα	0,74	0,76	2,70%
Ηλεκτρικά οχήματα	0,22	0,48	118,18%

Είναι σαφές ότι η μείωση στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης οφείλεται στη μείωση της τιμής των κανονικοποιημένων όρων 2 και 3. Παρατηρείται ότι στους όρους 1, 4, 5 και 6 η ποσοστιαία μεταβολή σε κανονικοποιημένους και μη όρους είναι ακριβώς η ίδια, ενώ Ωστόσο διαφέρει στους όρους 2 και 3. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ο παρονομαστής  $Z_{i,max}$  με τον οποίο διαιρείται κάθε όρος για να κανονικοποιηθεί δεν είναι ο ίδιος και στα δύο σενάρια: Ο μέγιστος χρόνος διαδρομής στο SPEED10 αυξήθηκε σε 70 λεπτά (από 53 στο βασικό σενάριο), ενώ η μέγιστη ποσότητα εκπεμπόμενων ρύπων, όπως εξηγήθηκε στο υποκεφάλαιο 4.3, μεταβάλλεται σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου ώστε να εκφράζει το ποσοστό των πραγματικά εκπεμπόμενων ρύπων ως προς τη μάζα των ρύπων που θα απελευθερώνονταν στην ατμόσφαιρα, εάν στο δίκτυο χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά συμβατικά λεωφορεία.

Εξετάζοντας, στη συνέχεια, τους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι εμφανές ότι οι αρχικές εκτιμήσεις περί αύξησης του μέσου χρόνου μετακίνησης, των απαιτούμενων οχημάτων και των εκπεμπόμενων ρύπων αποδείχθηκαν σωστές:

Ο μέσος χρόνος διαδρομής αυξήθηκε κατά 18,93%, ενώ οι εκπεμπόμενοι ρύποι σχεδόν διπλασιάστηκαν. Η αύξηση της εκπεμπόμενης μάζας  $NO_x$  οφείλεται στην αύξηση του συντελεστή EF λόγω μείωσης της ταχύτητας. Παρά το γεγονός ότι στο εναλλακτικό σενάριο SPEED10 πραγματοποιούνται 22% λιγότερα συμβατικά οχηματοχιλιόμετρα από όσα στο βασικό, η μάζα των εκπεμπόμενων ρύπων παρουσιάζεται αυξημένη κατά 50% περίπου.

Όπως επίσης αναμενόταν, αυξήθηκε το αναγκαίο μέγεθος στόλου: Το εναλλακτικό σενάριο SPEED10 απαιτεί 62 οχήματα, έναντι 48 του βασικού. Αξιοσημείωτο είναι ότι η αύξηση αυτή παρατηρείται παρά τη μείωση της εξυπηρετούμενης ζήτησης κατά 388 επιβάτες. Το εγγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ότι η μέση ταχύτητα κίνησης επηρεάζει περισσότερο το πλήθος των απαιτούμενων οχημάτων από ό,τι η ζήτηση.

Τα ηλεκτρικά λεωφορεία αυξήθηκαν πολύ περισσότερο από τα συμβατικά (κατά 118,18% έναντι 2,70%) χωρίς να μεταβληθούν οι σταθμοί επαναφόρτισης. Επομένως, η αξιοποίησή



τους στο σενάριο SPEED10 είναι αποδοτικότερη. Πράγματι, ενώ στη βασική λύση ένας σταθμός εξυπηρετεί 3 γραμμές, στη λύση του SPEED10 εξυπηρετεί 4 γραμμές (τις 2, 3, 4 και 5).

Τέλος, όπως ακριβώς και στα προηγούμενα εναλλακτικά σενάρια, ο μόνος περιορισμός που παραβιάζεται είναι ο #5 (προσθήκη ποινής 0,75 μονάδων λόγων της ύπαρξης στο δίκτυο των ζευγών διαδοχικών στάσεων 47-14, 14-12, 40-45, 8-9, 24-27).

#### 7.6.7 WALK400: Μείωση του $L_{W,E}$ σε 400 m.

Στο βασικό σενάριο θεωρήθηκε ότι οι επιβάτες είναι διατεθειμένοι να μεταβούν είτε με τα πόδια είτε χρησιμοποιώντας άλλο μεταφορικό μέσο σε μια στάση διαφορετική από εκείνη της προέλευσης ή του προορισμού τους προκειμένου να εξυπηρετηθούν από το δίκτυο, αρκεί η απόσταση μεταξύ της αρχικής και της νέας στάσης να μην υπερβαίνει το 1 km. Στο εναλλακτικό σενάριο WALK400 η τιμή του  $L_{W,E}$  μειώνεται σε 400 m. Μειωμένη τιμή της μεταβλητής  $L_{W,E}$  είναι ρεαλιστική σε περιπτώσεις κατά τις οποίες είναι δεδομένη η απροθυμία των μετακινούμενων να μεταβούν σε άλλο κόμβο πέρα από εκείνον της προέλευσης ή του προορισμού τους λόγω μεγάλης ηλικίας, απουσίας εναλλακτικών μέσων μεταφοράς κ.λπ..

Το βασικό αναμενόμενο αποτέλεσμα σχετίζεται, όπως είναι προφανές, με τη μη εξυπηρετούμενη ζήτηση, καθώς η ελάττωση του  $L_{W,E}$  αναμένεται να προκαλέσει αύξηση του πρώτου όρου της αντικειμενικής συνάρτησης.

Ο Πίνακας 7.17 συνοψίζει τα αποτελέσματα της επίλυσης:

Πίνακας 7.17 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων WALK400 και Βασικού..

		ΒΑΣΙΚΟ	WALK400	Ποσοστιαία μεταβολή
ΓΕΝΙΚΑ	Τιμή διευρυμένης αντικειμενικής συνάρτησης	1,46	1,5	2,74%
	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,36	0,4	11,11%
	Σύνολο ποινών	1,1	1,1	0,00%
ΟΡΟΙ	Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	210	1258	499,05%
	Μέσος χρόνος διαδρομής (λεπτά)	28	26,8	-4,29%
	Ρύποι (g)	378,46	280,55	-25,87%
	Σταθμοί επαναφόρτισης	1	2	100,00%
	Συμβατικά οχήματα	37	30	-18,92%
	Ηλεκτρικά οχήματα	11	16	45,45%
ΠΟΙΝΕΣ	Περιορισμός 1 (Διέλευση ηλεκτρικών)	0	0	-
	Περιορισμός 2 (Μήκος)	0,25	0	-100,00%
	Περιορισμός 3 (Συχνότητα)	0	0	-
	Περιορισμός 4 (Στόλος)	0	0	-
	Περιορισμός 5 (Αλληλουχία στάσεων)	0,85	1,1	29,41%
	Περιορισμός 6 (Ίδιες στάσεις)	0	0	-

Παρατηρείται ότι τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ελάχιστα αυξήθηκε στο WALK400. Ακριβέστερα, το άθροισμα  $\sum W_i Z_{i,norm} + \sum P_i$  αυξήθηκε κατά 2,74%, η τιμή της αντικειμενικής κατά 11,11% και το σύνολο των επιβαλλόμενων ποινών παρέμεινε αμετάβλητο.

Αναλύοντας όρο προς όρο την αντικειμενική συνάρτηση, διαπιστώνεται κατ' αρχάς ότι η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση στη βέλτιστη λύση του WALK400 είναι 5 φορές υψηλότερη από εκείνη του βασικού σεναρίου και αντιστοιχεί σε ποσοστό 13% της συνολικής. Η αύξηση αυτή, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, ήταν αναμενόμενη.

Αύξηση παρουσίασε επίσης το πλήθος των απαιτούμενων σταθμών επαναφόρτισης, καθώς η λύση του WALK400 απαιτεί δύο σταθμούς – τους 40 και 49 – έναντι ενός – του 40 αποκλειστικά – του βασικού σεναρίου. Συγκεκριμένα, οι σταθμοί 40 και 49 εξυπηρετούν τις παραγόμενες γραμμές #2, #3 και #6, στις οποίες αντιστοιχεί το 38% περίπου των συνολικών οχηματοχιλιομέτρων του δικτύου (169 από τα συνολικά 450). Το αποτέλεσμα είναι αύξηση – κατά 45,45% – και των απαιτούμενων ηλεκτρικών λεωφορείων.

Η αυξημένη χρήση ηλεκτρικών λεωφορείων οδηγεί, όπως είναι λογικό, στον περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων. Πράγματι, το λεωφορειακό δίκτυο του WALK400 απελευθερώνει 25,87% λιγότερα γραμμάρια NO<sub>x</sub> κατά τη διάρκεια μιας ώρας λειτουργίας του.

Αναμενόμενη είναι, επίσης, δεδομένου του συνδυασμού μείωσης επιβατικής κίνησης και αύξησης ηλεκτρικών λεωφορείων, η μείωση των απαιτούμενων συμβατικών οχημάτων. Πράγματι, η βέλτιστη λύση του WALK400 απαιτεί 30 συμβατικά οχήματα, δηλαδή 19% λιγότερα σε σχέση με το βασικό σενάριο.

Τέλος, ο μέσος χρόνος διαδρομής ανά επιβάτη μειώθηκε και πάλι χωρίς θεαματική αλλαγή: Στην τελική λύση του WALK400 έλαβε την τιμή 26,8 λεπτά, μόλις 4,29%, δηλαδή, μικρότερη από το βασικό σενάριο.

Καλώντας τη συνάρτηση **F\_PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST\_BEFORE** στο τέλος των επαναλήψεων, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα (Πίνακας 7.18):

Πίνακας 7.18 Ανάλυση της εξυπηρετούμενης και μη ζήτησης με βάση τα αποτελέσματα της συνάρτησης F\_PASS\_ASSIGN\_2\_FASTEST\_BEFORE.

		Βασικό	WALK400	Ποσοστιαία μεταβολή
Εξυπηρετούνται		9790	8742	-10,70%
Εξυπηρετούνται χωρίς ενδιάμεσο κόμβο	Επιβάτες	6648	6924	4,15%
	Ζεύγη	1648	1648	0,00%
Εξυπηρετούνται με ενδιάμεσο κόμβο		3142	1818	-42,14%
Δεν εξυπηρετούνται καθόλου		210	1258	499,05%

Διαπιστώνεται ότι, όπως είχε υποτεθεί αρχικά, η μείωση της εξυπηρετούμενης ζήτησης οφείλεται σε μείωση των επιβατών οι οποίοι μπορούν να εξυπηρετηθούν χωρίς να χρησιμοποιήσουν ενδιάμεσο κόμβο. Παρά το γεγονός ότι αυτού του είδους η ζήτηση παρουσιάζεται αυξημένη κατά 4,15% στο WALK400, το πλήθος των επιβατών που χρησιμοποιούν ενδιάμεσο κόμβο έχει μειωθεί κατά 42,14%. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης από 210 σε 1258 μετακινήσεις.

#### 7.6.8 WALK700: Μείωση του $L_{W,E}$ σε 700 m

Με μείωση του  $L_{W,E}$  σε 700 m, η εξυπηρετούμενη ζήτηση αναμένεται μειωμένη σε σχέση με το βασικό σενάριο, αλλά αυξημένη σε σχέση με το σενάριο WALK400. Ο Πίνακας 7.19 περιέχει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση:

Πίνακας 7.19 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων WALK700 και Βασικού.

		ΒΑΣΙΚΟ	WALK700	Ποσοστιαία μεταβολή
ΓΕΝΙΚΑ	Τιμή διευρυμένης αντικειμενικής συνάρτησης	1,46	2,21	51,37%
	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,36	0,35	-2,78%
	Σύνολο ποινών	1,1	1,86	69,09%
ΟΡΟΙ	Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	210	498	137,14%
	Μέσος χρόνος διαδρομής (λεπτά)	28	28,4	1,43%
	Ρύποι (g)	378,46	289,36	-23,54%
	Σταθμοί επαναφόρτισης	1	2	100,00%
	Συμβατικά οχήματα	37	29	-21,62%
	Ηλεκτρικά οχήματα	11	21	90,91%
ΠΟΙΝΕΣ	Περιορισμός 1 (Διέλευση ηλεκτρικών)	0	0	-
	Περιορισμός 2 (Μήκος)	0,25	0	-100,00%
	Περιορισμός 3 (Συχνότητα)	0	0	-
	Περιορισμός 4 (Στόλος)	0	0	-
	Περιορισμός 5 (Αλληλουχία στάσεων)	0,85	1,86	118,82%
	Περιορισμός 6 (Ίδιες στάσεις)	0	0	-

Η τιμή του αθροίσματος  $\sum W_i Z_{i,norm} + \sum P_i$  παρουσιάζει αύξηση κατά 51,37% σε σχέση με το βασικό σενάριο. Παρόλο που η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μειώθηκε κατά 2,78%, οι επιβαλλόμενες ποινές, οι οποίες οφείλονται σε παραβίαση του περιορισμού #5, αυξήθηκαν κατά 69,09%.

Όπως αναμενόταν, η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση αυξήθηκε σε σχέση με το βασικό σενάριο, και μάλιστα υπερδιπλασιάστηκε (αύξηση κατά 137,14%). Παραμένει, όμως, χαμηλότερη κατά 60,41% από την αντίστοιχη του WALK400, η οποία ισούται με 1258 επιβάτες.

Ο μέσος χρόνος διαδρομής παραμένει για ένα ακόμα σενάριο σχετικά σταθερός, αφού αυξήθηκε μόλις κατά 1,43% σε σχέση με το βασικό σενάριο. Αντίθετα, ελαττώθηκαν

αισθητά – κατά 23,54% – οι εκπεμπόμενοι ρύποι. Η μείωση αυτή οφείλεται στη μείωση των πραγματοποιούμενων οχηματοχιλιομέτρων συμβατικών οχημάτων από 378 σε 289. Επιπλέον, σε ένα βαθμό συμβάλλει και η χρησιμοποίηση ενός επιπλέον σταθμού επαναφόρτισης: Του σταθμού #49, ο οποίος εξυπηρετεί τη γραμμή 6. Ο άλλος χρησιμοποιούμενος σταθμός είναι ο σταθμός #40, ο οποίος εξυπηρετεί τις γραμμές 2 και 3. Είναι χαρακτηριστικό ότι, εάν χρησιμοποιούνται συμβατικά οχήματα, η γραμμή 6, με μήκος 3,2 km και συχνότητα περίπου 8,3 οχήματα/ώρα, θα ευθυνόταν για την εκπομπή 217% περισσότερης μάζας NO<sub>x</sub> από όση θα αντιστοιχούσε στις γραμμές 2 και 3 αθροιστικά.

Παρά το γεγονός ότι η εξυπηρετούμενη ζήτηση μειώνεται, τα απαιτούμενα οχήματα παρουσιάζουν αύξηση, καθώς η λύση του WALK700 απαιτεί 50 οχήματα, έναντι 48 του βασικού σεναρίου. Η αιτία αυτής της απόκλισης εντοπίζεται στη μορφή του δικτύου και στον καταμερισμό της ζήτησης. Ο Πίνακας 7.20 περιέχει αναλυτικά τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το απαιτούμενο πλήθος των οχημάτων ανά γραμμή:

Πίνακας 7.20 Οι τιμές των  $Q_{max}$ ,  $f_n$ ,  $T_n$  και  $V_n$  στα σενάρια Βασικό και WALK700.

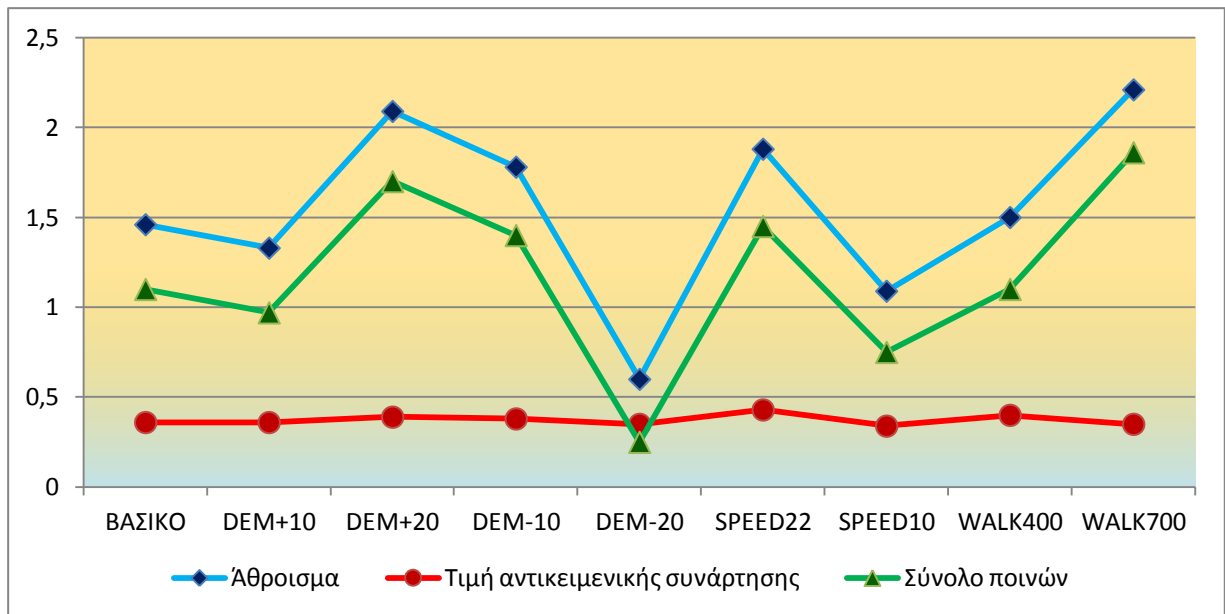
# ΓΡΑΜΜΗΣ	$Q_{max}$		$f_n$		$T_n$		$V_n$	
	ΒΑΣΙΚΟ	WALK700	ΒΑΣΙΚΟ	WALK700	ΒΑΣΙΚΟ	WALK700	ΒΑΣΙΚΟ	WALK700
1	309	156	3,9	2,0	26,5	17,0	4	2
2	800	790	10,0	9,9	24,0	23,6	8	8
3	403	342	5,0	4,3	17,7	17,5	3	3
4	199	376	2,5	4,7	17,6	18,1	2	3
5	523	555	6,5	6,9	16,0	17,0	4	4
6	664	788	8,3	9,9	17,8	30,4	5	10
7	564	511	7,1	6,4	20,5	23,8	5	6
8	494	512	6,2	6,4	24,6	19,2	6	5
9	473	254	5,9	3,2	19,8	18,4	4	2
10	785	621	9,8	7,8	20,0	25,2	7	7
<b>Μέση τιμή</b>	521,4	490,5	6,5	6,1	20,4	21	4,8	5,0

Παρατηρείται ότι η αύξηση του πλήθους των οχημάτων στο σενάριο WALK700 οφείλεται στη δημιουργία γραμμών ελαφρώς μεγαλύτερου μέσου μήκους σε σχέση με το βασικό σενάριο.

Τέλος, η χρησιμοποίηση του επιπλέον σταθμού επαναφόρτισης οδηγεί σε αύξηση του αριθμού των απαιτούμενων ηλεκτρικών λεωφορείων κατά 90,91%, ενώ τα συμβατικά οχήματα παρουσιάζουν μείωση κατά 21,62%.

#### 7.6.9 Συνολικά αποτελέσματα

Στο Σχήμα 7.3 αναπαρίστανται γραφικά οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε εναλλακτικό σενάριο.



Σχήμα 7.3 Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε σενάριο επίλυσης.

Ο Πίνακας 7.21 παρουσιάζει τις τιμές των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης, των ποινών και άλλων χαρακτηριστικών μεγεθών για κάθε σενάριο χωριστά.

Πίνακας 7.21 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίων.

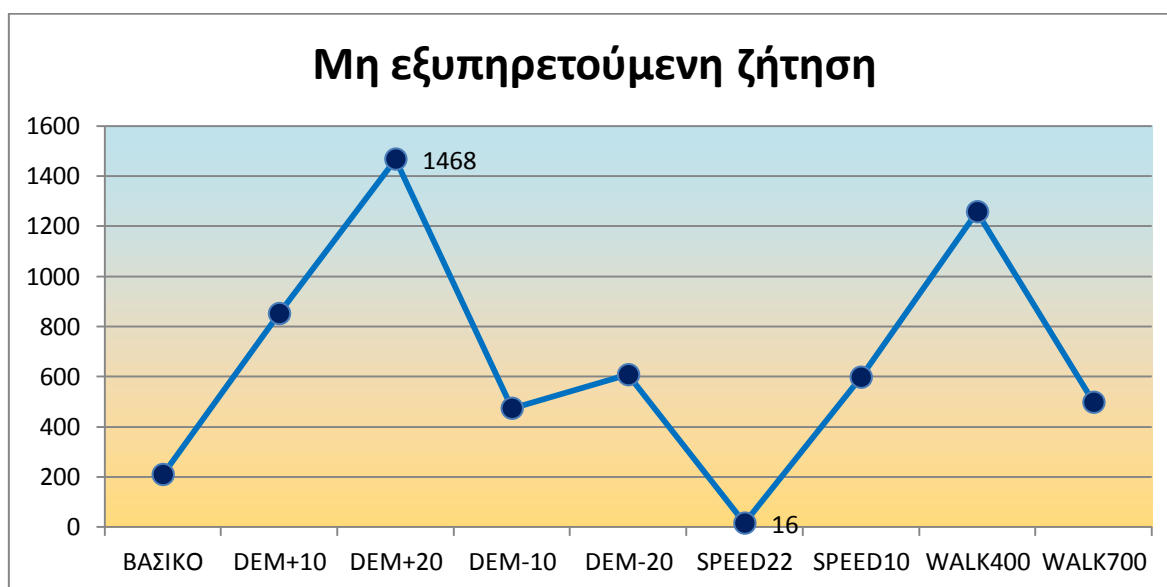
		Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6	Σ7	Σ8	
		ΒΑΣΙΚΟ	DEM+10	DEM+20	DEM-10	DEM-20	SPEED22	SPEED10	WALK400	WALK700
ΓΕΝΙΚΑ	Τιμή διευρυμένης αντικειμενικής συνάρτησης	1,46	1,33	2,09	1,78	0,6	1,88	1,09	1,5	2,21
	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,36	0,36	0,39	0,38	0,35	0,43	0,34	0,4	0,35
	Σύνολο ποινών	1,1	0,97	1,7	1,4	0,25	1,45	0,75	1,1	1,86
ΠΑΡΑ-ΜΕΤΡΟΙ	Συντελεστής εκπομπής EF	1	1	1	1	1	0,6	2	1	1
	Μέση ταχύτητα λεωφορείου (km/h)	15	15	15	15	15	22	10	15	15
	Μέσος μέγιστος χρόνος διαδρομής (λεπτά/επιβάτη)	53	53	53	53	53	40	70	53	53
ΟΡΟΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ	Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	210	852	1468	474	608	16	598	1258	498
	Μέσος χρόνος διαδρομής (λεπτά)	28	27	27,1	27,5	27,1	24,2	33,3	26,8	28,4
	Ρύποι (g)	378,46	268,04	272,53	341,59	215,26	243,20	590,33	280,55	289,36
	Σταθμοί επαναφόρτισης	1	2	2	1	2	3	1	2	2
	Συμβατικά οχήματα	37	28	28	34	23	29	38	30	29
	Ηλεκτρικά οχήματα	11	20	20	10	17	14	24	16	21
ΠΟΙΝΕΣ	Περιορισμός 1 (Διέλευση ηλεκτρικών)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Περιορισμός 2 (Μήκος)	0,25	0,02	0	0	0	0	0	0	0
	Περιορισμός 3 (Συχνότητα)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Περιορισμός 4 (Στόλος)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Περιορισμός 5 (Αλληλουχία στάσεων)	0,85	0,95	1,7	1,4	0,25	1,45	0,75	1,1	1,86

Περιορισμός 6 (Ιδιες στάσεις)		0	0	0	0	0	0	0	0	0
ΑΛΛΑ ΜΕΓΕΘΗ	Συνολική ζήτηση	10000	10952	12008	9332	7992	10000	10000	10000	10000
	Εξυπηρετούμενη ζήτηση	9790	10100	10540	8858	7384	9984	9402	8742	9502
	Ποσοστό μη εξυπηρετούμενης ζήτησης	2,10%	7,78%	12,23%	5,08%	7,61%	0,16%	5,98%	12,58%	4,98%
	Ποσοστό εξυπηρετούμενης ζήτησης	97,90%	92,22%	87,77%	94,92%	92,39%	99,84%	94,02%	87,42%	95,02%
	Ζήτηση χωρίς επιπλέον βάδισμα	6648	5452	5446	4690	3850	8362	5424	6924	6814
	Ποσοστό ζήτησης χωρίς επιπλέον βάδισμα	67,91%	53,98%	51,67%	52,95%	52,14%	83,75%	57,69%	79,20%	71,71%
	Ζήτηση με επιπλέον βάδισμα	3142	4648	5094	4168	3534	1622	3978	1818	2688
	Ποσοστό ζήτησης με επιπλέον βάδισμα	32,09%	46,02%	48,33%	47,05%	47,86%	16,25%	42,31%	20,80%	28,29%
	Συνολικά απαιτούμενα οχήματα	48	48	48	44	40	43	62	46	50
	Ποσοστό συμβατικών οχημάτων	77,08%	58,33%	58,33%	77,27%	57,50%	67,44%	61,29%	65,22%	58,00%
	Ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων	22,92%	41,67%	41,67%	22,73%	42,50%	32,56%	38,71%	34,78%	42,00%
	Συνολικά οχηματοχιλιόμετρα	505,50	494,99	466,08	452,07	406,07	598,45	486,91	449,29	532,66
	Οχηματοχιλιόμετρα συμβατικών οχημάτων	378,46	268,04	272,53	341,59	215,26	405,33	295,16	280,55	289,36
	Οχηματοχιλιόμετρα ηλεκτρικών οχημάτων	127,04	226,95	193,55	110,48	190,81	193,12	191,74	168,74	243,30
	Ποσοστό συμβατικών οχηματοχιλιομέτρων	74,87%	54,15%	58,47%	75,56%	53,01%	67,73%	60,62%	62,44%	54,32%
	Ποσοστό ηλεκτρικών οχηματοχιλιομέτρων	25,13%	45,85%	41,53%	24,44%	46,99%	32,27%	39,38%	37,56%	45,68%

## 7.7 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών σε κάθε ένα από τα εναλλακτικά σενάρια που διαμορφώθηκαν, προκύπτουν τα εξής:

(α) Η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση εξαρτάται, κατά κύριο λόγο, από τη δομή του συγκοινωνιακού δικτύου το οποίο θα προκύψει στην τελική λύση, δηλαδή από το σύνολο των γραμμών που περιέχονται στο δίκτυο, το πλήθος των στάσεων που περιλαμβάνουν και τις στάσεις όπου είναι δυνατή η μετεπιβίβαση. Η δομή του δικτύου καθορίζει το σύνολο των εξυπηρετούμενων ζευγών. Το Σχήμα 7.4 απεικονίζει την τιμή της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης στην τελική λύση κάθε εναλλακτικού σεναρίου.



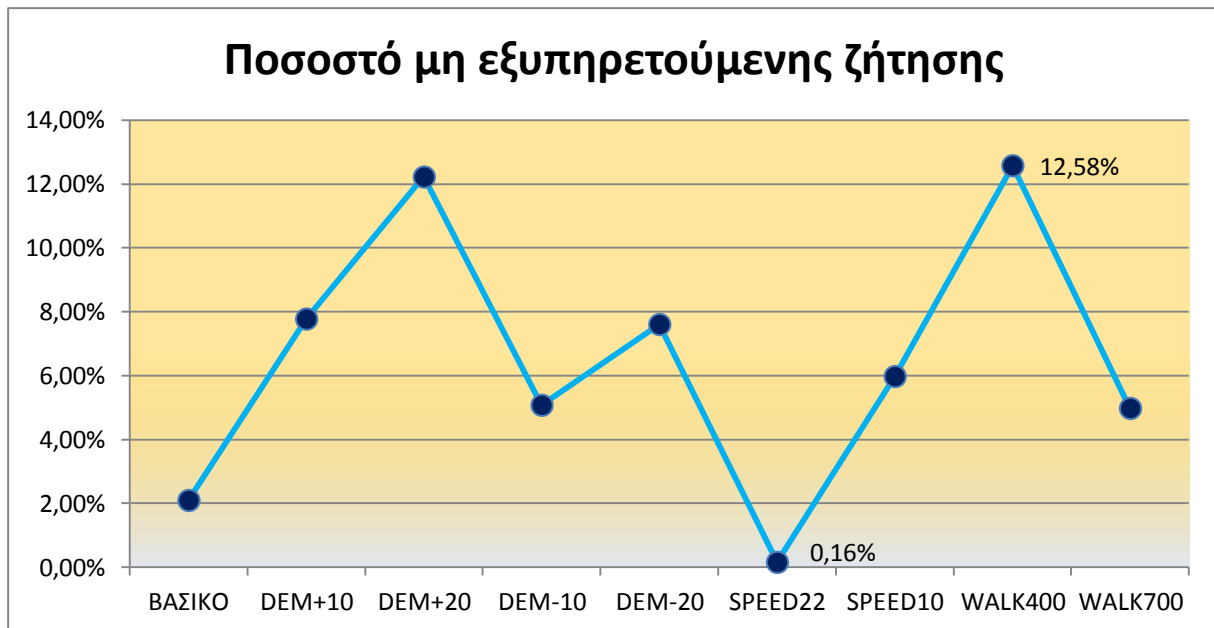
Σχήμα 7.4 Οι τιμές της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης για τα διάφορα σενάρια.

Με δεδομένη, επομένως, την εξάρτησή της από τη δομή του δικτύου, η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση μεταβάλλεται δυσανάλογα με τη συνολική ζήτηση. Όταν, για παράδειγμα, στο σενάριο DEMAND+10 αυξήθηκε η συνολική ζήτηση κατά 10%, η μη εξυπηρετούμενη αυξήθηκε κατά 305,7%. Αντίστοιχα, όταν στο σενάριο DEMAND-10 μειώθηκε η συνολική ζήτηση κατά 10%, η μη εξυπηρετούμενη αυξήθηκε και πάλι – συγκεκριμένα κατά 260%. Είναι γεγονός, ωστόσο, ότι η αύξηση της συνολικής ζήτησης αυξάνει τη μη εξυπηρετούμενη, όπως γίνεται αντιληπτό από τα σενάρια DEMAND+10 και DEMAND+20.

Η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση τείνει να μηδενιστεί στο σενάριο SPEED22, όπου φτάνει τους 16 επιβάτες, δηλαδή ποσοστό 0,16% επί της συνολικής ζήτησης.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση του ποσοστού της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης, το οποίο και αναπαρίσταται γραφικά στο Σχήμα 7.5:



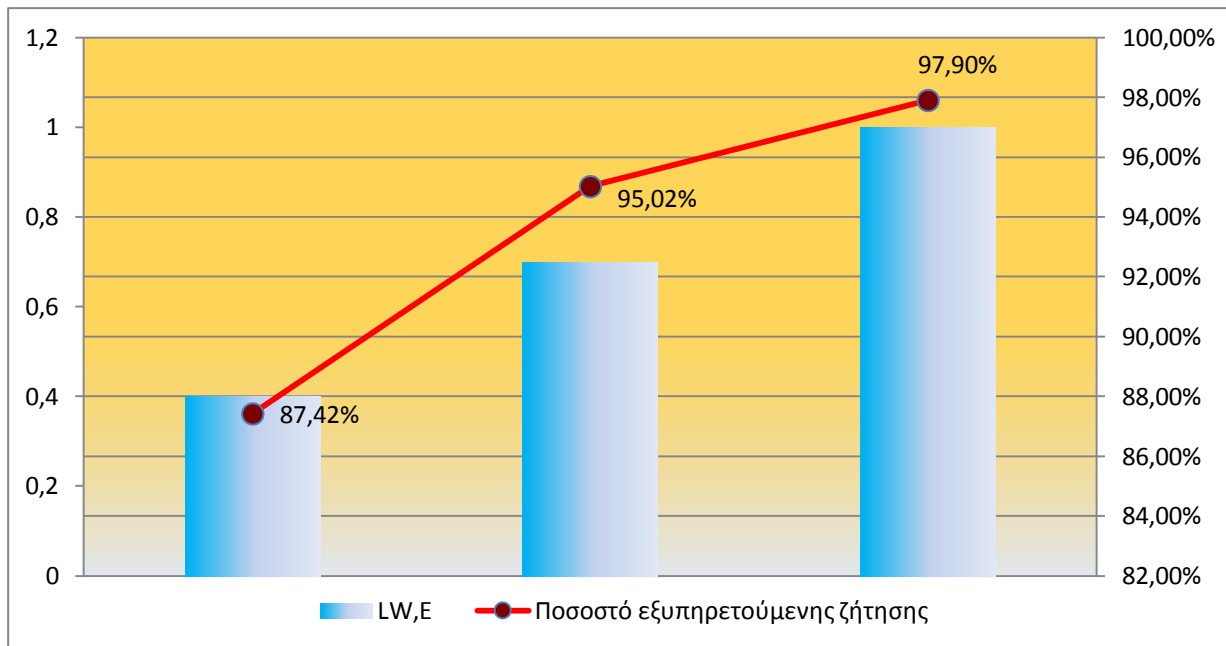


Σχήμα 7.5 Το ποσοστό μη εξυπηρετούμενης ζήτησης για κάθε σενάριο επίλυσης.

Το ποσοστό της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης κυμαίνεται σε κάθε περίπτωση από 0,16% έως 12,58% και μεταβάλλεται με παρόμοιο τρόπο με την απόλυτη τιμή της συνολικής ζήτησης. Επομένως, όσο αυξάνεται η συνολική ζήτηση, τόσο αυξάνεται το ποσοστό της το οποίο δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί και, κατά συνέπεια, ακόμα περισσότερο αυξάνεται το πλήθος των μετακινούμενων οι οποίοι τελικά δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν.

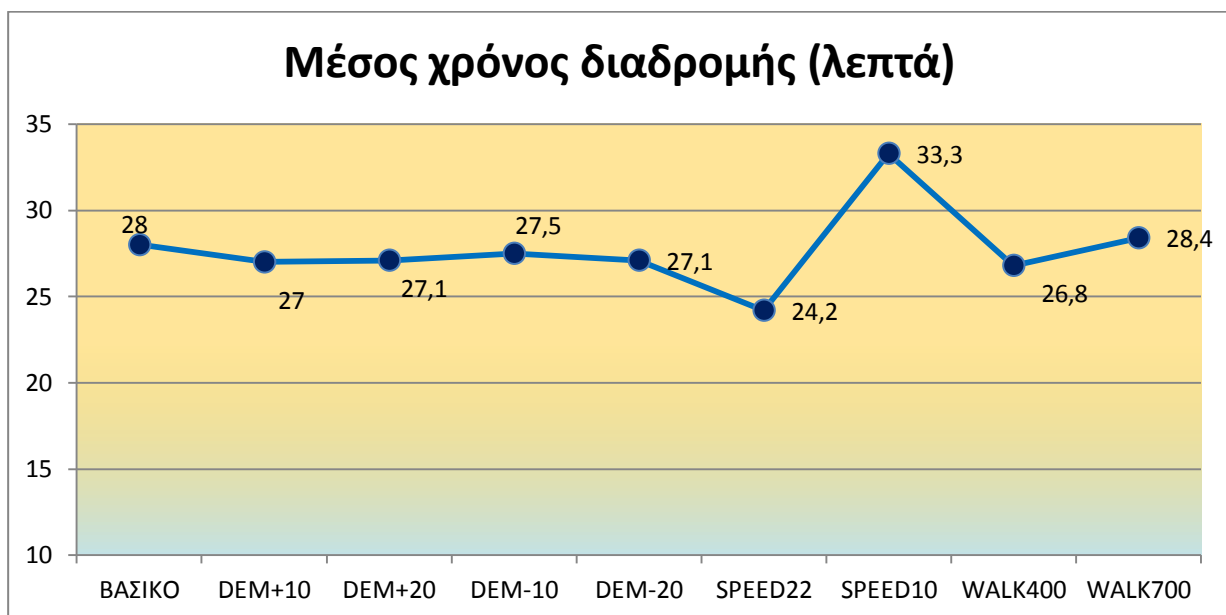
Η παράμετρος η οποία φαίνεται να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μη εξυπηρετούμενη ζήτηση είναι η  $L_{W,E}$ : Ενδεικτικά, όταν η τιμή της παραμέτρου μειώθηκε σε 700 m στο εναλλακτικό σενάριο WALK700, η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση αυξήθηκε κατά 137,14% σε σχέση με το βασικό σενάριο. Περαιτέρω μείωση της παραμέτρου σε 400 m οδήγησε σε μείωση της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης κατά 500% σε σχέση με το βασικό σενάριο. Είναι χαρακτηριστικό ότι το ποσοστό της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης στο σενάριο WALK400 υπερβαίνει εκείνο του DEMAND+20 (12,58% έναντι 12,23% αντιστοίχως).

Το Σχήμα 7.6 απεικονίζει γραφικά τη μεταβολή του ποσοστού της εξυπηρετούμενης ζήτησης συναρτήσει της παραμέτρου  $L_{W,E}$ : Είναι εμφανές ότι αύξηση στην τιμή της παραμέτρου προκαλεί αύξηση του ποσοστού αυτού.



Σχήμα 7.6 Το ποσοστό εξυπηρετούμενης ζήτησης σε συνάρτηση με την παράμετρο  $L_{W,E}$ .

(β) Ο μέσος χρόνος διαδρομής, ο οποίος γραφικά απεικονίζεται στο Σχήμα 7.7, δεν παρουσιάζει ευαισθησία στις μεταβολές της ζήτησης, καθώς στα σενάρια βασικό, DEMAND-20, DEMAND-10, DEMAND+10 και DEMAND+20 κυμαίνεται από 27,1 μέχρι 28 λεπτά.

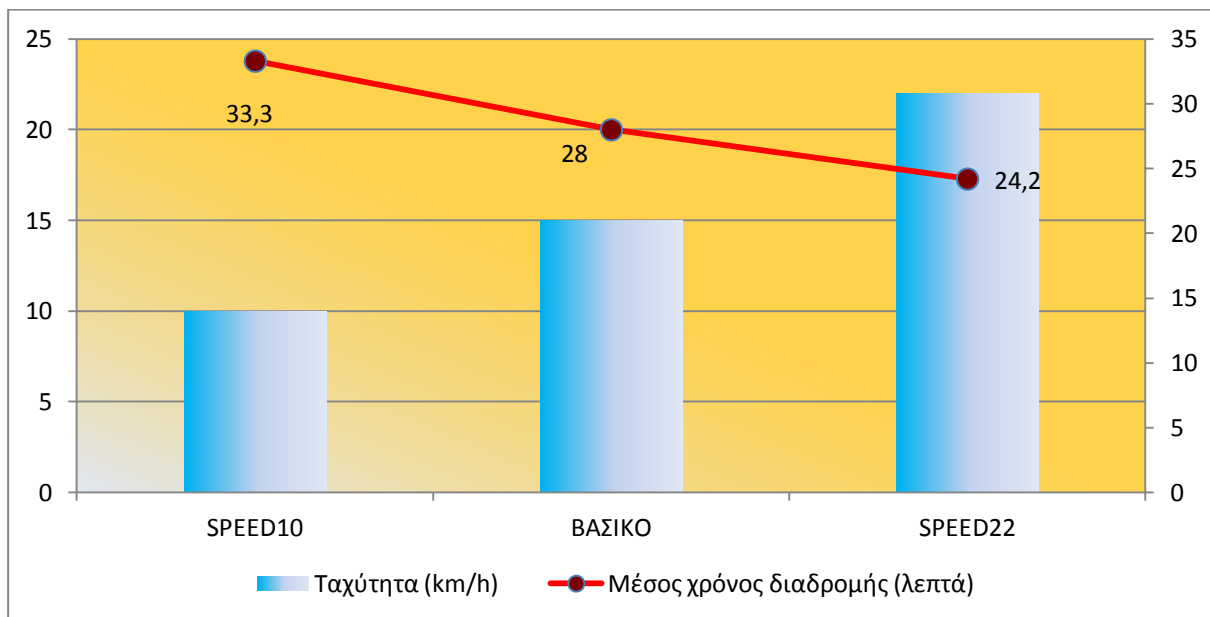


Σχήμα 7.7 Ο μέσος χρόνος διαδρομής για διάφορα σενάρια επίλυσης.

Όπως είναι λογικό, όταν αφενός η γενική μορφολογία του δικτύου – μέσες αποστάσεις στάσεων, μέσα μήκη γραμμών κ.λπ. – και αφετέρου η δομή της ζήτησης παραμένουν σε γενικές γραμμές σταθερά, ο μέσος χρόνος διαδρομής δεν παρουσιάζει αξιόλογες μεταβολές. Εξάλλου, κατά τη διαμόρφωση των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης, ο μέσος χρόνος διαδρομής θεωρήθηκε ανεξάρτητος από τη ζήτηση. Εάν είχαν ληφθεί

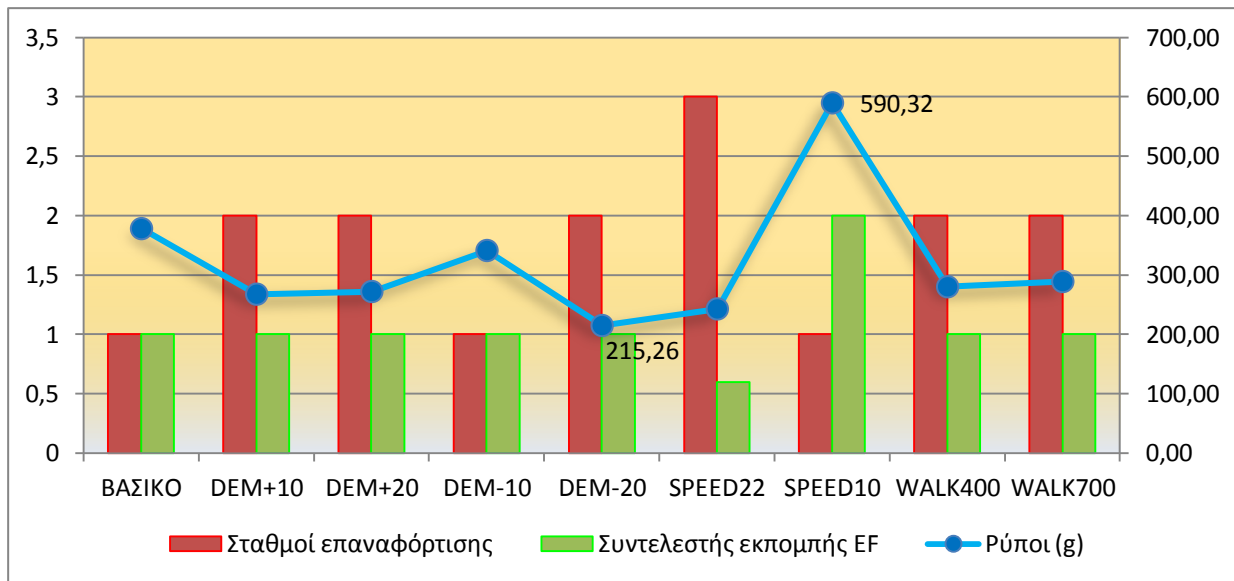
αναλυτικά υπόψη οι χρόνοι επιβίβασης και αποβίβασης, ενδεχόμενη αύξηση της ζήτησης θα σήμαινε αύξηση του χρόνου διαδρομής, η οποία μαθηματικά θα μπορούσε να εκφραστεί ως μείωση της μέσης ταχύτητας κίνησης των λεωφορείων. Με την παρούσα διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης, όμως, ο μέσος χρόνος διαδρομής δεν επηρεάζεται άμεσα από μεταβολές στην επιβατική ζήτηση.

Αντιθέτως, ο μέσος χρόνος διαδρομής είναι ευαίσθητος στη μεταβολή της μέσης ταχύτητας κίνησης των λεωφορείων: Στο εναλλακτικό σενάριο SPEED22, όπου η μέση ταχύτητα αυξάνεται σε 22 km/h, ο μέσος χρόνος διαδρομής μειώνεται κατά 13,57%, ενώ στο εναλλακτικό σενάριο SPEED10, όπου η μέση ταχύτητα μειώνεται σε 10 km/h, αυξάνεται κατά 18,93%. Η μεταβολή αυτή απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 7.8:



Σχήμα 7.8 Η μεταβολή του μέσου χρόνου διαδρομής ως προς την ταχύτητα.

(γ) Η μάζα του εκπεμπόμενου  $\text{NO}_x$  επηρεάζεται από το συντελεστή εκπομπής EF και από το πλήθος των χρησιμοποιούμενων σταθμών επαναφόρτισης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.9:



Σχήμα 7.9 Η σχέση των ρύπων με το πλήθος των σταθμών επαναφόρτισης και το συντελεστή εκπομπής EF για διάφορα εναλλακτικά σενάρια.

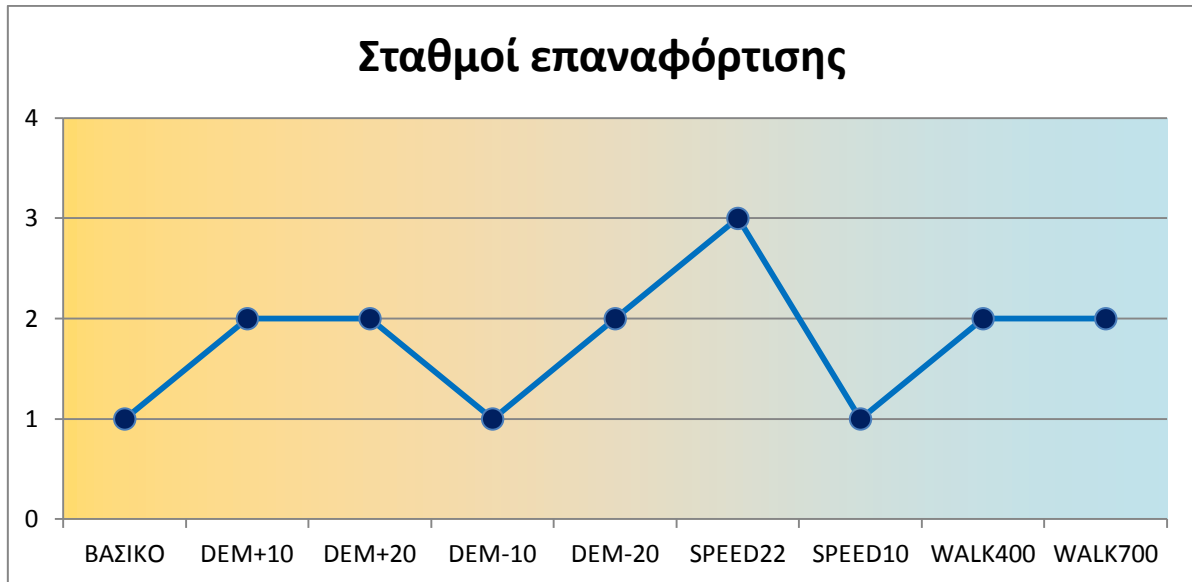
Ως γνωστόν, ο συντελεστής εκπομπής EF εξαρτάται από την ταχύτητα κίνησης των οχημάτων. Όταν, επομένως, στο σενάριο SPEED22 η ταχύτητα αυξάνεται σε 22 km/h, ο συντελεστής εκπομπής EF μειώνεται από 1 g/km/όχημα σε 0,6 g/km/όχημα και η μάζα εκπεμπόμενου NO<sub>x</sub> λαμβάνει την τιμή 243,20 g, δηλαδή τη δεύτερη χαμηλότερη της από όλα τα σενάρια. Αντίθετα, στο σενάριο SPEED10, η ταχύτητα μειώνεται σε 10 km/h, ο συντελεστής εκπομπής EF αυξάνεται σε 2 g/km/όχημα και η μάζα εκπεμπόμενου NO<sub>x</sub> λαμβάνει τη συνολικά υψηλότερη τιμή της από όλα τα σενάρια, ίση με 590,33 g. Η συνολικά χαμηλότερη τιμή των ρύπων λαμβάνεται στη λύση του σεναρίου DEM-20, όπου το 47% των οχηματοχιλιομέτρων αντιστοιχούν σε ηλεκτρικά λεωφορεία.

Επιπλέον, η μάζα των ρύπων εξαρτάται και από το πλήθος των χρησιμοποιούμενων σταθμών επαναφόρτισης. Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι αύξηση των χρησιμοποιούμενων σταθμών επαναφόρτισης συνεπάγεται μείωση των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων. Η μείωση αυτή προφανώς είναι αποτέλεσμα της αυξημένης χρησιμοποίησης ηλεκτρικών λεωφορείων και, κατ' επέκταση, της περιορισμένης χρήσης των συμβατικών.

Με βάση τα παραπάνω, είναι χαρακτηριστικό ότι, στο σενάριο SPEED10, ο συνδυασμός αυξημένου EF και χρησιμοποίησης ενός και μόνο σταθμού επαναφόρτισης οδηγεί σε ραγδαία αύξηση των εκπεμπόμενων ρύπων σε 590,33 g.

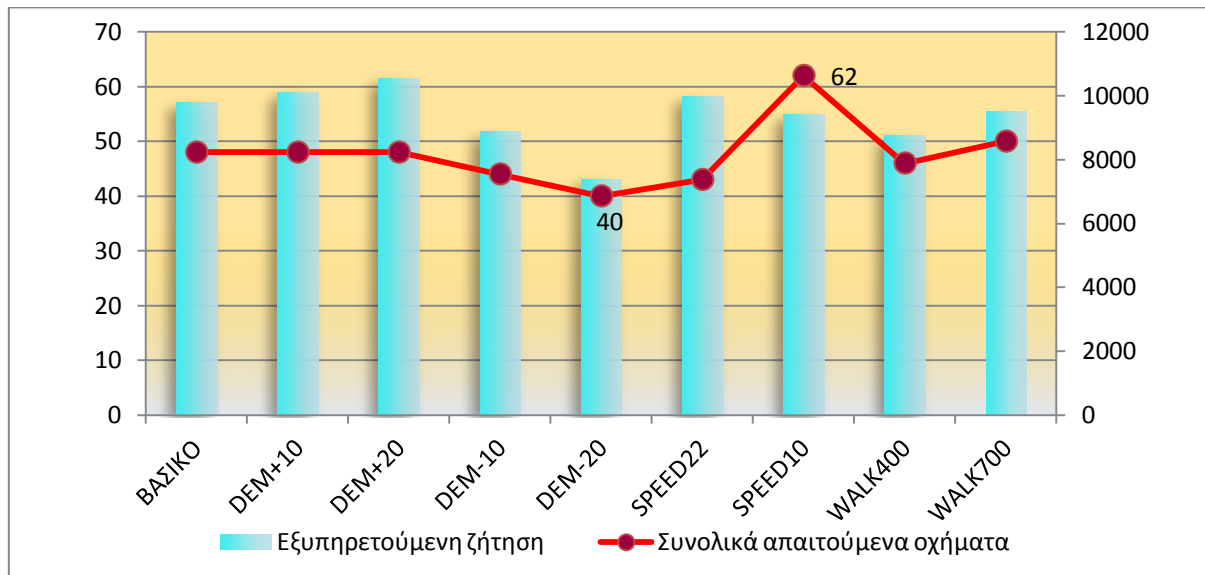
(δ) Στις λύσεις όλων των εναλλακτικών σεναρίων, το τελικό δίκτυο περιέχει από έναν μέχρι τρεις σταθμούς, όπως είναι εμφανές και από το γράφημα στο Σχήμα 7.10. Το πλήθος αυτό είναι λογικό, δεδομένου ότι ένα δίκτυο στο οποίο το κόστος κατασκευής των σταθμών εξισορροπείται από το περιβαλλοντικό όφελος είναι απίθανο να περιλαμβάνει 0 σταθμούς, καθώς σε αυτήν την περίπτωση θα ήταν αδύνατη η κυκλοφορία ηλεκτρικών λεωφορείων, ή υπερβολικά πολλούς σταθμούς, δεδομένου ότι με αποδοτική χρήση μικρότερου αριθμού

σταθμών είναι εφικτή η μείωση των εκπεμπόμενων NO<sub>x</sub> χωρίς υπέρμετρη αύξηση των εξόδων κατασκευής. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, το πλήθος των σταθμών επαναφόρτισης επηρεάζει το πλήθος των ηλεκτρικών οχηματοχιλιομέτρων που μπορούν να πραγματοποιηθούν και, κατ' επέκταση, τους εκπεμπόμενους ρύπους.



Σχήμα 7.10 Οι χρησιμοποιούμενοι σταθμοί φόρτισης σε κάθε σενάριο.

(ε) Το συνολικό πλήθος απαιτούμενων οχημάτων παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές της μέσης ταχύτητας κίνησης και μικρότερη ευαισθησία σε μεταβολές της ζήτησης, όπως διαπιστώνεται από τη μελέτη του ακόλουθου γραφήματος (Σχήμα 7.11):

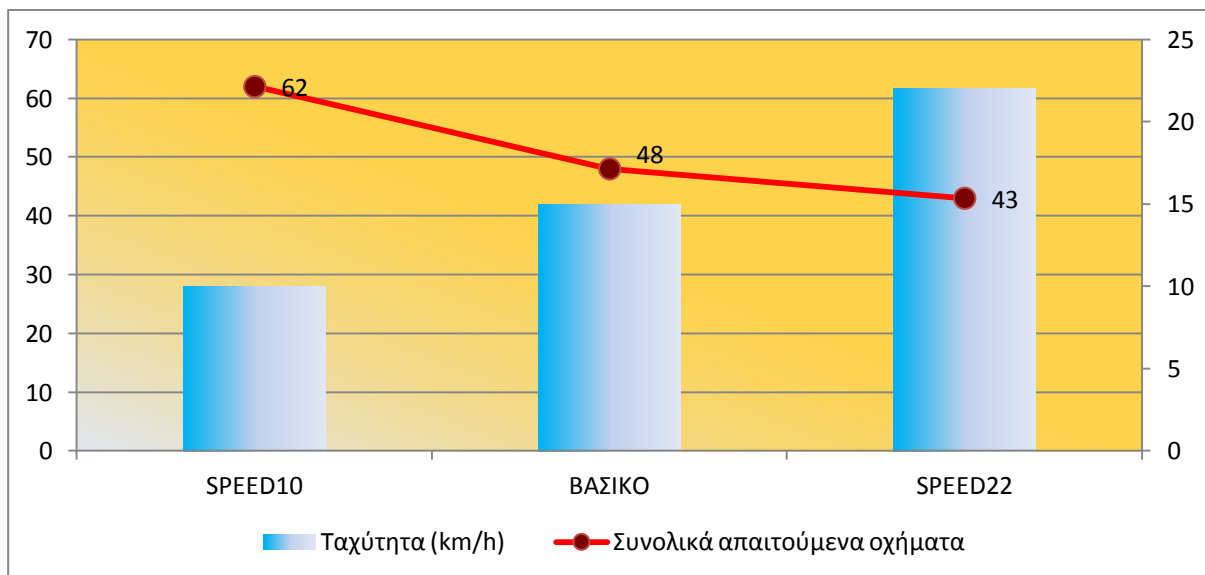


Σχήμα 7.11 Η εξυπηρετούμενη ζήτηση και τα συνολικά απαιτούμενα οχήματα για διάφορα εναλλακτικά σενάρια.

Η μεταβολή της εξυπηρετούμενης ζήτησης (και καμίας άλλης παραμέτρου) προκαλεί ήπιες μεταβολές στον αριθμό των συνολικών οχημάτων. Συγκεκριμένα, παρατηρείται σταδιακή

αύξηση του πλήθους των οχημάτων κατά τη διαδοχική μετάβαση από το σενάριο DEM-20 στο DEM-10 και έπειτα στο βασικό. Από εκεί και πέρα, παρά την αύξηση της εξυπηρετούμενης ζήτησης στα σενάρια DEM+10 και DEM+20, το πλήθος των οχημάτων παραμένει σταθερό (48). Ωστόσο, είναι γεγονός ότι, ενώ η συνολική ζήτηση αυξάνεται σημαντικά στα σενάρια αυτά, η εξυπηρετούμενη παρουσιάζει λιγότερο θεαματική αύξηση. Ενδεικτικά, ενώ στο σενάριο DEMAND+20 η συνολική ζήτηση αυξάνεται κατά 20,8% σε σχέση με το βασικό, η εξυπηρετούμενη αυξάνεται μόλις κατά 7,66%. Στο DEMAND+10, η εξυπηρετούμενη ζήτηση αυξάνεται κατά 3% σε σχέση με το βασικό σενάριο (από 9790 σε 10100), αλλά τα απαιτούμενα οχήματα παραμένουν τα ίδια ακριβώς (48). Στο DEMAND+20, η εξυπηρετούμενη ζήτηση αυξάνεται κατά 7,7%, αλλά και πάλι τα απαιτούμενα οχήματα είναι ακριβώς τα ίδια. Η μικρή αύξηση της ζήτησης, σε συνδυασμό με τη μορφή του νέου δικτύου, δεν είναι επαρκής ώστε να οδηγήσει σε απαίτηση υψηλότερου αριθμού λεωφορείων. Μπορεί να υποθεθεί ότι, κατά την επίλυση του προβλήματος, η μορφολογία του δημιουργούμενου δικτύου είναι τέτοια ώστε κατά την κατανομή της επιβατικής κίνησης να μη δημιουργούνται «αιχμές», δηλαδή τμήματα της γραμμής με έντονα αυξημένο μέγιστο επιβατικό φόρτο  $Q_{max}$ . Αντίστοιχα, στο DEMAND-10 η εξυπηρετούμενη ζήτηση μειώνεται κατά 12,4% (από 9790 σε 8576) και τα απαιτούμενα οχήματα κατά 12,5% (από 48 σε 42).

Αντίθετα, οι μεταβολές της ταχύτητας επηρεάζουν σημαντικά τον απαιτούμενο αριθμό λεωφορείων, όπως αποδεικνύει και το Σχήμα 7.12:

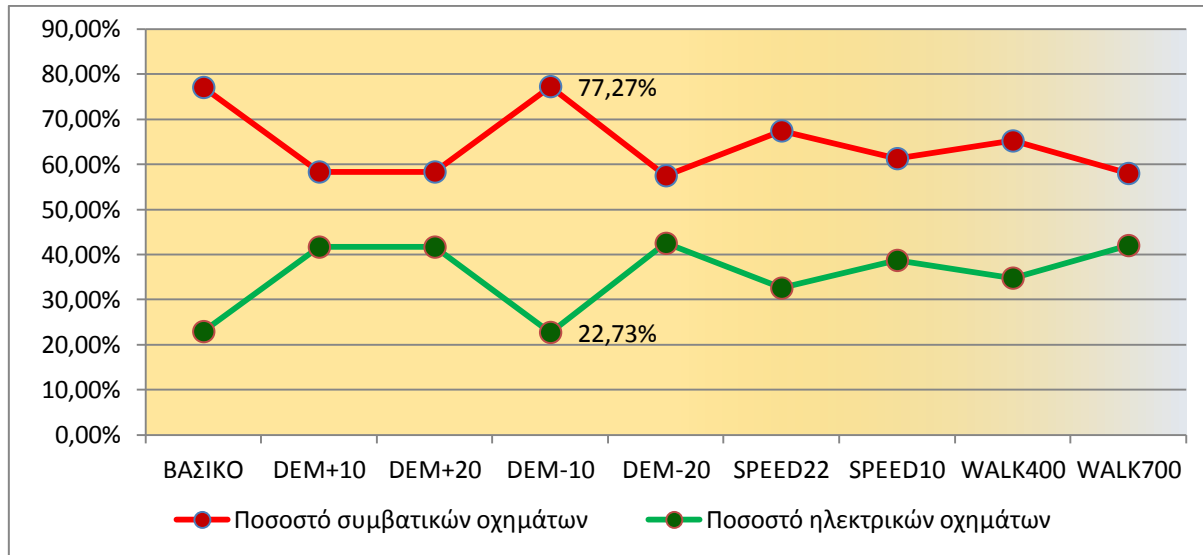


Σχήμα 7.12 Η μείωση των συνολικών απαιτούμενων οχημάτων με την αύξηση της ταχύτητας.

Ενδεικτικά, το σενάριο SPEED10 παρουσιάζει την πέμπτη υψηλότερη εξυπηρετούμενη ζήτηση αλλά απαιτεί τον υψηλότερο αριθμό οχημάτων (62). Εν συγκρίσει, για παράδειγμα, με το βασικό σενάριο, το δίκτυο του SPEED10 εξυπηρετεί 3,96% λιγότερους επιβάτες, αλλά απαιτεί 29,17% περισσότερα οχήματα. Αντίστοιχα, το σενάριο SPEED22 παρουσιάζει την τρίτη υψηλότερη εξυπηρετούμενη ζήτηση, αλλά απαιτεί το μικρότερο αριθμό οχημάτων

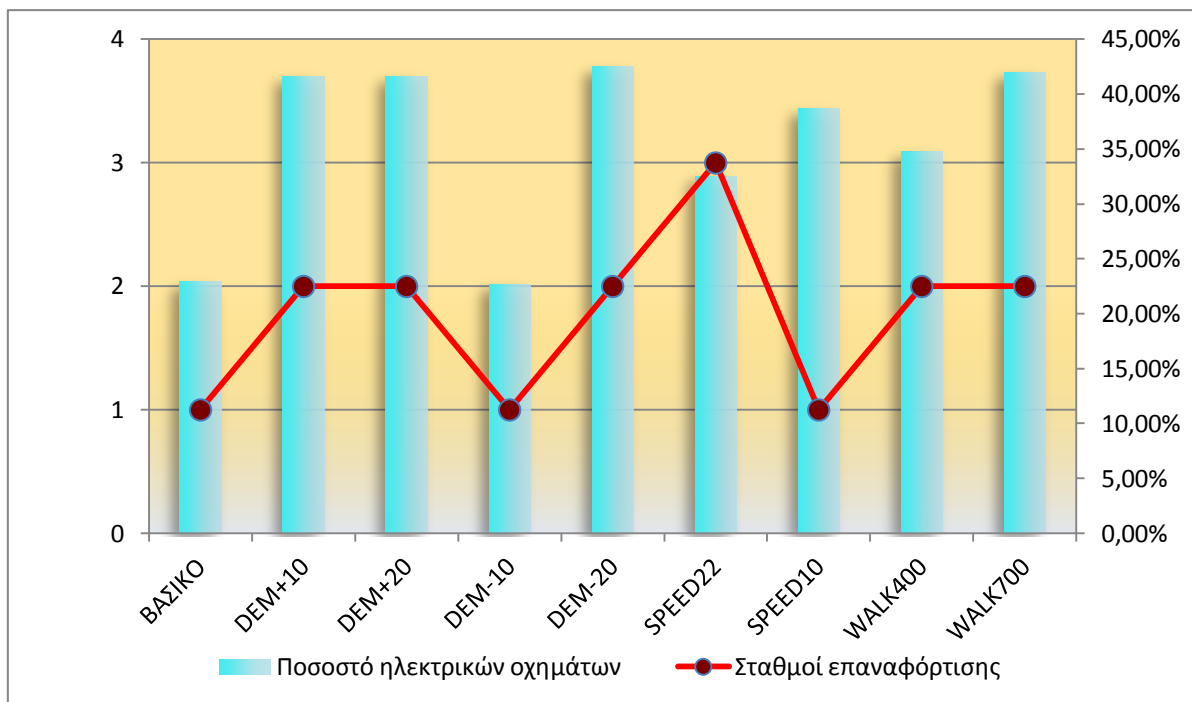
(43). Επομένως, η μείωση της ταχύτητας από 22 km/h σε 10 km/h (κατά 54,5% περίπου) επέφερε αύξηση των συνολικών απαιτούμενων οχημάτων κατά 44,19%.

(στ) Σε όλες τις τελικές λύσεις, το ποσοστό συμβατικών οχημάτων υπερβαίνει το ποσοστό των ηλεκτρικών οχημάτων (Σχήμα 7.13):



Σχήμα 7.13 Τα ποσοστά συμβατικών και ηλεκτρικών οχημάτων για κάθε εναλλακτικό σενάριο.

Είναι γεγονός ότι σε κανένα σενάριο δεν απαιτούνται περισσότερα συμβατικά οχήματα από ηλεκτρικά. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην απαίτηση ύπαρξης σταθμού επαναφόρτισης στο άκρο της γραμμής προκειμένου να διέλθει ηλεκτρικό λεωφορείο. Το Σχήμα 7.14 απεικονίζει την ποσοστιαία συμμετοχή των ηλεκτρικών λεωφορείων στο στόλο σε σχέση με το πλήθος των χρησιμοποιούμενων σταθμών επαναφόρτισης.



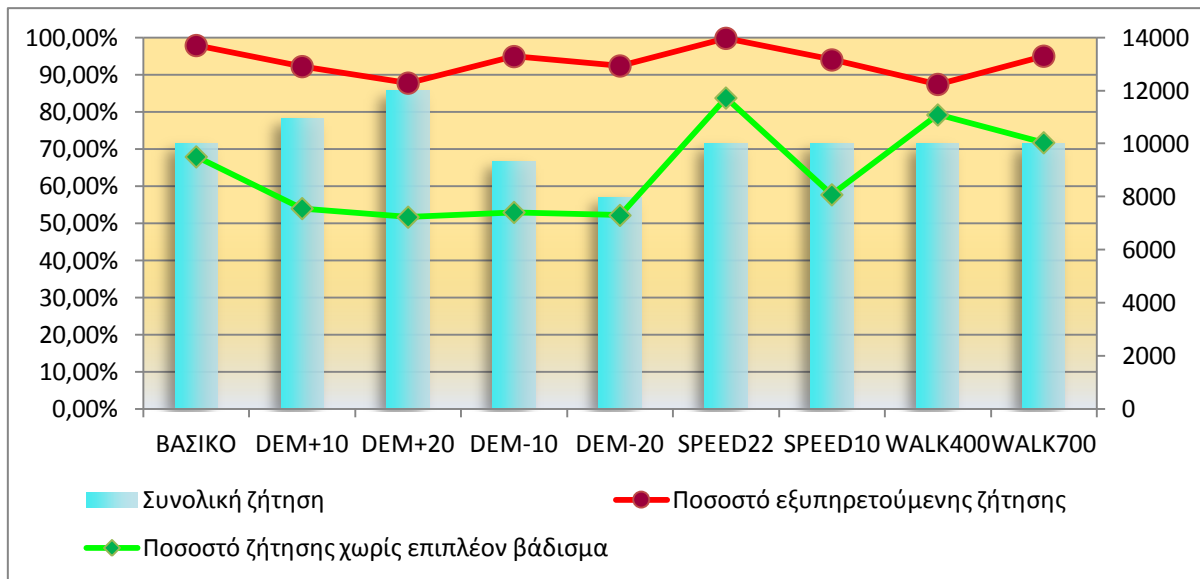
Σχήμα 7.14 Το ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων και οι σταθμοί επαναφόρτισης για διάφορα εναλλακτικά σενάρια.

Όπως αναμενόταν, η μεταβολή του ποσοστού ηλεκτρικών λεωφορείων είναι γενικώς ομόσημη με εκείνη του πλήθους σταθμών φόρτισης. Εξάιρεση αποτελεί το σενάριο SPEED10, όπου το 47% των οχηματοχιλιομέτρων αντιστοιχούν σε ηλεκτρικά λεωφορεία παρά το γεγονός ότι λειτουργεί μόνο ένας σταθμός φόρτισης.

Το υψηλότερο ποσοστό ηλεκτρικών λεωφορείων – 42,50% – απαιτείται στο εναλλακτικό σενάριο DEMAND-20, όπου χρησιμοποιούνται τρεις σταθμοί επαναφόρτισης.

(η) Το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 7.15) παρουσιάζει συγκεντρωτικά τη συνολική ζήτηση, το ποσοστό εξυπηρετούμενης ζήτησης και το ποσοστό επιβατών που εξυπηρετούνται χωρίς επιπλέον βάδισμα (ή χρήση άλλου μέσου):





Σχήμα 7.15 Η συνολική ζήτηση, το ποσοστό εξυπηρετούμενης ζήτησης και το ποσοστό ζήτησης που δε χρειάζεται επιπλέον βάδισμα, για διάφορα εναλλακτικά σενάρια.

Από το γράφημα συμπεραίνεται ότι, σε γενικές γραμμές, το ποσοστό των επιβατών οι οποίοι εξυπηρετούνται χρησιμοποιώντας τις αρχικές στάσεις Προέλευσης – Προορισμού τους μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο κατά τον οποίο μεταβάλλεται το ποσοστό της εξυπηρετούμενης ζήτησης. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί πρακτικά με τον εξής τρόπο: Για να εξυπηρετηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό της ζήτησης, πρέπει, κατ' αρχάς, οι γραμμές του δικτύου να περιλαμβάνουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό στάσεων. Δεδομένου ότι ως εξυπηρετούμενη θεωρείται η ζήτηση η οποία μπορεί να ικανοποιηθεί με μία το πολύ μετεπιβίβαση, προκύπτει επιπλέον ως αναγκαία συνθήκη η ύπαρξη όσο το δυνατόν περισσότερων κοινών στάσεων μεταξύ των γραμμών. Όταν, όμως, υπάρχουν περισσότερα κοινά ζεύγη μεταξύ των γραμμών, δημιουργούνται νέοι τρόποι σύνδεσης ζευγών Προέλευσης – Προορισμού. Επομένως, η ύπαρξη όλο και περισσότερων εφικτών διαδρομών δίνει τη δυνατότητα στους επιβάτες να μετακινούνται μεταξύ των στάσεων Προέλευσης και Προορισμού τους χωρίς να χρειάζεται να μεταβούν σε άλλη στάση κατά την έναρξη ή το πέρας του ταξιδιού τους.

(ζ) Από όλους τους περιορισμούς του προβλήματος, εκείνος που παραβιάζεται συχνότερα είναι ο #5. Η παραβίαση αυτή είναι λογική, καθώς είναι εξαιρετικά απίθανο να δημιουργηθεί ένα δίκτυο το οποίο ταυτόχρονα α) προσδίδει ικανοποιητικά χαμηλή τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση, β) ικανοποιεί τους περιορισμούς μήκους, συχνότητας, οχημάτων, μορφολογίας γραμμών, επιτρεπόμενης διέλευσης ηλεκτρικών οχημάτων και γ) αποτελείται από 10 γραμμές στις οποίες κάθε στάση συνδέεται αποκλειστικά και μόνο με στάσεις οι οποίες είτε ανήκουν στο σύνολο με τις πέντε πιο κοντινές της, είτε την περιέχουν ως μία εκ των πέντε κοντινότερών τους. Εκτός από αναμενόμενη, η παραβίαση του περιορισμού είναι προτιμότερη σε σχέση με την παραβίαση άλλων περιορισμών για δύο βασικούς λόγους:

(i) Η παραβίαση των υπόλοιπων περιορισμών ενδέχεται να οδηγήσει σε ανέφικτη λύση. Δεν είναι δυνατόν, για παράδειγμα, να γίνει δεκτή η κυκλοφορία ηλεκτρικού λεωφορείου σε γραμμή όπου δεν υπάρχει σταθμός επαναφόρτισης. Αντίθετα, η παραβίαση του περιορισμού #5 μπορεί να σημαίνει ότι θα συνδεθούν δύο «σχετικά μακρινές» στάσεις, χωρίς να δημιουργηθεί ανέφικτη γραμμή.

(ii) Η επιβάρυνση της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μεγαλύτερη όταν παραβιαστούν οι υπόλοιποι περιορισμοί. Για παράδειγμα, η παραβίαση του περιορισμού #1 προσθέτει στην τιμή της 100 μονάδες, ενώ του #6 καθιστά τη λύση αδύνατη. Επιπλέον, παραβίαση του περιορισμού #4 προσθέτει ποινή τουλάχιστον ίση με τη μονάδα, δεδομένου ότι το πλήθος των οχημάτων λαμβάνει ακέραιες τιμές. Αντίθετα, η απόκλιση των αποστάσεων η οποία υπολογίζεται κατά τον έλεγχο του περιορισμού #5 μπορεί να λάβει τιμές μικρότερες της μονάδας, με αποτέλεσμα σχετικά μικρότερη επιβάρυνση της αντικειμενικής συνάρτησης (Πίνακας 4.1).

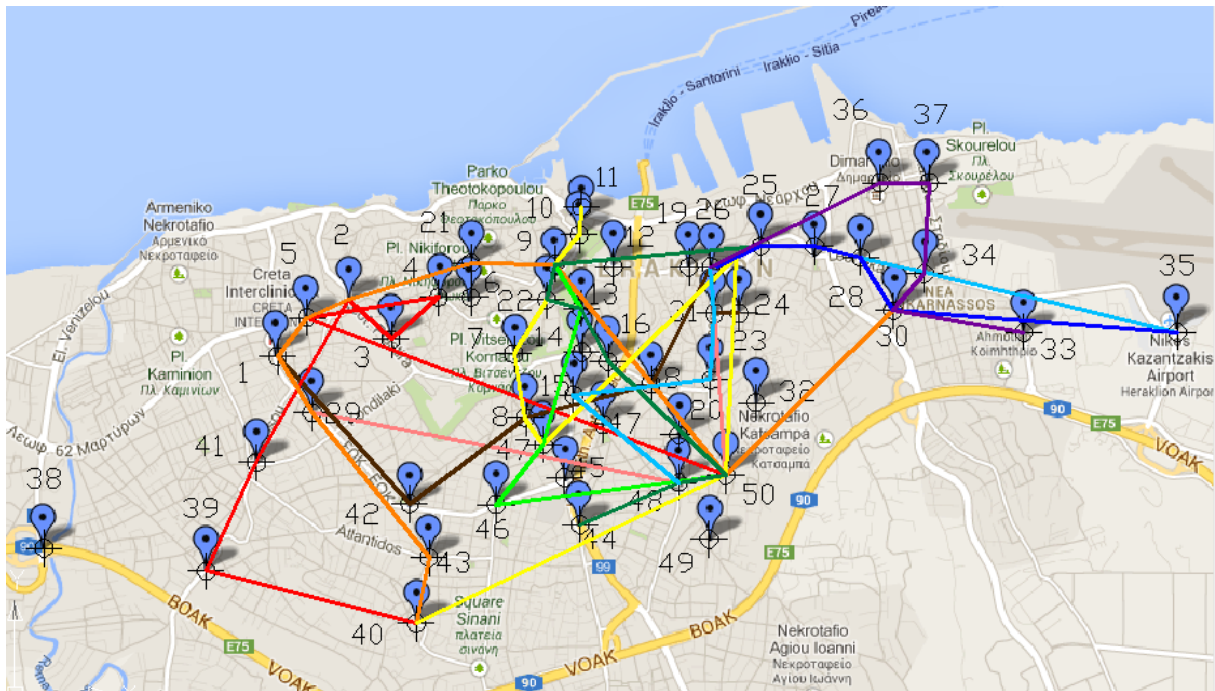
Προκειμένου να αποδειχθεί η αναγκαιότητα του περιορισμού #5, επιλύθηκε το βασικό σενάριο χωρίς να ληφθεί υπόψη ο περιορισμός. Ο Πίνακας 7.22 περιέχει τα αποτελέσματα της επίλυσης αυτής.

Πίνακας 7.22 Αποτελέσματα της επίλυσης του βασικού σεναρίου χωρίς τον περιορισμό #5.

		ΒΑΣΙΚΟ	NO_NEAREST5	Ποσοστιαία μεταβολή
<b>ΓΕΝΙΚΑ</b>	Τιμή διευρυμένης αντικειμενικής συνάρτησης	1,46	0,27	-81,51%
	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0,36	0,27	-25,00%
	Σύνολο ποινών	1,1	0	-100,00%
<b>ΟΡΟΙ</b>	Μη εξυπηρετούμενη ζήτηση	210	700	233,33%
	Μέσος χρόνος διαδρομής (λεπτά)	28	29,4	5,00%
	Ρύποι (g)	378,46	239,74	-36,65%
	Σταθμοί επαναφόρτισης	1	1	0,00%
	Συμβατικά οχήματα	37	24	-35,14%
	Ηλεκτρικά οχήματα	11	27	145,45%
<b>ΠΟΙΝΕΣ</b>	Περιορισμός 1 (Διέλευση ηλεκτρικών)	0	0	-
	Περιορισμός 2 (Μήκος)	0,25	0	-100,00%
	Περιορισμός 3 (Συχνότητα)	0	0	-
	Περιορισμός 4 (Στόλος)	0	0	-
	Περιορισμός 6 (Ίδιες στάσεις)	0	0	-

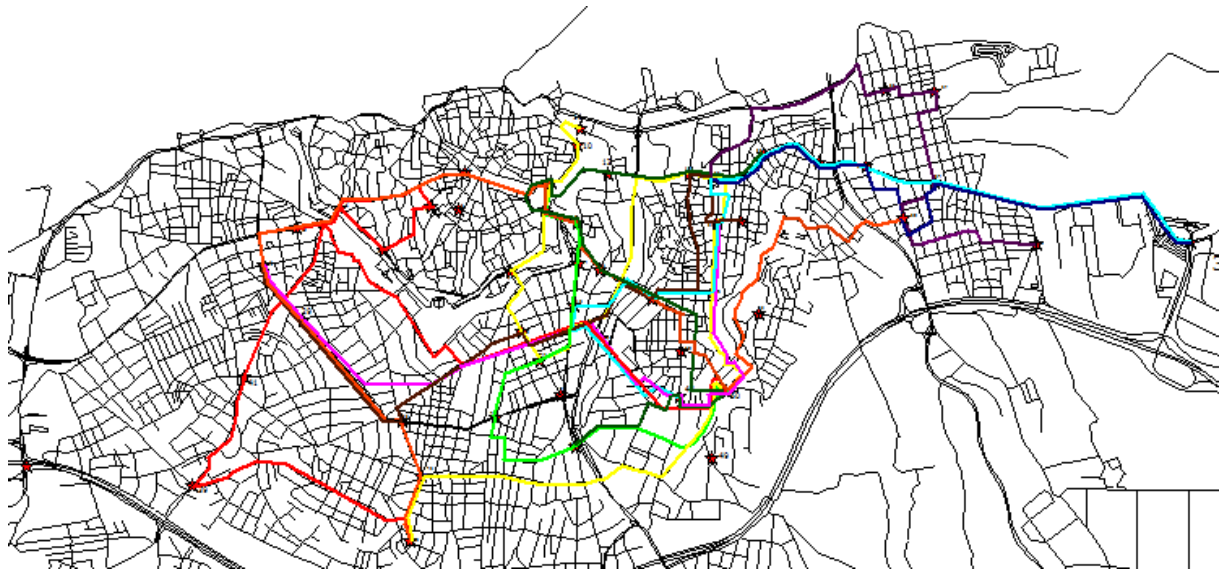
Όπως αναμενόταν, δεν παραβιάστηκε κανένας περιορισμός. Είναι επίσης χαρακτηριστικό ότι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζεται βελτιωμένη σε σχέση με την αρχική επίλυση του εναλλακτικού σεναρίου. Η βελτίωση οφείλεται κυρίως στη μάζα των εκπεμπόμενων ρύπων, η οποία λαμβάνεται υπόψη στην αντικειμενική συνάρτηση με αυξημένο συντελεστή βάρους. Ωστόσο, παρατηρώντας στο Σχήμα 7.16 το δίκτυο που

προκύπτει, διαπιστώνεται ότι η γεωμετρία των γραμμών του είναι μάλλον ασυνήθιστη και μη εφαρμόσιμη στην πράξη. Περιλαμβάνει, για παράδειγμα, έντονους ελιγμούς (π.χ. η σύνδεση των στάσεων 2, 3, 4 και 5 στην κόκκινη γραμμή), μεγάλες αποκλίσεις από την κύρια διαδρομή (π.χ. κίτρινη γραμμή) και απευθείας σύνδεση μακρινών στάσεων (π.χ. στάσεις 50 και 30 στην πορτοκαλιά γραμμή). Ακόμα και αν σε κάποια γραμμή συνδέονται ομαλά κοντινές στάσεις, ενδέχεται στο πέρας της γραμμής να προστεθεί μια στάση η οποία απέχει σημαντικά περισσότερο (π.χ. η στάση 25 στο τέλος της σκούρας πράσινης γραμμής).



Σχήμα 7.16 Το δίκτυο που προκύπτει με την άρση του περιορισμού #5.

Το Σχήμα 7.17 απεικονίζει το ίδιο δίκτυο με περισσότερη λεπτομέρεια, καθώς παρουσιάζει την ακριβή διαδρομή που ακολουθούν τα λεωφορεία κάθε γραμμής:



Σχήμα 7.17 Λεπτομερής απεικόνιση του δικτύου που προκύπτει με την άρση του περιορισμού #5.

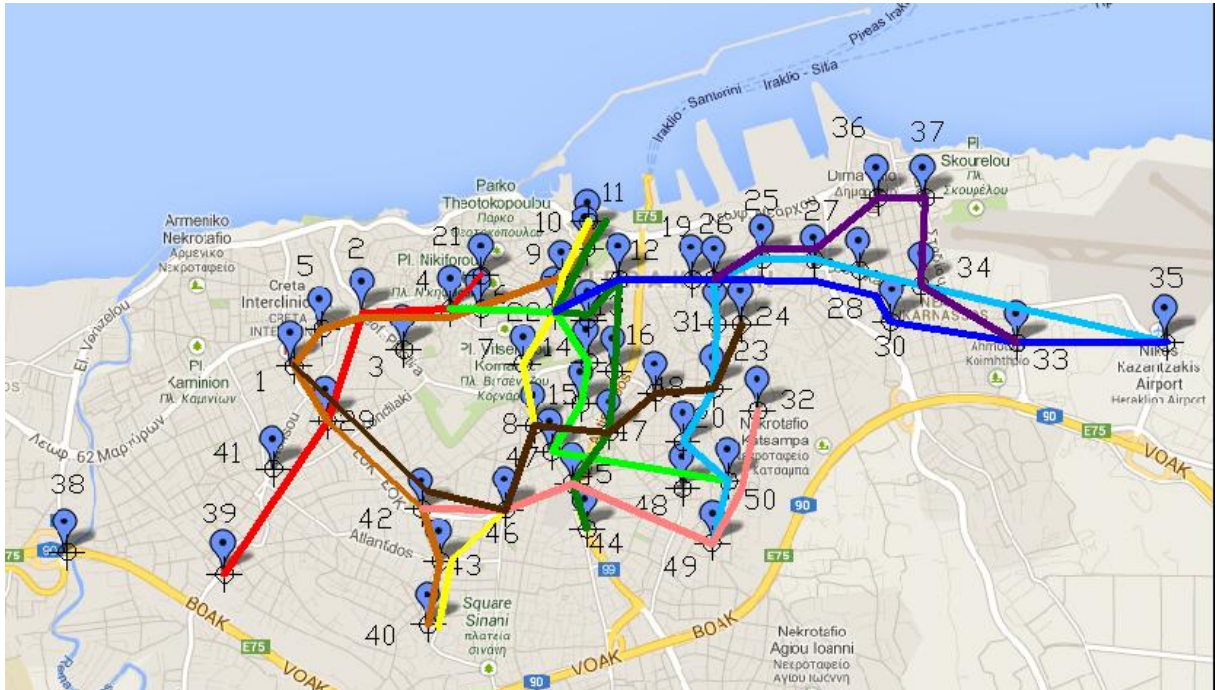
## 7.8 Ενδεικτική απεικόνιση λύσης

Αφενός χάρη στην απαγόρευση της επανάληψης στάσεων εντός των γραμμών και αφετέρου λόγω της ισχύος του περιορισμού #5, οι γραμμές που προκύπτουν χαρακτηρίζονται από λογική γεωμετρία, χωρίς αναστροφές και μεγάλες αποκλίσεις από την κύρια διαδρομή. Ενδεικτικά, παρατίθεται η απεικόνιση των γραμμών που προέκυψαν από τη λύση του εναλλακτικού σεναρίου WALK400. Ο Πίνακας 7.23 περιέχει συγκεντρωτικά τα μητρώα **TOTALNETWORK** και **G** για τη λύση αυτή:

Πίνακας 7.23 Η τελική λύση του Σεναρίου WALK400.

TOTALNETWORK																G		
39	29	2	4	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	43	42	29	1	5	2	4	21	9	10	11	0	0	0	0	0	0	1
40	43	46	8	7	22	9	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
50	47	15	14	22	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	45	17	16	12	13	22	9	10	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	50	20	23	31	26	25	27	28	34	35	0	0	0	0	0	0	0	1
35	33	30	28	27	26	19	12	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	34	37	36	27	25	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	46	45	49	50	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	23	18	17	8	46	42	29	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Το Σχήμα 7.18 απεικονίζει γραφικά τη λύση του WALK400. Για λόγους απλότητας και ευκρίνειας, οι στάσεις αρχικά απεικονίζονται συνδεδεμένες μεταξύ τους με ευθύγραμμα τμήματα:



Σχήμα 7.18 Απεικόνιση της λύσης του σεναρίου WALK400.

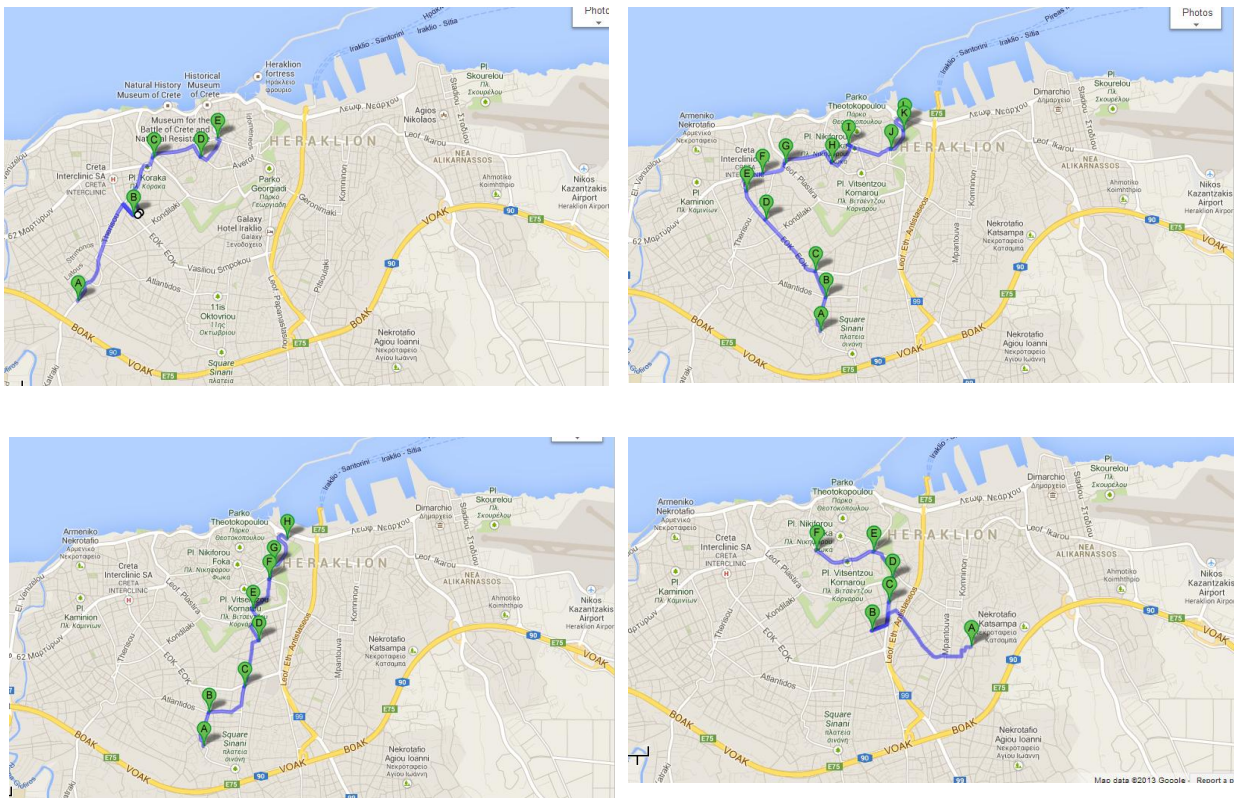
Το ίδιο συγκοινωνιακό δίκτυο απεικονίζεται με ακρίβεια στο Σχήμα 7.19:

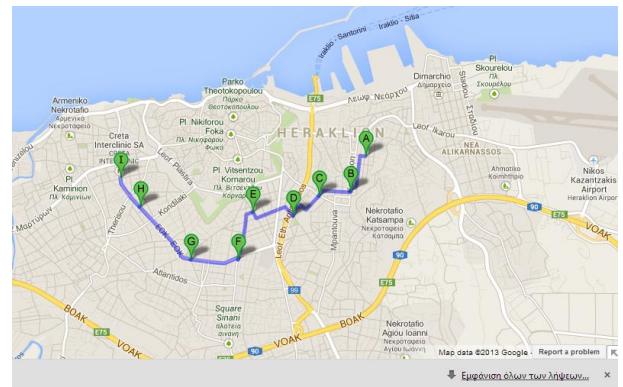
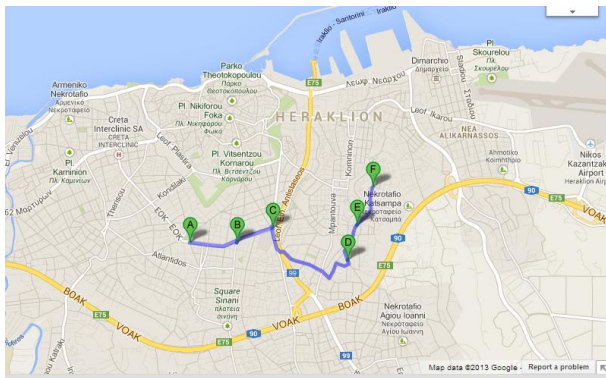
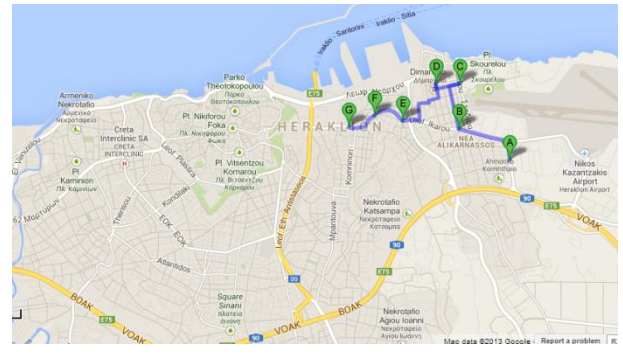
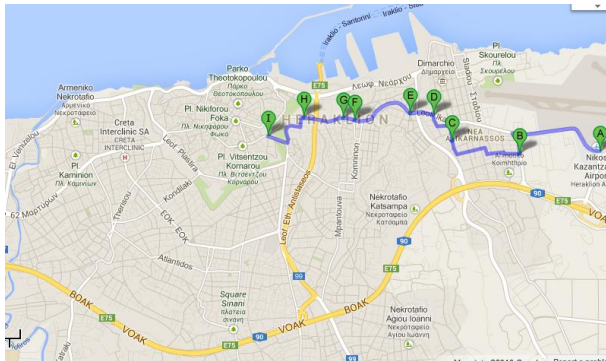
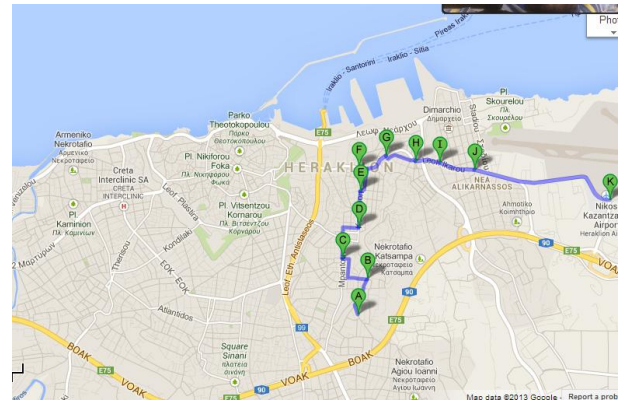
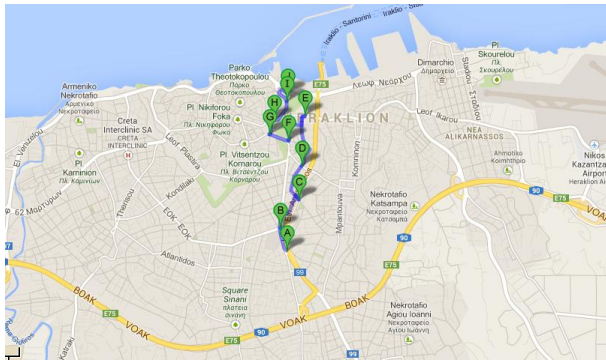


Σχήμα 7.19 Λεπτομερής απεικόνιση του συγκοινωνιακού δικτύου που προκύπτει από την επίλυση του σεναρίου WALK400.

Εύκολα διαπιστώνεται η υπεροχή του δικτύου αυτού έναντι εκείνου που προκύπτει με άρση του περιορισμού #5 (Σχήμα 7.16 και Σχήμα 7.17), από άποψη σχεδιασμού και δυνατότητας υλοποίησης).

Τέλος, στο Σχήμα 7.20 απεικονίζεται κάθε γραμμή ξεχωριστά, για λόγους ευκρίνειας:





Σχήμα 7.20 Οι γραμμές του σεναρίου WALK400 .





---

---

## 8 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

---

---

### 8.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εφαρμόστηκε μια ευέλικτη μαθηματική μέθοδος για το βέλτιστο σχεδιασμό ενός δικτύου αστικών συγκοινωνιών. Στόχος ήταν ο προσδιορισμός όχι μόνο των λεωφορειακών γραμμών, αλλά και των συχνοτήτων τους, καθώς και του είδους των οχημάτων – συμβατικά ή ηλεκτρικά – τα οποία λειτουργούν σε κάθε μια εξ αυτών. Η αντικειμενική συνάρτηση αποτελεί σταθμισμένο άθροισμα έξι διαφορετικών όρων, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν το κόστος φορέα, το κόστος χρήστη και το εξωτερικό κόστος. Οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί ελέγχουν τη λειτουργία του δικτύου και τη γεωμετρία των γραμμών και είναι εύκαμπτοι, δηλαδή η παραβίασή τους επιβαρύνει την αντικειμενική συνάρτηση με ποινή.

Η προτεινόμενη προσέγγιση διαφέρει συγκρινόμενη με προγενέστερές της: Πρώτον, η αυτούσια εισαγωγή των ρύπων στην αντικειμενική συνάρτηση επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό τους και τη συνεκτίμηση των παραγόντων από τους οποίους εξαρτώνται. Επιπλέον, θεωρείται ετερογενής στόλος αποτελούμενος από συμβατικά (ντιζελοκίνητα) και ηλεκτρικά οχήματα. Η περιορισμένη εμβέλεια κίνησης των τελευταίων λαμβάνεται υπόψη μέσω της απαίτησης ύπαρξης σταθμών επαναφόρτισης στα άκρα των γραμμών που εξυπηρετούνται από αυτά, οι οποίες και χαρακτηρίζονται από μικρότερο μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος σε σχέση με τις γραμμές που εξυπηρετούνται από συμβατικά οχήματα. Τέλος, η γεωμετρία των γραμμών ελέγχεται μέσω της απαγόρευσης επανάληψης στάσεων εντός της ίδιας λεωφορειακής γραμμής και μέσω της επιβολής διαδοχικής σύνδεσης κοντινών στάσεων. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι αναστροφές και οι ελιγμοί χωρίς να απαιτείται προκατασκευή γραμμών, τακτική η οποία ενδέχεται να αποτρέπει την εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με γενετικό αλγόριθμο. Κάθε άτομο του πληθυσμού αποτελείται από δύο διακριτά μητρώα, το πρώτο εκ των οποίων αναπαριστά το σύνολο των γραμμών με τις στάσεις τους και το δεύτερο το είδος των οχημάτων που λειτουργούν σε κάθε γραμμή. Η ομοιόμορφη διασταύρωση σε συνδυασμό με τον αυτόματα προσαρμοζόμενο ρυθμό μετάλλαξης και τη θεώρηση εύκαμπτων περιορισμών επιτρέπουν την ευρεία εξερεύνηση των δυνατών λύσεων.

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συνολική εξέταση των αποτελεσμάτων της επίλυσης των εναλλακτικών σεναρίων είναι τα ακόλουθα:

(α) Η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση επηρεάζεται κυρίως από την πρόσθετη απόσταση την οποία είναι διατεθειμένοι οι επιβάτες να βαδίσουν ή να καλύψουν με οποιονδήποτε εναλλακτικό τρόπο εκτός από λεωφορείο. Ως ποσοστό της συνολικής ζήτησης, η μη εξυπηρετούμενη ζήτηση αυξάνεται με την αύξηση της συνολικής ζήτησης.

(β) Ο μέσος χρόνος διαδρομής είναι ευαίσθητος σε μεταβολές της μέσης ταχύτητας των λεωφορείων αλλά δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στις μεταβολές της ζήτησης.

(γ) Η μάζα των εκπεμπόμενων ρύπων επηρεάζεται αφενός από το συντελεστή εκπομπής ΕΦ και αφετέρου από το πλήθος των χρησιμοποιούμενων σταθμών επαναφόρτισης.

(δ) Το πλήθος των χρησιμοποιούμενων σταθμών επαναφόρτισης εξαρτάται από τη δομή του δικτύου και είναι τέτοιο ώστε να αποδίδει σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος χωρίς να επιβαρύνει το συγκοινωνιακό φορέα με δυσανάλογο κόστος κατασκευής των σταθμών.

(ε) Το απαιτούμενο πλήθος οχημάτων παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές της μέσης ταχύτητας και μικρότερη ευαισθησία σε μεταβολές της συνολικής και εξυπηρετούμενης ζήτησης.

(στ) Το ποσοστό των απαιτούμενων συμβατικών λεωφορείων συνήθως υπερβαίνει εκείνο των ηλεκτρικών λεωφορείων, το οποίο σε γενικές γραμμές αυξάνεται όταν αυξάνεται το πλήθος των σταθμών επαναφόρτισης.

(ζ) Το ποσοστό των επιβατών που εξυπηρετούνται χρησιμοποιώντας τις αρχικές στάσεις Προέλευσης – Προορισμού τους μεταβάλλεται όπως και το ποσοστό της εξυπηρετούμενης ζήτησης.

(η) Ο περιορισμός που παραβιάζεται συχνότερα είναι ο #5. Ωστόσο, είναι πολύ μικρό το ποσοστό των συνολικών ζευγών διαδοχικών στάσεων που τον παραβιάζουν και, επίσης, σε αντίθεση με άλλους περιορισμούς, η παραβίασή του μπορεί να οδηγήσει σε αποδεκτές λύσεις με ικανοποιητική μορφολογία των λεωφορειακών γραμμών.

## **8.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

### **8.2.1 Γενικά**

Όπως έγινε αντιληπτό, δεν υπάρχει μοναδικός, ενιαίος για όλες τις περιπτώσεις τρόπος επίλυσης του TRNDP. Κατά συνέπεια, προτείνονται ακολούθως ορισμένες παραλλαγές της παρούσας επίλυσης, στις οποίες μπορεί να επικεντρωθεί η μελλοντική έρευνα. Οι προτεινόμενες παραλλαγές αφορούν στη διαχείριση των δεδομένων του προβλήματος, στην αντικειμενική συνάρτηση, στους περιορισμούς, τις παραμέτρους, τις παραδοχές και τις επιμέρους μεθοδολογίες.

### **8.2.2 Παραλλαγές στο είδος των δεδομένων**

Βασικό χαρακτηριστικό των μητρώων αποστάσεων, ταχυτήτων, χρόνων και ρύπων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα στο μοντέλο που παρουσιάστηκε είναι η συμμετρία ως

προς την κύρια διαγώνιο. Θα ήταν, επομένως, ενδιαφέρουσα η άρση της παραδοχής περί συμμετρίας, η οποία οδηγεί σε μία διαφοροποιημένη προσέγγιση του προβλήματος. Επιπλέον, μπορεί να θεωρηθούν περισσότεροι των δύο τύποι λεωφορείων στον ετερογενή στόλο οι οποίοι διαφέρουν ως προς το συντελεστή εκπομπής ρύπων και τη χωρητικότητα (π.χ. mini ή αρθρωτά λεωφορεία).

### 8.2.3 Παραλλαγές στην αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση λήφθηκε ίση με το σταθμισμένο άθροισμα έξι διαφορετικών όρων. Παρουσιάζει ενδιαφέρον η αντικατάσταση των όρων από δείκτες αξιολόγησης (παραγωγικότητας, αποτελεσματικότητας, εξυπηρέτησης) και ο διαφορετικός ορισμός μερικών όρων (π.χ. θεώρηση ως μη εξυπηρετούμενων των επιβατών οι οποίοι χρησιμοποιούν ενδιάμεσο κόμβο).

### 8.2.4 Παραλλαγές στη μορφή και τη γεωμετρία των γραμμών

Εκτός από τους περιορισμούς #5 και #6 και την αφαίρεση επαναλαμβανόμενων στάσεων εντός της ίδιας γραμμής, μπορεί να εξεταστεί η εισαγωγή επιπλέον περιορισμών για τον έλεγχο της γεωμετρίας των γραμμών και της αλληλουχίας των στάσεων (π.χ. έλεγχος ποσοστού επικάλυψης γραμμών).

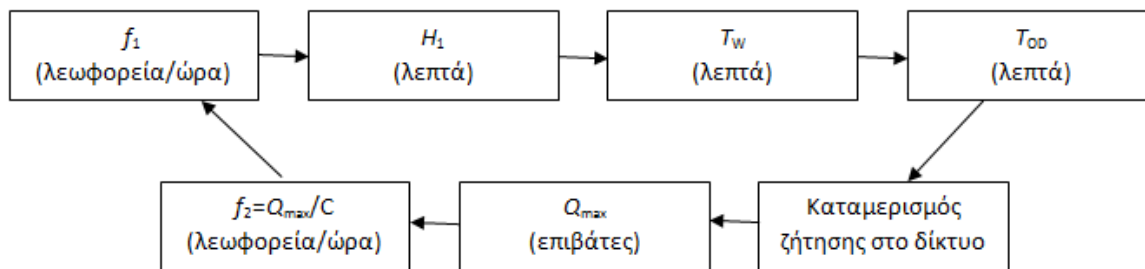
### 8.2.5 Παραλλαγές στις παραδοχές και στις επιμέρους μεθοδολογίες

Σε ορισμένες περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν εύλογες παραδοχές προκειμένου να απλοποιηθεί υπολογιστικά το πρόβλημα. Ορισμένες προτάσεις για την άρση των παραδοχών αυτών είναι οι ακόλουθες:

(α) Εξάρτηση χρόνου αναμονής από συχνότητα: Στην παρούσα προσέγγιση, ο χρόνος αναμονής θεωρήθηκε σταθερός για όλες τις γραμμές και ίσος με 10 λεπτά, ενώ στην πράξη εξαρτάται από τη συχνότητα της γραμμής. Εάν, επιπλέον, υποθεθεί ότι οι αφίξεις των επιβατών στη στάση ακολουθούν την κατανομή Poisson, ο μέσος χρόνος αναμονής για τη γραμμή  $n$  ισούται με

$$T_{w,n} = \frac{H_n}{2} \quad (9.1)$$

όπου  $H_n$  η χρονοαπόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διελεύσεων του λεωφορείου από την ίδια στάση. Η συχνότητα, όμως, καθορίζεται από το φόρτο των επιβατών στο κρίσιμο τμήμα της διαδρομής και ταυτόχρονα η φόρτιση του δικτύου προϋποθέτει γνώση των διαδρομών που επιλέγουν οι επιβάτες. Επομένως, μια διαφορετική προσέγγιση περιλαμβάνει την εκτέλεση επαναληπτικής διαδικασίας με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης, έτσι ώστε οι συχνότητες  $f_1$  και  $f_2$  του παρακάτω σχήματος (Σχήμα 8.1) να συγκλίνουν στην ίδια τιμή:



Σχήμα 8.1 Επαναληπτική διαδικασία προσδιορισμού συχνότητων.

(β) Εξάρτηση του χρόνου μετακίνησης από τη ζήτηση, με συνεκτίμηση της επιρροής του χρόνου επιβίβασης και αποβίβασης.

(γ) Διαφοροποίηση της κατανομής των επιβατών σε διαδρομές: Μια νέα προσέγγιση στο πρόβλημα έγκειται στην εύρεση περισσότερων δυνατών διαδρομών ανά ζεύγος Π-Π και στη δυνατότητα πραγματοποίησης περισσότερων μετεπιβιβάσεων. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικό μοντέλο κατανομής των επιβατών σε δεδομένο αριθμό διαδρομών, π.χ. εκθετικό.

(δ) Αλλαγή στον τρόπο υπολογισμού των απαιτούμενων σταθμών επαναφόρτισης: Στην παρούσα εργασία, θεωρήθηκε ότι, όταν μία γραμμή από την οποία διέρχονται ηλεκτρικά λεωφορεία έχει και στα δύο άκρα της κόμβους όπου είναι δυνατή η κατασκευή σταθμών επαναφόρτισης, τότε κατασκευάζονται σταθμοί και στα δύο άκρα. Ωστόσο, θα μπορούσε να εξεταστεί η πιθανότητα κατασκευής σταθμού στο ένα μόνο άκρο της γραμμής, διερευνώντας την ύπαρξη άλλων γραμμών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από τον ίδιο.

(ε) Συνεκτίμηση της χρήσης ΙΧ με θεώρηση ελαστικής ζήτησης και υπολογισμό των ρύπων που εκπέμπονται τόσο από τα ΙΧ όσο και από τα λεωφορεία.

#### 8.2.6 Παραλλαγές στον αλγόριθμο επίλυσης

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (Κεφάλαιο 3) έγινε φανερό ότι οι μεθοδολογίες επίλυσης του TRNDP είναι ποικίλες. Επομένως, μπορεί να διερευνηθεί η επίλυσή του με χρήση διαφορετικών μεθοδολογιών, όπως εκείνες οι οποίες βασίζονται στη νοημοσύνη σμήνους (swarm intelligence).

---

---

## 9 Βιβλιογραφικές αναφορές

---

---

- Γεωργόπουλος, Ε.Φ., και Λυκοθανάσης, Σ.Δ., Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους, Πάτρα 1999.
- Καρλαύτης, Μ.Γ., και Λαγαρός, Ν.Δ., 2010, *Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Καρλαύτης, Μ.Γ., και Λυμπέρης, Κ.Π., 2009, *Συστήματα αστικών συγκοινωνιών – Σχεδιασμός, κατασκευή, λειτουργία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Μακρόπουλος, Χ., και Ευστρατιάδης, Α., 2011, *Γενετικοί Αλγόριθμοι*, σειρά διαφανειών, Τομέας υδατικών Πόρων και περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Adal, A., and Wiener, S.W., Heavy Metal Toxicity, ιστοσελίδα *Medscape*, [www.medscape.com/](http://www.medscape.com/), τελευταία πρόσβαση: Οκτώβριος 2013.
- ATSDR, 1996, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry
- Baaj, M.H., and Mahmassani, H., 1995, Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks, *Transportation Research C*, 3(1):31–50.
- Baricelli, N. A. 1957, Symbiogenetic evolution processes realized by artificial methods, *Methodos* 9, no. 35–36: 143–182.
- Baricelli, N. A. 1962, Numerical testing of evolution theories, *ACTA Biotheoretica* 16: 69–126.
- BATELLE, 2002, Technical Assessment of Advanced Transit Bus Propulsion Systems, *Report prepared for Dallas Area Rapid Transit*, Columbus, OH, U.S.A..
- Beltran, B., Carrese, S., Cipriani, E., and Petrelli, M., 2009, Transit network design with allocation of green vehicles: A genetic algorithm approach, *Transportation Research Part C*, 17, 475–483.
- Bledsoe, W. W. 1961, The use of biological concepts in the analytical study of systems, paper presented at ORSA–TIMS National Meeting, San Francisco.
- Blum, J.J., and Mathew, T.V., 2011, Intelligent Agent Optimization of Urban Bus Transit System Design, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 25(5), 357-369.
- Box, G. E. P. 1957, Evolutionary operation: A method for increasing industrial productivity, *Journal of the Royal Statistical Society C* 6, no. 2: 81–101.
- Bremermann, H. J. 1962, Optimization through evolution and recombination, M. C. Yovits, G. T. Jacobi, and G. D. Goldstein, eds., *Self-Organizing Systems*, Spartan Books.
- Brodsky, J.B., and Cohen, E.N., 1986, Adverse effects of nitrous oxide, *Med Toxicol.*, Sep-Oct; 1(5):362-74.
- Černá, A., Černý, J. and Příbyl, V., 2011: Bus route design in small demand areas, *Transport*, 26(3), 248-254.

- Chakroborty, P., 2003, Genetic Algorithms for optimal urban transit network design, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18(3), 184–200.
- Cipriani, E., Gorri, S., and Petrelli, M., 2012, Transit network design: A procedure and an application to a large urban area, *Transportation Research Part C*, 20, 3–14.
- Cipriani, E., Gori, S., and Petrelli, M., 2012, A bus network design procedure with elastic demand for large urban areas, *Public Transportation*, 4, 57–76.
- Curtin, K.M., and Biba, S., 2011, The Transit Route Arc-Node Service Maximization problem, *European Journal of Operational Research*, 208, 46–56.
- Delle Site, P., and Filippi, F., 1995, Bus service optimization and car pricing policies to save fuel in urban areas, *Transportation Research Part A*, Vol.29A, No. 5., 345-358.
- Delle Site, P., and Filippi, F., 2001, Bus service optimisation with fuel saving objective and various financial constraints, *Transportation Research Part A*, 35, 157-176.
- Desaulniers, G., and Hickman, M.D., 2007, Chapter 2, Public Transit, C. Barnhart and G. Laporte (Eds.), *Handbook in Operations Research and Management Science*, Vol. 14.
- Dijkstra, E.W., 1959, A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik 1*, 269–271.
- Duysinx, P., 2012, *Performance of vehicles*, Research Center in Sustainable Automotive Technologies of University of Liege.
- EEA, Road Transport Annex HDV files, *EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook*, 2009.
- EEA (2013), επίσημη ιστοσελίδα European Environmental Agency, [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu), τελευταία πρόσβαση: Οκτώβριος 2013.
- EMEP/EEA air pollutant air pollutant emission inventory guidebook - 2009, European Environmental Agency, EEA Technical report, No 12.
- EPA, 2013, επίσημη ιστοσελίδα United States Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/>, τελευταία πρόσβαση: Οκτώβριος 2013.
- Estrada, M., Roca-Riu, M., Badia, H., Robusté, F., and Daganzo, C.F., 2011, Design and Implementation of Efficient Transit Networks: Procedure, Case Study and Validity Test, 19th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 17, 113–135.
- Euchi, J., and Mraïhi, R., 2012, The urban bus routing problem in the Tunisian case by the hybrid artificial ant colony algorithm, *Swarm and Evolutionary Computation*, 2, 15–24.
- Fan, L., and Mumford, C., 2010, A metaheuristic approach to the urban transit routing problem, *Journal of Heuristics*, 16, 353–372.
- Fan, W.D., Machemehl, R.B. and Lownes, N.E., 2008, Some Computational Insights on the Optimal Bus Transit Route Network Design Problem, *Journal of the Transportation Research Forum*, Vol. 47, No. 3 (Public Transit Special Issue), 61-75.

- Ferguson, E.M., Duthie, J., Unnikrishnan, A., and S. Travis Waller, S., 2012, Incorporating equity into the transit frequency-setting problem, *Transportation Research Part A*, 46, 190–199.
- Fogel, L. J., Owens, A. J., and Walsh, M. J. 1966, *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*, Wiley.
- Fraser, A. S. 1957a, Simulation of genetic systems by automatic digital computers: I. Introduction, *Australian Journal of Biological Science* 10, 484–491.
- Fraser, A. S. 1957b, Simulation of genetic systems by automatic digital computers: II. Effects of linkage on rates of advance under selection, *Australian Journal of Biological Science* 10, 492–499.
- Gallo, M., Montella, B. and D’Acierno, L., 2011, The transit network design problem with elastic demand and internalisation of external costs: An application to rail frequency optimization, *Transportation Research Part C*, 19, 1276–1305.
- Guihaire, V., and Hao, J.-K., 2008, Transit network design and scheduling: A global review, *Transportation Research Part A*, 42, 1251–1273.
- Han, J., Lee, S., and Kim, J., 2011, Meta-heuristic algorithms for a transit route design, *Advanced Operations Research and Artificial Intelligence Methods in Transportation*.
- Hicks, B. J., Medland, A. J., Mullineux, G., 2006, The representation and handling of constraints for the design, analysis and optimization of high speed machinery, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacture (AIEDAM)*, 20, 313-328.
- Holland, J. H. 1975, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, (Second edition: MIT Press, 1992).
- Israeli, Y, and Ceder, A., 1993, Transit route design using scheduling and multiobjective programming techniques. In: Daduna J, Branco I, Pinto J, editors. *Proceedings of the sixth international workshop on computer aided scheduling of public transport*. Berlin: Springer.
- Kepaptsoglou, K., and Karlaftis, M., 2009, Transit route network design problem: Review, *Journal of Transportation Engineering*, 135(8), 491-505.
- Marín, Á.G., and Jaramillo, P., 2009, Urban rapid transit network design: accelerated Benders decomposition, *Annals of Operations Research*, 169, 35–53.
- Marler, R.T., and Arora, J.S., 2004, Survey of multi-objective optimization methods for engineering, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 26, 369–395.
- Martin, F. G., and Cockerham, C. C. 1960, High speed selection studies. In O. Kempthorne, ed., *Biometrical Genetics*, Pergamon.
- Mauttone, A., and Urquhart, M.E., 2009, A route set construction algorithm for the transit network design problem, *Computers & Operations Research* 36, 2440 – 2449.
- Mauttone, A., and Urquhart, M.E., 2009, A multi-objective metaheuristic approach for the Transit Network Design Problem, *Public Transportation*, 1: 253–273.

- Microsoft, επίσημη ιστοσελίδα του Microsoft Office, <http://office.microsoft.com>, τελευταία πρόσβαση: Οκτώβριος 2013
- Mitchell, M., 1998, An Introduction to Genetic Algorithms, *First MIT Press paperback edition*.
- Newell, G.F., 1979, Some Issues Relating to the Optimal Design of Bus Routes, *Transportation Science*, 13(1), 20-35.
- New York State Department of Health, επίσημη ιστοσελίδα New York State Department of Health, [www.health.ny.gov](http://www.health.ny.gov), τελευταία πρόσβαση: Οκτώβριος 2013.
- Nikolić, M, and Teodorović, D., 2013, Transit network design by Bee Colony Optimization, *Expert Systems with Applications* 40, 5945–5955.
- Palisade Corporation, *Guide to using Evolver – The Genetic Algorithm Solver for Microsoft Excel*, Version 5.7, September 2010.
- Proos, K.A., Steven, G.P., Querin, O.M. and Xie, Y.M., 2001, Multicriterion evolutionary structural optimization using the weighted and the global criterion methods, *AIAA Journal*, 39, 2006–2012.
- Rechenberg, I. 1965, *Cybernetic Solution Path of an Experimental Problem*, Ministry of Aviation, Royal Aircraft Establishment (U.K.).
- Rechenberg, I. 1973, *Evolutionsstrategie: Optimierung Technischer Systeme nach Prinzipien der Biologischen Evolution*, Frommann–Holzboog (Stuttgart).
- Roca-Riu, M., Estrada, M., and Trapote, C., 2012, The design of interurban bus networks in city centers, *Transportation Research Part A*, 46, 1153–1165.
- Schöbel, A., 2012, Line planning in public transportation: models and methods, *OR Spectrum*, 34:491–510.
- Schwefel, H.–P, 1975, *Evolutionsstrategie und numerische Optimierung*, Ph.D. thesis, Technische Universität Berlin.
- Schwefel, H.–P, 1977, *Numerische Optimierung von Computer–Modellen mittels der Evolutionsstrategie*, Basel: Birkhäuser.
- Shafahi, Y., and Khani, A., 2010, A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions, *Transportation Research Part A*, 44, 377–389.
- Shimamoto, H., Murayama, N., Fujiwara, A. and Zhang, J., 2010, Evaluation of an existing bus network using a transit network optimisation model: a case study of the Hiroshima City Bus network, *Transportation*, 37, 801–823.
- Sivanandam, S.N., and Deepa, S.N., 2008, *Introduction to Genetic Algorithms*, Springer Berlin Heidelberg.
- Szeto, W.Y., and Wu, Y., 2011, A simultaneous bus route design and frequency setting problem for Tin Shui Wai, Hong Kong, *European Journal of Operational Research*, 209, 141–155.



- Talapatra, A., and Srivastava, A., 2011, Ambient Air Non-Methane Volatile Organic Compound (NMVOC) Study Initiatives in India - a Review, *Journal of Environmental Protection*, 2, 21-36.
- Torres, L.M., Torres R., Borndörfer, R., and Pfetsch, M.E., 2011, Line planning on tree networks with applications to the Quito Trolebús system, *International Transactions in Operational Research*, 18, 455–472.
- Vale, A., 2012, Sulphur dioxide, *Medicine*, Volume 40, Issue 3, Page 158.
- van Nes, R., Hamerslag, R., and Immers, B.H., 1988, Design of public transport networks, *Transportation Research Record* 1202, 74–83.
- Yen, J.Y., 1971, “Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network”, *Management Science* 17(11), 712-716.
- Yu, B., Yang, Z., Jin, P., Wu, S., and Yao, B., 2012, Transit route network design-maximizing direct and transfer demand density, *Transportation Research Part C*, 22, 58–75.
- Zhao, F., and Zeng, X., 2008, Optimization of transit route network, vehicle headways and timetables for large-scale transit networks, *European Journal of Operational Research*, 186, 841–855.



---

---

## 10 Παράρτημα

---

---

### Μητρώο Προέλευσης-Προορισμού d

d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
1	0	1	2	4	0	6	2	7	6	3	7	3	3	3	2	0	3	3	2	1	4	5	3	3	0	5	2	1	3	4	4	4	3	4	4	3	2	1	2	4	6	6	5	2	7	3	5	0	3	1
2	1	0	2	2	4	4	1	4	2	4	2	1	1	3	2	2	4	3	3	1	5	5	3	5	2	3	4	2	2	2	1	4	4	3	3	9	1	4	2	3	2	1	2	4	6	4	2	4	3	1
3	2	2	0	1	3	5	4	0	2	5	2	3	4	3	3	1	3	4	4	2	1	4	3	3	1	4	4	5	4	2	6	1	4	3	5	4	2	1	1	3	4	3	2	4	3	4	3	2	3	5
4	4	2	1	0	2	2	3	4	1	1	1	4	4	5	2	2	1	4	4	4	7	8	2	4	4	5	3	5	9	3	3	2	4	3	3	2	2	3	2	3	1	1	2	4	2	5	2	5	2	5
5	0	4	3	2	0	2	5	1	4	2	3	3	7	6	3	4	3	4	6	4	6	6	9	6	4	4	3	4	5	4	4	4	4	4	3	1	3	4	1	4	3	4	4	1	6	4	2	4	4	1
6	6	4	5	2	2	0	7	1	5	5	7	8	0	1	4	9	5	3	6	3	6	3	5	4	5	0	6	6	4	3	0	0	6	1	6	7	7	6	3	3	4	4	6	4	4	3	9	1	6	3
7	2	1	4	3	5	7	0	2	4	2	6	9	5	4	4	1	7	3	9	3	9	7	6	7	9	1	3	4	8	4	4	4	3	4	5	1	6	9	6	2	9	5	1	2	2	2	1	1	8	5
8	7	4	0	4	1	1	2	0	9	8	6	5	6	8	4	3	3	2	3	4	3	3	4	8	2	3	3	6	8	5	2	5	3	6	3	6	8	3	7	1	3	1	6	3	3	5	7	9	5	1
9	6	2	2	1	4	5	4	9	0	5	8	4	2	8	5	3	4	6	6	10	3	2	8	7	9	9	1	7	5	2	1	5	4	2	2	5	3	2	5	6	7	6	2	6	3	2	5	6	5	5
10	3	4	5	1	2	5	2	8	5	0	7	5	9	4	5	2	4	2	6	6	6	3	2	2	4	3	4	9	1	2	1	7	5	7	5	7	6	7	5	8	5	9	4	3	3	4	4	3	7	4
11	7	2	2	1	3	7	6	6	8	7	0	5	1	0	3	4	5	1	2	2	1	2	4	3	2	4	6	4	1	2	1	6	6	5	8	4	1	6	4	3	2	6	2	2	1	1	2	2	7	8
12	3	1	3	4	3	8	9	5	4	5	5	0	1	3	1	8	2	2	3	1	7	3	1	5	7	5	7	1	0	2	7	4	1	6	8	6	4	6	3	6	6	9	8	3	7	2	6	9	6	5
13	3	1	4	4	7	0	5	6	2	9	1	1	0	5	1	6	8	2	1	3	9	4	9	4	6	1	3	1	3	2	1	6	7	5	7	7	2	5	4	6	3	5	8	3	1	1	9	7	1	1
14	3	3	3	5	6	1	4	8	8	4	0	3	5	0	7	9	5	2	8	6	9	5	5	2	8	3	8	2	5	5	5	2	3	5	3	5	9	1	3	3	8	5	5	5	3	1	3	2	8	
15	2	2	3	2	3	4	4	4	5	5	3	1	1	7	0	6	6	9	1	8	2	3	1	4	8	1	4	3	2	2	1	9	8	3	1	0	4	3	2	1	1	3	4	3	6	2	9	2	0	
16	0	2	1	2	4	9	1	3	3	2	4	8	6	9	6	0	3	5	5	0	3	8	3	6	3	4	2	5	3	3	6	6	1	3	1	2	8	1	3	4	3	6	4	3	2	1	7	4	2	8
17	3	4	3	1	3	5	7	3	4	4	5	2	8	5	6	3	0	5	0	8	2	0	2	3	4	3	2	4	9	6	3	8	5	9	3	2	9	3	1	6	1	3	7	3	9	4	5	7	3	3
18	3	3	4	4	4	3	3	2	6	2	1	2	2	2	6	5	5	0	4	9	5	8	7	9	2	7	6	5	9	3	1	2	2	7	5	9	6	5	4	8	4	3	5	1	9	8	4	4	3	3
19	2	3	4	4	6	6	9	3	6	6	2	3	1	8	9	5	0	4	0	8	6	6	1	7	8	3	3	7	6	1	6	4	1	8	3	8	2	1	3	1	5	2	6	3	1	2	1	4	5	8
20	1	1	2	4	4	3	3	4	10	6	2	1	3	6	1	0	8	9	8	0	6	9	5	7	1	5	6	4	6	7	0	2	6	8	6	5	7	2	5	1	6	4	6	5	7	8	3	8	7	8
21	4	5	1	7	6	6	9	3	3	6	1	7	9	9	8	3	2	5	6	6	0	4	8	3	1	3	3	9	7	4	6	9	2	5	8	5	9	5	4	2	1	7	2	2	5	9	1	1	7	6
22	5	5	4	8	6	3	7	3	2	3	2	3	4	5	2	8	0	8	6	9	4	0	6	9	2	7	1	9	8	5	1	9	4	6	1	5	4	6	7	3	0	9	4	2	7	8	1	3	5	3
23	3	3	3	2	9	5	6	4	8	2	4	1	9	5	3	3	2	7	1	5	8	6	0	6	4	3	9	8	3	2	2	7	8	4	6	4	3	4	2	2	5	6	4	2	0	0	0	3	7	6
24	3	5	3	4	6	4	7	8	7	2	3	5	4	2	1	6	3	9	7	7	3	9	6	0	7	4	4	5	7	9	6	9	4	1	9	7	3	3	7	7	3	3	4	2	0	6	0	9	1	2
25	0	2	1	4	4	5	9	2	9	4	2	7	6	8	4	3	4	2	8	1	1	2	4	7	0	8	7	6	5	8	3	4	4	1	6	4	8	4	4	4	3	2	1	3	6	2	9	7	5	0
26	5	3	4	5	4	0	1	3	9	3	4	5	1	3	8	4	3	7	3	5	3	7	3	4	8	0	7	7	2	3	3	3	5	1	5	3	7	7	9	8	3	7	6	4	5	2	8	5	5	2
27	2	4	4	3	3	6	3	3	1	4	6	7	3	8	1	2	2	6	3	6	3	1	9	4	7	7	0	9	2	2	6	3	4	8	2	4	4	1	5	5	2	2	2	4	2	8	8	4	7	3
28	1	2	5	5	4	6	4	6	7	9	4	1	1	2	4	5	4	5	7	4	9	9	8	5	6	7	9	0	4	2	3	2	3	8	6	5	4	2	3	5	5	8	5	5	4	5	0	1	3	9

29	3	2	4	9	5	4	8	8	5	1	1	0	3	5	3	3	9	9	6	6	7	8	3	7	5	2	2	4	0	2	5	7	1	2	3	6	5	1	6	2	6	4	3	5	1	4	6	8	2	2
30	4	2	2	3	4	3	4	5	2	2	2	2	2	5	2	3	6	3	1	7	4	5	2	9	8	3	2	2	2	0	4	3	5	4	4	5	7	3	7	4	6	5	3	4	6	1	4	4	1	5
31	4	1	6	3	4	0	4	2	1	1	1	7	1	5	2	6	3	1	6	0	6	1	2	6	3	3	6	3	5	4	0	6	7	5	7	4	7	1	6	1	4	7	5	1	6	5	1	6	4	7
32	4	4	1	2	4	0	4	5	5	7	6	4	6	2	1	6	8	2	4	2	9	9	7	9	4	3	3	2	7	3	6	0	1	8	7	5	5	3	4	3	3	2	5	3	5	3	2	4	3	2
33	3	4	4	4	4	6	3	3	4	5	6	1	7	2	9	1	5	2	1	6	2	4	8	4	4	5	4	3	1	5	7	1	0	3	5	2	2	6	1	4	2	3	1	4	2	5	5	1	3	1
34	4	3	3	3	4	1	4	6	2	7	5	6	5	3	8	3	9	7	8	8	5	6	4	1	1	1	8	8	2	4	5	8	3	0	3	1	2	1	4	6	5	0	0	2	3	4	3	3	4	1
35	4	3	5	3	3	6	5	3	2	5	8	8	7	5	3	1	3	5	3	6	8	1	6	9	6	5	2	6	3	4	7	7	5	3	0	6	0	3	2	7	6	4	4	3	4	2	2	6	2	2
36	3	9	4	2	1	7	1	6	5	7	4	6	7	3	1	2	2	9	8	5	5	5	4	7	4	3	4	5	6	5	4	5	2	1	6	0	6	5	1	4	3	7	5	3	4	8	6	5	2	1
37	2	1	2	2	3	7	6	8	3	6	1	4	2	5	0	8	9	6	2	7	9	4	3	3	8	7	4	4	5	7	7	5	2	2	0	6	0	6	2	3	1	1	1	1	1	3	8	7	5	6
38	1	4	1	3	4	6	9	3	2	7	6	6	5	9	4	1	3	5	1	2	5	6	4	3	4	7	1	2	1	3	1	3	6	1	3	5	6	0	7	2	5	1	8	4	2	3	7	1	5	1
39	2	2	1	2	1	3	6	7	5	5	4	3	4	1	3	3	1	4	3	5	4	7	2	7	4	9	5	3	6	7	6	4	1	4	2	1	2	7	0	5	4	4	3	1	3	1	2	1	2	3
40	4	3	3	3	4	3	2	1	6	8	3	6	6	3	2	4	6	8	1	1	2	3	2	7	4	8	5	5	2	4	1	3	4	6	7	4	3	2	5	0	3	3	4	2	3	5	4	0	2	2
41	6	2	4	1	3	4	9	3	7	5	2	6	3	3	1	3	1	4	5	6	1	0	5	3	3	3	2	5	6	6	4	3	2	5	6	3	1	5	4	3	0	3	2	8	1	6	4	4	3	5
42	6	1	3	1	4	4	5	1	6	9	6	9	5	8	1	6	3	3	2	4	7	9	6	3	2	7	2	8	4	5	7	2	3	0	4	7	1	1	4	3	3	0	1	4	6	6	7	2	5	6
43	5	2	2	2	4	6	1	6	2	4	2	8	8	5	3	4	7	5	6	6	2	4	4	1	6	2	5	3	3	5	5	1	0	4	5	1	8	3	4	2	1	0	3	8	3	5	9	9	2	
44	2	4	4	4	1	4	2	3	6	3	2	3	3	5	4	3	3	1	3	5	2	2	2	2	3	4	4	5	5	4	1	3	4	2	3	3	1	4	1	2	8	4	3	0	8	7	3	4	4	2
45	7	6	3	2	6	4	2	3	3	3	1	7	1	5	3	2	9	9	1	7	5	7	0	0	6	5	2	4	1	6	6	5	2	3	4	4	1	2	3	3	1	6	8	8	0	3	3	2	2	4
46	3	4	4	5	4	3	2	5	2	4	1	2	1	3	6	1	4	8	2	8	9	8	0	6	2	2	8	5	4	1	5	3	5	4	2	8	3	3	1	5	6	6	3	7	3	0	4	3	4	1
47	5	2	3	2	2	9	1	7	5	4	2	6	9	1	2	7	5	4	1	3	1	1	0	0	9	8	8	0	6	4	1	2	5	3	2	6	8	7	2	4	4	7	5	3	3	4	0	2	4	3
48	0	4	2	5	4	1	1	9	6	3	2	9	7	3	9	4	7	4	4	8	1	3	3	9	7	5	4	1	8	4	6	4	1	3	6	5	7	1	1	0	4	2	9	4	2	3	2	0	3	4
49	3	3	3	2	4	6	8	5	5	7	7	6	1	2	2	2	3	3	5	7	7	5	7	1	5	5	7	3	2	1	4	3	3	4	2	2	5	5	2	2	3	5	9	4	2	4	4	3	0	5
50	1	1	5	5	1	3	5	1	5	4	8	5	1	8	0	8	3	3	8	8	6	3	6	2	0	2	3	9	2	5	7	2	1	1	2	1	6	1	3	2	5	6	2	2	4	1	3	4	5	0

### Μητρώο αποστάσεων L (km) ( $1 \leq j \leq 25$ )

L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1		0,6	0,9	1,2	0,35	1,4	1,6	1,7	1,8	2	2,1	2,2	2	2	2,2	2,2	2,2	2,5	2,6	2,8	1,3	1,8	2,8	3,1	3,1
2	0,6		0,3	0,6	0,29	0,75	1,2	1,6	1,2	1,4	1,5	1,7	1,4	1,6	1,7	1,7	1,9	2	2,1	2,4	0,7	1,2	2,3	2,5	2,5
3	0,9	0,3		0,4	0,6	0,55	0,85	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,3	1,3	1,5	1,6	1,8	2	2,1	0,75	1	2,1	2,5	2,5
4	1,2	0,6	0,4		0,9	0,23	0,6	1	0,8	1	1,1	1,2	0,85	1	1,1	1,1	1,4	1,4	1,6	1,8	0,35	0,65	1,8	2,1	2,1
5	0,35	0,29	0,6	0,9		1,1	1,5	1,7	1,5	1,7	1,8	1,9	1,7	1,9	1,9	2	2,1	2,3	2,3	2,7	1	1,5	2,6	2,8	2,8
6	1,4	0,75	0,55	0,23	1,1		0,5	0,85	0,6	0,85	0,95	1,1	0,7	0,9	1	1	1,2	1,2	1,5	1,6	0,27	0,5	1,6	1,9	1,9
7	1,6	1,2	0,85	0,6	1,5	0,5		0,4	0,6	0,85	1,1	1	0,6	0,45	0,5	0,65	0,75	0,9	1,4	1,3	0,6	0,45	1,3	1,7	1,9
8	1,7	1,6	1,2	1	1,7	0,85	0,4		1	1,2	1,6	1,2	0,8	0,6	0,35	0,65	0,5	0,85	1,5	1,1	1	0,8	1,2	1,6	1,9
9	1,8	1,2	1,2	0,8	1,5	0,6	0,6	1		0,26	0,5	0,45	0,4	0,55	0,8	0,7	1,1	1	0,85	1,3	0,5	0,2	1,3	1,3	1,3
10	2	1,4	1,4	1	1,7	0,85	0,85	1,2	0,26		0,26	0,6	0,65	0,8	1	0,95	1,3	1,2	1	1,6	0,75	0,45	1,6	1,5	1,4
11	2,1	1,5	1,5	1,1	1,8	0,95	1,1	1,6	0,5	0,26		0,3	0,75	1	1,2	0,95	1,3	1,2	0,75	1,6	0,8	0,7	1,3	1,2	1,2
12	2,2	1,7	1,6	1,2	1,9	1,1	1	1,2	0,45	0,6	0,3		0,45	0,65	0,9	0,6	1	0,9	0,4	1,2	1	0,65	1	0,9	0,85
13	2	1,4	1,2	0,85	1,7	0,7	0,6	0,8	0,4	0,65	0,75	0,45		0,21	0,45	0,3	0,7	0,6	0,85	1	0,8	0,21	0,95	1,3	1,3
14	2	1,6	1,3	1	1,9	0,9	0,45	0,6	0,55	0,8	1	0,65	0,21		0,23	0,25	0,5	0,55	1,1	0,9	1	0,4	0,85	1,3	1,5
15	2,2	1,7	1,3	1,1	1,9	1	0,5	0,35	0,8	1	1,2	0,9	0,45	0,23		0,28	0,3	0,5	1,2	0,9	1,1	0,6	0,85	1,2	1,6
16	2,2	1,7	1,5	1,1	2	1	0,65	0,65	0,7	0,95	0,95	0,6	0,3	0,25	0,28		0,4	0,27	0,9	0,65	1,1	0,5	0,6	1	1,4
17	2,2	1,9	1,6	1,4	2,1	1,2	0,75	0,5	1,1	1,3	1,3	1	0,7	0,5	0,3	0,4		0,45	1,2	0,65	1,3	0,9	0,75	1,1	1,5
18	2,5	2	1,8	1,4	2,3	1,2	0,9	0,85	1	1,2	1,2	0,9	0,6	0,55	0,5	0,27	0,45		0,9	0,4	1,3	0,75	0,35	0,85	1,2
19	2,6	2,1	2	1,6	2,3	1,5	1,4	1,5	0,85	1	0,75	0,4	0,85	1,1	1,2	0,9	1,2	0,9		1	1,4	1	0,7	0,5	0,45
20	2,8	2,4	2,1	1,8	2,7	1,6	1,3	1,1	1,3	1,6	1,6	1,2	1	0,9	0,9	0,65	0,65	0,4	1		1,7	1,1	0,45	1	1,3
21	1,3	0,7	0,75	0,35	1	0,27	0,6	1	0,5	0,75	0,8	1	0,8	1	1,1	1,1	1,3	1,3	1,4	1,7		0,6	1,7	1,8	1,8
22	1,8	1,2	1	0,65	1,5	0,5	0,45	0,8	0,2	0,45	0,7	0,65	0,21	0,4	0,6	0,5	0,9	0,75	1	1,1	0,6		1,1	1,5	1,5
23	2,8	2,3	2,1	1,8	2,6	1,6	1,3	1,2	1,3	1,6	1,3	1	0,95	0,85	0,85	0,6	0,75	0,35	0,7	0,45	1,7	1,1		0,5	0,85
24	3,1	2,5	2,5	2,1	2,8	1,9	1,7	1,6	1,3	1,5	1,2	0,9	1,3	1,3	1,2	1	1,1	0,85	0,5	1	1,8	1,5	0,5		0,4
25	3,1	2,5	2,5	2,1	2,8	1,9	1,9	1,9	1,3	1,4	1,2	0,85	1,3	1,5	1,6	1,4	1,5	1,2	0,45	1,3	1,8	1,5	0,85	0,4	
26	2,8	2,2	2,2	1,8	2,5	1,6	1,6	1,6	1	1,1	0,85	0,55	1	1,2	1,3	1	1,3	1	0,12	1,1	1,5	1,2	0,7	0,4	0,3
27	3,4	2,8	2,8	2,4	3,1	2,2	2,2	2,3	1,6	1,8	1,5	1,2	1,6	1,8	1,9	1,7	1,8	1,5	0,75	1,6	2,1	1,8	1,2	0,7	0,35
28	3,6	3,1	3	2,6	3,3	2,5	2,4	2,5	1,8	2	1,8	1,4	1,8	2,1	2,2	1,9	2,1	1,8	1	1,9	2,3	2	1,4	0,95	0,6
29	0,35	0,75	1	1,3	0,55	1,3	1,3	1,4	2	2,2	2,3	2,3	1,9	1,8	1,7	2	1,8	2,2	2,9	2,5	1,5	1,7	2,5	2,9	3,3

30	4	3,5	3,4	3	3,7	2,8	2,7	2,6	2,2	2,4	2,2	1,8	2,2	2,3	2,3	2	2,2	1,8	1,4	1,9	2,7	2,4	1,4	1,2	1
31	3	2,4	2,4	2	2,7	1,8	1,5	1,4	1,2	1,3	1,1	0,75	1,2	1,1	1,1	0,85	1	0,7	0,35	0,85	1,7	1,3	0,35	0,14	0,5
32	3,3	2,8	2,6	2,2	3,2	2,1	1,7	1,6	1,8	2,2	2	1,6	1,4	1,4	1,4	1,1	1,1	0,85	1,3	0,65	2,2	1,6	0,65	0,75	1,1
33	4,7	4,1	4,1	3,7	4,4	3,5	3,5	3,5	2,9	3,1	2,9	2,5	2,9	3,1	3,1	2,9	3	2,6	2,1	2,7	3,4	3,1	2,3	2	1,7
34	4	3,4	3,4	3	3,7	2,8	2,8	2,9	2,2	2,4	2,1	1,8	2,2	2,4	2,5	2,3	2,4	2,1	1,4	2,1	2,7	2,4	1,8	1,3	0,95
35	5,5	4,9	4,9	4,5	5,2	4,3	4,3	4,4	3,7	3,9	3,6	3,3	3,7	3,9	4	3,8	3,9	3,6	2,8	3,7	4,2	3,9	3,3	2,8	2,4
36	4	3,4	3,4	3	3,7	2,8	2,9	3	2,3	2,1	1,9	1,9	2,3	2,5	2,6	2,4	2,6	2,3	1,5	2,4	2,7	2,5	1,9	1,5	1,1
37	4,3	3,7	3,7	3,3	4	3,1	3,2	3,3	2,6	2,5	2,2	2,2	2,6	2,8	2,9	2,7	2,8	2,5	1,7	2,6	3	2,8	2,1	1,6	1,3
38	2,1	2,4	2,7	3	2,1	3,2	3,6	3,4	3,6	3,9	3,9	4,1	3,9	4	3,8	4,1	3,9	4,3	4,5	4,5	3,1	3,6	4,6	4,9	5
39	1,4	1,7	1,9	2,2	1,6	2,3	2,3	2	2,9	3,2	3,6	3,3	2,7	2,5	2,4	2,7	2,5	2,8	3,5	3,1	2,5	2,7	3,2	3,5	3,9
40	1,8	2,1	1,8	2,1	1,9	2,1	1,7	1,4	2,3	2,5	3	2,6	2,1	1,9	1,7	2	1,9	2,2	2,9	2,2	2,3	2,1	2,6	2,9	3,3
41	0,65	1,1	1,2	1,5	0,85	1,6	1,6	1,6	2,3	2,5	2,6	2,6	2,2	2,1	1,9	2,2	2,1	2,4	3,1	2,7	1,8	2	2,8	3,1	3,5
42	1,1	1,4	1,1	1,4	1,2	1,4	1,1	0,85	1,7	2	2,4	2,1	1,6	1,4	1,2	1,5	1,3	1,7	2,3	2	1,7	1,5	2	2,3	2,8
43	1,4	1,7	1,4	1,7	1,6	1,8	1,3	1	1,9	2,1	2,6	2,2	1,7	1,5	1,3	1,6	1,5	1,8	2,5	1,8	1,9	1,7	2,2	2,5	2,9
44	2,2	2,2	1,9	1,6	2,3	1,5	1	0,65	1,5	1,8	1,9	1,6	1,2	1	0,7	1	0,65	1	1,8	0,9	1,6	1,3	1,4	1,8	2,2
45	2	1,9	1,6	1,4	2	1,2	0,75	0,45	1,3	1,5	1,7	1,3	0,9	0,7	0,45	0,75	0,45	0,9	1,6	1,1	1,4	1,1	1,3	1,6	2
46	1,7	1,7	1,4	1,5	1,8	1,3	0,85	0,55	1,5	1,7	2	1,7	1,3	1,1	0,85	1,1	0,95	1,3	2	1,5	1,5	1,3	1,6	2	2,4
47	1,8	1,7	1,4	1,2	1,7	1	0,55	0,18	1,2	1,4	1,6	1,3	0,8	0,6	0,4	0,65	0,5	0,85	1,5	1,1	1,2	1	1,2	1,5	1,9
48	2,8	2,5	2,2	2	2,7	1,8	1,4	1,1	1,6	1,8	1,8	1,5	1,2	1,1	0,9	0,9	0,6	0,6	1,3	0,24	2	1,4	0,7	1,2	1,6
49	3,2	2,9	2,6	2,4	3,1	2,2	1,8	1,6	2	2,4	2,2	1,8	1,6	1,5	1,3	1,3	1	1,1	1,6	0,7	2,4	1,8	1	1,5	1,8
50	3,2	2,9	2,6	2,2	3,1	2,1	1,7	1,5	1,8	2,2	1,9	1,6	1,4	1,4	1,3	1,1	0,95	0,85	1,3	0,45	2,2	1,6	0,7	1,1	1,5

**Μητρώο αποστάσεων  $L$  (km) ( $25 < j \leq 50$ )**

$L$	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
1	2,8	3,4	3,6	0,35	4	3	3,3	4,7	4	5,5	4	4,3	2,1	1,4	1,8	0,65	1,1	1,4	2,2	2	1,7	1,8	2,8	3,2	3,2
2	2,2	2,8	3,1	0,75	3,5	2,4	2,8	4,1	3,4	4,9	3,4	3,7	2,4	1,7	2,1	1,1	1,4	1,7	2,2	1,9	1,7	1,7	2,5	2,9	2,9
3	2,2	2,8	3	1	3,4	2,4	2,6	4,1	3,4	4,9	3,4	3,7	2,7	1,9	1,8	1,2	1,1	1,4	1,9	1,6	1,4	1,4	2,2	2,6	2,6
4	1,8	2,4	2,6	1,3	3	2	2,2	3,7	3	4,5	3	3,3	3	2,2	2,1	1,5	1,4	1,7	1,6	1,4	1,5	1,2	2	2,4	2,2
5	2,5	3,1	3,3	0,55	3,7	2,7	3,2	4,4	3,7	5,2	3,7	4	2,1	1,6	1,9	0,85	1,2	1,6	2,3	2	1,8	1,7	2,7	3,1	3,1
6	1,6	2,2	2,5	1,3	2,8	1,8	2,1	3,5	2,8	4,3	2,8	3,1	3,2	2,3	2,1	1,6	1,4	1,8	1,5	1,2	1,3	1	1,8	2,2	2,1
7	1,6	2,2	2,4	1,3	2,7	1,5	1,7	3,5	2,8	4,3	2,9	3,2	3,6	2,3	1,7	1,6	1,1	1,3	1	0,75	0,85	0,55	1,4	1,8	1,7
8	1,6	2,3	2,5	1,4	2,6	1,4	1,6	3,5	2,9	4,4	3	3,3	3,4	2	1,4	1,6	0,85	1	0,65	0,45	0,55	0,18	1,1	1,6	1,5
9	1	1,6	1,8	2	2,2	1,2	1,8	2,9	2,2	3,7	2,3	2,6	3,6	2,9	2,3	2,3	1,7	1,9	1,5	1,3	1,5	1,2	1,6	2	1,8
10	1,1	1,8	2	2,2	2,4	1,3	2,2	3,1	2,4	3,9	2,1	2,5	3,9	3,2	2,5	2,5	2	2,1	1,8	1,5	1,7	1,4	1,8	2,4	2,2
11	0,85	1,5	1,8	2,3	2,2	1,1	2	2,9	2,1	3,6	1,9	2,2	3,9	3,6	3	2,6	2,4	2,6	1,9	1,7	2	1,6	1,8	2,2	1,9
12	0,55	1,2	1,4	2,3	1,8	0,75	1,6	2,5	1,8	3,3	1,9	2,2	4,1	3,3	2,6	2,6	2,1	2,2	1,6	1,3	1,7	1,3	1,5	1,8	1,6
13	1	1,6	1,8	1,9	2,2	1,2	1,4	2,9	2,2	3,7	2,3	2,6	3,9	2,7	2,1	2,2	1,6	1,7	1,2	0,9	1,3	0,8	1,2	1,6	1,4
14	1,2	1,8	2,1	1,8	2,3	1,1	1,4	3,1	2,4	3,9	2,5	2,8	4	2,5	1,9	2,1	1,4	1,5	1	0,7	1,1	0,6	1,1	1,5	1,4
15	1,3	1,9	2,2	1,7	2,3	1,1	1,4	3,1	2,5	4	2,6	2,9	3,8	2,4	1,7	1,9	1,2	1,3	0,7	0,45	0,85	0,4	0,9	1,3	1,3
16	1	1,7	1,9	2	2	0,85	1,1	2,9	2,3	3,8	2,4	2,7	4,1	2,7	2	2,2	1,5	1,6	1	0,75	1,1	0,65	0,9	1,3	1,1
17	1,3	1,8	2,1	1,8	2,2	1	1,1	3	2,4	3,9	2,6	2,8	3,9	2,5	1,9	2,1	1,3	1,5	0,65	0,45	0,95	0,5	0,6	1	0,95
18	1	1,5	1,8	2,2	1,8	0,7	0,85	2,6	2,1	3,6	2,3	2,5	4,3	2,8	2,2	2,4	1,7	1,8	1	0,9	1,3	0,85	0,6	1,1	0,85
19	0,12	0,75	1	2,9	1,4	0,35	1,3	2,1	1,4	2,8	1,5	1,7	4,5	3,5	2,9	3,1	2,3	2,5	1,8	1,6	2	1,5	1,3	1,6	1,3
20	1,1	1,6	1,9	2,5	1,9	0,85	0,65	2,7	2,1	3,7	2,4	2,6	4,5	3,1	2,2	2,7	2	1,8	0,9	1,1	1,5	1,1	0,24	0,7	0,45
21	1,5	2,1	2,3	1,5	2,7	1,7	2,2	3,4	2,7	4,2	2,7	3	3,1	2,5	2,3	1,8	1,7	1,9	1,6	1,4	1,5	1,2	2	2,4	2,2
22	1,2	1,8	2	1,7	2,4	1,3	1,6	3,1	2,4	3,9	2,5	2,8	3,6	2,7	2,1	2	1,5	1,7	1,3	1,1	1,3	1	1,4	1,8	1,6
23	0,7	1,2	1,4	2,5	1,4	0,35	0,65	2,3	1,8	3,3	1,9	2,1	4,6	3,2	2,6	2,8	2	2,2	1,4	1,3	1,6	1,2	0,7	1	0,7
24	0,4	0,7	0,95	2,9	1,2	0,14	0,75	2	1,3	2,8	1,5	1,6	4,9	3,5	2,9	3,1	2,3	2,5	1,8	1,6	2	1,5	1,2	1,5	1,1
25	0,3	0,35	0,6	3,3	1	0,5	1,1	1,7	0,95	2,4	1,1	1,3	5	3,9	3,3	3,5	2,8	2,9	2,2	2	2,4	1,9	1,6	1,8	1,5
26		0,65	0,9	3	1,3	0,3	1,2	2	1,2	2,7	1,4	1,6	4,7	3,6	3	3,2	2,5	2,6	1,9	1,7	2,1	1,6	1,4	1,7	1,4
27	0,65		0,25	3,7	0,65	0,85	1,1	1,3	0,6	2,1	0,75	1	5,3	4,3	3,7	3,9	3,1	3,3	2,5	2,4	2,8	2,3	1,8	1,9	1,6
28	0,9	0,25		3,9	0,4	1,1	1,3	1,1	0,35	1,9	0,55	0,75	5,6	4,5	3,9	4,1	3,4	3,5	2,7	2,6	3	2,5	2	2,1	1,8



29	3	3,7	3,9		4	2,9	2,9	4,9	4,1	5,6	4,2	4,5	2,3	1,3	1,4	0,6	0,75	1,1	1,9	1,7	1,3	1,5	2,4	2,7	2,8
30	1,3	0,65	0,4	4		1,3	1,4	0,9	0,35	1,8	0,75	0,95	5,9	4,6	4	4,2	3,5	3,6	2,8	2,7	3,1	2,6	2,1	2,2	1,9
31	0,3	0,85	1,1	2,9	1,3		0,9	2,1	1,4	2,9	1,6	1,8	4,8	3,4	2,7	3	2,2	2,4	1,6	1,4	1,8	1,4	1,1	1,3	1,1
32	1,2	1,1	1,3	2,9	1,4	0,9		2,3	1,7	3,1	1,8	2	5	3,6	2,8	3,2	2,4	2,5	1,5	1,6	2,1	1,6	0,8	0,85	0,45
33	2	1,3	1,1	4,9	0,9	2,1	2,3		0,7	1,3	1,3	1,1	6,7	5,5	4,9	5,1	4,3	4,5	3,5	3,6	4	3,5	3	2,8	2,7
34	1,2	0,6	0,35	4,1	0,35	1,4	1,7	0,7		1,5	0,6	0,6	5,9	4,9	4,3	4,5	3,7	3,9	3	3	3,3	2,9	2,4	2,5	2,1
35	2,7	2,1	1,9	5,6	1,8	2,9	3,1	1,3	1,5		2,1	1,9	7,4	6,4	5,7	5,9	5,2	5,3	4,5	4,4	4,8	4,4	3,8	3,9	3,6
36	1,4	0,75	0,55	4,2	0,75	1,6	1,8	1,3	0,6	2,1		0,3	5,8	5	4,3	4,4	3,8	4	3,2	3	3,4	3	2,5	2,6	2,3
37	1,6	1	0,75	4,5	0,95	1,8	2	1,1	0,6	1,9	0,3		6,1	5,3	4,7	4,8	4,1	4,3	3,5	3,4	3,7	3,3	2,7	2,8	2,5
38	4,7	5,3	5,6	2,3	5,9	4,8	5	6,7	5,9	7,4	5,8	6,1		1,5	2,9	1,8	2,7	2,8	3,7	3,6	3,2	3,5	4,5	4,6	4,8
39	3,6	4,3	4,5	1,3	4,6	3,4	3,6	5,5	4,9	6,4	5	5,3	1,5		1,4	0,7	1,3	1,4	2,3	2,2	1,8	2,1	3	3,2	3,4
40	3	3,7	3,9	1,4	4	2,7	2,8	4,9	4,3	5,7	4,3	4,7	2,9	1,4		1,4	0,7	0,4	1,3	1,4	1	1,4	2	2,2	2,4
41	3,2	3,9	4,1	0,6	4,2	3	3,2	5,1	4,5	5,9	4,4	4,8	1,8	0,7	1,4		1	1,2	2,1	1,9	1,5	1,7	2,7	3	3
42	2,5	3,1	3,4	0,75	3,5	2,2	2,4	4,3	3,7	5,2	3,8	4,1	2,7	1,3	0,7	1		0,3	1,1	0,9	0,55	0,95	1,9	2,1	2,2
43	2,6	3,3	3,5	1,1	3,6	2,4	2,5	4,5	3,9	5,3	4	4,3	2,8	1,4	0,4	1,2	0,3		1	1	0,6	1	1,7	1,8	2
44	1,9	2,5	2,7	1,9	2,8	1,6	1,5	3,5	3	4,5	3,2	3,5	3,7	2,3	1,3	2,1	1,1	1		0,26	0,65	0,5	0,75	1	1
45	1,7	2,4	2,6	1,7	2,7	1,4	1,6	3,6	3	4,4	3	3,4	3,6	2,2	1,4	1,9	0,9	1	0,26		0,45	0,27	1	1,2	1,3
46	2,1	2,8	3	1,3	3,1	1,8	2,1	4	3,3	4,8	3,4	3,7	3,2	1,8	1	1,5	0,55	0,6	0,65	0,45		0,45	1,3	1,5	1,6
47	1,6	2,3	2,5	1,5	2,6	1,4	1,6	3,5	2,9	4,4	3	3,3	3,5	2,1	1,4	1,7	0,95	1	0,5	0,27	0,45		1,1	1,4	1,4
48	1,4	1,8	2	2,4	2,1	1,1	0,8	3	2,4	3,8	2,5	2,7	4,5	3	2	2,7	1,9	1,7	0,75	1	1,3	1,1		0,45	0,4
49	1,7	1,9	2,1	2,7	2,2	1,3	0,85	2,8	2,5	3,9	2,6	2,8	4,6	3,2	2,2	3	2,1	1,8	1	1,2	1,5	1,4	0,45		0,4
50	1,4	1,6	1,8	2,8	1,9	1,1	0,45	2,7	2,1	3,6	2,3	2,5	4,8	3,4	2,4	3	2,2	2	1	1,3	1,6	1,4	0,4	0,4	

Πίνακας NEAREST5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
2	1	21	7	1	7	6	7	21	22	19	13	14	15	47	13	18	20	12	18	6	14	24	19	31	24	28	27	1	34	19	48	27	36	37	27	28	1	1	39	1	43	40	8	44	8	15	17	44	32
3	3	2	2	2	21	22	15	10	9	10	11	12	16	8	17	8	17	26	17	22	10	16	25	19	31	30	25	2	28	24	24	34	28	30	30	36	41	40	46	42	8	8	45	8	45	8	20	50	48
41	4	4	3	3	3	15	17	22	11	9	9	9	22	16	14	45	23	25	50	9	9	20	23	27	12	25	34	42	33	26	20	30	30	34	34	30	39	42	44	39	46	45	47	46	42	44	18	20	23
5	5	5	21	41	4	14	47	12	12	22	26	22	13	14	18	15	16	31	48	4	13	31	31	26	19	34	36	41	27	23	23	28	27	28	28	27	29	29	42	29	40	42	46	17	43	46	49	32	49
29	21	6	6	29	22	8	45	13	13	12	19	16	7	17	15	16	15	24	23	7	7	18	26	24	25	26	30	5	36	25	50	37	37	33	37	34	5	41	43	5	29	46	17	47	47	45	50	48	20
0,6	0,6	0,75	0,6	0,35	0,5	0,5	0,4	0,5	0,45	0,75	0,45	0,21	0,23	0,4	0,3	0,45	0,4	0,4	0,4	0,27	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,25	0,25	0,35	0,35	0,35	0,8	1,3	0,6	1,9	0,75	0,75	2,1	1,4	1,4	0,65	0,3	0,4	0,65	0,26	0,55	0,4	0,6	1	0,45
0,9	0,3	0,3	0,6	0,29	0,27	0,45	0,35	0,26	0,26	0,26	0,3	0,45	0,25	0,35	0,4	0,5	0,45	0,12	0,65	0,6	0,45	0,6	0,4	0,45	0,3	0,65	0,6	0,75	0,4	0,14	0,75	0,7	0,35	1,8	0,75	0,3	1,8	1,4	1	1	0,85	1	0,26	0,45	0,45	0,18	0,24	0,4	0,4
0,65	0,6	0,4	0,4	0,6	0,55	0,5	0,5	0,2	0,26	0,5	0,45	0,4	0,4	0,28	0,25	0,45	0,35	0,45	0,45	0,5	0,2	0,45	0,5	0,35	0,55	0,35	0,35	0,75	0,9	0,3	0,65	0,9	0,35	1,5	0,6	0,95	1,5	1,3	1,3	0,7	0,55	1	0,5	0,45	0,55	0,5	0,6	0,7	0,7
0,35	0,29	0,6	0,35	0,85	0,23	0,45	0,18	0,45	0,6	0,7	0,55	0,21	0,21	0,23	0,27	0,3	0,27	0,35	0,24	0,35	0,21	0,35	0,14	0,3	0,12	0,6	0,55	0,6	0,65	0,35	0,65	1,1	0,6	1,9	0,55	1	2,3	1,3	0,7	0,6	0,7	0,3	0,65	0,45	0,6	0,45	0,45	0,85	0,4
0,35	0,7	0,55	0,23	0,55	0,5	0,4	0,45	0,4	0,65	0,3	0,4	0,3	0,45	0,3	0,28	0,4	0,5	0,5	0,45	0,6	0,45	0,35	0,4	0,4	0,3	0,65	0,4	0,55	0,75	0,5	0,45	1,1	0,6	1,3	0,3	0,6	2,1	0,7	0,4	0,85	0,75	0,6	0,65	0,27	0,45	0,27	0,4	0,45	0,45

Πίνακας γεωγραφικών συντεταγμένων στάσεων

ΚΟΜΒΟΣ	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος
1	35,334593	25,120566
2	35,337201	25,124975
3	35,335311	25,127449
4	35,337254	25,130367
5	35,336221	25,122406
6	35,337096	25,132084
7	35,334313	25,134809
8	35,331442	25,135431
9	35,338497	25,137169
10	35,340247	25,138607
11	35,341017	25,138736
12	35,338956	25,140691
13	35,336519	25,138800
14	35,334681	25,138650
15	35,332597	25,138392
16	35,334260	25,140345
17	35,331092	25,140066
18	35,332965	25,142877
19	35,338812	25,145109
20	35,330514	25,144658
21	35,338899	25,132256
22	35,337184	25,136676
23	35,333315	25,146439
24	35,336606	25,148177
25	35,339757	25,149400
26	35,338707	25,146461
27	35,339302	25,152640
28	35,339144	25,155323
29	35,331880	25,122725
30	35,336711	25,157382
31	35,336554	25,146632
32	35,332195	25,149186
33	35,335538	25,165021
34	35,338479	25,159228
35	35,335766	25,174162
36	35,342750	25,156481
37	35,342785	25,159335
38	35,325105	25,106721
39	35,324124	25,116420
40	35,321481	25,129015
41	35,329254	25,119467
42	35,327153	25,128522
43	35,324632	25,129681
44	35,326278	25,138607
45	35,328449	25,137877
46	35,327136	25,133801
47	35,330129	25,136461
48	35,328344	25,144529
49	35,325525	25,146396
50	35,328694	25,147319