

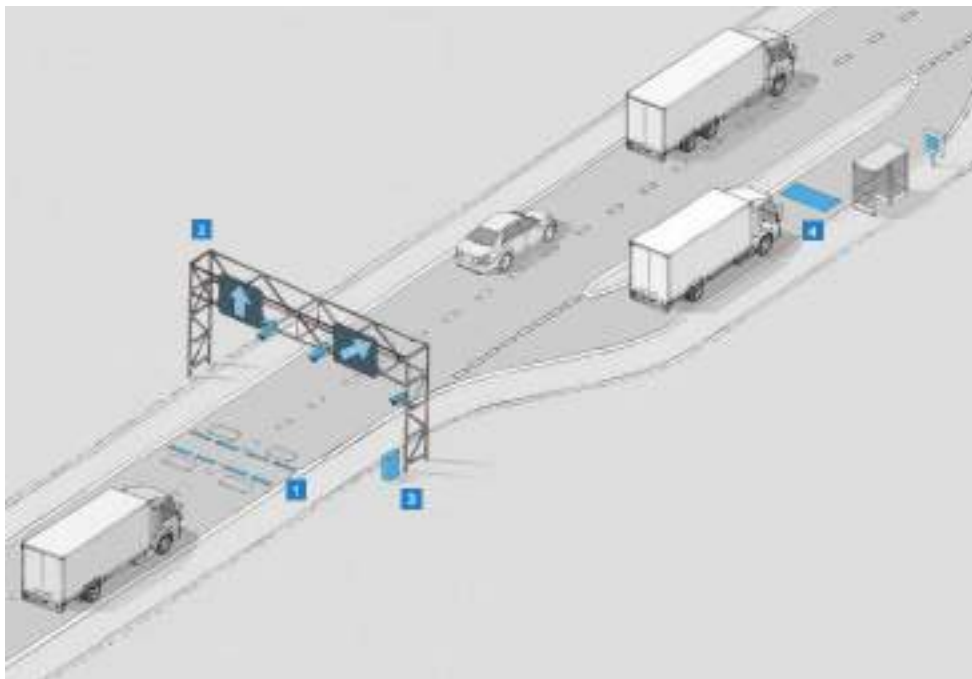


ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

Ανάπτυξη Μοντέλου Χωροθέτησης Σταθμών Ζύγισης Βαρέων Οχημάτων



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Γιδάρης

Επιβλέπων: Κεπαπτσόγλου Κωνσταντίνος

Αθήνα, Ιούλιος 2020

Ευχαριστίες

Τελειώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κ. Κεπαπτσόγλου, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ καθώς χωρίς την ουσιαστική βοήθεια του η παρούσα διπλωματική δεν θα είχε περατωθεί. Θέλω να του εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την άμεση και συνεχή βοήθειά τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Διδάκτορα της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ κ. Χριστίνα Ηλιοπούλου για τις παρατηρήσεις, την βοήθεια και το χρόνο που αφιέρωσε για την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και στους φίλους μου για την υποστήριξη που μου προσέφεραν σε όλα τα χρόνια της φοιτητικής μου πορείας.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη Μοντέλου Χωροθέτησης Σταθμών Ζύγισης Βαρέων Οχημάτων

Γιδάρης Γ. (Επιβλέπων: κ.Κεπαπτσόγλου Κ.)

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου βέλτιστης χωροθέτησης σταθμών WIM στο εθνικό οδικό δίκτυο της Ελλάδας. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται, αποτελεί μια παραλλαγή του μοντέλου μέγιστης κάλυψης και διατυπώνεται ως ένα ακέραιο μη γραμμικό μοντέλο προγραμματισμού υπό κατάλληλους περιορισμούς. Στόχος του μοντέλου είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων που ελέγχονται μια φορά μετά την εγκατάσταση των σταθμών WIM. Η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου πραγματοποιείται με χρήση του λογισμικού OpenSolver και πιο συγκεκριμένα επιλέγεται η μηχανής επίλυσης Nomad, που είναι κατάλληλη για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας εφαρμόζοντας διάφορα σενάρια και τα αποτελέσματα της για κάθε σενάριο παρουσιάζονται.

ABSTRACT

The objective of this diploma thesis is the development of a mathematical model, for locating WIM stations in the Greek National road Network. The model developed is the maximal covering location problem and is formulated as an integer non linear programming model under suitable constraints. The model aims at maximizing the number of once checked trucks after the installation of WIM stations. In order to solve the model, OpenSolver tool is utilized and more specifically Nomad Engine is selected which is suitable for solving non linear problems. Finally, a sensitivity analysis was carried out by applying different scenarios and then its results were presented.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενική Ανασκόπηση	1
1.2 Τρόποι Ζύγισης Βαρέων Οχημάτων	3
1.2.1 Παραδοσιακός τρόπος ζύγισης φορτηγών (Static Weighing).....	3
1.2.2 Ζύγιση εν κινήσει (Weight-in-Motion-WIM)	4
1.3 Τεχνολογίες WIM	8
1.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα WIM.....	13
1.5 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	14
1.6 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	15
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	16
2.1 Εισαγωγή στη Χωροθέτηση Εγκαταστάσεων.....	16
2.2 Ιστορική Αναδρομή και Εξέλιξη	17
2.3 Μεθοδολογική Προσέγγιση	20
3.ΒΑΣΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ	22
3.1 Εισαγωγή	22
3.2 Βασικά Μοντέλα Χωροθέτησης	22
3.2.1 Μοντέλα Μέγιστης απόστασης (Maximum Distance Models).....	22
3.2.2 Μοντέλο P- Κέντρων (The P-Center problem).....	23
3.2.3 Μοντέλο P- Διασποράς (The P- Dispersion Problem).....	24
3.2.4 Μοντέλα Κάλυψης (Covering Location problems)	25
3.2.5 Μοντέλο Συνόλου Κάλυψης (Set Covering Location Model).....	26
3.2.6 Μοντέλο Μέγιστης Κάλυψης (Maximal Covering Location Problem).....	28
3.2.7 Μοντέλα Μέσης ή Συνολικής Απόστασης (Total or Average Distance Models).....	29
3.2.8 Μοντέλα P- Διαμέσων (The P – Median Problem)	29
3.2.9 Μοντέλα Σταθερού κόστους (The Fixed-Charge Facility Location problem).....	31
3.2.10 Μοντέλα Δρομολόγησης ή Χωροθέτησης Πλήμνης (The Hub Location Problem)	33
3.2.11 Μοντέλα Χωροθέτησης Μέγιστου Αθροίσματος (The Maxisum Location Problem).....	35
4.5 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μοντέλων WIM.....	36
4.ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	46
4.1 Εισαγωγή	46
4.2 Κριτήρια Χωροθέτησης Σταθμών WIM	46
4.3 Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming).....	51
4.3.1 Ακέραιος Προγραμματισμός.....	54
4.3.2 Δυϊκό Πρόβλημα.....	55
4.4 Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (Non Linear Programming)	56
4.6 Επιλογή Μοντέλου Χωροθέτησης	59

4.6.1 Παραδοχές Προβλήματος	60
4.6.2 Περιοχή Εφαρμογής-Δεδομένα.....	60
4.6.2 Εργαλείο Επίλυσης	71
4.6.3 Αποτελέσματα Μοντέλου	74
4.7 Ανάλυση Ευαισθησίας.....	75
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	78
5.1 Ανασκόπηση διπλωματικής εργασίας.....	78
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	79
6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	80
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί το εισαγωγικό κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στους λόγους για τους οποίους κρίνεται απαραίτητη η επιβολή ζύγιση των φορτηγών καθώς και στις επιπτώσεις που υπάρχουν τόσο στις υποδομές όσο και στην οικονομία λόγω της υπερφόρτωσης τους. Στην συνέχεια, γίνεται αναφορά στους τρόπους ζύγισης των φορτηγών (στατική και δυναμική) και στους λόγους για τους οποίους έχει αντικατασταθεί η στατική ζύγιση με νέα συστήματα μέτρησης βάρους οχημάτων εν κινήσει (weigh in motion). Τέλος, αναφέρονται τα είδη των νέων συστημάτων, τα χαρακτηριστικά τους και δίνονται τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την εγκατάστασή τους.

1.1 Γενική Ανασκόπηση

Είναι γεγονός ότι τα υπερφορτωμένα φορτηγά αποτελούν σοβαρή απειλή για τις οδικές μεταφορές προκαλώντας αυξημένο κίνδυνο για τους χρήστες του οδικού δικτύου, επιδείνωση της οδικής ασφάλειας, σοβαρές επιπτώσεις στην ανθεκτικότητα των υποδομών και επηρεάζουν αρνητικά τον υγιή ανταγωνισμό μεταξύ των μέσων μεταφοράς και των διαχειριστών των οδών. Ένα υπερφορτωμένο φορτηγό είναι πιθανότερο να εμπλακεί σε ατύχημα και να έχει σοβαρότερες συνέπειες από ένα φορτηγό που μεταφέρει το επιτρεπόμενο βάρος φόρτωσης.

Όσο βαρύτερο είναι το όχημα, τόσο υψηλότερη είναι η κινητική του ενέργεια, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεγαλύτερες δυνάμεις πρόσκρουσης και οι ζημιές στα εμπλεκόμενα οχήματα και στις υποδομές να είναι εντονότερες. Ωστόσο, το βάρος δεν αποτελεί από μόνο του πρόβλημα καθώς τα βαριά φορτία μπορούν να μεταφέρονται με ασφάλεια από φορτηγά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό, όπως είναι τα «οχήματα υψηλής χωρητικότητας». Τα σημαντικότερα προβλήματα όμως παρατηρούνται όταν το μεταφερόμενο φορτίο υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ενός φορτηγού καθώς παρατηρούνται τα ακόλουθα:

- Αστάθεια φορτηγού: ένα υπερφορτωμένο όχημα είναι λιγότερο σταθερό λόγω της αύξησης του ύψους του κέντρου βάρους και μεγαλύτερη αδράνεια του οχήματος (π.χ. ρυμουλκούμενο ή ημιρυμουλκούμενο). Λόγω του υπερβολικού φορτίου, το ενσωματωμένο σύστημα ευστάθειας (ESP, σύστημα κατά της ανατροπής, κ.λπ.) φθείρεται πολύ γρηγορότερα και έτσι αυξάνεται ο κίνδυνος ανατροπής, εκτροπής από τη λωρίδας κυκλοφορίας και αναδίπλωσης του φορτηγού.
- Μείωση της ικανότητας πέδησης: το σύστημα πέδησης οποιουδήποτε φορτηγού έχει σχεδιαστεί για το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος που αναγράφεται στα έγγραφα του οχήματος. Η ικανότητα πέδησης δεν εξαρτάται μόνο από τα ίδια τα φρένα, αλλά επίσης και από τις επιδόσεις των ελαστικών και των αναρτήσεων που έχουν σχεδιαστεί για το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος του φορτηγού. Το υπερβολικό βάρος μειώνει τη δυνατότητα πέδησης ενός φορτηγού και μπορεί ακόμη και να καταστρέψει το σύστημα πέδησης ενός φορτηγού.

- Απώλεια κίνησης και ευελιξίας: ένα υπερφορτωμένο όχημα γίνεται χαμηλής ισχύος, με αποτέλεσμα να αναπτύσσει χαμηλότερες ταχύτητες και να αυξάνεται ο κίνδυνος συμφόρησης στις ανηφόρες ενώ στις κατηφόρες να παρατηρείται δυσκολία στην πέδηση και μεγάλες ταχύτητες. Ωστόσο, αυτό ενέχει πρόσθετους κινδύνους όχι μόνο για τους ίδιους τους οδηγούς αλλά για τους άλλους οδηγούς.
- Η υπερφόρτωση των οχημάτων μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση των ελαστικών, με κίνδυνο έκρηξης των ελαστικών.

Όταν μεταφέρονται εύφλεκτα προϊόντα, οι υπερφορτώσεις των οχημάτων αυξάνουν τον κίνδυνο εκδήλωσης πυρκαγιάς λόγω ατυχήματος ή απώλειας ελέγχου ενός φορτηγού.



Εικόνα 1.1: Ανατροπή και αναδίπλωση φορτηγού

Τα υπερφορτωμένα φορτηγά αποτελούν απειλή για την οδική ασφάλεια, αλλά και για την υποδομή, καθώς αυξάνουν τη φθορά του οδοστρώματος προκαλώντας ρωγμές και αυλακώσεις, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην πρόωρη αστοχία οδοστρώματος. Τα βαριά φορτηγά συμβάλλουν ακόμη και στην κόπωση των γεφυρών λόγω των μεγάλων φορτίσεων που προκαλούν στο οδόστρωμα. Όταν τα φορτηγά είναι υπερφορτωμένα, η επιθετικότητα τους αυξάνεται σημαντικά. Ακραίες περιπτώσεις φόρτισης γεφυρών παρατηρούνται όταν υπάρχει διέλευση βαρέων οχημάτων δηλαδή φορτηγών που είτε μεταφέρουν ασυνήθιστα μεγάλα φορτία (π.χ. γερανοί) είτε προβαίνουν σε παράνομες υπερφορτώσεις. Ορισμένες παλιές και κακοσυντηρημένες γέφυρες με μειωμένη φέρουσα ικανότητα μπορεί να υποστούν σοβαρές ζημιές ή ακόμη και να καταστραφούν, από τη συχνή διέλευση υπερφορτωμένων φορτηγών.



(α)



(β)

Εικόνα 1.2: (α) Φθορές στην επιφάνεια οδοστρώματος, (β) Κατεδάφιση γέφυρας λόγω υπερφορτώσης βαρέου οχήματος

Ωστόσο, παρατηρούνται και οικονομικές επιπτώσεις από την υπερφόρτωση των φορτηγών καθώς αυτή οδηγεί σε μεγάλες στρεβλώσεις στον ανταγωνισμό εμπορευματικών μεταφορών, μεταξύ των τρόπων μεταφοράς (π.χ. σιδηροδρομικές, πλωτές και οδικές) και των φορέων των οδικών μεταφορών. Στη Γαλλία, εκτιμήθηκε ότι ένα αρθρωτό φορτηγό 5 αξόνων, λειτουργούσε με υπερφόρτωση της τάξεως του 20% όλο το χρόνο, δημιουργώντας επιπλέον 25.000 €. Υπερφόρτωση σημαίνει επίσης παραβίαση των φορολογικών κανόνων, όπως τα τέλη ταξινόμησης οχήματος, τέλη άξονα και τέλη υποδομής διοδίων. Είναι επομένως απαραίτητο να υπάρχουν κανονισμοί σχετικά με το βάρος και η διάσταση του οχήματος ώστε να ελαχιστοποιείται ο αριθμός των υπερφορτωμένων φορτηγών. Η ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης των φορτίων των φορτηγών κρίνεται απαραίτητη ως μέρος ευφώνων συστημάτων μεταφοράς (ITS), τα οποία προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες και εναλλακτικές λύσεις στον παραδοσιακό τρόπο παρακολούθησης του οδικού δικτύου.

1.2 Τρόποι Ζύγισης Βαρέων Οχημάτων

1.2.1 Παραδοσιακός τρόπος ζύγισης φορτηγών (Static Weighing)

Η παραδοσιακή διαδικασία για τη ζύγιση βαρέων οχημάτων είναι η στατική ζύγιση. Αυτή ήταν η μόνη μέθοδος που είχε εγκριθεί από τη νομική μετρολογία μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990 για επιβολή του ορίου βάρους. Χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας είναι η ακρίβεια. Οι γεφυροπλάστιγγες και οι ζυγοί τροχών- αξόνων, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του μεικτού βάρους του οχήματος και τα φορτία τροχών ή αξόνων. Εάν χρησιμοποιούνται κλίμακες αξόνων, το μεικτό βάρος του οχήματος επιτυγχάνεται αθροίζοντας τα επιμέρους φορτία άξονα ενώ αν χρησιμοποιούνται κλίμακες τροχών, το φορτίο του άξονα υπολογίζεται αθροίζοντας τα φορτία του τροχού κάθε άξονα.

Υπάρχουν τρεις τύποι στατικών συσκευών ζύγισης:

- Τα σταθερά συστήματα, τα οποία είναι μονίμως τοποθετημένα στο οδόστρωμα, συνήθως σε πλαίσια από σκυρόδεμα ή πλατφόρμες. Αυτό ισχύει για όλες τις γεφυροπλάστιγγες και ζυγαριές τροχών και αξόνων.
- Ημι-φορητά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν εγκαταστάσεις επί της οδού (παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, σύνδεση με τη συσκευή καταγραφής βάρους κ.λπ.).

- Φορητά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν ζυγαριές τροχών ή αξόνων που τοποθετούνται στην επιφάνεια του οδοστρώματος (π.χ. σε χώρο στάθμευσης ή σε οποιαδήποτε περιοχή ζύγισης) και συμπληρώνονται με επίπεδες πλάκες ή ράμπες, ώστε να βρίσκονται όλοι οι τροχοί που ζυγίζονται στο ίδιο επίπεδο.



Εικόνα 1.3: Φορητές στατικές ζυγαριές τροχών

Η στατική ζύγιση διέπεται από διάφορους περιορισμούς. Αυτή η διαδικασία απαιτεί κατάλληλο προσωπικό και μεγάλη έκταση για να εκτελεσθεί. Το προσωπικό χρειάζεται για να επιλέγει και να διακόπτει τα φορτηγά που χρησιμοποιούν το δίκτυο εκτελώντας τη διαδικασία ζύγισης στη περιοχή ελέγχου και επιπλέον να επιβάλει πρόστιμα και κυρώσεις στους παραβάτες εφόσον απαιτείται. Ωστόσο, σε αυτοκινητόδρομους και οδικές οδούς είναι δύσκολο να εκτελεστεί η διαδικασία της στατικής ζύγισης καθώς η μέθοδος αυτή απαιτεί τα οχήματα να είναι σταματημένα με αποτέλεσμα όταν διεξάγεται να δημιουργείται κυκλοφοριακή συμφόρηση και καθυστέρηση στη μεταφορά των εμπορευμάτων. Έτσι το σύστημα στατικής ζύγισης πλέον αποτελεί μια αναποτελεσματική μέθοδο ζύγισης. Στην Ευρώπη, υπολογίστηκε ότι ο μέσος χρόνος ανάμεσα σε ελέγχους ενός τυχαίου φορτηγού που χρησιμοποιείται καθημερινά ήταν σχεδόν 30 χρόνια. Με μια τόσο μικρή πιθανότητα να μετρηθεί - και τα αρκετά χαμηλού επιπέδου πρόστιμα για υπέρβαση βάρους - το κέρδος από την υπερφόρτωση πολύ μεγάλο. Λόγω του μεγάλου χρόνου που απαιτείται για στατική ζύγιση, όταν αρκετά φορτηγά επιλέγονται για έλεγχο, η περιοχή ζύγισης γεμίζει με αποτέλεσμα τα άλλα υπερφορτωμένα φορτηγά να μπορούν να παρακάμπτουν το σημείο ελέγχου. Επιπλέον, η στατική ζύγιση οδηγούσε σε καθυστερήσεις 10 έως 30 λεπτών (μερικές φορές ίσως και περισσότερο), οι οποίες έπλητταν εκτός από τους οδηγούς που ελέγχονταν και αυτούς που διέρχονταν από το οδικό δίκτυο.

1.2.2 Ζύγιση εν κινήσει (Weight-in-Motion-WIM)

Ένα σύστημα WIM είναι μια «διάταξη» που μετράει το δυναμικό βάρος του κινούμενου οχήματος και υπολογίζει την ισοδύναμη στατική του μάζα. Τα συστήματα ζύγισης σε κίνηση χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο του βάρους των υπέρβαρων φορτηγών στο πλαίσιο τιμολογιακών διαδικασιών. Σήμερα τα συστήματα WIM είναι πρωταρχικής σημασίας στη διαχείριση των οδικών μεταφορών των εμπορευμάτων, στο σχεδιασμό των υποδομών των αυτοκινητόδρομων αλλά και στη συντήρησή τους, στην παρακολούθηση των

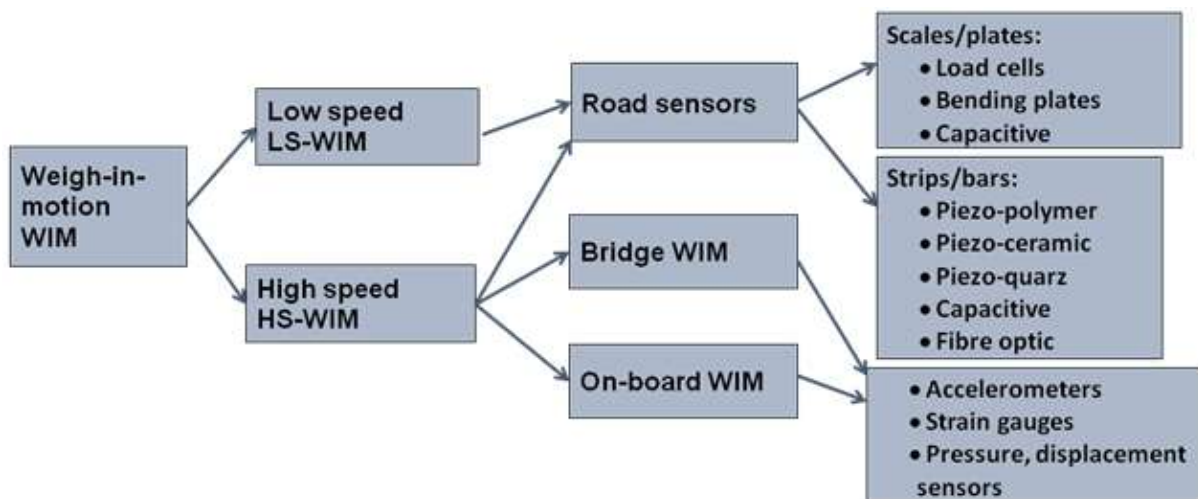
οχημάτων και των επιτρεπόμενων φορτίων τους ανά άξονα και τέλος στην εναρμόνιση των μεταφορών με την ισχύουσα νομοθεσία. Επίσης εκτός από τα οφέλη που προκύπτουν τόσο στους τομείς της φορολόγησης και της ασφάλειας αυξάνεται και η παραγωγικότητα των οχημάτων αφού δεν είναι υποχρεωμένα να σταματούν σε σταθμούς ζύγισης.

Τα τελευταία 20 χρόνια πολλά κράτη έχουν εισάγει και αναπτύξει τεχνολογίες WIM. Με βάση την ASTM (American Society of Testing and Materials) ως WIM ορίστηκε η διαδικασία υπολογισμού του μικτού βάρους ενός κινούμενου οχήματος και το ποσοστό αυτού το βάρους που μοιράζεται σε κάθε τροχό, άξονα ή σύστημα αξόνων, αλλά και συνδυασμός αυτών, μετρώντας και αναλύοντας τις στατικές δυνάμεις από τις ρόδες του οχήματος (1994). Ωστόσο καθεμία από αυτές έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και λόγω ότι η κάθε εφαρμογή έχει διαφορετικές απαιτήσεις στο κόστος και στην ακρίβεια, κάθε φορά εξετάζεται ποια από αυτές τις τεχνολογίες είναι κατάλληλη για να χρησιμοποιηθεί.

Τα συστήματα WIM επιτρέπουν τη διακριτική και συνεχή συλλογή πληροφοριών για το βάρος του οχήματος, που κυμαίνονται από ακριβείς μεμονωμένες μετρήσεις βάρους για κάθε βαρύ όχημα έως συγκεντρωτικό προφίλ βάρους οχήματος για οδικά τμήματα. Ομοίως, οι εφαρμογές κυμαίνονται από τη συλλογή δεδομένων για δραστηριότητες όπως ο προσδιορισμός και προγραμματισμός της συντήρησης έως στρατηγικές τιμολόγησης διόδων που σχετίζονται με το βάρος και ανίχνευση υπέρβαρων οχημάτων. Όπως και άλλες τεχνολογίες ελεύθερης ροής, τα συστήματα WIM προσφέρουν αυξημένη αποτελεσματικότητα στους αυτοκινητόδρομους και μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα επί του οχήματος και στο οδόστρωμα για να παρέχουν πληροφορίες στους χειριστές των οδών και τους οδηγούς των οχημάτων.

Πολλές τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί για τα συστήματα WIM συμπεριλαμβανομένων των κλιμάκων με βάση την ένταση (τεχνολογία καμπτόμενων πλακών) και των αισθητήρων που τοποθετούνται στο οδόστρωμα (πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες, χωρητικές επιφάνειες). Αυτές οι τεχνολογίες χαρακτηρίζονται από αντιστρόφως ανάλογα χαρακτηριστικά (κόστος και ακρίβειας μέτρησης) με την τελευταία συνήθως να είναι η αποφασιστική παράμετρος για την εφαρμογή τους σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα οι κλίμακες με βάση την ένταση προσφέρουν λύση χαμηλού κόστους και ικανοποιητικές αποδόσεις ενώ οι τεχνολογίες με βάση τις κυψέλες φόρτισης παρέχουν ένα ακριβές και εύκολα συντηρούμενο σύστημα με σημαντικά υψηλότερο κόστος εξοπλισμού και εγκατάστασης.

Επομένως τα συστήματα που χρησιμοποιούν την ένταση εφαρμόζονται κυρίως για σκοπούς συλλογής δεδομένων όπου απαιτούνται αρκετές εγκαταστάσεις σε ολόκληρο το δίκτυο. Τέτοια δίκτυα συλλογής δεδομένων μπορούν να βελτιωθούν με αισθητήρες υψηλότερης ακρίβειας εγκατεστημένους σε βασικά δίκτυα για τη βαθμονόμηση των δεδομένων που συλλέγονται από άλλους αισθητήρες. Τα δεδομένα έπειτα συλλέγονται και αναλύονται με προσέγγιση του δικτύου. Ομοίως οι κυψέλες φόρτισης χρησιμοποιούνται συνήθως σε εγκαταστάσεις επιβολής βάρους, γέφυρες και διόδους όπου απαιτείται υψηλότερη απόδοση σε συνδυασμό με εύκολη συντήρηση.



Εικόνα 1.4: Κατηγορίες WIM

1.2.2.1 WIM χαμηλής ταχύτητας (LS-WIM)

Τα συστήματα WIM χαμηλής ταχύτητας αποτελούνται από ζυγαριές τροχών ή αξόνων και είναι κυρίως εξοπλισμένα με κυψέλες φόρτισης, οι οποίες έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια από όλες τις υπόλοιπες τεχνολογίες WIM. Η ζύγιση πραγματοποιείται σε μια προκαθορισμένη περιοχή, συνήθως εκτός των λωρίδων κυκλοφορίας, σε μια επίπεδη και ομαλή επιφάνεια από σκυρόδεμα ή σε ισχυρές πλατφόρμες ασφάλτου μήκους τουλάχιστον 30 μέτρων και τα οχήματα πρέπει να διέρχονται με ταχύτητα 5-10 χμ/ώρα ώστε να εξαλειφθούν οι δυναμικές επιδράσεις του οχήματος και να γίνει η υπόθεση ότι οι δυνάμεις πρόσκρουσης των ελαστικών είναι ίσες με τα στατικά φορτία του τροχού. Το λογισμικό της απόκτησης δεδομένων και το σύστημα επεξεργασίας έχουν σχεδιαστεί για την ανάλυση του σήματος των κυψελών φόρτισης και για τον ακριβή υπολογισμό του φορτίου των τροχών ή αξόνων λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα του οχήματος. Ο Διεθνής Οργανισμός Νομικής Μετρολογίας δημοσίευσε μια διεθνή σύσταση για τη διενέργεια δοκιμών έγκρισης τύπου μοντέλου και για την πιστοποίηση αυτόματων οργάνων ζύγισης για οδικά οχήματα, που ισχύει για συστήματα LS-WIM. Τα συστήματα WIM ταχύτητας έχουν εφαρμοστεί νόμιμα στο Ηνωμένο Βασίλειο από το 1978 για επιβολή περιορισμών κίνησης βαρέων οχημάτων καθώς και σε αρκετές Βόρειες Αμερικανικές πολιτείες και επαρχίες του Καναδά και της Αυστραλίας. Στα τέλη του 1990 με αρχές 2000, αρκετές ευρωπαϊκές χώρες (Γερμανία, Γαλλία, Βέλγιο κ.λπ.) ενέκριναν την εφαρμογή συστημάτων WIM χαμηλής ταχύτητας για επιβολή. Η ακρίβεια των συστημάτων LS-WIM μπορεί να είναι 3 έως 5%.



Εικόνα 1.5: Low speed weigh in motion (LS-WIM)

1.2.2.2 Υψηλής ταχύτητας WIM (HS-WIM)

Τα συστήματα υψηλής ταχύτητας WIM διαθέτουν αισθητήρες, οι οποίοι τοποθετούνται σε μία ή περισσότερες λωρίδες κυκλοφορίας και μετρούν και καταγράφουν το φορτίο των αξόνων και το μεικτό βάρος των οχημάτων, καθώς αυτά διέρχονται με ταχύτητα από το οδικό δίκτυο. Η μέτρηση γίνεται στη λωρίδα κυκλοφορίας καθώς τα οχήματα διέρχονται με σταθερή ταχύτητα (60-90 ή 100 χμ/ώρα), χωρίς να απαιτείται η επιβράδυνση ή το σταμάτημα των οχημάτων. Έτσι επιτυγχάνεται η ζύγιση σχεδόν όλων των οχημάτων που διέρχονται από το δίκτυο, ενώ παράλληλα καταγράφονται μετρήσεις και χαρακτηριστικά του κάθε οχήματος. Οι μετρήσεις επηρεάζονται από τη δυναμική του οχήματος (επιτάχυνση) και μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από τις στατικές ζυγίσεις σε ανώμαλες επιφάνειες. Τα κύρια πλεονεκτήματα ενός συστήματος υψηλής ταχύτητας είναι ότι:

- αποτελεί ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα ζύγισης.
- καταγράφει όλα τα οχήματα - ανεξάρτητα από την ταχύτητα, τον αριθμό των αξόνων ή την ώρα της ημέρας
- δεν απαιτεί πρόσθετη υποδομή και μπορεί να εγκατασταθεί σε καλό οδόστρωμα και οδικά τμήματα σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές προδιαγραφές του WIM
- είναι ένα σύστημα με προσιτό κόστος.

Ωστόσο, τα συστήματα HS-WIM έχουν ορισμένους περιορισμούς. Το κύριο ζήτημα είναι η ακρίβεια, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ομαλότητα του οδοστρώματος και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του, καθώς και από την απόδοση των αναρτήσεων λόγω της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ του οδοστρώματος και του οχήματος. Επιπλέον, λόγω ότι οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι στο οδόστρωμα και εκτίθενται σε μεγάλα φορτία κυκλοφορίας με κίνδυνο αστοχίας του οδοσώματος, ο χρόνος ζωής τους περιορίζεται σημαντικά. Ένα ακόμη δύσκολο ζήτημα είναι η αξιολόγηση της βαθμονόμησης και ακρίβειας συστημάτων HS-WIM. Η ακρίβεια των συστημάτων HS-WIM ποικίλλει από B (10) έως D (25), σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές προδιαγραφές COST323, δηλαδή 10 έως 25%

για περίπου 95% των μικτών βαρών και το πλήρες εύρος των κατηγοριών ακρίβειας είναι A (5) έως E (30).

Η τεχνολογία HS-WIM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

- Την κατασκευή οδοστρωμάτων και γεφυρών δηλαδή καταγραφή πρότυπων φορτίων κυκλοφορίας που χρησιμοποιούνται:
 - i) βαθμονόμηση κωδικών σχεδιασμού και συμβατικών μοντέλων φορτίου
 - ii) παρακολούθηση και αξιολόγηση υποδομών
 - iii) στρατηγικές επιθεώρησης και ενίσχυσης
- Τη συλλογή δεδομένων κυκλοφορίας, στατιστικών στοιχείων στοιχεία για τις εμπορευματικές μεταφορές, και μερικές φορές για την τιμολόγηση του οδικού δικτύου βάσει πραγματικών μετρήσεων των κυκλοφοριακών φόρτων.
- Τον έλεγχο υπερφορτωμένων φορτηγών πριν από μια περιοχή ελέγχου εξοπλισμένη με συσκευές στατικής ζύγισης ή συσκευές LS-WIM. Μια ακριβή προεπιλογή στην ροή της κίνησης αυξάνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα των ελέγχων και αποφεύγει το σταμάτημα νόμιμων φορτωμένων ή άδειων οχημάτων.



Εικόνα 1.6: High speed weigh-in-motion (HS-WIM)

1.3 Τεχνολογίες WIM

Τα συστήματα WIM χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στις Ηνωμένες Πολιτείες στα μέσα της δεκαετίας του 1950. Έκτοτε υπήρξε μεγάλη ανάπτυξη και εξέλιξη των συστημάτων με αποτέλεσμα να εισαχθούν και να εφαρμοστούν διάφορες τεχνολογίες. Ωστόσο, η απόδοση της κάθε τεχνολογίας διαφέρει και εξαρτάται από κάποιους παράγοντες όπως είναι η εφαρμογή, το περιβάλλον, το κόστος και η ακρίβεια. Ορισμένες από τις τεχνολογίες προσφέρονται σε χαμηλό κόστος με σχετικά μικρό κόστος εγκατάστασης παρέχοντας ικανοποιητική απόδοση, ενώ άλλες τεχνολογίες παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια με πολύ υψηλότερο κόστος εξοπλισμού και εγκατάστασης. Καθώς τα οχήματα διέρχονται από τα συστήματα WIM, αυτά μετρούν τα δυναμικά φορτία και με βάση αυτά υπολογίζεται

το στατικό φορτίο χρησιμοποιώντας κατάλληλες παραμέτρους βαθμονόμησης. Το βασικότερο στοιχείο οποιουδήποτε συστήματος WIM είναι η τεχνολογία των αισθητήρων, καθεμία από τις οποίες έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και με βάση αυτά χαρακτηρίζεται κατάλληλη ή όχι για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τα συστήματα WIM είναι το κόστος των αισθητήρων (απόκτηση, εγκατάσταση και συντήρηση) και η ακρίβεια. Καμία τεχνολογία αισθητήρα δεν παρέχει το βέλτιστο συνδυασμό αυτών των χαρακτηριστικών καθώς το κόστος και η ακρίβεια είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη της διάρκειας του χρόνου. Οι τεχνολογίες αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι εξής:

- Πιεζο-ηλεκτρικά Συστήματα (Piezoelectric)

Η πιο κοινή συσκευή WIM είναι τα πιεζοηλεκτρικά συστήματα WIM, τα οποία αποτελούνται από έναν ή περισσότερους αισθητήρες χαλαζία και ανάλογα με τον αριθμό αισθητήρων που περιέχουν κατατάσσονται στους τύπους I και II της ASTM. Τοποθετούνται κάθετα προς την κατεύθυνση του οχήματος στη λωρίδα κυκλοφορίας και εγκαθίστανται είτε μόνιμα κάνοντας ασφαλτοκοπή του οδοστρώματος είτε προσωρινά στην επιφάνεια του δρόμου με ταινίες σήμανσης ή με χρήση εποξικής ρητίνης. Κάθε πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας χαλαζία έχει μήκος 1,5-2,0 μέτρα και μπορεί να συνδυαστεί σε διάφορα μήκη παρέχοντας κάλυψη πλάτους μισής ή μιας λωρίδας κυκλοφορίας. Οι αισθητήρες χαλαζία ανιχνεύουν αλλαγές των τάσεων, οι οποίες προκαλούνται από την πίεση που ασκεί ο άξονας του οχήματος στον αισθητήρα αξιοποιώντας αυτές τις πληροφορίες για το προσδιορισμό του βάρους του άξονα των φορτηγών. Καθώς ένα όχημα περνά από τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα, το σύστημα καταγράφει το ηλεκτρικό φορτίο που δημιουργήθηκε και υπολογίζει το δυναμικό φορτίο. Το στατικό φορτίο εκτιμάται από το μετρούμενο δυναμικό φορτίο εφαρμόζοντας ένα σύνολο παραμέτρων βαθμονόμησης. Τα πιεζοηλεκτρικά συστήματα WIM παρέχουν δεδομένα για την ταξινόμηση οχημάτων για στατιστικές μελέτες, μέτρηση της ταχύτητας, συστήματα παραβίασης κόκκινης ένδειξης σηματοδότη, μελέτες βάρους οχήματος, προεπεξεργασία καθώς και για την εκτίμηση φθορών στο οδόστρωμα.



Εικόνα 1.7: Πιεζοηλεκτρικά συστήματα WIM

- Καμπτόμενες πλάκες (Bending Plates)

Ένα σύστημα WIM που κάνει χρήση τεχνολογίας bending plates βασίζεται σε πλάκες, που δέχονται κάμψη όταν το όχημα διέλθει από αυτές, οι οποίες είναι συνδεδεμένες

με strain gauges. Καθώς ένα όχημα περνά πάνω από την καμπτόμενη πλάκα, το σύστημα καταγράφει την καταπόνηση που μετράται από μετρητή πίεσης και υπολογίζει το δυναμικό φορτίο. Τα συστήματα WIM με καμπτόμενες πλάκες χρησιμοποιούνται τακτικά σε συστήματα προεπιλογής σε ράμπες σταθμού ζύγισης, για συλλογή δεδομένων και για βιομηχανική και στρατιωτική ζύγιση. Τα συστήματα αυτά μπορούν να είναι φορητά ή να εγκαθίστανται μόνιμα με ελαφρά εκσκαφή του οδοστρώματος ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται.



Εικόνα 1.8: Εκσκαφή του εδάφους για τοποθέτηση καμπτόμενων πλακών

Ωστόσο παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα καθώς οι απαιτούμενες εργασίες που χρειάζονται για την εγκατάσταση του εξοπλισμού, προκαλούν μεγάλη ζημιά στο οδόστρωμα (μεγάλες τρύπες ή αυλακώσεις) και έτσι αυξάνεται ο κίνδυνος ατυχήματος στους αυτοκινητόδρομους εάν η πλάκα χαλαρώσει. Επιπρόσθετα, οι αισθητήρες που τοποθετούνται παραμένουν ξεχασμένοι σε αυτοκινητόδρομους και εθνικές οδούς σε κάποιες περιοχές με αποτέλεσμα να δημιουργείται κίνδυνος τόσο για τους διερχόμενους οδηγούς αλλά και για το ίδιο το οδόστρωμα.



Εικόνα 1.9: Καμπτόμενες Πλάκες(Bending Plates)

- Κυψέλες φόρτισης (Load cells)

Τα συστήματα κυψελών φόρτισης χρησιμοποιούν συνήθως μια κυψέλη φόρτισης, η οποία τοποθετείται στην λωρίδα κυκλοφορίας κάθετα προς την κατεύθυνση κυκλοφορίας και αποτελείται από δυο κλίμακες που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ενός άξονα και τη ζύγιση και των δύο τροχών ταυτόχρονα. Καθώς ένα όχημα περνά πάνω από από την κυψέλη φόρτισης WIM, το σύστημα καταγράφει το βάρος που μετριέται από κάθε κλίμακα και τα προσθέτει μαζί για να υπολογίσει το βάρος του άξονα. Οι κλίμακες των κυψελών φόρτισης εγκαθίστανται στο οδόστρωμα είτε μόνιμα με ελαφρά εκσκαφή του είτε προσωρινά με χρήση φορητών συσκευών. Οι κυψέλες φόρτισης χρησιμοποιούνται τακτικά σε συστήματα WIM στην κύρια γραμμή σταθμών ζύγισης, στα συστήματα συλλογής δεδομένων και στη βιομηχανική και στρατιωτική ζύγιση. Ωστόσο παρουσιάζονται τα ίδια μειονεκτήματα με αυτά που προκύπτουν για τις καμπτόμενες πλάκες.

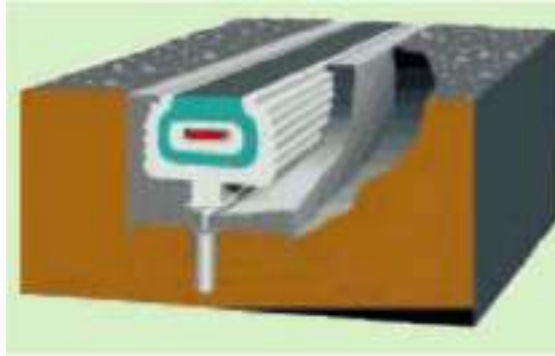


Εικόνα 1.10: Κυψέλες φόρτισης (Load cells)

- Χωρητικές Επιφάνειες (capacitive mats)

Το σύστημα WIM στρώματος χωρητικότητας συνήθως αποτελείται από δύο ή περισσότερες μεταλλικές αγώγιμες πλάκες, οι οποίες παρέχουν ίσα αλλά αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Όταν ένα όχημα διέρχεται πάνω από το στρώμα χωρητικότητας, το διάκενο μεταξύ

των πλακών μειώνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η χωρητικότητα. Η μεταβολή της χωρητικότητας καταγράφεται και χρησιμοποιείται για το υπολογισμό του βάρους. Για την κατασκευή του στρώματος χωρητικότητας χρησιμοποιείται ανοξείδωτο ατσάλι, ορείχαλκος, αλουμίνιο, πολυουρεθάνιο, λάστιχο κ.ά



Εικόνα 1.11: Χωρητικές επιφάνειες (Capacitive mats)

- Σύστημα WIM με οπτικές ίνες (Fiber Optical Sensors)

Οι ανιχνευτές οπτικών ινών αποτελούν ένα σημαντικό ανταγωνιστή των κλασσικών συστημάτων WIM έχουν χαμηλό κόστος, μεγάλη ακρίβεια και παρουσιάζουν ανοχή σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Η πίεση που ασκείται από τους άξονες των οχημάτων μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά των ινών, όπως για παράδειγμα το δείκτη διάθλασης, την ανισοτροπία καθώς και την γεωμετρία. Οι μεταβολές αυτές υπολογίζονται μέσω αισθητήρων οπτικών ινών.



Εικόνα 1.12: Σύστημα WIM με οπτικές ίνες

1.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα WIM

1.4.1 Πλεονεκτήματα τεχνολογίας WIM

- Ποσοστό επεξεργασίας. Τα φορτηγά μπορούν να ζυγίζονται καθώς ταξιδεύουν σε μεγάλους αυτοκινητόδρομους, με αποτέλεσμα να ελέγχεται και να μετριέται μεγαλύτερος αριθμός οχημάτων σε μικρότερο χρονικό διάστημα συγκριτικά με τους σταθμούς στατικής ζύγισης.
- Ασφάλεια. Η ελαχιστοποίηση της στατικής ζύγισης θα μειώσει σημαντικά τη συσσώρευση οχημάτων στις λωρίδες που οδηγούν σε σταθμούς ζύγισης.
- Συνεχής επεξεργασία δεδομένων. Η ζύγιση εν κινήσει μπορεί να εκτελείται συνεχώς σε αντίθεση με τη στατική ζύγιση, η οποία χρησιμοποιεί δείγματα κυκλοφοριακής ροής καθώς δεν είναι δυνατός ο έλεγχος όλων των οχημάτων που διέρχονται από το οδικό δίκτυο. Συνεπώς με τη ζύγιση εν κινήσει, μπορούν να εξαλειφθούν τυχόν λανθασμένα δεδομένα που έχουν προκύψει από τη στατική ζύγιση.
- Αυξημένη κάλυψη και χαμηλότερο κόστος. Περισσότερα σημεία ενός οδικού δικτύου θα μπορούν να παρακολουθούνται με τους ίδιους σταθμούς WIM με το ίδιο κόστος.
- Ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αποφυγής της ζύγισης. Τα συστήματα WIM μπορούν να παρακολουθούν την κυκλοφορία των φορτηγών χωρίς να ειδοποιούν τους οδηγούς φορτηγών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ακριβή καταγραφή δεδομένων καθώς τα υπέρβαρα φορτηγά είναι λιγότερο πιθανό να αποφύγουν τη ζύγιση τους.
- Δυναμική φόρτωση δεδομένων. Σε αντίθεση με τη στατική ζύγιση, τα συστήματα ελέγχου WIM μπορούν να καταγράψουν δυναμικές πληροφορίες φορτίου άξονα, οι οποίες μπορεί να είναι περισσότερες από αυτές της στατικής ζύγισης.

1.4.2 Μειονεκτήματα τεχνολογίας WIM

- Λιγότερο ακριβή. Τα συστήματα WIM είναι λιγότερο ακριβή από τα στατικά. Σύμφωνα με το Εθνικό Γραφείο Προτύπων, οι κλίμακες φορτίου τροχών πρέπει να έχουν ακρίβεια $\pm 1\%$ όταν δοκιμάζονται για πιστοποίηση και στη συνέχεια πρέπει να διατηρούνται στο $\pm 2\%$. Η μεγαλύτερη ακρίβεια που αποκτήθηκε με τις πιο ακριβείς συσκευές WIM που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το 6% των πραγματικών βαρών του οχήματος για το 95% των μετρούμενων φορτηγών.
- Μειωμένες πληροφορίες. Κάποιες πληροφορίες που συλλέγονται εύκολα σε σταθμούς στατικής ζύγισης όπως τύπος του καυσίμου, το κράτος καταχώρησης, ο αριθμός κυκλοφορίας οχήματος, η κατάσταση φόρτωσης ή εκφόρτωσης, η προέλευση και ο προορισμός δεν μπορούν να καταγραφούν με τα τυπικά συστήματα WIM.
- Ευαίσθητα σε βλάβες από ηλεκτρομαγνητικές μεταβάσεις. Τα συστήματα WIM είναι ευαίσθητα σε ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές που προκαλούνται κυρίως από πτώση κεραυνών στην περιοχή που βρίσκεται ο εξοπλισμός.

1.5 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επίτευξη της βέλτιστης χωροθέτησης σημείων ελέγχου WIM στο οδικό δίκτυο της Ελλάδας και πιο συγκεκριμένα στα εξής τμήματα:

- Αθήνα-Θεσσαλονίκη
- Θεσσαλονίκη-Αλεξανδρούπολη
- Θεσσαλονίκη-Ιωάννινα
- Αθήνα-Πάτρα
- Πάτρα-Ιωάννινα
- Κόρινθος-Καλαμάτα

Ο στόχος αυτός εντάσσεται στο πλαίσιο της συνολικής προσπάθειας ενίσχυσης των ελέγχων πεδίου, ώστε να εξετάζονται όλα και περισσότερα βαρέα οχήματα και κατ' επέκταση να αμβλυνθούν, ως ένα βαθμό, τα προβλήματα που σχετίζονται με τη φθορά των υποδομών αλλά και να περιοριστεί ο αριθμός των ατυχημάτων που προκύπτουν από τη μεταφορά υπερβολικών ή παράνομων φορτίων.

Πιο συγκεκριμένα, στην εν λόγω εργασία αναζητούνται οι βέλτιστες θέσεις των σημείων ελέγχου WIM, με απώτερο σκοπό την μεγιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων που ελέγχονται μόνο μια φορά έπειτα από την εγκατάσταση των σταθμών. Για το σκοπό αυτό, προβλέπεται η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης, ώστε να προσεγγιστεί ρεαλιστικά το εξεταζόμενο πρόβλημα χωροθέτησης και να εξυπηρετηθούν κατάλληλα οι ανάγκες του.

Για την μαθηματική επίλυση του μοντέλου, επιλέχθηκε ένα πρόσθετο εργαλείο του Excel, το OpenSolver στο οποίο αφού πρώτα εισάγαμε το στόχο της αντικειμενικής συνάρτησης, τις παραμέτρους, τις μεταβλητές και τους περιορισμούς του προβλήματος, μας έδωσε τη βέλτιστη λύση του προβλήματος.

1.6 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

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

Κεφάλαιο 1: αποτελεί το εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας. Αρχικά αναφέρονται τα προβλήματα που προκύπτουν από την υπερβολική και παράνομη φόρτωση των βαρέων οχημάτων και γίνεται αναφορά στον παραδοσιακό τρόπο ζύγισης καθώς και στους περιορισμούς που τον διέπουν. Επιπλέον, γίνεται εισαγωγή στα συστήματα WIM και στις τεχνολογίες WIM που χρησιμοποιούνται σήμερα και παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση τους. Τέλος, πραγματοποιείται αναφορά στο αντικείμενο και στη δομή της διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 2: παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο και μεθοδολογικό πλαίσιο, στο οποίο θα βασιστεί η ανάπτυξη του προβλήματος μελέτης της διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα εισάγεται η έννοια της χωροθέτησης, γίνεται ιστορική αναδρομή και παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται σε τέτοια προβλήματα.

Κεφάλαιο 3: παρατίθενται τα βασικά πρότυπα χωροθέτησης, τα οποία περιλαμβάνουν τα μοντέλα μέσης ή συνολικής απόστασης, τα μοντέλα μέγιστης απόστασης και τα μοντέλα κάλυψης. Επιπλέον, πραγματοποιείται σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί για τη χωροθέτηση σταθμών WIM.

Κεφάλαιο 4: αναλύονται οι συνιστώσες του προβλήματος χωροθέτησης που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική. Πιο αναλυτικά, αναφέρονται τα κριτήρια χωροθέτησης των σταθμών ελέγχου WIM και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του γραμμικού και του μη γραμμικού προγραμματισμού. Στην συνέχεια, διατυπώνεται μαθηματικά το μοντέλο χωροθέτησης που επιλέχθηκε και ορίζεται η περιοχή μελέτης. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του προβλήματος και πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας.

Κεφάλαιο 5: πραγματοποιείται ανασκόπηση του προβλήματος και καταγράφονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, παρατίθενται η λίστα με τις πηγές τεκμηρίωσης της εν λόγω εργασίας.

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Εισαγωγή στη Χωροθέτηση Εγκαταστάσεων

Η χωροθέτηση εγκαταστάσεων (facility location) αποτελεί ένα από τα πιο συνηθισμένα και σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι επιστήμες της Λήψης Αποφάσεων όπως της Διοίκησης Λειτουργιών και της Επιχειρησιακής Έρευνας. Τα προβλήματα χωροθέτησης εγκαταστάσεων ορίζονται από τα εξής ερωτήματα: «Ποια είναι η καλύτερη τοποθέτηση ενός αριθμού μονάδων, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, σε ένα δοσμένο γεωγραφικό χώρο, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται κάποιοι στόχοι, όπως για παράδειγμα η καλύτερη εξυπηρέτηση των πελατών, λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη κάποιους περιορισμούς, όπως για παράδειγμα η παραγωγική ικανότητα μιας μονάδας;». Συνεπώς, ο στρατηγικός σχεδιασμός ενός αποτελεσματικού συστήματος διαχείρισης εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την επιλογή του χώρου στον οποίο θα δημιουργηθούν μία ή περισσότερες εγκαταστάσεις προκειμένου να εξυπηρετήσουν μια συγκεκριμένη κατανομή πελατών. Η τοποθεσία που θα επιλεγεί για τη δημιουργία μιας εγκατάστασης καθορίζει κυρίως την επιτυχημένη παροχή των υπηρεσιών για τις οποίες σχεδιάστηκε η εγκατάσταση αυτή. Η χωροθέτηση εγκαταστάσεων αντιπροσωπεύει μακροχρόνιες επενδύσεις λόγω του κόστους απόκτησης ιδιοκτησίας και των υψηλών κατασκευαστικών εξόδων. Προκειμένου λοιπόν, να είναι επιτυχημένη η λειτουργία της εγκατάστασης και η επένδυση να είναι παραγωγική, θα πρέπει να διαμορφωθεί μια ορθολογική διαδικασία λήψης αποφάσεων που θα επικεντρώνεται στους σημαντικούς παράγοντες και τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την αποδοτικότητα της εγκατάστασης. Τα προβλήματα χωροθέτησης, στο επιστημονικό πεδίο, χαρακτηρίζονται ως χωρικά προβλήματα κατανομής πόρων (spatial resource allocation problems) τα οποία αφορούν μία ή περισσότερες λειτουργικές μονάδες ή μονάδες εξυπηρέτησης (servers) οι οποίες εξυπηρετούν χωρικά κατανεμημένες ομάδες ζήτησης (demand centers) που αποτελούν τους πελάτες (customers). Από τον ορισμό της χωροθέτησης εγκαταστάσεων προκύπτουν τέσσερα συστατικά που χαρακτηρίζουν τα προβλήματα χωροθέτησης:

- α) οι «πελάτες» (customers) οι οποίοι θεωρούνται ότι έχουν τοποθετηθεί σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου, έχουν συγκεκριμένη κατανομή και παρουσιάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.
- β) οι «μονάδες» ή «εγκαταστάσεις» (facilities) που θα χωροθετηθούν.
- γ) ο «χώρος» (space) στον οποίο βρίσκονται οι πελάτες και οι μονάδες εγκατάστασης που θα χωροθετηθούν.
- δ) μια «μετρική» (metric) η οποία υποδεικνύει τις αποστάσεις ή τον χρόνο που απαιτείται ανάμεσα στους πελάτες και τις μονάδες-εγκατάστασης.

Με μια πιο απλουστευμένη θεώρηση-ερμηνεία, θα μπορούσε κανείς να πει ότι επιτυχής επίλυση ενός προβλήματος χωροθέτησης, σημαίνει ότι έχει βρεθεί και επιλεγεί η καλύτερη τοποθεσία σε έναν ορισμένο γεωγραφικό χώρο για την τοποθέτηση μιας ή περισσότερων μονάδων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, ικανοποιώντας συγκεκριμένα κριτήρια και στόχους που αφορούν κυρίως την επιτυχημένη παροχή υπηρεσιών σε κατανεμημένους πελάτες.

Η ανάλυση χωροθέτησης (location analysis) αναφέρεται στην ανάπτυξη μαθηματικών προτύπων και αλγορίθμων τοποθέτησης εγκαταστάσεων κάθε τύπου σε χωρικό ή γεωγραφικό περιβάλλον. Οι εγκαταστάσεις χωροθετούνται έτσι ώστε να ικανοποιούν τη ζήτηση, τον ανεφοδιασμό, την κάλυψη περιοχών ή αλληλεπιδρούν με την ύπαρξη άλλων εγκαταστάσεων. Στα προβλήματα αυτά, συνήθως η θέση εγκατάστασης εξετάζεται μεμονωμένα ως προς τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης εγκατάστασης (facility layout), αλλά σχετίζεται με την ανάπτυξη και τον σχεδιασμό ευρύτερων συστημάτων με βάση την κατανομή των πόρων του συστήματος που εξυπηρετεί. Πιο συγκεκριμένα, οι πόροι του συστήματος είναι τα σταθερά σημεία του συστήματος όπου ανάλογα με το πρόβλημα, αντιπροσωπεύουν άλλες εγκαταστάσεις, αγορές ή καταναλωτές, αφετηρίες ή προορισμούς με τους οποίους αλληλεπιδρά η μία ή περισσότερες εγκαταστάσεις που πρόκειται να χωροθετηθούν (Plastrio, 1995). Ο γενικευμένος όρος που περιγράφει αυτή τη διαδικασία αναζήτησης θέσεων για εγκαταστάσεις μέσα σε δίκτυα εξυπηρέτησης, είναι ως προβλήματα χωροθέτησης-κατανομής (location-allocation problems). Σε αυτά τα προβλήματα ζητείται η χωροθέτηση κέντρων εξυπηρέτησης σε δοσμένο χώρο, έτσι ώστε να καλύπτεται η ζήτηση στον χώρο αυτό με τον καλύτερο τρόπο.

2.2 Ιστορική Αναδρομή και Εξέλιξη

Το βασικό πρόβλημα χωροθέτησης που σε διάφορες μορφές αντιμετωπίστηκε από διάφορους ερευνητές είναι γνωστό ως πρόβλημα WEBER και αποτέλεσε την αρχή για μια σειρά από μελέτες ερευνητών προερχόμενων από διαφορετικούς τομείς για την επίλυση του αρχικού βασικού προβλήματος και των μελλοντικών του επεκτάσεων.

Στην πιο απλή μορφή του το πρόβλημα μπορεί να οριστεί με τον ακόλουθο τρόπο. Αναζητούμε την τοποθεσία ενός σημείου με συντεταγμένες (x,y) το οποίο ελαχιστοποιεί το σταθμισμένο άθροισμα των Ευκλείδειων αποστάσεων μεταξύ του σημείου (x,y) και n σταθερών σημείων με συντεταγμένες $P_i = (a_i, b_i)$ για $i=1,...,n$. Οι σταθμίσεις σχετίζονται με τα σταθερά n σημεία και δηλώνονται με το σύμβολο w_i .

Άρα το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

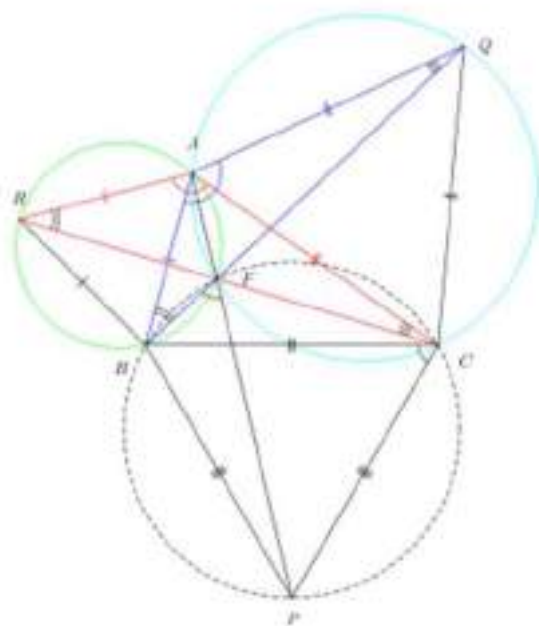
$$\text{Minimize}_{x,y} \{W(x,y) = \sum_{i=1}^n w_i d_i(x,y)\} \quad (2.1)$$

όπου:

$d_i(x,y) = \sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2}$ είναι η Ευκλείδειος απόσταση μεταξύ του (x,y) και του (a_i,b_i)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα του παραπάνω προβλήματος είναι η εύρεση της τοποθέτησης μιας αποθήκης με προϊόντα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος παράδοσης των προϊόντων της αποθήκης στους N πελάτες δοθέντων των σταθερών σημείων παράδοσης $P_i = (a_i,b_i)$, για $i=1,...,N$. Ουσιαστικά λοιπόν ζητάμε τη βέλτιστη χωροθέτηση της αποθήκης, με κύριο στόχο την ελαχιστοποίηση της σταθμισμένης απόστασης των προϊόντων στις προεπιλεγμένες τοποθεσίες παράδοσης που έχουν οριστεί από τους πελάτες.

Επιχειρώντας μια σύντομη ιστορική αναδρομή για το ποιος έθεσε και έλυσε το πρόβλημα πρώτος και σε ποια ακριβώς μορφή, παρατηρούμε ότι τα πράγματα δεν είναι και τόσο ξεκάθαρα. Μια πρώτη τοποθέτηση του προβλήματος προτάθηκε από το Pierre de Fermat (1601-1665), οποίος διατύπωσε το πρόβλημα ως εξής «Δοθέντων τριων σημείων στο επίπεδο», να βρεθεί ένα τέταρτο σημείο τέτοιο ώστε το άθροισμα των αποστάσεων του με τα προηγούμενα σημεία να είναι το ελάχιστο. Για την επίλυση του ο μαθητής του Galileo, Evangelista Torricelli (1608-1647) πρότεινε μια γεωμετρική λύση με $n=3$ σημεία τα οποία ένωσε με γραμμές ώστε να σχηματίουν τρίγωνο (ABC). Έπειτα σχεδίασε ισόπλευρα τρίγωνα με το αρχικό με τις κορυφές τους να δείχνουν την εξωτερική πλευρά (BRA, AQC, BPC). Έτσι σχημάτισε τρεις κύκλους από τις κορυφές των ισόπλευρων τριγώνων και το σημείο στο οποίο τέμνονται αποτελεί λύση στο πρόβλημα και το σημείο αυτό ονομάστηκε σημείο Torricelli.



Εικόνα: Σημείο Torricelli

Για την αρχική διατύπωση και λύση του προβλήματος υπάρχουν ωστόσο και άλλες πιθανές εκδοχές. Ο Melzak (1983) ανέφερε ότι πρώτος ο Ιταλός Μαθηματικός Battista Cavalieri (1558-1647) ασχολήθηκε με τη διατύπωση και λύση του, ενώ στη συνέχεια το πρόβλημα διατυπώθηκε από το Pierre de Fermat και επιλύθηκε από τον Evangelista Torricelli.

Με το άρθρο του ο M. Zacharias (1913) αναφέρει ότι και η διατύπωση και η επίλυση του προβλήματος έγινε από τον Evangelista Torricelli, εξου και η ονομασία που δόθηκε στο σημείο επίλυσης (Torricelli Point).

Σήμερα, λόγω των συνθηκών που επικρατούν, οι δυνατότητες του μοντέλου του Weber στην λύση προβλημάτων χωροθέτησης θεωρούνται περιορισμένες. Το κύριο πρόβλημα της θεωρίας που ανέπτυξε βρίσκεται στους περιορισμούς. Για παράδειγμα, παράγοντες που σχετίζονται με τη χρήση γης ελαττώνουν δραστικά τον αριθμό των

επιτρεπόμενων θέσεων. Σε πολλές περιπτώσεις ένα κέντρο παροχής υπηρεσιών, για λόγους οι οποίοι σχετίζονται με την προσφερόμενη υπηρεσία (πυροσβεστική κάλυψη), δεν μπορούν να χωροθετηθούν σε θέσεις, που η απόσταση από τους χρήστες ξεπερνά μια ορισμένη τιμή, η οποία μπορεί να αντιστοιχεί σε ένα μέγιστο χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο πρέπει να γίνει η παροχή της υπηρεσίας.

Ακόμα ο Weber μιλούσε για κάθε σημείο στο χώρο, ενώ σήμερα σε πολλές περιπτώσεις η φύση των προβλημάτων και οι ανάγκες επίλυσης τους, ιδιαίτερα όταν υπάρχει πληθώρα στοιχείων, απαιτούν τον περιορισμό των σημείων που μπορούν να δεχθούν κέντρα παροχής υπηρεσιών. Για παράδειγμα, κάθε σημείο της Ελλάδας δεν μπορεί να είναι έδρα Πανεπιστημίου. Ακόμη, για το είδος του κέντρου παροχής υπηρεσιών, ο Weber αναφερόταν για θέσεις σταθερές στο χώρο, ενώ σήμερα μιλάμε και για κινητά κέντρα παροχής υπηρεσιών, όπως κινητά ιατρεία, κινητές τράπεζες, ταχυδρομεία κτλ. Ο Weber έλυνε το πρόβλημα από την πλευρά των ιδιωτών που απέβλεπαν σε προσωπικό όφελος ενώ οι σημερινές συνθήκες επίλυσης προβλημάτων σχετίζονται κυρίως με κοινωνικά οφέλη. Τέλος ο Weber ενδιαφερόταν αποκλειστικά για την αποτελεσματικότητα της χωροθέτησης και αγνοούσε το πρόβλημα ισότητας ως προς την παροχή υπηρεσιών.

Λόγω αυτών των περιορισμών και λόγω της αύξησης των αναγκών με την πρόοδο του χρόνου, επήλθαν σημαντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις στη διατύπωση και την επίλυση του προβλήματος του Weber. Ορισμένες επεκτάσεις έγιναν τον 20^ο αιώνα και αφορούσαν την τροποποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του αρχικού προβλήματος, κυρίως, με την ενσωμάτωση διαφορετικών συναρτήσεων απόστασης (HANSEN et al., 1985). Οι Tellier και Polanski (1989) και οι Drener Wesolowsky (1990) αφαίρεσαν τον περιορισμό των μη αρνητικών βαρών από το κλασσικό πρόβλημα. Εάν όλα τα βάρη είναι αρνητικά, τότε τα κέντρα εξυπηρέτησης μετατοπίζονται μακριά από τα σημεία ζήτησης και επομένως το μοντέλο βρίσκει εφαρμογή στην τοποθέτηση ανεπιθύμητων εγκαταστάσεων. Έτσι, δημιουργήθηκε μια νέα σχέση που μεγιστοποιεί το άθροισμα των αποστάσεων μεταξύ των κέντρων εξυπηρέτησης και των σημείων ζήτησης. Σε άλλες γενικές προσεγγίσεις, το αρχικό μοντέλο του Weber αντιμετωπίστηκε ως στοχαστικό ή δυναμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα ο Cooper (1974) περιέγραψε την τοποθεσία των σημείων ζήτησης με τη χρήση κατανομών πιθανότητας. Ο Erlenkotter (1981) παρουσίασε διαφορετικές τεχνικές προσέγγισης σε περίπτωση δυναμικής χωροθέτησης. Ακόμη, πολυκριτηριακά προβλήματα του Weber με δύο ή περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις έχουν αναλυθεί από τους Hamacher και Nickel (1996), καθώς και από τους Puerto και Fernandez.

Γενικά με την ανακάλυψη και εξέλιξη των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών καθώς και την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού, νέα ώθηση δόθηκε για την ευκολότερη επίλυση τέτοιων και παρόμοιων προβλημάτων και την πρακτική εφαρμογή τους σε διάφορους τομείς.

2.3 Μεθοδολογική Προσέγγιση

Η χωροθέτηση εγκαταστάσεων είναι από τη φύση της ένα πολυδιάστατο πρόβλημα. Ανάλογα με τη πολυπλοκότητα του επιχειρησιακού περιβάλλοντος και την απαραίτητη προσαρμογή στις συγκεκριμένες ανάγκες του προβλήματος, χρειάζεται διαφορετική προσέγγιση για την επίτευξη των επιθυμητών στόχων. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται, προϋποθέτει τον προσδιορισμό ενός συνόλου τοποθεσιών για τις μονάδες εξυπηρέτησης με βάση χωρικά κατανεμημένες προϋποθέσεις, ενώ στην πορεία βελτιστοποιούνται κάποια συγκεκριμένα μετρήσιμα κριτήρια. Τα πρότυπα χωροθέτησης χρησιμοποιούνται στη λήψη αποφάσεων σε τομείς που σχετίζονται κυρίως με:

- τον εντοπισμό του συνόλου των υποψήφιων θέσεων χωροθέτησης
- τη βέλτιστη χωροθέτηση εγκαταστάσεων σε μια νέα περιοχή
- τον υπολογισμό της αποδοτικότητας προηγούμενων αποφάσεων χωροθέτησης
- τη βελτίωση των υπαρχόντων σχεδίων χωροθέτησης

Το μεθοδολογικό πλαίσιο που προτείνεται για την προσέγγιση προβλημάτων χωροθέτησης συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα (Rahman and Smith, 2000):

- ❖ Κατανόηση και καθορισμός του προβλήματος
- ❖ Ανάπτυξη του αντίστοιχου μοντέλου
- ❖ Ανάλυση του μοντέλου
- ❖ Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων
- ❖ Εκτέλεση των αποτελεσμάτων

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στη διαδικασία επίλυσης μοντέλων χωροθέτησης είναι η επιλογή των κατάλληλων κριτηρίων και της αντικειμενικής συνάρτησης που θα βελτιστοποιεί τα κριτήρια αυτά. Ο σχηματισμός της αντικειμενικής συνάρτησης εξαρτάται κυρίως από τη φύση του οργανισμού που θα ασχοληθεί με το πρόβλημα, καθώς και από τη φύση των μονάδων εξυπηρέτησης. Συνεπώς, ένας πρώτος διαχωρισμός στα προβλήματα χωροθέτησης αφορά τη διάκριση ανάμεσα στην εξυπηρέτηση ιδιωτικών ή δημόσιων αναγκών (Cohon, 1978). Οι μονάδες εξυπηρέτησης στον ιδιωτικό τομέα, όπως για παράδειγμα μία αποθήκη ή ένας σταθμός εξυπηρέτησης πελατών, συνήθως χωροθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να εκπληρώνονται στόχοι όπως, η ελαχιστοποίηση του κόστους ή η μεγιστοποίηση του κέρδους, είτε αυτό υπολογίζεται σε χρήματα, χρόνο ή απόσταση. Αντίθετα, προβλήματα χωροθέτησης δημόσιου τομέα είναι ακόμα πιο πολύπλοκα γιατί 14 σχετίζονται με προβληματικές καταστάσεις κοινωνικοοικονομικού και πολιτικού χαρακτήρα στις οποίες είναι αρκετά δύσκολο έως αδύνατο να υπολογιστούν μονοσήμαντα οι συνέπειες τους. Επίσης, είναι συχνό το φαινόμενο, στις αποφάσεις αυτές να υπάρχει αυξημένη αβεβαιότητα είτε λόγω μη ύπαρξης διαθέσιμων στοιχείων και σαφώς καθορισμένων συνεπειών είτε, λόγω ύπαρξης φιλοσοφικών αναζητήσεων συχνά αντικρουόμενων (αποτίμηση κόστους μιας οικολογικής καταστροφής ή ενός θανάτου από ατύχημα). Τυπικά παραδείγματα εγκαταστάσεων του δημόσιου τομέα είναι οι πυροσβεστικοί σταθμοί, τα αστυνομικά τμήματα, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κ.α. Όπως αναφέρεται από τους Eliset and Laporte (1995), η κατηγορία προβλημάτων του ιδιωτικού τομέα, συνήθως χρησιμοποιεί τη τυπική συνάρτηση αποδοτικότητας Minsum. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι εγκαταστάσεις τοποθετούνται έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν το άθροισμα του συνολικού κόστους μεταφοράς. Αντίθετα, στις δραστηριότητες του δημόσιου τομέα, εφαρμόζεται ευρέως η τυπική συνάρτηση ισότητας Minmax, όπως για παράδειγμα στη

χωροθέτηση μονάδων υγείας, έτσι ώστε να μειώνεται ο χρόνος πρόσβασης των πολιτών στις μονάδες εξυπηρέτησης ακόμα και στην περίπτωση των πιο απομακρυσμένων περιοχών.

Προτού γίνει η ανάλυση των βασικών προτύπων χωροθέτησης που χρησιμοποιούνται για τη προσέγγιση πολλών προβλημάτων και την κάλυψη των εκάστοτε απαιτήσεων, κρίνεται χρήσιμο να αναφερθεί η βασική δομή που κατέχουν όλα τα μοντέλα χωροθέτησης. Η βασική τους δομική μορφή περιλαμβάνει (Αλεξανδρή, 2009):

❖ Αντικειμενική συνάρτηση

Κάθε μοντέλο χωροθέτησης περιλαμβάνει μια ή περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις, οι οποίες επιδιώκεται να ελαχιστοποιηθούν ή να μεγιστοποιηθούν. Κάθε αντικειμενική συνάρτηση εκφράζει τα κριτήρια που πρέπει να βελτιστοποιηθούν για την επιλογή της τοποθεσίας των κέντρων εξυπηρέτησης και για το λόγο αυτό, αποτελεί το μέτρο σύγκρισης για τις διαφορετικές επιλογές που αποτιμούνται και συγκρίνονται. Συνήθως τα χαρακτηριστικά που βελτιστοποιούνται είναι η απόσταση, ο χρόνος μετακίνησης και το κόστος. Ακόμη, πρέπει να επισημάνουμε ότι είναι δυνατό δυο διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις να έχουν την ίδια βέλτιστη λύση, γιατί το σημείο αυτό προσδιορίζεται ακριβώς από το σύνολο των προορισμών. Τέλος, αναφέρεται ότι η περίπτωση ανυπαρξίας αντικειμενικής συνάρτησης συνεπάγεται την εύρεση απλώς εφικτής και όχι βέλτιστης λύσης

❖ Σύνολο εφικτών λύσεων

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

❖ Περιορισμοί

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

3.ΒΑΣΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα οκτώ βασικά μοντέλα χωροθέτησης, ο διαχωρισμός των οποίων γίνεται με βάση την απόσταση. Αυτά είναι (Laporte et.al.,2015): το set covering location problem (πρόβλημα συνόλου κάλυψης), maximal covering location problem (πρόβλημα μέγιστης κάλυψης), p-center location problem (πρόβλημα p-κέντρων), και το p-dispersion location problem (πρόβλημα p- διασποράς), τα οποία βασίζονται στη μέγιστη απόσταση. Υπάρχουν και τα εξής τέσσερα προβλήματα που στηρίζονται στη μέση απόσταση: (p-median location problem (πρόβλημα-διαμέσων), fixed charge location problem (πρόβλημα σταθερού κόστους), hub location problem (πρόβλημα χωροθέτησης πλήμνης) και τέλος, το maxisum location problem (χωροθέτησης μέγιστου αθροίσματος). Γίνεται αντιληπτό πως η απόσταση μεταξύ των χωροθετημένων εγκαταστάσεων είναι καθοριστικής σημασίας, όπως επίσης είναι και ορισμένα ακόμη χαρακτηριστικά, όπως και χρόνος και το κόστος μια διαδρομής ή η ικανοποίηση της ζήτησης. Τέλος, παρατίθενται τα μοντέλα τα οποία έχουν αναπτυχθεί για τη χωροθέτηση σταθμών WIM και βασιστήκαμε για την επιλογή του δικού μας μοντέλου.

3.2 Βασικά Μοντέλα Χωροθέτησης

3.2.1 Μοντέλα Μέγιστης απόστασης (Maximum Distance Models)

Στα μοντέλα μέγιστης απόστασης λαμβάνεται υπόψη, εξ αρχής (a priori), ο περιορισμός μέγιστης απόστασης (maximum distance). Η απόσταση, δηλαδή μεταξύ δυο εγκαταστάσεων δεν πρέπει να υπερβαίνει μια μέγιστη τιμή. Η βασική παραδοχή του μοντέλου της μέγιστης απόστασης είναι ότι η ζήτηση ικανοποιείται πλήρως, εάν η πιο κοντινή εγκατάσταση βρίσκεται εντός μιας καλυπτόμενης απόστασης ενώ αντιθέτως δεν ικανοποιείται όταν η πιο κοντινή εγκατάσταση βρίσκεται εκτός αυτής της απόστασης. Οι Drezner και Hamacher (2002) αναφέρουν αυτές τις αποστάσεις ως «καλυπτόμενες αποστάσεις» (covering diastances) και τη ζήτηση μέσα στην καλυπτόμενη απόσταση της πιο κοντινής της εγκατάστασης ως «καλυμμένη» (covered).

Παραδείγματα του μοντέλου μέγιστης απόστασης μπορούμε να συναντήσουμε τόσο στον ιδιωτικό όσο και στο δημόσιο τομέα. Ένα παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου στον ιδιωτικό τομέα είναι η εξυπηρέτηση που εγγυώνται ορισμένες εταιρείες διανομής αγαθών σε ένα προκαθορισμένο χρόνο (εταιρίες γρήγορου φαγητού). Στόχος αυτών των εταιριών είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των πελατών τους, δηλαδή το κέρδος (Current et al.,2002). Στο δημόσιο τομέα, παράδειγμα αποτελεί η χωροθέτηση σχολείων, η οποία γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται ο αριθμός των μαθητών που θα κάνουν χρήση των μέσων μαζικής μεταφοράς ώστε να φθάσουν στο σχολείο. Πιο συγκεκριμένα, οι μαθητές που μένουν εντός μιας ακτίνας ενός χιλιομέτρου από το σχολείο, πηγαίνουν στο σχολείο με πεζή μετακίνηση ενώ οι μαθητές που μένουν εκτός αυτής της ακτίνας, κάνουν χρήση δημόσιας συγκοινωνίας.

3.2.2 Μοντέλο P- Κέντρων (The P-Center problem)

Το μοντέλο p-κέντρων (Hakimi 1964,1965) αντιμετωπίζει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της μέγιστης απόστασης όπου η ζήτηση είναι από την πιο πληρέστερη εγκατάσταση με προκαθορισμένο αριθμό εγκαταστάσεων. Υπάρχουν αρκετές παραλλαγές του βασικού μοντέλου. Το vertex p-center problem περιορίζει το σύνολο των υποψήφιων θέσεων χωροθέτησης στους κόμβους του δικτύου ενώ το absolute p-center problem επιτρέπει στις εγκαταστάσεις να τοποθετηθούν οπουδήποτε κατά μήκος των τόξων. Και οι δυο παραλλαγές μπορεί να είναι είτε σταθμικές είτε μη σταθμικές. Στο μη σταθμικό μοντέλο όλοι οι κόμβοι ζήτησης αντιμετωπίζονται ισοδύναμα ενώ αντίθετα στο σταθμικό οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων ζήτησης και των εγκαταστάσεων πολλαπλασιάζονται επί ένα βάρος που σχετίζεται με τη ζήτηση του κόμβου. Για παράδειγμα, το βάρος θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει τη σπουδαιότητα ενός κόμβου ή πιο συχνά το επίπεδο ζήτησης του.

Προτού διατυπωθεί το πρόβλημα πρέπει πρώτα να οριστούν τα παρακάτω δεδομένα και σύνολα:

I: το σύνολο των κόμβων ζήτησης που συμβολίζονται με i

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

h_i : η ζήτηση στον κόμβο i

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

p: ο αριθμός των μονάδων εξυπηρέτησης που θα χωροθετηθούν

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

και οι μεταβλητές απόφασης:

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

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

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω συμβολισμούς το μοντέλο διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Minimize } W$$

$$\text{s. t: } \sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.1)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.2)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.3)$$

$$W - \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (3.4)$$

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

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

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόστασης σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση ανάμεσα σε κάθε απαίτηση ζήτησης ενός

κόμβου και της πιο κοντινής του ανοιχτής εγκατάστασης. Ο περιορισμός (3.1) ορίζει ότι p-εγκαταστάσεις πρόκειται αν χωροθετηθούν. Ο περιορισμός (3.2) απαιτεί ότι ο κάθε κόμβος ζήτησης θα πρέπει να ανατεθεί σε ακριβώς μια εγκατάσταση. Ο περιορισμός (3.3) περιορίζει τις αναθέσεις των ζητήσεων των κόμβων μόνο σε ανοιχτές εγκαταστάσεις. Ο περιορισμός (3.4) καθορίζει το κατώτερο όριο της μέγιστης απόστασης σταθμισμένη ως προς την ζήτηση, η οποία ελαχιστοποιείται. Ο περιορισμός (3.5) θέτει τη μεταβλητή απόφασης τοποθεσίας ως δυαδική. Ο περιορισμός (3.6) απαιτεί η ζήτηση ενός κόμβου αν ανατεθεί σε μια εγκατάσταση μόνο.

Λόγω της φύσης της αντικειμενικής συνάρτησης, αυτή η κατηγορία μοντέλων ονομάζεται Minimax μοντέλα χωροθέτησης (Σατρατζέμη, 1991). Τα μοντέλα p-center τα τελευταία χρόνια εφαρμόζονται κυρίως σε προβλήματα χωροθέτησης εγκαταστάσεων έκτακτων υπηρεσιών, νοσοκομείων, πυροσβεστικών σταθμών κ.ά, όπου η απόσταση από τις εγκαταστάσεις, στις οποίες θα ανατεθεί κάποιος πελάτης, πρέπει να είναι ελάχιστη.

Όσον αφορά την επίλυση τέτοιων μοντέλων, για σταθερές τιμές του p το μοντέλο μπορεί να λυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο αφού μπορούμε να απαριθμήσουμε το κάθε πιθανό σύνολο υποψήφιων θέσεων μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα. Είναι σαφές ότι ακόμα και για μέτριες τιμές του N και του p, δεν είναι ρεαλιστική μια τέτοια αρίθμηση, με αποτέλεσμα να απαιτούνται πιο σύνθετες προσεγγίσεις. Για μεταβλητές τιμές του p, το πρόβλημα είναι NP-hard (Garey and Johnson 1979).

Εάν μπορούν να θεωρηθούν οι αποστάσεις με ακέραιες τιμές, το μη σταθμισμένο vertex ή absolute p-center problem συνήθως επιλύεται με μια δυαδική αναζήτηση σε μια περιοχή με καλυπτόμενες αποστάσεις (Handler and Mirchandani, 1979, 1990). Για κάθε καλυπτόμενη απόσταση, επιλύεται ένα set covering problem. Όταν η λύση του SCL ισούται με το p, η ελάχιστη καλυπτόμενη απόσταση είναι η λύση του p-center πρόβλημα. Ο Daskin (2013) πρότεινε έναν αλγόριθμο βασισμένο στο set covering model, ο οποίος μπορεί να επιλύσει το μη σταθμισμένο vertex p-center πρόβλημα.

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

Όλα τα μοντέλα που προναφέρθηκαν αφορούν την απόσταση μεταξύ της ζήτησης και των νέων εγκαταστάσεων, ωστόσο το πρόβλημα διασποράς p-εγκαταστάσεων διαφοροποιείται από τα περισσότερα μοντέλα με δύο τρόπους (Kuby, 1987). Πρώτον, αυτό ασχολείται μόνο την απόσταση μεταξύ των νέων εγκαταστάσεων και δεύτερον διαφέρει ως προς το στόχο καθώς το μοντέλο p-διασποράς έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της ελάχιστης απόστασης μεταξύ κάθε ζεύγους εγκαταστάσεων.

Για τη διατύπωση του παραπάνω μοντέλου απαιτείται ο ορισμός μιας ακόμη μεταβλητής M και μιας μεταβλητής απόφασης D:

M: ένας μεγάλος σταθερός θετικός αριθμός

D: η ελάχιστη απόσταση μεταξύ κάθε ζεύγους εγκαταστάσεων

Έτσι το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Maximize } D \quad (3.7)$$

$$\text{s. t:} \quad \sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.8)$$

$$D + (M - d_{ij}) x_i + (M - d_{ij}) x_j \leq 2M - d_{ij} \quad \forall i, j \in J, i < j \quad (3.9)$$

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

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.7) μεγιστοποιεί την απόσταση μεταξύ των δυο πλησιέστερων εγκαταστάσεων. Ο περιορισμός (3.8) απαιτεί οι p εγκαταστάσεις να χωροθετηθούν. Ο περιορισμός (3.9) ορίζει τον ελάχιστο διαχωρισμό μεταξύ κάθε ζεύγους των ανοιχτών εγκαταστάσεων. Πρατηρείται ότι, εάν η μεταβλητή x_i ή x_j μηδέν, ο περιορισμός (3.9) δεν είναι δεσμευτικός. Όμως, εάν και δυο αυτές μεταβλητές είναι ίσες με 1, τότε ο περιορισμός είναι ισοδύναμος με το $D \leq d_{ij}$. Ως εκ τούτου η μεγιστοποίηση του D έχει ως αποτέλεσμα να αναγκάσει τη μικρότερη απόσταση μεταξύ των εγκαταστάσεων να γίνει όσο μεγαλύτερη μπορεί.

Εφαρμογές του μοντέλου p -διασποράς συναντώνται κυρίως στη χωροθέτηση ραδιοτηλεοπτικών αναμεταδοτών, κεραίων κινητής τηλεφωνίας, αλυσίδας franchise, αμυντικών εγκαταστάσεων και άλλων εγκαταστάσεων κοινής ανταγωνιστικότητας (Αλεξανδρή 2009). Ακόμη το συγκεκριμένο πρόβλημα εφαρμόζεται και για εγκαταστάσεις που μπορεί να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην κοινωνία σε σχέση με την τοποθεσία και τη λειτουργία τους. Τέτοιες είναι οι εγκαταστάσεις παραγωγής δυνατών θορύβων, τα κέντρα απεξάρτησης ναρκωτικών ουσιών, οι σωφρονιστικές εγκαταστάσεις κ.ά

3.2.4 Μοντέλα Κάλυψης (Covering Location problems)

Στο πλαίσιο της λήψης μιας απόφασης για τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων που παρέχουν μια υπηρεσία, συμβαίνει συχνά ένας πελάτης να μπορεί να λάβει αυτήν την υπηρεσία μόνο εάν βρίσκεται εντός μιας συγκεκριμένης απόστασης από την πλησιέστερη εγκατάσταση. Τα μοντέλα που επιλύουν τέτοιου είδους ζητήματα ονομάζονται προβλήματα κάλυψης (Laporte et al., 2015). Δηλαδή, όλα τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνουν την έννοια της κάλυψης και χρησιμοποιούν μια συγκεκριμένη απόσταση, μέσα στα όρια της οποίας, εάν βρίσκεται ένα σημείο ζήτησης, θα θεωρείται ότι μπορεί να καλυφθεί.

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

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

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις τρεις πιο σημαντικές υποκατηγορίες των μοντέλων κάλυψης και αναλύονται τα χαρακτηριστικά της κάθε μιας.

3.2.5 Μοντέλο Συνόλου Κάλυψης (Set Covering Location Model)

Το πρώτο πρόβλημα κάλυψης τοποθεσίας ήταν το set covering problem (Toregas et al., 1971). Εδώ, ο στόχος είναι η τοποθέτηση του ελάχιστου αριθμού εγκαταστάσεων που απαιτούνται ή η ελαχιστοποίηση του κόστους τοποθέτησης ώστε να καλύψουμε όλη τη ζήτηση των κόμβων. Για τη διατύπωση του προβλήματος είναι απαραίτητος ο ορισμός στοιχείων εισόδου και συνόλων:

I: το σύνολο της ζήτησης των κόμβων που συμβολίζονται με i

J: το σύνολο των υποψήφιων θέσεων εγκαταστάσεων που συμβολίζεται με j

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

S: απόσταση της κάλυψης

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

f_j : το κόστος τοποθέτησης μιας μονάδας εξυπηρέτησης στην υποψήφια θέση j και οι μεταβλητές απόφασης

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

$a_{ij} : \begin{cases} 1, \text{ εάν η υποψήφια θέση } j \text{ μπορεί να καλύψει τη ζήτηση στον κόμβο } i \\ 0, \text{ εάν όχι} \end{cases}$

Με αυτόν τον συμβολισμό το set covering location problem μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} f_j x_j \quad (3.11)$$

$$\text{s. t: } \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (3.12)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3.13)$$

Σκοπός της αντικειμενικής συνάρτησης (3.11) είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους τοποθέτησης των μονάδων εξυπηρέτησης που έχουν επιλεγεί. Ο περιορισμός (3.12) δηλώνει ότι κάθε κόμβος ζήτησης i πρέπει να καλύπτεται από τουλάχιστον μια εγκατάσταση, ενώ ο περιορισμός (3.13) είναι ο ακέραιος περιορισμός των μεταβλητών απόφασης, δηλαδή ενισχύει την απόφαση χωροθέτησης με ένα ναι ή με ένα όχι.

Στο σημείο αυτό, είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι ο παραπάνω σχηματισμός της αντικειμενικής συνάρτησης (3.11) προκύπτει από την υπόθεση ότι τα κόστη εγκατάστασης των μονάδων εξυπηρέτησης δεν είναι ίδια σε όλες τις θέσεις, οπότε πρέπει να συμπεριληφθούν ως συντελεστές των μεταβλητών απόφασης (Laporte et al., 2015). Εάν όμως, τα κόστη χωροθέτησης είναι ίδια για όλες τις υποψήφιες τοποθεσίες ή απλά επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση του αριθμού των επιλεγμένων κέντρων εξυπηρέτησης, η αντικειμενική συνάρτηση (3.11) παίρνει την ακόλουθη μορφή: $\text{Minimize } \sum_{j \in J} x_j$. Και οι δυο εκδόσεις του set covering problem είναι NP- hard (Garey and Johnson, 1979). Ωστόσο,

γραμματική «χαλάρωση» προγραμματισμού του set covering location problem όπως διατυπώθηκε παραπάνω, οδηγεί συνήθως σε μια καθ' όλα ακέραια λύση. Συνήθως, μόνο λίγοι κλάδοι σε ένα branch and bound αλγόριθμο είναι αναγκαίοι για την επίτευξη μιας βέλτιστης καθ' όλα ακέραιης λύσης

Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι περιορισμοί (3.12), (3.13) προϋποθέτουν ότι κάθε σημείο ζήτησης εξυπηρετείται-καλύπτεται από μια αντίστοιχη εγκατάσταση, πράγμα το οποίο, συνήθως, αποδίδει μη οικονομικά βιώσιμες λύσεις. Αυτό γιατί στις περισσότερες περιπτώσεις, η παραπάνω υπόθεση απαιτεί τη χωροθέτηση πάρα πολλών εγκαταστάσεων. Έτσι μια ποικιλία κανόνων μείωσης γραμμών και στηλών έχει αναπτυχθεί για τη σημαντική μείωση του μεγέθους του προβλήματος (Daskin, 1995). Για παράδειγμα, η μεταβλητή x_k μπορεί να παραλειφθεί από τη διατύπωση αν $M_k \subset M_j$, όπου $M_j = \{i \mid d_{ij} \leq S\}$ και $M_k = \{i \mid d_{ik} \leq S\}$. Αυτή η μείωση στηλών είναι εφικτή γιατί μια εγκατάσταση στη θέση j μπορεί να καλύψει όλους τους κόμβους ζήτησης τους οποίους μια εγκατάσταση στη θέση k θα μπορούσε να καλύψει και ενδεχομένως θα μπορούσε να καλύψει και συμπληρωματικούς, επομένως η τοποθεσία j «κυριαρχεί» της τοποθεσίας k . Ατομικοί περιορισμοί, έστω h , του συνόλου των περιορισμών (3.12) μπορούν να εξαλειφθούν αν υπάρχει κάποιο σύνολο κάλυψης, έστω N_i τέτοιο ώστε $N_i \subset N_h$. Αυτή η μείωση γραμμής είναι εφικτή γιατί ο περιορισμός του (3.12) για τη ζήτηση του κόμβου h είναι περιττός. Δηλαδή, αν ο περιορισμός κάλυψης για τη ζήτηση του κόμβου i ικανοποιείται, τότε ικανοποιείται επίσης ο περιορισμός για τη ζήτηση του κόμβου h .

Η διατύπωση (3.11) – (3.13) υποθέτει ότι οι υποψήφιες θέσεις των εγκαταστάσεων βρίσκονται στους κόμβους ενός δικτύου. Ένα σχέδιο χωροθέτησης χαμηλότερου κόστους θα μπορούσε να ήταν εφικτό αν οι εγκαταστάσεις μπορούσαν να τοποθετηθούν κατά μήκος των τόξων του δικτύου. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Αν η απόσταση κάλυψης είναι 10 μονάδες και οι εγκαταστάσεις μπορούν να τοποθετηθούν μόνο στους κόμβους, τότε χρειάζονται δύο εγκαταστάσεις: μία στον κόμβο A και μία είτε στον κόμβο B είτε στον κόμβο C . Αν μπορούσαμε να τοποθετήσουμε τις εγκαταστάσεις στους κόμβους, τότε είναι αναγκαίες δυο εγκαταστάσεις: μια στον κόμβο A και μια στον κόμβο B ή στον κόμβο C . Αν ήταν δυνατό να τοποθετήσουμε τις εγκαταστάσεις κατά μήκος των συνδέσμων (ή αλλιώς των τόξων), καθώς και στους κόμβους, τότε μια εγκατάσταση τοποθετημένη 10 μονάδες δεξιά του κόμβου A θα κάλυπτε τη ζήτηση και των τριών κόμβων. Οι Chuck and Meadows (1979) παρουσίασαν μια μέθοδο για να τροποποιήσουν το αρχικό δίκτυο, ώστε να επιτρέπεται η τοποθεσία κατά μήκος των τόξων αλλά να εξακολουθούν να λύνουν το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τη διατύπωση (3.11) – (3.13). Αυτή η μέθοδος αυξάνει το αρχικό δίκτυο με ένα σταθερό αριθμό κόμβων που τοποθετούνται κατά μήκος των τόξων του δικτύου. Η συμπερίληψη αυτών των επιπλέον κόμβων στο σύνολο J θα οδηγήσει σε μια λύση τόσο καλή όπως όταν κάποιος επιτρέπει τοποθεσίες οπουδήποτε κατά μήκος των τόξων.



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα δικτύου

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

3.2.6 Μοντέλο Μέγιστης Κάλυψης (Maximal Covering Location Problem)

Το maximal covering location problem (MCLP, Church and Reville, 1974) παρουσιάζει μια σημαντική διαφορά σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο (set covering model). Στη συγκεκριμένη κατηγορία, ο αριθμός των εγκαταστάσεων που θα τοποθετηθεί είναι προκαθορισμένος, έστω p και τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται η ζήτηση που καλύπτεται. Έτσι το MCLP υποθέτει ότι μπορεί να μην είναι αρκετές οι εγκαταστάσεις για να καλύψουν όλους τους κόμβους ζήτησης. Σε περίπτωση που δεν καλυφθούν όλοι οι κόμβοι, τότε το μοντέλο αναζητά σχήμα χωροθέτησης το οποίο καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης.

Για τη διατύπωση του μοντέλου μέγιστης κάλυψης, θα χρησιμοποιηθούν οι ορισμοί που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο συνόλου κάλυψης και επιπλέον θα οριστούν τα εξής μεγέθη:

h_i : η ζήτηση στον κόμβο i

p : ο αριθμός των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν

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

Έτσι το πρόβλημα μέγιστης κάλυψης ορίζεται ως εξής:

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i \in I} h_i z_i \quad (3.14)$$

$$\text{s. t:} \quad \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \geq z_i \quad \forall i \in I \quad (3.15)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad (3.16)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.17)$$

$$z_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in I \quad (3.18)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.14) μεγιστοποιεί τη συνολική κάλυψη της ζήτησης. Ο περιορισμός (3.15) εξασφαλίζει ότι η ζήτηση στον κόμβο i δεν υπολογίζεται ως καλυπτόμενη αν δεν τοποθετήσουμε εγκατάσταση σε μία από τις υποψήφιες θέσεις που καλύπτεται στον κόμβο i . Ο περιορισμός (3.16) περιορίζει τον αριθμό των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν. Οι δυο επόμενοι περιορισμοί (3.17), (3.18) είναι περιορισμοί δυαδικότητας και ακεραιότητας των μεταβλητών απόφασης. Παρουσιάζει ενδιαφέρον το γεγονός ότι, οι

περιορισμοί (3.15) και (3.17), μας επιτρέπουν να αντικαταστήσουμε τον περιορισμό (3.18) με $z_i \leq 1, \forall i \in I$, χωρίς απώλεια της γενικότητας.

Μια παραλλαγή αυτού του προβλήματος προτάθηκε από τους Church και ReVelle (1974) και αφορούσε το συνδυασμό της υποχρεωτικής κάλυψης ορισμένων σημείων ζήτησης και τη μεγιστοποίηση της κάλυψης των υπόλοιπων σημείων. Ακόμη, οι Church και Meadows (1979) πρότειναν μια τροποποίηση του δικτύου στην περίπτωση που οι εγκαταστάσεις μπορούν να τοποθετηθούν και κατα μήκος των συνδέσμων του δικτύου. Σύμφωνα με τους Current et al. (2002), συστηματικές αλλαγές του p από 1 έως k , όπου k ο ελάχιστος αριθμός εγκαταστάσεων που απαιτούνται για να καλυφθεί ολόκληρη η ζήτηση, τότε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν οι τύποι (3.14) έως (3.18), προκειμένου να προσδιοριστούν τα οφέλη που σχετίζονται με επιπλέον εγκαταστάσεις.

Ακόμη, μια ενδιαφέρουσα πρόταση για τη λύση του προβλήματος διατυπώθηκε από τους Carrizosa και Plastria (1998b). Τέλος, μια πρόσφατη προσέγγιση του maximal covering location problem αναφέρεται στο Niaki (2016) όπου παρουσιάζεται η γενική μορφή του capacitated maximal covering location problem.

Το πρόβλημα μέγιστης κάλυψης είναι επίσης NP-hard (Mediggo, Zemel and Hakimi, 1983), αλλά γενικά μπορεί να επιλυθεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας ευρετικούς αλγόριθμους. Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η Lagrangean "χαλάρωση" που ενσωματώνεται μέσα στον branch and bound αλγόριθμο (Daskin, 1995, Daskin and Owen, 1998, Galvao and ReVelle 1996).

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

Τα μοντέλα Μέσης ή Συνολικής Απόστασης στοχεύουν στην εύρεση της βέλτιστης της συνολικής ή μέσης διανυόμενης απόστασης μεταξύ των εγκαταστάσεων και των σημείων ζήτησης για την πλήρη εξυπηρέτηση της ζήτησης. Πολλές καταστάσεις σχεδιασμού χωροθέτησης εγκαταστάσεων στο δημόσιο και ιδιωτικό τομέα, ασχολούνται με τη συνολική απόσταση ταξιδιού μεταξύ των εγκαταστάσεων και των κόμβων ζήτησης. Ένα παράδειγμα, στον ιδιωτικό τομέα, θα μπορούσε να είναι η χωροθέτηση παραγωγικών μονάδων παραγωγής (εργοστασίων), οι οποίες λαμβάνουν τις εισροές τους από τις καθιερωμένες.

3.2.8 Μοντέλα P- Διαμέσων (The P – Median Problem)

Το μοντέλο p -διάμεσος έχει ως αντικειμενικό σκοπό τη χωροθέτηση δοθέντος αριθμού εγκαταστάσεων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική ή μέση απόσταση σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση μεταξύ των κόμβων ζήτησης και των πιο κοντινών από τις επιλεγμένες εγκαταστάσεις. Οι πρώτες προσπάθειες επίλυσης τέτοιων προβλημάτων χωροθέτησεων κατανομών στηρίχθηκαν στον αλγόριθμο Hakimi, (1964, 1965), το οποίο βρίσκει τις τοποθεσίες των p -εγκαταστάσεων ελαχιστοποιώντας τη συνολική απόσταση σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση μεταξύ των κόμβων ζήτησης και των εγκαταστάσεων στις οποίες έχουν ανατεθεί (οι κόμβοι ζήτησης). Για τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι απαραίτητο να οριστούν πρώτα τα παρακάτω δεδομένα και σύνολα:

I: το σύνολο των κόμων ζήτησης που συμβολίζεται με i

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

h_i : η ζήτηση στον κόμβο i

d_{ij} : η απόσταση ανάμεσα στους κόμβους ζήτησης I και στις υποψήφιες θέσεις j

p: ο αριθμός των μονάδων εξυπηρέτησης που θα χωροθετηθούν

και οι μεταβλητές απόφασης:

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

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

Με χρήση των παραπάνω συμβολισμών το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (3.19)$$

$$\text{s. t: } \sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.20)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.21)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.22)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3.23)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in I \quad (3.24)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.19) έχει ως στόχο να ελαχιστοποιεί τη συνολική απόσταση ταξιδιού σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση. Οι περιορισμοί (3.20) έως (3.22) είναι ταυτόσημοι με τους (3.1) έως (3.3) του p-center προβλήματος. Οι περιορισμοί (3.23) και (3.24) είναι πανομοιότυποι με τους (3.5) και (3.6). Ο περιορισμός (3.24) μπορεί να παραλειφθεί ακολουθώντας τα ίδια επιχειρήματα που χρησιμοποιήθηκαν για τον περιορισμό. Οι Toregas & ReVelle (1972) δείχνουν ότι αυτή η διατύπωση ελαχιστοποιεί επίσης τη μέση απόσταση ταξιδιού μεταξύ των εγκαταστάσεων και της ζήτησης. Αυτή η διατύπωση υποθέτει ότι οι πιθανές τοποθεσίες εγκαταστάσεων είναι κόμβοι πάνω σε δίκτυο. Ο Hakimi (1964) απέδειξε ότι «χαλαρώνοντας» το πρόβλημα επιτρέποντας τοποθεσίες εγκαταστάσεων στα τόξα του δικτύου, αυτό δεν θα μείωνε το συνολικό κόστος ταξιδιού. Ως εκ τούτου, αυτή η διατύπωση θα αποφέρει μια βέλτιστη λύση, ακόμα και αν οι εγκαταστάσεις θα μπορούσαν να τοποθετηθούν οπουδήποτε στο τόξο. Όπως το p – center πρόβλημα, το p-median πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο για σταθερές τιμές του p, αλλά είναι NP – hard για μεταβλητές τιμές του p (Garey and Johnson, 1979)

3.2.9 Μοντέλα Σταθερού κόστους (The Fixed-Charge Facility Location problem)

Το μοντέλο σταθερού κόστους αποτελεί ένα από τα πιο βασικά μοντέλα χωροθέτησης. Διαφέρουν ως προς τα μοντέλα p -median καθώς τα τελευταία κάνουν τρεις σημαντικές παραδοχές οι οποίες μπορεί να μην είναι κατάλληλες για ορισμένα σενάρια χωροθέτησης. Πρώτον, υποθέτουν ότι κάθε πιθανή τοποθεσία έχει τα ίδια σταθερά κόστη για να χωροθετηθεί μια εγκατάσταση σ' αυτή την τοποθεσία. Δεύτερον, υποθέτουν ότι οι εγκαταστάσεις που πρόκειται να χωροθετηθούν δεν διαθέτουν την παραγωγική ικανότητα σε σχέση με τη ζήτηση που μπορούν να εξυπηρετήσουν. Τέλος, υποθέτουν ότι κάποιος γνωρίζει *a priori* (εκ των προτέρων), πόσες εγκαταστάσεις θα ανοιχθούν (π.χ. p). Τα μοντέλα σταθερού κόστους (FCLP) «χαλαρώνουν» αυτές τις τρεις υποθέσεις και έχουν ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους που αφορά τις μονάδες που θα χωροθετηθούν αλλά και του κόστους μετακίνησης. Σ' αυτό το πλαίσιο, καθορίζει τον βέλτιστο αριθμό εγκαταστάσεων και τοποθεσιών τους, καθώς επίσης και τις αναθέσεις της ζήτησης σε κάθε εγκατάσταση.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι εγκαταστάσεις έχουν παραγωγικές ικανότητες, η ζήτηση μπορεί να μην ανατεθεί στη πιο πλησιέστερη της εγκατάστασης, όπως συνέβη στα προηγούμενα μοντέλα. Τα μοντέλα σταθερού κόστους μοορούμε ανάλογα με την ύπαρξη περιορισμού η όχι της δυνατότητας εξυπηρέτησης της ζήτησης από ένα κέντρο εξυπηρέτησης να τα διαχωρίσουμε σε δυο προβλήματα:

- ❖ Πρόβλημα Σταθερού Κόστους Χωρίς Περιορισμούς (Uncapacitated Fixed Charge Facility Location Problem)
- ❖ Πρόβλημα Σταθερού Κόστους Με Περιορισμούς (Capacitated Fixed Charge Facility Location Problem)

Η κύρια διαφορά μεταξύ των δυο προβλημάτων είναι ότι στο πρόβλημα σταθερού κόστους χωρίς περιορισμούς θεωρούμε ότι ένα κέντρο εξυπηρέτησης δεν έχει περιορισμούς αναφορικά με τη ζήτηση που μπορεί να εξυπηρετήσει ενώ αντίθετα στο πρόβλημα σταθερού κόστους με περιορισμό υπάρχει περιορισμός στη ζήτηση που κάποιο κέντρο εξυπηρέτησης μπορεί να ικανοποιήσει.

Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα δεδομένα και σύνολα ορίζονται αρχικά οι παρακάτω επιπρόσθετες παράμετροι και μεταβλητές ώστε στη συνέχεια να διατυπωθούν οι δυο τύποι προβλημάτων:

f_j : σταθερό κόστος χωροθέτησης μιας εγκατάστασης σε μια υποψήφια θέση j

a_i : κόστος ανά μονάδα απόστασης ανά μονάδα ζήτησης

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

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

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

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

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} f_j x_j + \alpha \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (3.25)$$

$$\text{s. t: } \sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.26)$$

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

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.28)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.29)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.25) ελαχιστοποιεί το άθροισμα του σταθερού κόστους χωροθέτησης εγκαταστάσεων και του συνολικού κόστους μετακίνησης. Ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης αναφέρεται συχνά σε απόσταση σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση. Ο περιορισμός (3.26) ορίζει ότι κάθε κόμβος ζήτησης i εξυπηρετείται, ενώ ο περιορισμός (3.27) εξασφαλίζει ότι κάθε κόμβος ζήτησης μπορεί να αντεθεί σε μια υποψήφια θέση j , εφόσον έχει εγκατασταθεί στη θέση αυτή ένα κέντρο εξυπηρέτησης. Οι δυο τελευταίοι περιορισμοί αποτελούν τους περιορισμούς ακεραιότητας και με τη χαλάρωση του τελευταίου περιορισμού είναι δυνατή η ανάθεση της ζήτησης σε πολλαπλές εγκαταστάσεις,

Για τη διατύπωση του Προβλήματος Σταθερού κόστους με περιορισμούς χρειάζεται ο ορισμός μιας επιπλέον παραμέτρου c_j που ορίζεται, ως η χωρητικότητα μιας εγκατάστασης στην υποψήφια θέση j . Έτσι το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} f_j x_j + \alpha \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (3.30)$$

$$\text{s. t: } \sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.31)$$

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

$$\sum_{j \in J} h_i y_{ij} \leq c_j x_j \quad \forall i \in I \quad (3.33)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.34)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.35)$$

Όπως παρατηρείται, είναι παρόμοιο με το uncapacitated fixed charge location problem, εκτός από τον περιορισμό της χωρητικότητας (3.33), ο οποίος χρησιμοποιείται ώστε να εξασφαλίζεται ότι η συνολική ζήτηση δεν θα υπερβαίνει τη χωρητικότητα της εγκατάστασης (c_j). Επίσης, μπορεί να θεωρηθεί ότι, επειδή ο περιορισμός (3.33) θα αναγκάσει τη ζήτηση να ανατεθεί μόνο σε εγκαταστάσεις με δυνατότητα εξυπηρέτησης, ο περιορισμός (3.32) δεν είναι αναγκαίος. Ωστόσο συμπεριλαμβάνοντας αυτό τον περιορισμό ενισχύεται σημαντικά η χαλάρωση του γραμμικού προγραμματισμού του μοντέλου.

Το πρόβλημα σταθερού κόστους έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε περιοχές έρευνας όπως είναι ο ιδιωτικός τομέας, το λογισμικό για GIS ή η ρομποτική. Επιπλέον, το μοντέλο σταθερού κόστους παίζει κρίσιμο ρόλο και σε πολλά άλλα πεδία όπως στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, στα συστήματα κατανομής, στα συστήματα έκτακτης ανάγκης, στα προβλήματα χωροθέτησης-δρομολόγησης, στη μεταφορά φορτίων κ.ά. Οι Melo et al. (2009) μελέτησαν το πρόβλημα στο πλαίσιο της διαχείρισης εφοδιαστικής αλυσίδας μέχρι το 2009. Οι Klose και Drexl (2005) αναφέρουν περιληπτικά εφαρμογές του προβλήματος σταθερού κόστους μέσα σε κατανομημένα συστήματα σχεδιασμού.

3.2.10 Μοντέλα Δρομολόγησης ή Χωροθέτησης Πλήμνης (The Hub Location Problem)

Πολλά μεταφορικά, τηλεπικοινωνιακά και πληροφοριακά δίκτυα χρησιμοποιούν συχνά hub and spoke συστήματα για να κατευθύνουν αποτελεσματικά τις ροές μεταφορών ανάμεσα σε πολλαπλές πηγές και προορισμούς (Current et al., 2002). Αυτά τα συστήματα είναι σχεδιασμένα να χρησιμοποιούν μεγαλύτερη παραγωγική ικανότητα ή ταχύτερα οχήματα σε μεγάλες αποστάσεις. Κατα συνέπεια, αυτά τα συστήματα μειώνουν το μέσο κόστος μεταφορών ανά χιλιόμετρο ή το συνολικό χρόνο παράδοσης.

Ο πρώτος που μελέτησε τα μοντέλα δρομολόγησης ήταν ο Kelly (1986), ο οποίος αρχικά ασχολήθηκε με περιπτώσεις συνεχών μοντέλων και έπειτα με περιπτώσεις διακριτών μοντέλων. Στη βιβλιογραφία της επιχειρησιακής έρευνας, ως πλήμνη ορίζεται μια κεντρική εγκατάσταση η οποία τοποθετείται σε κεντρικό σημείο ενός συνόλου περιοχών, έτσι ώστε να εξυπηρετούνται όλες οι ροές ζήτησης. Το 1969 ο Goldman ανέφερε την πλήμνη ως ένα κέντρο και σύμφωνα με τον Campbell (1990) χωροθέτησε εγκαταστάσεις σε θέσεις κέντρα με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς για ένα σύνολο ζευγαριών προέλευσης-προορισμού, δημιουργώντας έτσι τη γενική μαθηματική διατύπωση του προβλήματος. Μετέπειτα και άλλοι μελετητές ασχολήθηκαν με το πρόβλημα χωροθέτησης πλήμνης ωστόσο οι πιο σημαντικές μελέτες ήταν των Campbell (1994a), Klineciewicz (1998), Bryan και O'Kelly (1999), Alumur και Kara (2008), Campbell και O'Kelly (2012). Τα περισσότερα από αυτά τα μοντέλα προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν το συνολικό κόστος (ως συνάρτησης απόστασης).

Το βασικό πρόβλημα χωροθέτησης p-πλημνών χωροθέτησης μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα δευτεροβάθμιο πρόγραμμα ακέραιου προγραμματισμού και για τη διατύπωση του θα χρησιμοποιηθεί ο ακόλουθος συμβολισμός εισόδου:

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

c_{ij} : μοναδιαίο κόστος μεταξύ των κόμβων i και j

a : εκπτώτικος παράγοντας για τις μεταφορές μεταξύ των κόμβων

και οι ακόλουθες μεταβλητές απόφασης:

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

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

Έτσι, το μοντέλο αναπαρίσταται με την παρακάτω μαθηματική έκφραση:

$$\text{Minimize } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} h_{ij} (\sum_{k \in N} c_{ik} y_{ik} + \sum_{m \in N} c_{jm} y_{jm} + a \sum_{k \in N} c_{km} y_{ik} y_{jm}) \quad (3.36)$$

$$\text{s. t: } \sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.37)$$

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

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.39)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.40)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.41)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.36) ελαχιστοποιεί το άθροισμα του κόστους μεταφοράς αντικειμένων μεταξύ ενός απλού κόμβου και μιας πλήμνης με την οποία συνδέεται, το κόστος μετακίνησης από την τελική πλήμνη στον προορισμό της ροής και το κόστος μετακίνησης μεταξύ των πλημνών το οποίο είναι μειωμένο επί ένα συντελεστή a . Το μοντέλο υποθέτει ότι το hub τμήμα του δικτύου είναι ένας πλήρης γράφος και ως εκ τούτου ροές μεταξύ οποιουδήποτε ζευγαριού κόμβων i και j θα περάσουν μέσα από το πολύ δύο διαφορετικούς hub κόμβους. Ο περιορισμός (3.37) προσδιορίζει τον αριθμό των κέντρων εξυπηρέτησης-πλημνών προς τοποθέτηση ενώ ο περιορισμός (3.38) δηλώνει ότι κάθε σημείο ζήτησης θα συνδεθεί με μια ακριβώς πλήμνη και μπορεί να «χαλαρώσει» ώστε να είναι δυνατόν οι ροές από μεγάλους κόμβους να ανατίθενται σε δυο ή περισσότερες πλήμνες. Ο επόμενος περιορισμός (3.39) περιορίζει τη σύνδεση σημείων ζήτησης μόνο με διαθέσιμες ανοικτές πλίμνες. Οι δυο τελευταίοι περιορισμοί (3.40) και (3.41) είναι οι γνωστοί περιορισμοί δυαδικότητας και ακεραιότητας.

Όπως παρατηρείται οι περιορισμοί (3.37) έως (3.41) είναι ταυτόσημοι με τους περιορισμούς (3.20) έως (3.24) του p -median μοντέλου που αναλύθηκαν προηγουμένως. Συγκεκριμένα, ο περιορισμός (3.38) ορίζει ότι κάθε κόμβος θα πρέπει να ανατεθεί σε ακριβώς ένα hub. Στη πράξη, μπορεί να αξίζει να «χαλαρώσουμε» αυτόν τον περιορισμό και να επιτρέψουμε ροές από ιδιαίτερα μεγάλους κόμβους να εξυπηρετούνται άμεσα από δύο ή περισσότερους hub κόμβους.

Παρά την ομοιότητα μεταξύ των περιορισμών των δύο μοντέλων, αξίζει να σημειωθεί μια σειρά από σημαντικές διαφορές. Πρώτον, οι απαιτήσεις στο p -hub μοντέλο χωροθέτησης είναι ροές κόμβο-προς-κόμβο και όχι απλώς απαιτήσεις σε ένα συγκεκριμένο κόμβο. Δεύτερον, και ίσως σημαντικότερον, η αντικειμενική συνάρτηση στις μεταβλητές ανάθεσης είναι τετραγωνική. Τρίτον, ίσως να μην είναι βέλτιστη η ανάθεση ενός κόμβου στο πλησιέστερο hub δεδομένου ότι η αντικειμενική συνάρτηση μετριέται σε όρους κόμβο – προς – κόμβο ροές και όχι απλώς όσον αφορά το κόστος πρόσβασης στο hub system.

Λαμβάνοντας υπόψη τις δυσκολίες για την επίλυση ακόμα και ενός μεσαίου μεγέθους hub location problem με βέλτιστο τρόπο, οι Ernst & Krishnamoorthy (1996) προτείνουν αλγόριθμους για την αποτελεσματική αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων. Οι Kuby & Gray (1993) ανέλυσαν ένα δίκτυο αερομεταφορών με ένα hub μοντέλο χωροθέτησης

3.2.11 Μοντέλα Χωροθέτησης Μέγιστου Αθροίσματος (The Maxisum Location Problem)

Τα μοντέλα μέσης απόστασης που συζητήθηκαν παραπάνω, υποθέτουν ότι είναι επιθυμητό η τοποθέτηση εγκαταστάσεων όσο το δυνατόν πλησιέστερα στις απαιτήσεις. Για πολλές εγκαταστάσεις-μονάδες, αυτό είναι το ζητούμενο. Ωστόσο, για ορισμένες εγκαταστάσεις όπως είναι για π.χ. οι φυλακές, τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και χώροι εναπόθεσης στερεών αποβλήτων κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτηση τους όσο το δυνατόν πιο μακριά από τα σημεία διαμονής του πληθυσμού.

Το maxisum location problem (Church & Garfinkel 1978, Ting 1984) αφορά τη χωροθέτηση τέτοιων εγκαταστάσεων και έχει στόχο την εύρεση βέλτιστης λύσης για τη χωροθέτηση μονάδων παροχής εξυπηρέτησης, ώστε να μεγιστοποιείται η μεση σταθμισμένη διανυόμενη απόσταση μεταξύ των σημείων ζήτησης και των εγκαταστάσεων.

Το πρόβλημα αυτό έχει εκτεταμένα απασχολήσει τη διεθνή βιβλιογραφία, κυρίως σε ότι αφορά τις μεθόδους επίλυσης του. Οι Erkut και Neuman (1989) παρουσίασαν μια ενδιαφέρουσα μελέτη, όπου αναλύουν τα κριτήρια χωροθέτησης ανεπιθύμητων εγκαταστάσεων και τα μαθηματικά υποδείγματα που έχουν αναπτυχθεί.

Το μοντέλο maxisum μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (3.42)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (3.43)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.44)$$

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

$$\sum_{k=1}^m y_{i[k]i} - x_{[m]i} \geq 0 \quad \forall i \in I, m = 1, \dots, N-1 \quad (3.46)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3.47)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.48)$$

Όπως παρατηρείται, η διατύπωση του παραπάνω προβλήματος είναι πανομοιότυπη με αυτή του p-median problem ωστόσο υπάρχουν δυο αξιοσημείωτες διαφορές. Η πρώτη προφανής διαφορά είναι ότι σε αντίθεση με το p-median που η αντικειμενική συνάρτηση (3.42) έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση, εδώ στόχος είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής απόστασης η οποία είναι σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση. Η επίπτωση αυτής της αντικειμενικής συνάρτησης είναι ότι υποχρεώνει τις απαιτήσεις της ζήτησης να ανατεθούν στην πιο απομακρυσμένη εγκατάσταση. Έτσι, η διατύπωση έχει επεκταθεί με τον περιορισμό (3.46), ο οποίος επιβεβαιώνει ότι οι απαιτήσεις της ζήτησης ανατίθενται στην πλησιέστερη εγκατάσταση. Σε αυτόν τον περιορισμό ο $[k]_i$ είναι ο δείκτης από τη k πιο απομακρυσμένη υποψήφια θέση από τον κόμβο ζήτησης i. Ακόμη ο ίδιος περιορισμός δηλώνει ότι αν η m πλησιέστερη εγκατάσταση στον κόμβο ζήτησης i έχει τη δυνατότητα εξυπηρέτησης, τότε η ζήτηση του κόμβου i πρέπει να συνδεθεί με αυτήν την εγκατάσταση ή με την πιο κοντινή σε αυτήν.

Για την επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης μέγιστου αθροίσματος, οι Hanset et al. (1981) χρησιμοποίησαν φθίνουσες συνεχείς συναρτήσεις απόστασης και πρότειναν μια

μέθοδο παρόμοιου τύπου με τη μέθοδο δράγμα και κλάδος (Branch and bound) την οποία αναφέρουν ως «Bing -square-small-square» για την επίλυση του.

3.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μοντέλων WIM

Καθοριστικό ρόλο για την επίτευξη του στόχου της παρούσας εργασίας αποτελεί η πραγματοποίηση ολοκληρωμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης, προκειμένου να επιλεγθούν με ορθολογικό και τεκμηριωμένο τρόπο σημαντικές συνιστώσες και μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος που πραγματεύεται η εργασία. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση περιλαμβάνει κυρίως δημοσιεύσεις μελετητών που ανέπτυξαν μοντέλα που σχετίζονται με τη χωροθέτηση σταθμών WIM.

Πολλοί μελετητές έχουν ασχοληθεί με την αντιμετώπιση προβλημάτων χωροθέτησης σταθμών WIM. Τα πρώτα μοντέλα που αναπτύχθηκαν από τους AlGadhi (2002), Selmic et.al (2011) και Mahmoudabadī και Seyedhosseini (2013) υπέθεταν εάν ένας σταθμός ελέγχου τοποθετηθεί κατά μήκος μιας προκαθορισμένης διαδρομής, τότε η ροή ελέγχεται, χωρίς ωστόσο να λαμβάνουν υπόψη ότι κάποιοι οδηγοί παρεκκλίνουν αυτής της διαδρομής αυτής. Συνεπώς, προκειμένου να επιβληθεί ο έλεγχος βάρους, υπήρχε η απαίτηση η χωροθέτηση αισθητήρων WIM να γίνεται κατά μήκος των κοντινότερων διαδρομών που ακολουθούν τα φορτηγά.

Η πρώτη μελέτη για τη χωροθέτηση σταθμών WIM σε ένα οδικό δίκτυο έγινε από το AlGadhi (2002). Σε αυτή την μελέτη διατυπώθηκε ένα μοντέλο για τη χωροθέτηση σταθμών WIM στο οδικό δίκτυο της Σαουδικής Αραβίας αποσκοπώντας στην μεγιστοποίηση της συνολικής ροής των φορτηγών που ελέγχονται κατά τη διέλευση τους από το δίκτυο. Το μοντέλο αυτό αποτελούσε ένα μοντέλο ακέραιου προγραμματισμού και βασίστηκε στο μοντέλο μέγιστης κάλυψης (Church and ReVelle).

Προτού διατυπωθεί το μοντέλο, πρέπει να οριστούν τα εξής μεγέθη:

f: συνολική ροή

m: αριθμός των εγκαταστάσεων που τοποθετούνται

και οι μεταβλητές απόφασης:

$$X_j: \begin{cases} 1, \text{ εάν η εγκατάσταση τοποθετείται στον κόμβο } j, & j \in N \\ 0, \text{ εάν όχι} \end{cases}$$

$$Y_p: \begin{cases} 1, \text{ εάν τουλάχιστον μια εγκατάσταση τοποθετείται στη διαδρομή } p \\ 0, \text{ εάν όχι} \end{cases}$$

Έτσι, τώρα το μοντέλο διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Maximize } \sum_{p \in P} f_p Y_p \quad (4.8)$$

$$\text{s. t: } \sum_{j=1}^n X_j = m \quad p \in P \quad (4.9)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad (4.10)$$

$$Y_p \in \{0,1\} \quad (4.11)$$

Δεδομένου ότι η μεταβλητή Y_p είναι ίση με 1 μόνο εάν έχει τοποθετηθεί τουλάχιστον μια εγκατάσταση στη διαδρομή p , το ποσοστό ροής f_p θα συμπεριληφθεί ακριβώς μια φορά και θα αποφευχθεί η διπλή μέτρηση στην αντικεμενική συνάρτηση όταν $Y_p=1$. Ο περιορισμός (4.9) εγγυάται ότι ο ακριβής αριθμός των εγκαταστάσεων θα ισούται με m . Οι περιορισμοί (4.10), (4.11) εξασφαλίζουν ότι εάν δεν υπάρχει εγκατάσταση στη διαδρομή P , το Y_p ισούται με μηδέν ενώ αν υπάρχει τουλάχιστον μια εγκατάσταση στη διαδρομή p , δεδομένου ότι η αντικεμενική συνάρτηση είναι η μεγιστοποίηση του αθροίσματος μη αρνητικών όρων, $Y_p=1$.

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος έγιναν δυο προσεγγίσεις από το συγγραφέα: μια μαθηματική προσέγγιση προγραμματισμού (MP) και μια ευρετική προσέγγιση με το πρόγραμμα Matlab. Στην ακριβή επίλυση με το μαθηματικό μοντέλο, έγινε η υπόθεση ότι οι οδηγοί επιλέγουν τη διαδρομή τους μεταξύ κάθε ζεύγους προέλευσης-προορισμού κατά μήκος της αντίστοιχης συντομότερης διαδρομής. Σύμφωνα με το συγγραφέα όλοι οι οδηγοί θα ακολουθούσαν τέτοια συμπεριφορά επιλογής διαδρομής μόνο εάν χρησιμοποιούνταν ζυγαριές, οι οποίες δεν θα ήταν εύκολο να τις αντιληφθούν οι οδηγοί και έτσι θα εμποδίζονταν οι προσπάθειες των οδηγών να αποφύγουν τον έλεγχο. Ωστόσο, εάν οι θέσεις των εγκαταστάσεων ελέγχου ήταν γνωστές για τους οδηγούς, κάποιοι οδηγοί ίσως προσπαθούσαν να αλλάξουν την διαδρομή τους αποφεύγοντας τη ζύγιση, αντί να επέγαν την κοντινότερη διαδρομή μεταξύ ζευγών προέλευσης και προορισμού. Συγκρίνοντας τις επιλύσεις με τις δυο μεθόδους, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η λύση της ευρετικής προσέγγισης ήταν πολύ κοντά στη βέλτιστη όσον αφορά τον αριθμό των σταθμών που απαιτούνται για τη διακοπή ενός δεδομένου ποσοστού της ροής των φορτηγών. Ωστόσο, ορισμένες θέσεις των σταθμών δεν συνέπιπταν με εκείνες που προέκυψαν από την ακριβή λύση με MP.

Μια άλλη προσέγγιση του προβλήματος χωροθέτησης εγκαταστάσεων σταθμών WIM έγινε από τους *Selmic, et al.* (2011). Σκοπός αυτής της μελέτης ήταν η ανάπτυξη ενός μοντέλου ικανού να αποφασίσει για τις βέλτιστες θέσεις εγκαταστάσεων σημείων ελέγχου WIM στο οδικό δίκτυο. Η αντικεμενική συνάρτηση είχε ως στόχο το συνδυασμό της μείωσης της πιθανότητας να διέλθουν οχήματα από το δίκτυο χωρίς να καταγραφούν και τον έλεγχο όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ροής στο οδικό δίκτυο. Ο αριθμός των εγκαταστάσεων θεωρήθηκε δεδομένος και αντιμετωπίστηκε ως περιορισμός για πρόβλημα. Λόγω ότι η εγκατάσταση σημείων ελέγχου WIM αποτελεί μη γραμμικό πρόβλημα (NLP), η επίλυση που πρότειναν ήταν με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου. Ωστόσο, λόγω του ότι δεν διέθεταν πραγματικά δεδομένα, εφάρμοσαν το μοντέλο σε παραδείγματα που διαμορφώθηκαν τυχαία. Οι παράμετροι που εισήγαγαν στο μοντέλο τους ήταν ο αριθμός των κόμβων, ο αριθμός των σημείων ελέγχου, το μητρώο πινάκων προέλευσης και προορισμού και οι συντομότερες

διαδρομές μεταξύ των κόμβων στο δίκτυο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την επίλυση του Γενετικού Αλγόριθμου, τα σύγκριναν με τα βέλτιστα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα IBM ILOG OPL. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο Γενετικός Αλγόριθμος ήταν ικανός να φθάσει στη βέλτιστη λύση σε όλα τα δίκτυα που εξετάστηκαν και ότι οι λύσεις προέκυψαν έπειτα από ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων. Επιπλέον, παρατήρησαν ότι το προτεινόμενο μοντέλο επέτρεπε τον έλεγχο μεγαλύτερου ποσοστού ροής μειώνοντας την πιθανότητα να διέλθουν οχήματα από το δίκτυο χωρίς να καταγραφούν. Τέλος, κατέληξαν στο ότι η τοποθέτηση λίγων σημείων ελέγχου ήταν ικανή να ελέγξει σχεδόν όλο το ποσοστό της ροής του δικτύου.

Προτού γίνει η διατύπωση του σχετικού μοντέλου, απαραίτητη κρίνεται η παρουσίαση των παραμέτρων και των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν:

G: το σύνολο των συνδέσμων του εξεταζόμενου οδικού δικτύου

n: ο συνολικός αριθμός κόμβων στο δίκτυο στους οποίους είναι δυνατή η εγκατάσταση σημείων ελέγχου WIM

R: το σύνολο των κόμβων προέλευσης

S: το σύνολο των κόμβων προορισμού

P: μητρώο που περιέχει τη ζήτηση των ζευγών προέλευσης-προορισμού

V_p : το σύνολο των κόμβων στη διαδρομή p, $p \in P$

a_{ip} : μείωση του κινδύνου που επιτυγχάνεται στη διαδρομή p εάν η πρώτη εγκατάσταση που συναντάται κατά μήκος αυτής της διαδρομής έχει τοποθετηθεί στον κόμβο $v_i \in V_p$

m: ο συνολικός αριθμός των εγκαταστάσεων wim που επιθυμούμε να εγκαταστήσουμε

και επιπλέον ορίζονται και οι μεταβλητές απόφασης:

$$y_i: \begin{cases} 1, \text{εάν γίνεται η χωροθέτηση στον κόμβο } v_i \\ 0, \text{εάν όχι} \end{cases}$$

$$x_{ip}: \begin{cases} 1, \text{εάν η ροή στη διαδρομή p διακόπτεται πρώτα στο } v_i \in V_p \\ 0, \text{εάν όχι} \end{cases}$$

Έτσι προκύπτει η ακόλουθη διατύπωση:

$$\text{Maximize } \sum_{p \in P} \sum_{v_i \in V_p} a_{ij} f_{ix_{ip}} \quad (4.12)$$

$$\text{s. t: } \sum_{v_i \in V} y_i = m \quad (4.13)$$

$$x_{ip} \leq y_i \quad (p \in P, v_i \in V_p) \quad (4.14)$$

$$\sum_{v_i \in V_p} x_{ip} \leq 1 \quad (p \in P) \quad (4.15)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad (v_i \in V) \quad (4.16)$$

$$x_{ip} \in \{0,1\} \quad (p \in P, v_i \in V_p) \quad (4.17)$$

Ο σκοπός της αντικειμενικής συνάρτησης (4.12) είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων που ελέγχονται μειώνοντας της πιθανότητα να μην καταγραφούν τα οχήματα

κατά τη διέλευση τους από το δίκτυο. Ο συνολικός αριθμός των σημείων ελέγχου που πρέπει να εγκατασταθούν ισούται με m και αναφέρεται στο περιορισμό (4.13). Η ροή στη διαδρομή p δεν μπορεί να διακοπεί στον κόμβο V_i εάν δεν υπάρχουν συστήματα ελέγχου WIM (4.14). Ο περιορισμός (4.15) δηλώνει ότι δεν είναι απαραίτητο όλες οι διαδρομές να περιέχουν ένα σύστημα ελέγχου και ότι κάθε διαδρομή μετريέται μόνο μια φορά σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση. Η δυαδική φύση των μεταβλητών y_i, x_p αντιπροσωπεύεται από τους περιορισμούς (4.16), (4.17). Ο αριθμός των σημείων ελέγχου δίνεται από πριν και αντιμετωπίζεται ως περιορισμός στη διαμόρφωση του μοντέλου.

Τέλος, οι Mahmoudabadi και Seyedhosseini (2013) πρότειναν μια αποτελεσματική διαδικασία για τον προσδιορισμό της κατάλληλης θέσης για εγκατάσταση των σταθμών WIM. Ο κύριος στόχος του προβλήματος ήταν ο καθορισμός των βέλτιστων θέσεων για την εγκατάσταση των σταθμών, που ορίζεται ως ο μέγιστος αριθμός των αξονικών φορτίων των φορτηγών που ελέγχθηκαν και η ελαχιστοποίηση των περιττών ενεργειών. Η προαναφερθείσα μέθοδος αποτελούταν από δυο κύρια στάδια, συμπεριλαμβανομένης της επίλυσης αλγορίθμου συντομότερης διαδρομής και της επιλογής της βέλτιστης θέσης για την εγκατάσταση σημείων ελέγχου. Στα πλαίσια αυτής της διαδικασίας ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο για την επίτευξη της αντικειμενικής συνάρτησης. Ως κριτήρια ορίστηκαν ο αριθμός των οχημάτων που ελέγχονται μόνο μια φορά, ο αριθμός των περιττών ενεργειών και το μέσο κόστος εγκατάστασης. Η προτεινόμενη διαδικασία εφαρμόστηκε σε ένα επαρχιακό δίκτυο του Ιράν λόγω διαθεσιμότητας πειραματικών δεδομένων. Για την επίλυση του προβλήματος οι κόμβοι, οι συνδέσμοι και τα ζεύγη προορισμού προέλευσης που χρησιμοποιήθηκαν, συλλέχθηκαν από μελέτες. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο συγκρίθηκαν με συνήθεις μεθόδους εντοπισμού των εγκαταστάσεων επιβολής. Από τα αποτελέσματα οι μελετητές συμπέραναν ότι η προτεινόμενη διαδικασία ήταν πιο αποτελεσματική και ικανή να επιτύχει την βέλτιστη επιλογή θέσεων για χωροθέτηση σταθμών WIM που στόχευε στο μέγιστο αριθμό των οχημάτων που ελέγχθηκαν μόνο μια φορά και στον ελάχιστο αριθμό περιττών ελέγχων σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους και τις απόψεις των τοπικών εμπειρογνώμων.

Στη συνέχεια διατυπώνεται το παραπάνω μοντέλο όπως αναπτύχθηκε από τους μελετητές:

$$\text{Maximize } \sum_{i,j \in G} M_{ij} \quad (4.18)$$

$$\text{s. t: } M_{ij} \geq \text{Nod}_{ij} \times x_{ij} \quad (4.19)$$

$$\sum_{i,j \in J} x_{ij} \leq \text{Number of Wim}(s) \quad (4.20)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in G \quad (4.21)$$

Ωστόσο, λόγω του ότι στα παραπάνω προβλήματα η υπόθεση που γινόταν δεν ήταν ρεαλιστική καθώς συνήθως οι οδηγοί ανακαλύπτουν γρήγορα τις θέσεις των σταθμών WIM προσπαθώντας να αποφύγουν τον έλεγχο, παρεκκλίνοντας από τις προκαθορισμένες συντομότερες διαδρομές, οι Markovic, et al. (2015) εισήγαγαν ένα νέο είδος μοντέλου, το EFCP (Evasive Flow Capturing Problem). Επιπλέον, υπέθεσαν ότι μεταξύ διαφορετικών διαδρομών που δεν καλύπτονται από αισθητήρες WIM, τα φορτηγά επιλέγουν να ταξιδέψουν κατά μήκος της συντομότερης διαδρομής. Αυτό το μοντέλο γενικεύει το μοντέλο FCP και έχει σχετικές εφαρμογές στη μεταφορά, διαχείριση εσόδων και διαχείριση ασφάλειας. Για τη διατύπωση του προβλήματος, οι μελετητές έκαναν τις εξής υποθέσεις:

1. Η ζημιά που προκαλείται από τη ροή των φορτηγών (δηλαδή ένα σύνολο από φορτηγά που έχουν την ίδια προέλευση και προορισμό) αυξάνεται γραμμικά με την απόσταση που διανύθηκε στο δίκτυο. Ο όρος ζημιά αναφέρεται στο οδόστρωμα και στο περιβάλλον.
2. Μια ροή φορτηγού f μπορεί να ταξιδεύει κατά μήκος k_f συντόμοτερων διαδρομών από την προέλευση στον προορισμό. Ο αριθμός k_f μπορεί να αποφασίζεται έτσι ώστε η (k_f+1) συντομότερη διαδρομή να αναπαριστά την υπερβολική παράκαμψη των οδηγών (π.χ το κόστος να ακολουθήσουν μια τόσο μεγάλη παρακαμπτήρια οδό θα μπορούσε να υπερβεί το όφελος από την υπερφόρτωση των οχημάτων)
3. Μια ροή θεωρείται ότι ελέγχεται εάν τουλάχιστον ένας σταθμός WIM είναι τοποθετημένος κατά μήκος κάθε διαδρομής k_f .
4. Μια ροή που δεν ελέγχεται ταξιδεύει κατά μήκος της συντομότερης από τις διαθέσιμες διαδρομές k_f που δεν έχουν καλυφθεί από σημεία ελέγχου γιατί έτσι ελαχιστοποιείται το κόστος των φορτηγών.

Αρχικά το μοντέλο το οποίο διατύπωσαν ήταν μη γραμμικό και είχε την εξής μορφή:

$$\min_{x \in (0,1)^A} w^T x + Q(x)$$

Ωστόσο χρησιμοποιώντας τις παραπάνω υποθέσεις και θεωρώντας ότι η ελαχιστοποίηση της απόστασης του ταξιδιού των φορτηγών συνέπιπτε με την ελαχιστοποίηση της ζημιάς, μετέτρεψαν το παραπάνω πρόβλημα σε ένα ισοδύναμο γραμμικό πρόβλημα ενός επιπέδου. Στη συνέχεια παρατίθεται το μοντέλο αφού οριστούν οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν:

G : οδικό δίκτυο διπλής κατεύθυνσης

N : σύνολο κόμβων

A : σύνολο συνδέσμων (i,j)

F : η συνολική ροή των φορτηγών

P_f : το σύνολο των διαδρομών

A^{P_f} : στο σύνολο των συνδέσμων κατά μήκος της διαδρομής $p \in P_f$ της ροής $f \in F$

w_{ij} : το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης στο σύνδεσμο ij

c^{P_f} : το υπερβολικά μεγάλο κόστος ζημιών που δημιουργείται εάν η ροή $(f) \in F$ δεν διακόπτεται στη διαδρομή $p \in P_f$

x_{ij} : δυαδική μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 εάν γίνεται η εγκατάσταση στο σύνδεσμο ij αλλιώς παίρνει την τιμή 0

$$y_f^p: \begin{cases} 1, & \text{εάν τουλάχιστον ένας σταθμός χωροθετείται} \\ 0, & \text{εάν όχι} \end{cases}$$

$$y_f: \begin{cases} 1, & \text{εάν τουλάχιστον ένας σταθμός χωροθετείται σε όλες τις διαδρομές} \\ 0, & \text{εάν όχι} \end{cases}$$

$$z_f^p: \begin{cases} 1, & \text{εάν η ροή } f \in F \text{ δεν διακόπτεται στη διαδρομή } p \in P_f \\ 0, & \text{εάν όχι} \end{cases}$$

Έτσι το μοντέλο διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Minimize}_{x_{ij}, y_f^p, z_f^p \in \{0,1\}} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij} w_{ij} + \sum_{f \in F} \sum_{p \in P_f} z_f^p c_f^p \quad (4.22)$$

$$\text{s. t:} \quad \sum_{(i,j) \in A_f^p} x_{ij} \geq y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (4.23)$$

$$z_f^p \leq 1 - y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (4.24)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_f^p} x_{ij} \leq |A_f^p| \times y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (4.25)$$

$$y_f \leq y_f^p \quad \forall f \in F, p \in P_f \quad (4.26)$$

$$\sum_{p \in P_f} z_f^p \geq 1 - y_f \quad \forall f \in F \quad (4.27)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (4.22) είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους επένδυσης για εγκατάσταση σταθμών WIM και του κόστους που σχετίζεται με τις φθορές στο οδόστρωμα λόγω των υπερβολικά φορτωμένων φορτηγών που δεν ελέγχονται. Οι περιορισμοί (4.23)-(4.25) εξασφαλίζουν ότι εάν τουλάχιστον ένα σταθμός τοποθετηθεί στη διαδρομή $p \in P_f$ τότε $y_f = 1$ και όταν η ροή δεν διακόπτεται κατά μήκος της διαδρομής $z_f = 0$. Ο περιορισμός (4.26) εξασφαλίζει ότι το y_f μπορεί να πάρει την τιμή 1 μόνο εάν όλες οι διαδρομές καλύπτονται από τουλάχιστον μια τουλάχιστον εγκατάσταση. Τέλος, ο περιορισμός (4.27) απαιτεί τα κόστη των ζημιών που δημιουργούνται στις μη διακοπτόμενες ροές να λαμβάνονται υπόψη στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Παράλληλα, θέλοντας να εξετάσουν τη συσχέτιση μεταξύ των μοντέλων FCP και EFCP και να συγκρίνουν τα αποτελέσματα των δυο μοντέλων. Όπως είναι γνωστό στα προβλήματα FCP χωροθετούνται εγκαταστάσεις με στόχο τη μεγιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων που συναντάνε αυτές τις εγκαταστάσεις κατά μήκος προκαθορισμένων διαδρομών. Οι συγγραφείς για την ανάπτυξη του μοντέλου FCP θεώρησαν ένα μεταβαλλόμενο αριθμό εγκαταστάσεων και ότι η μεγιστοποίηση του σταθμισμένου αθροίσματος των ροών που ελέγχονται ισούται με την ελαχιστοποίηση του σταθμισμένου αθροίσματος των ροών που δεν ελέγχονται.

Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω συμβολισμό το πρόβλημα FCP διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Minimize}_{x_{ij}, y_f \in \{0,1\}} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij} w_{ij} + \sum_{f \in F} (1 - y_f) c_f \quad (4.28)$$

$$\text{s. t:} \quad \sum_{(i,j) \in A_f} x_{ij} \geq y_f \quad \forall f \in F \quad (4.29)$$

όπου:

A_f : το σύνολο των συνδέσμων κατά μήκος μιας μοναδικής προκαθορισμένης διαδρομής

x_{ij} : δυαδική μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 εάν γίνεται η εγκατάσταση στο σύνδεσμο ij αλλιώς παίρνει την τιμή 0

y_f : $\begin{cases} 1, \text{ εάν τουλάχιστον ένας σταθμός χωροθετείται σε όλες τις διαδρομές} \\ 0, \text{ εάν όχι} \end{cases}$

Οι μελετητές σύγκριναν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δυο μοντέλα σε μια πραγματική μελέτη και κατέληξαν ότι τα αποτελέσματα που αφορούσαν τη βέλτιστη λύση του μοντέλου FCP ήταν φτωχά, όσον αφορά τις στοχευόμενες ροές που αποφεύγουν τις εγκαταστάσεις. Αυτά τα αποτελέσματα καθώς και η ευρεία εφαρμογή του EFCP έδειξαν τη σημασία του ως προτεινόμενο μοντέλο κάλυψης της ροής. Ωστόσο, στο μοντέλο EFCP που διατύπωσαν οι μελετητές υπέθεσαν ότι όλες οι παράμετροι ήταν γνωστές. Για παράδειγμα η ζημιά που παράγεται από τη ροή των οχημάτων και η επιθυμία των οδηγών να αποφύγουν τα σημεία ελέγχου θεωρήθηκαν γνωστά. Ωστόσο λόγω του ότι στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο δεν ήταν εφικτό καθώς γίνονται διαφορετικές εκτιμήσεις για τις παραμέτρους, πρότειναν μια στοχαστική διατύπωση του EFCP. Όπως ανέφεραν οι ζημιές που παράγει μια ροή διαφέρουν ανάλογα με τον αριθμό και τα είδη των οχημάτων μέσα σε μια ροή, οι κλιματολογικές συνθήκες και τον καιρό. Αντίθετα, η επιθυμία των οδηγών να αποφύγουν τα σημεία ελέγχου μπορεί να εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως ψυχολογικούς, οικονομικούς (τιμή της βενζίνης, ωριαία αμοιβή του οδηγού). Στην στοχαστική επέκταση του μοντέλου EFCP που πραγματοποιήσαν, θεώρησαν ότι αυτές οι δύο παράμετροι είναι ανεξάρτητες. Υπέθεσαν ότι οι εντάσεις των ροών και η προθυμία των οδηγών να αποφύγουν τον έλεγχο χαρακτηρίζονται με σενάρια που θα μπορούσαν να εκτιμηθούν είτε μέσω της συλλογής δεδομένων είτε μέσω γνωμοδότησης εμπειρογνομόνων. Εκμεταλλεύτηκαν τις δομικές ιδιότητες του προβλήματος για να το μετατρέψουν σε ένα πρόβλημα λίγο πιο δύσκολο από το ντιτερμινιστικό EFCP. Η απλοποίηση αυτή ήταν απαραίτητη για την επίλυση του στοχαστικού μοντέλου επειδή η κλασσική μέθοδος επίλυσης δεν βρίσκει τις βέλτιστες λύσεις σε πραγματικά προβλήματα σε λογικό χρονικό διάστημα. Επιπλέον, το στοχαστικό μοντέλο ήρθε σε αντίθεση με το αντίστοιχο ντετερμινιστικό, καθώς οι στοχαστικές που προέκυψαν έπειτα από πειραματικές εφαρμογές πρόσθεταν σημαντική αξία κάνοντας το μοντέλο πιο εφαρμόσιμο.

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η γραμμή έρευνας που πρότειναν θα μπορούσε να είναι χρήσιμη ως προς:

- Βελτίωση της τρέχουσας πρακτικής των οργανισμών μεταφοράς που εγκαθιστούν σταθμούς ελέγχου WIM.
- Βελτίωση της είσπραξης διοδίων για τους οργανισμούς μεταφοράς μέσω βέλτιστης χωροθέτησης των διοδίων.
- Βελτίωση της διαχείρισης της ασφάλειας μέσω βέλτιστης χωροθέτησης σημείων ελέγχου.

Οι *Markovic, et al.* (2017) θέλοντας να εξελίσσουν το στοχαστικό μοντέλο που είχαν διατυπώσει, εισήγαγαν το πρόβλημα της χωροθέτησης σταθμών σε ένα πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα με στόχο τη διακοπή στοχαστικών ροών κυκλοφορίας που αποφεύγουν τα σημεία ελέγχου. Το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως πρόβλημα πολλών επιπέδων, μεικτού ακέραιου στοχαστικού προγραμματισμού. Ωστόσο κάτω από ορισμένες υποθέσεις ανεξαρτησίας, μπορεί να αναδιατυπωθεί ως ένα μεγάλο στοχαστικό πρόβλημα διεπιπέδου επιτρέποντας την επίλυση πολύ περισσότερων περιπτώσεων. Η επίλυση που προτάθηκε από τους συγγραφείς ήταν ένας αλγόριθμος που βασιζόταν στη χαλάρωση του Lagrange που χώριζε το αναδιατυπωμένο στοχαστικό πρόγραμμα σε μια παραλλαγή του ντιτερμινιστικού προβλήματος του σακιδίου και σε ένα άθροισμα στοχαστικών προγραμμάτων μιας περιόδου, τα οποία μπορούν να επιλυθούν ανεξάρτητα. Το μοντέλο και ο αλγόριθμος είχαν σαν πεδίο εφαρμογής το οδικό δίκτυο της Νεβάδα και του Βέρμοντ. Τέλος, οι μελετητές σύγκριναν τα

αποτελέσματα της προσέγγισης του στοχαστικού προγραμματισμού μιας περιόδου με το μοντέλο πολλαπλών περιόδων που πρότειναν και συμπέραναν ότι το μοντέλο πολλαπλών περιόδων μειώνει σημαντικά το αναμενόμενο κόστος.

Οι *Lu et al. (2018)* λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των αρχών που θέλουν να επιβάλλουν την διαδικασία του ελέγχου και αποφασίζουν για τις θέσεις χωροθέτησης των εγκαταστάσεων ελέγχου και των οδηγών που προσπαθούν να επιλέγουν διαδρομές που τους επιτρέπουν να αποφύγουν τη διαδικασία της ζύγισης, πρότειναν ένα μοντέλο διεπιπέδου για το πρόβλημα της χωροθέτησης σταθμών WIM στο οδικό δίκτυο για ένα δεδομένο αρχικό προϋπολογισμό. Το μοντέλο που ανέπτυξαν, είναι μια βελτίωση του μοντέλου που αναπτύχθηκε από τους *Besinovic et al. (2013)*, που βασιζόταν στην ιδέα της εγκατάστασης σταθμών ελέγχου ώστε να καλύπτεται αριθμός k συντομότερων διαδρομών (KSP- k shortest paths) για κάθε ζεύγος προέλευσης-προορισμού και είχε ως στόχο την ελαχιστοποίηση των φθορών του οδοστρώματος που προκαλούνται λόγω της υπερφόρτωσης των βαρέων οχημάτων. Το μοντέλο αυτό όχι μόνο ενσωμάτωνε τα φορτηγά που δεν συνεργάζονταν για την επιλογή μιας αποδεκτής διαδρομής σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο μοντελοποίησης αλλά επιπρόσθετα αντιμετώπιζε το γεγονός ότι με τη βοήθεια των προηγμένων συστημάτων πλοήγησης τα φορτηγά μπορούσαν να ερευνήσουν όλο το δίκτυο ώστε να επιλέξουν την διαδρομή με το λιγότερο κόστος για την παράκαμψη των σταθμών ελέγχου. Σε αυτήν την ιεραρχική βελτιστοποίηση, ο υπεύθυνος για την λήψη αποφάσεων ανώτερου επιπέδου ήταν η αρχή επιβολής ελέγχου που στόχευε στην ελαχιστοποίηση του κόστους των ζημιών εξαιτίας των υπερφορτωμένων φορτηγών, ενώ οι φορείς λήψης αποφάσεων χαμηλότερου επιπέδου ήταν τα φορτηγά που στόχευαν στην ελαχιστοποίηση του κόστους ταξιδιού και των προστίμων που επιβάλλονταν λόγω παραβίασης του ορίου βάρους. Η επίλυση που πρότειναν ήταν ο ευρετικός αλγόριθμος, που επιλύει επαναλαμβανόμενα τα μοντέλα ανώτερου και κατώτερου επιπέδου για την επίλυση του μοντέλου διεπιπέδου. Παρόλο που η επίλυση με ευρετικό αλγόριθμο δεν εγγυάται ότι θα προκύψει η βέλτιστη λύση, τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την σημασία χρήσης ενός μοντέλου διεπιπέδου και έδειξαν την υπεροχή έναντι του κλασσικού μοντέλου KSP. Τα αποτελέσματα παρείχαν πληροφορίες σχετικά με την επένδυση και το όφελος από την εγκατάσταση σημείων ελέγχου WIM, όπως επίσης και αυτά που προήλθαν από ανάλυση του κόστους και του όφελους. Επιπλέον, ανέπτυξαν ένα βελτιωμένο ευρετικό αλγόριθμο για την καλύτερη και πιο λογική επίλυση.

Οι *Arslan, et al. (2018)* μοντελοποίησαν και έλυσαν το πρόβλημα EFCP (*Markovic et al. 2015*), το οποίο ασχολιόταν με τη βέλτιστη εγκατάσταση σταθμών για επιβολή ελέγχου με στόχο τον έλεγχο της ροής των οχημάτων που προσπαθούν να αποφύγουν τον έλεγχο σε ένα δίκτυο μεταφοράς. Το μοντέλο EFCP προσθέτει ακόμη μια διάσταση στο υπάρχον πρόβλημα κάλυψης (FCP) καθώς λαμβάνει υπόψη ότι οι παράνομοι οδηγοί μπορεί να αλλάξουν τις διαδρομές τους ώστε να μην ελεγχθούν. Τα προηγούμενα διαθέσιμα μοντέλα EFCP δούλευαν με μια συνεχόμενη δημιουργία διαδρομών, αλλά αυτό ήταν απογορευτικό όταν το μέγεθος του δείγματος αυξανόταν, ειδικά όταν οι οδηγοί δεν είναι σύμφωνοι να συνεργαστούν και παρεκκλίνουν σημαντικά από τις συντομότερες διαδρομές. Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις που θέλησαν να αντιμετωπίσουν οι συγγραφείς ήταν η παρουσία των αντικρουόμενων στόχων μεταξύ των αρχών επιβολής και των παράνομων οδηγών και για το λόγο αυτό ανέπτυξαν ένα μοντέλο διεπιπέδου. Μια άλλη πρόκληση ήταν ο μετασχηματισμός του μοντέλου διεπιπέδου σε μοντέλο ενός επιπέδου, κάτι

το οποίο αντιμετώπισαν εισάγοντας ένα ακόμη περιορισμό και χρησιμοποιώντας τη θεωρία της δυαδικότητας. Επιπλέον, εφάρμοσαν μια πολυεδρική μελέτη στο πρόβλημα ενός επιπέδου και χρησιμοποίησαν βοηθητικές μεταβλητές για να φτάσουν σε μια διατύπωση με έναν εκθετικό αριθμό από περιορισμούς, που σχετίζονται με τις διαδρομές στο δίκτυο. Για την επίλυση του τελικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος διακλάδωσης και αποκοπής (branch and cut). Οι λύσεις διαχωρίστηκαν με την επίλυση μικρότερων και πιο σύντομων προβλημάτων. Εκτεταμένα αριθμητικά πειράματα σε δίκτυα που περιείχαν έως και 500 κόμβους και απόκλιση της ανοχής $\lambda=1,2$ επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας τους. Τέλος, έδειξαν ότι η επίλυση του μοντέλου με αλγόριθμο branch and cut μείωσε σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο σε σχέση με το βέλτιστο δημοσιευμένο αλγόριθμο σε ένα δίκτυο από 25 κόμβους και επιπλέον αύξησαν το μέγεθος των περιπτώσεων που μπορούν να λυθούν βέλτιστα.

Οι *Hooshmand* και *MirHassani* (2018) ασχολήθηκαν με το πρόβλημα της χωροθέτησης αισθητήρων για τη ζύγιση εν κινήσει σε ένα δίκτυο οδικών μεταφορών με στόχο τον αποτελεσματικό εντοπισμό και έλεγχο των υπερφορτωμένων φορτηγών, υποθέτοντας ότι τα φορτηγά ανακαλύπτουν γρήγορα τους σταθμούς ελέγχου και προσπαθούν να τους αποφύγουν αποκλίνοντας από τις προκαθορισμένες συντομότερες διαδρομές τους. Οι μελετητές διατύπωσαν ένα μοντέλο διεπιπέδου και πρότειναν δυο προσεγγίσεις για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Στην πρώτη προσέγγιση τους χρησιμοποίησαν τις συνθήκες Karush-Kuhn Tucker (KKT) για την αναδιαμόρφωση του μοντέλου διεπιπέδου και την αναδιατύπωση του ως πρόβλημα ενός επιπέδου. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της απλοποίησης είναι ότι χρησιμοποιώντας τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του προβλήματος, οι συμπληρωματικές συνθήκες χαλαρότητας γραμμικοποιούνται χωρίς την εισαγωγή πρόσθετων δυαδικών μεταβλητών. Για τον δεύτερο τρόπο επίλυσης χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος αποσύνθεσης που ξεκινά με χαλάρωση του μοντέλου διεπιπέδου και προσθέτει επαναληπτικά περιορισμούς όταν δεν τηρείται κάποια συνθήκη. Έτσι, ο χώρος αναζήτησης της λύσης σταδιακά περιορίζεται με αποτέλεσμα το βέλτιστο να επιτυγχάνεται έπειτα από ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων. Ωστόσο, όπως αποδείχθηκε αργότερα από υπολογιστικά πειράματα, η επίλυση που βασίστηκε στις συνθήκες KKT μπορεί να είναι πολύ δύσκολη σε προβλήματα μεγάλου μεγέθους και έτσι να απαιτείται πολύ περισσότερος χρόνος για την επίλυση τους σε σχέση με τα προβλήματα δυο επιπέδων.

Τέλος, οι *Bogyrbayeva* και *Kwon* (2020) παρουσίασαν και έλυσαν τις απαισιόδοξες διατυπώσεις για το πρόβλημα EFCP (Evasive Flow Capturing Problem), που στοχεύει στην εύρεση κατάλληλων θέσεων για εγκατάσταση σταθμών επιβολής ώστε να καταγράψουν τους οδηγούς που δεν συμμορφώνονται. Στη μελέτη τους παρουσιάζουν δύο διατυπώσεις αυτού του μοντέλου, που αντιπροσωπεύουν τη γενική περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη δυο διαφορετικές οπτικές. Το πρόβλημα διεπιπέδου αναπαριστούσε τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των αρχών και των παράνομων οδηγών, που προσπαθούν να αποφύγουν τον έλεγχο από τα σημεία ελέγχου. Στις προτεινόμενες διατυπώσεις τους θεώρησαν περιορισμένη λογική στην συμπεριφορά των παράνομων οδηγών, ώστε το πρόβλημα να είναι πιο ρεαλιστικό όσον αφορά τη συμπεριφορά των οδηγών. Η πρώτη αφορά τη χαλάρωση τη βέλτιστης συμπεριφοράς των οδηγών επιτρέποντας τους να επιλέξουν οποιαδήποτε διαδρομή που δεν ελέγχεται εντός ενός ορίου απόκλισης. Η δεύτερη αφορά το γεγονός ότι ενώ η ακριβής επιλογή της διαδρομής που ακολουθούν οι οδηγοί παραμένει άγνωστη δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές διαδρομές για να επιλέξουν, θεώρησαν το δυσμενέστερο σενάριο όσον

αφορά το κόστος που σχετίζεται με τις φθορές του οδοστρώματος που προκαλούνται από τα οχήματα που δεν ελέγχονται, διατύπωνοντας προβλήματα βελτιστοποίησης δυο επιπέδων. Στο πρώτο μοντέλο που διατύπωσαν έλαβαν υπόψη το μέγιστο βαθμό ασάφειας στην επιλογή της διαδρομής από τους παράνομους οδηγούς. Ενώ η πρώτη απαισιόδοξη διατύπωση αποδίδει τον καλύτερο δυνατό σχεδιασμό των θέσεων των εγκαταστάσεων, η προσέγγιση μπορεί να αποδειχθεί υπερβολικά απαισιόδοξη. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, έκαναν και μια δεύτερη απαισιόδοξη διατύπωση, η οποία μπορεί να ελέγχει με ακρίβεια το επίπεδο απαισιοδοξίας στην συμπεριφορά των παράνομων οδηγών μεταξύ αισιόδοξων και υπερβολικά απαισιόδοξων υποθέσεων. Λόγω αυτής της δομικής τους διαφοράς, οι μέθοδοι επίλυσης που έχουν σχεδιαστεί για αισιόδοξες διατυπώσεις δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμες στην επίλυση απαισιόδοξων μοντέλων.

Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών επιπέδων, αυτοί πρότειναν την επίλυση με αλγόριθμο επιπέδων αποκοπής λύσεων (cutting planes). Στην πραγματικότητα, αυτοί παρουσίασαν την αναδιατύπωση του μοντέλου πολλαπλών επιπέδων ως μοντέλο ενός επιπέδου λαμβάνοντας υπόψη το χειρότερο σενάριο, χρησιμοποιώντας περιορισμούς για να λύσουν το πρόβλημα. Τα εκτεταμένα υπολογιστικά πειράματα επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου μοντέλου τους. Συγκρίνοντας τις επιλύσεις των απαισιόδοξων διατυπώσεων με τις υπάρχουσες αισιόδοξες προσεγγίσεις σε πραγματικά και τυχαία δίκτυα, κατέληξαν ότι το κόστος των ζημιών που προκλήθηκε στο δίκτυο, λόγω των παράνομων οδηγών σε αισιόδοξες επιλύσεις μπορεί να είναι μέχρι και 13,25% υψηλότερο συγκριτικά με τις απαισιόδοξες επιλύσεις για το δίκτυο μεταφοράς της Albany. Επιπλέον, διαπίστωσαν ότι ενώ τα κόστη εγκατάστασης ήταν υψηλότερα σε απαισιόδοξες συνθήκες, μακροπρόθεσμα μπορούσαν να επιφέρουν μεγαλύτερο όφελος στη συντήρηση των υποδομών του δικτύου.

4.ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

4.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται εκείνα τα στοιχεία που αφορούν στη διατύπωση του προβλήματος χωροθέτησης σημείων ελέγχου WIM. Αρχικά, παρουσιάζονται τα κριτήρια χωροθέτησης και τα χαρακτηριστικά του γραμμικού και μη γραμμικού προγραμματισμού. Στη συνέχεια, αναλύονται όλες οι παράμετροι που σχετίζονται με το μοντέλο χωροθέτησης που επιλέχθηκε, διατυπώνεται το μοντέλο και ορίζεται η περιοχή εφαρμογής του. Τέλος, ακολουθεί η επίλυση του μοντέλου με τα αποτελέσματα που προέκυψαν και πραγματοποιείται η ανάλυση ευαισθησίας.

4.2 Κριτήρια Χωροθέτησης Σταθμών WIM

Οι σταθμοί WIM πρέπει να εγκαθίστανται εντός ενός επιθυμητού τμήματος της οδού. σε μια τοποθεσία όπου θα ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα ζύγισης λόγω δυσμενών χαρακτηριστικών της τοποθεσίας. Για το σκοπό αυτό, εκδόθηκε το 2018 από την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητόδρομων των ΗΠΑ (FHWA) ένα εγχειρίδιο όπου αναλύονται τα κριτήρια, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της θέσης ενός σταθμού WIM, εξασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, τα κριτήρια αφορούν:

- Την γεωμετρία της οδού. Είναι σημαντικό να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε βασικά στοιχεία της οδού όπως η οριζόντια καμπυλότητα, η κλίση, το πλάτος και το μήκος της λωρίδας, οι διαγραμμίσεις, τα σημεία εξόδου κλπ. καθώς μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την οδηγική συμπεριφορά των χρηστών της οδού.
- Τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Το σταμάτημα και το ξεκίνημα των οχημάτων, αλλαγή λωρίδας, προσπεράσεις, διασταυρώσεις, λωρίδες εξόδου και αλλαγές ταχύτητας οχήματος πρέπει να αποφεύγονται.
- Η εγκατάσταση σταθμών δεν θα πρέπει να γίνεται σε αδύναμα ή λεπτά οδοστρώματα, σε τραχιές επιφάνειες και οδοστρώματα με επιφανειακές φθορές (ρωγμές, αυλακώσεις, λακκούβες).
- Την πρόσβαση σε ηλεκτρικό ρεύμα και τηλεπικοινωνίες
- Την τεχνική ασφάλεια
- Την εγκατάσταση καμπίνας
- Το σύστημα αποστράγγισης και υπάρχων εξοπλισμός
- Τα δοκιμαστικά δρομολόγια φορτηγών
- Την προβλεπόμενη οδόστρωση εντός των επόμενων 5 ετών

Η επιλογή της κατάλληλης θέσης για την τοποθέτηση ενός σταθμού WIM αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο περιλαμβάνει την αρχική επιλογή θέσης χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες πληροφορίες του γραφείου, ενώ το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τον επί τόπου έλεγχο των συνθηκών της υποψήφιας θέσης ώστε να αποφασιστεί η καταλληλότητα της. Πιο αναλυτικά τα βήματα που πρέπει να ακολουθούνται σε κάθε μέρος είναι:

1. Η αρχική επιλογή θέσης εγκατάστασης

Η αρχική επιλογή της θέσης WIM πραγματοποιείται συχνά εξ αποστάσεως, συνήθως στο γραφείο, χρησιμοποιώντας όλα τα διαθέσιμα σχετικά έγγραφα και δεδομένα. Ολόκληρο το τμήμα της οδού που έχει επιλεγεί για να καλύψει τις ανάγκες δεδομένων κυκλοφορίας, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι πληροί τις απαιτήσεις ASTM E 1318-09 για οριζόντια ευθυγράμμιση και για κατασκευή. Στόχος της προκαταρκτικής επιλογής τοποθεσίας, είναι ο εντοπισμός τμημάτων οδού μήκους τουλάχιστον 1.5 km που είναι αποδεκτά για εγκατάσταση σταθμών WIM, χρησιμοποιώντας τα εξής κριτήρια:

- Οριζόντια Καμπυλότητα και Κλίση

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο E1318-09 που εκδόθηκε από την ASTM, ελέγχονται τα διαθέσιμα σχέδια της οδού ώστε να προσδιοριστεί η οριζόντια καμπυλότητα η οποία πρέπει να είναι τουλάχιστον 1700 m για 60 m πριν τους αισθητήρες WIM και 30 m μετά, μετρούμενα κατά μήκος της γραμμής της οδού. Όσον αφορά τη κατακόρυφη κλίση αυτή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 2% για Τύπους I,II, III και 1% για τύπο IV.

- Δομή Οδοστρώματος

Για την εγκατάσταση των αισθητήρων WIM απαιτείται επαρκή δομή οδοστρώματος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος και η ικανότητα συντήρησης του οδοστρώματος στην περιοχή εγκατάστασης του WIM πρέπει να αξιολογείται με βάση την κατάσταση του οδοστρώματος και να προγραμματίζονται δραστηριότητες συντήρησης εφόσον χρειάζονται. Επομένως, απαιτούνται από τον σχεδιασμό οι κατάλληλες πληροφορίες σχετικά με τον τύπο και το πάχος του οδοστρώματος καθώς και της κατάστασης της επιφάνειας του οδοστρώματος και της τραχύτητας.

- Ομαλότητα Οδοστρώματος

Η επιφάνεια του οδοστρώματος πρέπει να είναι ομαλή και απαλλαγμένη από μέσες και υψηλές καταπονήσεις ώστε να διασφαλίζεται η ακεραιότητα της εγκατάστασης του αισθητήρα καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του. Το κατάλληλο τμήμα μιας οδού για εγκατάσταση ενός σταθμού είναι αυτό που έχει ομαλό οδόστρωμα ή η υποψήφια θέση WIM θα πρέπει να αποτελεί μέρος μιας νέας κατασκευής οδού ή ενός σχεδίου για επιδιόρθωση της οδού. Η μελλοντική ασφαλτόστρωση δεν πρέπει να αναμένεται ή να προγραμματίζεται για τα επόμενα πέντε χρόνια. Το υποψήφιο τμήμα της οδού για εγκατάσταση αισθητήρων WIM θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις ομαλότητας που ορίζονται στην ενότητα 6.1.5 του ASTM E 1318-09. Η αξιολόγηση της ομαλότητας του οδοστρώματος βάσει των κριτηρίων ASTM E 1318-09 πραγματοποιείται κατά την επιτόπια αξιολόγηση, που περιγράφεται παρακάτω.

Η προκαταρκτική ανάλυση ομαλότητας οδοστρώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί στο γραφείο χρησιμοποιώντας το American Association of State highway and Transportation Officials (AASHTO) M331-13. Αυτή η ανάλυση χρησιμοποιεί τα δεδομένα προφίλ (συλλέγονται με προφίλ υψηλής ταχύτητας) και τη μονάδα (OWL) του λογισμικού ανάλυσης δεδομένων προφίλ Pro-Val. Το λογισμικό OWL χρησιμοποιεί πληροφορίες για το προφίλ του οδοστρώματος με σκοπό τον εντοπισμό των βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης σταθμού WIM. Οι χρήστες του προγράμματος πρέπει να λαμβάνουν υπόψη της ότι το OWL δεν αναγνωρίζει τη διάταξη των αισθητήρων καθώς και το είδος τους και έτσι μπορεί να είναι

πολύ συντηρητικός για τη διάταξη καμπτόμενων πλακών ή κυψελών φόρτισης. Και τα δύο μοντέλα (ProVal και Owl) παρέχονται δωρεάν.

Όταν όλοι οι δείκτες τραχύτητας που υπολογίζονται από το καταγεγραμμένο προφίλ μετρήσεων είναι μικρότεροι από το κατώτερο όριο που αναγράφεται στο εγχειρίδιο της AASHTO, είναι πιθανό η τοποθεσία να παράγει ένα αποδεκτό επίπεδο σφάλμα ζύγισης για ένα επιλεγμένο τύπο αισθητήρα. Αντιθέτως αν αυτή η τιμή είναι πάνω από το όριο, η εγκατάσταση WIM είναι ακατάλληλη και είτε πρέπει να επιλέγεται μια θέση όπου θα οδηγεί σε αποδεκτές τιμές τραχύτητας σύμφωνα με την AASHTO M331-13 είτε να εξεταστεί το ενδεχόμενο για βελτίωση του οδοστρώματος, εφαρμόζοντας μια λεπτή επικάλυψη με σκοπό την μείωση της τραχύτητας ώστε να είναι επιτρεπτή.

- Δοκιμαστικά Δρομολόγια Φορτηγών

Τα δοκιμαστικά δρομολόγια των φορτηγών θα πρέπει να πραγματοποιούνται σε κοντινά χρονικά διαστήματα ώστε να ολοκληρώνονται εντός 1-2 ημερών. Μια δοκιμαστική διαδρομή προτείνεται να διαρκεί το πολύ έως είκοσι λεπτά. Μείωση του χρόνου εκτέλεσης μιας διαδρομής οδηγεί σε περισσότερο χρόνο για επιθεώρηση ενός σταθμού WIM ή καλιμπραρίσματος.

Σκόπιμη κρίνεται η χρήση εργαλείων διαδικτυακής χαρτογράφησης ώστε να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τοποθεσίες διέλευσης φορτηγών, καθώς και η καταγραφή μέσω βίντεο των χαρακτηριστικών τόσο της περιοχής όσο και της κατάστασης του οδοστρώματος κοντά στην υποψήφια θέση εγκατάστασης του WIM.

2. Η επί τόπου αξιολόγηση της υποψήφιας θέσης

Αφού προσδιοριστούν μια ή περισσότερες αποδεκτές θέσεις για την εγκατάσταση αισθητήρων WIM μέσω της αξιολόγησης των δεδομένων από το γραφείο, η επιτόπια έρευνα πρέπει να πραγματοποιηθεί από εκπαιδευμένο προσωπικό χρησιμοποιώντας το εγχειρίδιο και τα κριτήρια ASTM E 1318-09 για να ολοκληρωθεί η αξιολόγηση. Για τον επί τόπου έλεγχο των θέσεων απαιτείται από το προσωπικό:

- Να φοράει εξοπλισμό ατομικής προστασίας ασφαλείας (ΜΑΠ) όπως σκληρό καπέλο και γιλέκο ασφαλείας
- Ένας παρατηρητής πρέπει να παρακολουθεί την κυκλοφορία και να προειδοποιεί τον επιθεωρητή για τυχόν επερχόμενα οχήματα
- Για τη συντήρηση λωρίδων κυκλοφορίας, απαιτείται η προσωρινή τοποθέτηση συσκευών για τη διαχείριση της κυκλοφορίας

- Κατά μήκος κλίση

Συνιστάται η κατά μήκος κλίση της οδού 60 m πριν και 30 m μετά από το σημείο ελέγχου να μην ξεπερνά το 2%, με σκοπό την αποφυγή φρεναρισμάτων και επιταχύνσεων από τους οδηγούς.

- Εγκάρσια κλίση

Για την αποφυγή ανεπιθύμητων ενεργειών από τους οδηγούς, όπως η ξαφνική αλλαγή της κατεύθυνσης και η συχνή αλλαγή λωρίδων κυκλοφορίας και για τη διασφάλιση των επιτρεπόμενων ορίων φόρτωσης των φορτηγών, η κατά μήκος κλίση της οδού για 60 m πριν το σημείο ελέγχου και 30 m μετά δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 3% για συστήματα ελέγχου τύπου WIM τύπου I και II και 1% για συστήματα τύπου III.

Πίνακας 4.1: Τύποι συστημάτων ελέγχου WIM

	Τύπος I	Τύπος II	Τύπος III	Τύπος IV
Εύρος ταχύτητας	16-113 χμ/ώρα	16-113χμ/ώρα	24-80 χμ/ώρα	24-80 χμ/ώρα
Εφαρμογή	Συλλογή Δεδομένων Κυκλοφορίας	Συλλογή Δεδομένων Κυκλοφορίας	Επιβολή Ορίου Βάρους	Επιβολή Ορίου Βάρους
Αριθμός λωρίδων	Έως 4	Έως 4	Έως 2	Έως 2
Καμπτόμενη Πλάκα	X	X	X	X
Πιεζοηλεκτρικός Αισθητήρας	X	X		
Κυψέλη Φόρτισης	X	X	X	X
Φορτίο τροχού	X		X	X
Φορτίο άξονα	X	X	X	X
Συνολικό φορτίο αξόνων	X	X	X	X
Συνολικό βάρος οχήματος	X	X	X	X
Ταχύτητα	X	X	X	X
Απόσταση από κέντρο σε κέντρο άξονα	X	X	X	X
Κατηγορία οχήματος	X	X		
Κωδικός αναγνώρισης τοποθεσίας	X	X	X	X
Κατεύθυνση και διεύθυνση ταξιδιού	X	X	X	X
Ημερομηνία και ώρα διέλευσης	X	X	X	X
Καταγραφή πινακίδων κυκλοφορίας οχήματος	X	X	X	X
Μεταξόνιο	X	X		
Ισοδύναμο φορτίο άξονα	X	X		
Κωδικός παραβίασης	X	X	X	X
Εκτίμηση επιτάχυνσης			X	X

- Μήκος λωρίδας κυκλοφορίας και σήμανση

Για τη σωστή εγκατάσταση των αισθητήρων WIM, το πλάτος των λωρίδων κυκλοφορίας θα πρέπει να είναι αρκετό ώστε να εξασφαλίζεται τόσο η σωστή διάταξη των αισθητήρων WIM όσο και η επαρκής απόσταση μεταξύ των επαγωγικών βρόγχων. Το πλάτος της λωρίδας για την εγκατάσταση των αισθητήρων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 3 m ενώ το βέλτιστο είναι μεταξύ 3,5 και 4 m. Οι λωρίδες θα πρέπει να έχουν σαφή σήμανση, με γραμμές πλάτους από 0,10 έως 0,15 m από άκρη σε άκρη της τομής WIM.

- Σύνθεση της κυκλοφορίας - Χαρακτηριστικά κυκλοφοριακού φόρτου

Εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για τον κυκλοφοριακό φόρτο, την κατηγορία και την ταχύτητα των οχημάτων κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου, απαιτείται η επί τόπου μέτρηση και καταγραφή τους ανά ώρα και ημέρα της εβδομάδας. Το λιγότερο χρονικό διάστημα μετρήσεων πρέπει να είναι 48 ώρες. Σε πολλές περιπτώσεις για κάποιες θέσεις μπορεί να απαιτούνται μετρήσεις ακόμη και επτά ημερών. Η συλλογή δεδομένων κυκλοφοριακού φόρτου θα χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ενός αρχικού σχεδίου καλιμπραρίσματος και πιθανό σχέδιο αυτόματου καλιμπραρίσματος εάν χρειαστεί.

Τα συστήματα WIM πρέπει να εγκαθίστανται σε μια περιοχή με ελεύθερη κυκλοφοριακή ροή και με καλές αποστάσεις. Επιπρόσθετα, θα πρέπει στην περιοχή να σημειώνονται ελάχιστες αλλαγές μεταξύ των λωρίδων κυκλοφορίας αλλά και ελάχιστες προσπεράσεις. Επιθυμητή είναι η κυκλοφορία οχημάτων να γίνεται με σταθερές ταχύτητες, αποφεύγοντας τις περιοχές που εμφανίζουν συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης (stop & go). Σε περίπτωση που παρατηρηθούν αλλαγές στην κυκλοφοριακή ροή από τα δεδομένα που θα συλλεχθούν ή από τον έλεγχο των βίντεο, η περιοχή θα πρέπει να αποκλειστεί από περαιτέρω εξέταση.

- Κατάσταση του Οδοστρώματος

Στην επιφάνεια του οδοστρώματος δεν θα πρέπει να εμφανίζονται φθορές όπως ρηγματώσεις, αυλακώσεις και λακούβες. Πληροφορίες σχετικά με την αξιολόγηση της επιφάνειας του οδοστρώματος, μπορούν να βρεθούν στο εγχειρίδιο αναγνώρισης κινδύνων για την μακροχρόνια απόδοση των οδοστρωμάτων

- Ομαλότητα της Επιφάνειας του Οδοστρώματος

Ο στόχος της ανάλυσης ομαλότητας του οδοστρώματος είναι να αποφασιστεί εάν υπάρχει τμήμα 100 m εντός της επιλεγμένης περιοχής του οδοστρώματος που να ικανοποιεί τα κριτήρια οδοστρώματος ASTM E 1318-09 και κριτήρια ομαλότητας για την εγκατάσταση αισθητήρα WIM

- Αλληλεπίδραση οδοστρώματος - φορτηγού

Η παρακολούθηση των φορτηγών πρέπει να γίνεται όταν αυτά φθάνουν, διασχίζουν και φεύγουν από την εξεταζόμενη θέση τοποθέτησης του αισθητήρα για να αποφασιστεί εάν υπάρχει κάποια ορατή αναπήδηση του φορτηγού που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση των συστημάτων WIM. Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται ένα φορτηγό καθώς πλησιάζει την

περιοχή ζύγισης. Οι συγκεκριμένες θέσεις των οδών που παρουσιάζουν σταθερή δυναμική των φορτηγών πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά για να προσδιοριστεί η αιτία, συμπεριλαμβανομένων των λακκουβών ή των αναπηδήσεων στον αυτοκινητόδρομο. Επίσης, πρέπει να επαληθεύεται ότι τα φορτηγά ακολουθούν το κέντρο της λωρίδας κυκλοφορίας.



Εικόνα 4.1: Φορτηγό που πλησιάζει στην περιοχή ζύγισης WIM

Παρόλο που για τη βέλτιστη χωροθέτηση των σταθμών ελέγχου απαιτείται ένας συνδυασμός των παραπάνω κριτηρίων, στη παρούσα διπλωματική μοναδικό κριτήριο εξέτασης αποτελεί η κατανομή της ζήτησης. Πιο συγκεκριμένα, είναι σκόπιμη η χωροθέτηση των σταθμών ελέγχου σε σημεία διοδίων και εξόδων που χαρακτηρίζονται από υψηλούς φόρτους. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε τον έλεγχο μεγαλύτερου αριθμού οχημάτων συγκριτικά με τον αριθμό των οχημάτων που θα ελέγχονταν, εάν οι σταθμοί χωροθετούνταν σε άλλα σημεία των συνδέσμων με χαμηλούς φόρτους. Το κριτήριο αυτό είναι καθοριστικό, αφού βασικός στόχος της λειτουργίας των σταθμών WIM είναι η τοποθέτηση τους όπου υπάρχει αυξημένη ζήτηση με σκοπό τον έλεγχο όσο το δυνατόν περισσότερων βαρέων οχημάτων.

4.3 Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming)

Ο γραμμικός προγραμματισμός (linear programming) είναι μια από τις πιο σπουδαίες μαθηματικές ανακαλύψεις των μέσων χρόνων του 20^{ου} αιώνα. Ο πρώτος που εισήγαγε ουσιαστικά την τεχνική του γραμμικού προγραμματισμού ήταν ο Leonid Vitaliyevich Kantorovich (1912-1986), ο οποίος τη χρησιμοποίησε κατά τη διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου για την ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης των στρατιωτικών δυνάμεων ενώ παράλληλα στόχευε και στη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας στο πεδίο της μάχης. Λίγα χρόνια μετά, το 1947, ο George Bernard Dantig (1914-2005) πρότεινε ότι οι αλληλοσυσχετίσεις μεταξύ των δραστηριοτήτων ενός μεγάλου οργανισμού μπορεί να θεωρηθούν ως ένα μοντέλο Γ.Π και το βέλτιστο πρόγραμμα (λύση) μπορεί να επιτευχθεί με την ελαχιστοποίηση μιας (μοναδικής) γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης. Η πολεμική αεροπορία ξεκίνησε με το έργο SCOOP (Scientific Computing of Optimum Programs-

Επιστημονικός Υπολογισμός των Βέλτιστων Προγραμμάτων). Το έργο SCOOP ξεκίνησε τον Ιούνιο του 1947 από το Dantig και τους συνεργάτες που ανέπτυξαν:

- 1) Ένα αρχικό μαθηματικό μοντέλο του γενικού προβλήματος του γραμμικού προγραμματισμού
- 2) Μια γενική μέθοδο επίλυσης που ονομάστηκε μέθοδος Simplex

Το μαθηματικό πρότυπο του γραμμικού προγραμματισμού επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης κάτω από περιορισμούς που είναι γραμμικοί όροι, επιδιώκοντας να βελτιστοποιήσουν (μεγιστοποιήσουν ή ελαχιστοποιήσουν) μια αντικειμενική συνάρτηση. Στα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού υπάρχουν κάποιες προϋποθέσεις (ή αλλιώς υποθέσεις/ assumptions) που θα πρέπει να ικανοποιούνται, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι τεχνικές του γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση προβλημάτων. Αυτές είναι οι εξής:

- Γραμμικότητα (Linearity)
- Αναλογικότητα (Proportionality)
- Προσθετικότητα (Additivity)
- Διαιρετότητα (Divisibility)
- Βεβαιότητα- Προσδιορισμένοι Συντελεστές (Certainty)

Η γραμμικότητα αφορά το γεγονός πως η αντικειμενική συνάρτηση, αλλά και οι διάφοροι περιορισμοί θα πρέπει να είναι 1^{ου} βαθμού συναρτήσεις ως προς τις μεταβλητές απόφασης x_j . Σε αντίθετη περίπτωση θα έχουμε μοντέλο μη γραμμικού προγραμματισμού.

Η αναλογικότητα είναι μια υπόθεση που αφορά την αντικειμενική συνάρτηση αλλά και τις μεταβλητές. Είναι συνηθισμένο φαινόμενο να συναντούμε μη γραμμικά προβλήματα, στην περίπτωση που η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και η χρησιμοποίηση των διαθέσιμων μέσων δεν είναι ανάλογα ποσά ως προς τις ποσότητες της κάθε μεταβλητής. Εάν όμως η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι το άθροισμα των ατομικών συνεισφορών κάθε μεταβλητής και αν το αριστερό μέρος κάθε περιορισμού ισούται με το άθροισμα της συμβολής κάθε μεταβλητής στο μοντέλο, τότε ικανοποιείται η συνθήκη της αναλογικότητας.

Σχετικά με την υπόθεση της προσθετικότητας απαιτούμε από κάθε συνάρτηση του γραμμικού μοντέλου μας (είτε πρόκειται για την αντικειμενική συνάρτηση, είτε για τους περιορισμούς που έχουμε) να προκύπτει ότι το συνολικό κέρδος από τις δραστηριότητες x_j ισούται με το συνολικό άθροισμα των επί μέρους κερδών της κάθε δραστηριότητας.

Η απαίτηση της διαιρετότητας μας ορίζει πως κάθε μεταβλητή απόφασης σε ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού μπορεί να πάρει οποιαδήποτε ρητή τιμή, αρκεί να ικανοποιούνται οι περιορισμοί του μοντέλου. Στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται αυτή η προϋπόθεση, χρησιμοποιούμε την τεχνική του ακέραιου προγραμματισμού.

Τέλος, μια ακόμη εξίσου σημαντική προϋπόθεση για την εφαρμογή της θεωρίας του γραμμικού προγραμματισμού, είναι και αυτή της βεβαιότητας, που μας ορίζει πως οι τιμές των παραμέτρων πρέπει να είναι απολύτως γνωστές σταθερές. Επειδή όμως, τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού συνήθως χρησιμοποιούνται για τη σωστή λήψη μελλοντικών αποφάσεων, είναι επόμενο πως οι παραπάνω παράμετροι επιλέγονται βασιζόμενες σε μετέπειτα καταστάσεις, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει απόλυτη βεβαιότητα για αυτές. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, διεξάγουμε μια Ανάλυση Ευαισθησίας

(Sensitivity Analysis), η οποία μας επιτρέπει να αναγνωρίσουμε ποιες παράμετροι δεν μπορούν να μεταβληθούν μετέπειτα.

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος περιλαμβάνει αρχικά τον καθορισμό των μεταβλητών, όπου σε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού ποσοτικοποιούν τις αποφάσεις που πρόκειται να ληφθούν, για αυτό και ονομάζονται μεταβλητές απόφασης. Οι τιμές αυτών των μεταβλητών χρειάζεται να προσδιοριστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αποδοθεί το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα, το οποίο αποτελεί και το κριτήριο ή μέτρο απόδοσης του συστήματος που έχει ορισθεί. Η συνάρτηση της οποίας αναζητείται το μέγιστο ή το ελάχιστο αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση.

Η ανάλυση Γραμμικού Προγραμματισμού έχει στόχο τον προσδιορισμό των τιμών των μεταβλητών απόφασης ή αγνώστων $x_1, x_2, \dots, x_n$ που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση

$$\text{Max/Min } (c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n) \quad (4.1)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$a_{11}x_1 + \dots + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \quad [\leq, =, \geq] b_1 \quad (4.2)$$

$$a_{21}x_1 + \dots + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \quad [\leq, =, \geq] b_2 \quad (4.3)$$

.....

$$a_{m1}x_1 + \dots + a_{mj}x_j + \dots + a_{mn}x_n \quad [\leq, =, \geq] b_m \quad (4.4)$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad (4.5)$$

Είδη λύσεων προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού

Ως λύση θεωρείται κάθε διάνυσμα χ που ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος εκτός ίσως από τους περιορισμούς μη αρνητικότητας. Τα διάφορα είδη λύσεων σε ένα πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού είναι τα ακόλουθα:

- Εφικτή λύση (feasible solution): Ως εφικτή λύση θεωρείται κάθε διάνυσμα χ που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του προβλήματος, καθώς και τους περιορισμούς μη αρνητικότητας
- Βέλτιστη εφικτή λύση (optimal feasible solution): είναι η κάθε εφικτή λύση, η οποία βελτιστοποιεί την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Συνήθως ένα πρόβλημα έχει μια βέλτιστη λύση όμως είναι δυνατό να έχουμε και πολλαπλές βέλτιστες λύσεις οπότε σε αυτήν την περίπτωση το πρόβλημα του γραμμικού προγραμματισμού θα έχει άπειρες βέλτιστες λύσεις
- Εφικτή λύση ακραίου σημείου (corner point feasible solution): η εφικτή λύση που κείται σε κάποιο γειτονικό σημείο
- Γειτονικές ακραίες εφικτές λύσεις (adjacent corner point feasible solution): Δύο οποιεσδήποτε ακραίες εφικτές λύσεις αρκεί η ευθεία που τις ενώνει να αποτελεί εξίσωση ορίου για το χώρο εφικτότητας του προβλήματος
- Επαυξημένη λύση (augmented solution): Δεδομένου ενός προβλήματος με περιορισμούς ανισότητες, η λύση εκείνου του ισοδύναμου προβλήματος το οποίο έχει επαυξηθεί με μεταβλητές απόφασης, ώστε να μετατραπεί σε πρόβλημα με περιορισμούς ισότητας

- Βασική λύση (basic solution): κάθε ακραία επαυξημένη λύση, η συγκεκριμένη μπορεί να είναι εφικτή ή μη
- Βασική εφικτή λύση (basic feasible solution): Η βασική εκείνη λύση του προβλήματος της οποίας οι m βασικές μεταβλητές είναι μη αρνητικές και οι $n-m$ μη βασικές μεταβλητές είναι όλες ίσες με μηδέν. Μια βασική εφικτή λύση καλείται εκφυλισμένη (degenerated) εάν κάποιες από τις m βασικές μεταβλητές έχουν μηδενική τιμή.
- Εξίσωση ορίων (boundary equation): Οι εξισώσεις ορίων ορίζουν ένα υπερεπίπεδο ή ένα n -διάστατο γεωμετρικό σχήμα που είναι το ανάλογο μιας ευθείας των δυο διαστάσεων ή ενός επιπέδου των τριών διαστάσεων και κατασκευάζονται από τις ανισώσεις των περιορισμών, αν αντικατασταθούν τα $\leq, \geq$ με ισότητες. Προφανώς το όριο της εφικτής περιοχής ενός προβλήματος Γραμμικού Προγραμματισμού αποτελείται από τις εφικτές λύσεις που ικανοποιούν μια ή περισσότερες εξισώσεις ορίων.

Ο αλγόριθμος SIMPLEX είναι η αλγεβρική διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση μιας κατηγορίας προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού. Για να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος SIMPLEX πρέπει όλοι οι περιορισμοί να είναι ισότητες. Η αντικειμενική συνάρτηση μετατρέπεται σε ισότητα, θεωρώντας την ίση με το 0. Γενικά, ακολουθείται επαναληπτική μέθοδος προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού μέχρις ότου επιτευχθεί βέλτιστη λύση.

4.3.1 Ακέραιος Προγραμματισμός

Χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση μιας ιδιαίτερα σημαντικής κατηγορίας προβλημάτων κατανομής πόρων μεταξύ εναλλακτικών δραστηριοτήτων, στα οποία οι μεταβλητές μπορούν να πάρουν μόνο ακέραιες τιμές.

Οι κυριότερες τεχνικές επίλυσης προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού είναι:

- ✓ Μέθοδοι διακλάδωσης και ορίου (branch and bound)

Η λύση εδώ έρχεται ύστερα από τη λύση μιας σειράς υποπροβλημάτων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κλαδιά

- ✓ Τεχνικές περιορισμού του εφικτού χώρου (cutting planes)

Δημιουργία συμπληρωματικών ανισοτήτων για περιορισμό του χώρου των λύσεων ώστε το πρόβλημα να έχει ακέραιες μεταβλητές

- ✓ Μέθοδοι απαρίθμησης

Σε αυτές τις μεθόδους εντοπίζονται σύμφωνα με κάποια κριτήρια όλες οι εφικτές λύσεις και επιλέγεται αυτή που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί της αντικειμενική συνάρτηση

- ✓ Διαμεριστικοί αλγόριθμοι

Επίλυση ενός μεικτού προβλήματος ακέραιου προγραμματισμού μέσω της επίλυσης μιας σειράς προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού και προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού

✓ Αλγόριθμοι βασισμένοι στη θεωρία ομάδων (Gomory)

Ένα παράδειγμα προβλήματος ακέραιου προγραμματισμού είναι εκείνο των επιχειρήσεων που παράγουν προϊόντα σε ακέραιες ποσότητες όπως για παράδειγμα ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Με στόχο τη μεγιστοποίηση των κερδών για τις επιχειρήσεις αυτές πρέπει να βρεθεί η ποσότητα παραγόμενων προϊόντων που θα επιφέρει αυτό το βέλτιστο αποτέλεσμα. Όπως είναι λογικό η παραγωγή μη ακέραιου αριθμού δεν έχει καμία φυσική σημασία ενώ η στρογγυλοποίηση του αποτελέσματος μπορεί να μην συμβαδίζει με τυχόν περιορισμούς που έχουν τεθεί όπως η διαθεσιμότητα ενός από τα είδη υπολογιστών που η επιχείρηση θέλει να παράγει.

Στα προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού της μορφής «0-1» εισάγεται αντικειμενική συνάρτηση η οποία είναι και η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, η οποία είναι ζητούμενο είτε να μεγιστοποιηθεί είτε να ελαχιστοποιηθεί.

Για την καλύτερη κατανόηση των προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού της μορφής «0-1» παρατίθενται στη συνέχεια δυο παραδείγματα, όπου στο πρώτο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της μαθηματικής συνάρτησης και στο δεύτερο η μεγιστοποίηση της.

Το πρώτο παράδειγμα αφορά την εύρεση της συντομότερης διαδρομής ανάμεσα σε δυο δεδομένα κομβικά σημεία ενός δικτύου, για παράδειγμα ανάμεσα σε δύο πόλεις. Όλες οι πιθανές διαδρομές ανάμεσα σε αυτές τις δύο πόλεις απαιτούν την κατασκευή οδικών τμημάτων για τα οποία υπάρχει το αντίστοιχο κόστος κατασκευής.

Η επίλυση του προβλήματος αυτού μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του ακέραιου προγραμματισμού και να βρεθεί η βέλτιστη διαδρομή, η οποία θα είναι και η συντομότερη.

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός θα πρέπει να οριστεί η αντικειμενική συνάρτηση στην οποία θα εισαχθούν ως μεταβλητές τα δεδομένα κόστη της κατασκευής των οδικών τμημάτων αλλά και η μεταβλητή απόφασης X_{ij} οποίος παίρνει την τιμή 1 σε περίπτωση που θα κατασκευαστεί το οδικό τμήμα και 0 αν όχι. Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως το σύνολο όλων των αθροισμάτων των γινομένων των δυο παραπάνω μεταβλητών, κόστους και X_{ij} . Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης δεδομένου ότι η μια μεταβλητή αντιπροσωπεύει κόστη τα οποία πάντα ζητούμενο είναι να ελαχιστοποιηθούν.

Το δεύτερο πρόβλημα αφορά στην επένδυση ενός αρχικού ποσού A σε n διαθέσιμες επενδύσεις. Εδώ στόχος είναι να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος τοποθέτησης του αρχικού κεφαλαίου στις διάφορες επενδύσεις έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το κέρδος.

Σε αυτό το πρόβλημα, το οποίο μπορεί να επιλυθεί με τη βοήθεια του ακέραιου προγραμματισμού απαιτείται και πάλι η εισαγωγή της αντικειμενικής συνάρτησης, που εκφράζεται ως το σύνολο των αθροισμάτων των γινομένων των δυο μεταβλητών. Η πρώτη μεταβλητή είναι όπως και στο πρώτο πρόβλημα X_{ij} , η οποία παίρνει τιμές 0 ή 1 ανάλογα με το εάν πραγματοποιείται η επένδυση ή όχι και η δεύτερη εκφράζει την απόδοση της επένδυσης. Στόχος σε αυτό το πρόβλημα είναι η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης καθώς επιζητείται η μέγιστη δυνατή απόδοση των λιμένων.

4.3.2 Δυϊκό Πρόβλημα

Η βέλτιστη λύση ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού βασίζεται στις εφήμερες συνθήκες που κυριαρχούν τη στιγμή κατά την οποία το μοντέλο του προβλήματος

κατασκευάζεται και επιλύεται. Σε προβλήματα πραγματικών συνθηκών, τα διάφορα περιβάλλοντα αποφάσεων παραμένουν στατικά μόνο σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο αλλάζει η βέλτιστη λύση όταν μεταβάλλονται οι παράμετροι του μοντέλου. Με το παραπάνω πρόβλημα ασχολείται η ανάλυση της ευαισθησίας η οποία παρέχει ικανές υπολογιστικές τεχνικές που βοηθούν στη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της βέλτιστης λύσης, η οποία προκύπτει από διάφορες αλλαγές που προκύπτουν στις παραμέτρους του μοντέλου. Με το παραπάνω πρόβλημα ασχολείται η ανάλυση ευαισθησίας η οποία παρέχει ικανές υπολογιστικές τεχνικές που βοηθούν στη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της βέλτιστης λύσης, η οποία προκύπτει από διάφορες αλλαγές που προκύπτουν στις παραμέτρους του μοντέλου. Η θεωρία της δυϊκότητας παρέχει έναν αλγεβρικό τρόπο αντιμετώπισης αυτού του σημαντικού πρακτικού προβλήματος. Το δυϊκό πρόβλημα (dual problem) είναι ένα πρόγραμμα γραμμικού προγραμματισμού το οποίο καθορίζεται ντετερμινιστικά από το αρχικό ή πρωτεύον μοντέλο (primal or original problem) προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού. Η συσχέτιση των δυο προβλημάτων είναι τόσο απόλυτη ώστε αν προκύψει με κάποιο τρόπο η βέλτιστη λύση του πρωτεύοντος, να επέρχεται με φυσιολογικό τρόπο και η λύση του δυϊκού και αντίστροφα. Το είδος της βελτιστοποίησης (max ή min), οι μορφές των ανισοτήτων των περιορισμών καθώς και το είδος των μεταβλητών προσδιορίζουν πλήρως το δυϊκό πρόβλημα. Συγκεκριμένα, οι περιορισμοί του πρωτεύοντος καθορίζουν τις μεταβλητές του δυϊκού, η ίδια αντίθεση ισχύει και με τους συντελεστές μεταξύ των μεταβλητών του ενός και συντελεστών του άλλου. Τέλος, το είδος της βελτιστοποίησης που επιζητείται είναι επίσης αντίθετο στα δύο προβλήματα. Δηλαδή ένα πρωτεύον πρόβλημα μεγιστοποίησης μετατρέπεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης στο δυϊκό και αντίστροφα.

4.4 Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (Non Linear Programming)

Πρόκειται για προβλήματα που έχουν μη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση και/ή μη γραμμικούς περιορισμούς. Τα μη γραμμικά προβλήματα διατυπώνονται ουσιαστικά όπως και τα γραμμικά ωστόσο διαφέρουν ως προς τη μαθηματική προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την επίλυση κάθε προβλήματος. Σκοπός είναι η απαρίθμηση των δυνατών λύσεων και η επιλογή της βέλτιστης. Τα προβλήματα που απαιτούν μη γραμμικό προγραμματισμό εμφανίζουν τα ακόλουθα γενικά χαρακτηριστικά:

- Είναι μη γραμμικά
- Έχουν μη κυρτές περιοχές εφικτότητας
- Έχουν ασυνεχείς μεταβλητές
- Επιδέχονται μικρό αριθμό περιορισμών

Παραδείγματα τέτοιων προβλημάτων έχουν εφαρμογή συνήθως στη εφαρμοσμένη μηχανική περιλαμβάνοντας την ανάλυση σχεδιαστικών συναλλαγών, την επιλογή βέλτιστων σχεδίων, τον υπολογισμό βέλτιστων τροχιών και τη βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίων και τη βαθμονόμηση μοντέλων στην υπολογιστική χρηματοδότηση.

Η μαθηματική διατύπωση ενός μη γραμμικού προβλήματος είναι η εξής:

$$\text{Maximize-Minimize: } z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.6)$$

Υπό τους περιορισμούς:

$$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) (\leq, =, \geq) b_1 \quad (4.7)$$

$$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) (\leq, =, \geq) b_2$$

...

$$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) (\leq, =, \geq) b_m$$

Όπου:

- Η $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ όπως και στον γραμμικό προγραμματισμό είναι συνάρτηση του Μ.Γ.Π
- Οι $g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) (\leq, =, \geq) b_1, \dots, g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) (\leq, =, \geq) b$ είναι οι περιορισμοί του μη γραμμικού προγραμματισμού, οι οποίοι συνήθως δίνονται
- Ένα πρόβλημα που δεν έχει περιορισμούς λέγεται πρόβλημα χωρίς περιορισμούς
- Το σύνολο όλων των σημείων $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ είναι πραγματικοί αριθμοί και λαμβάνουν τιμές από το σύνολο R^n .

Τα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

1. NLP χωρίς περιορισμούς

Ο μη γραμμικός προγραμματισμός χωρίς περιορισμούς αφορά στο μαθηματικό πρόβλημα εύρεσης ενός διανύσματος x που είναι ένα τοπικό ελάχιστο στη μη γραμμική κλιμακωτή συνάρτηση $f(x)$. Δίχως περιορισμούς σημαίνει ότι δεν υπάρχουν περιορισμοί στην περιοχή του x .

Οι ακόλουθοι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται συνήθως για το μη γραμμικό προγραμματισμό δίχως περιορισμούς:

- Quasi-Newton: χρησιμοποιεί μια διαδικασία αναζήτησης ανάμεικτης τετραγωνικής και κυβικής γραμμής και τον τύπο Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno για την ενημέρωση της προσέγγισης του πίνακα Hessian
- Elder-Mead: χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο άμεσης αναζήτησης που χρησιμοποιεί μόνο τιμές της συνάρτησης (δεν απαιτεί τετράγωνα) και χειρίζεται μη κυρτές αντικειμενικές συναρτήσεις
- Περιοχές εμπιστοσύνης: χρησιμοποιείται για προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς και είναι ιδιαίτερα χρήσιμος σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα όπου μπορεί να εκμεταλλευτεί κανείς την αραιότητα (sparsity) ή τη δομή τους.

2. NLP με περιορισμούς

Ο μη γραμμικός προγραμματισμός με περιορισμούς αφορά στο μαθηματικό πρόβλημα εύρεσης ενός διανύσματος χ που ελαχιστοποιεί μια γραμμική συνάρτηση $f(x)$ που υπόκειται σε έναν ή περισσότερους περιορισμούς.

Οι αλγόριθμοι για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων προγραμματισμού με περιορισμούς περιλαμβάνουν:

- Εσωτερικού σημείου: είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για μεγάλης κλίμακας μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης που έχουν αραιότητα η δομή.
- Διαδοχικός τετραγωνικός προγραμματισμός (SQP): επιλύει γενικά μη γραμμικά προβλήματα και σέβεται τα όρια σε όλες τις επαναλήψεις.
- Περιοχή εμπιστοσύνης που αντανakλά: επιλύει δεσμευμένα περιορισμένα προβλήματα βελτιστοποίησης ή μόνο γραμμικές ισότητες.

Τέλος, συγκρίνοντας τα προβλήματα μη γραμμικού και γραμμικού προγραμματισμού παρατηρούνται κάποιες διαφορές, από τις οποίες οι πιο σημαντικές να είναι:

1. Στο μη γραμμικό προγραμματισμό η επιτρεπτή περιοχή πιθανόν να μην είναι κυρτό σύνολο ενώ αντίθετα στο γραμμικό προγραμματισμό η επιτρεπτή περιοχή πιθανόν να μην είναι κυρτό σύνολο.
2. Στο μη γραμμικό προγραμματισμό, η βέλτιστη λύση δεν είναι απαραίτητο να είναι ακραίο σημείο της επιτρεπτής περιοχής του Μ.Γ.Π, ενώ στο γραμμικό προγραμματισμό αν υπάρχει βέλτιστη λύση αποτελεί ακραίο σημείο της επιτρεπτής περιοχής.

4.5 Επιλογή Μοντέλου Χωροθέτησης

Το μαθηματικό μοντέλο που επιλέχθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας για τη κατάλληλη χωροθέτηση σταθμών WIM στο οδικό δίκτυο της Ελλάδας βασίστηκε στο μοντέλο που διατυπώθηκε από τους Mahmoudabadi και Seyedhosseini (2013). Αποτελεί ένα ακέραιο μη γραμμικό πρόβλημα προγραμματισμού και μια παραλλαγή του προβλήματος μέγιστης κάλυψης (Maximal Covering Location Problem).

Για τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος αυτού ορίζονται οι παρακάτω δείκτες, παράμετροι και μεταβλητές:

G: σύνολο όλων των συνδέσμων του εξεταζόμενου οδικού δικτύου

i: κόμβος αρχής

j: κόμβος τέλους

od: στοιχείο του πίνακα OD

OD: πίνακας που περιέχει τη ζήτηση των ζευγών προέλευσης- προορισμού

Nod_{ij}: αριθμός των οχημάτων που διέρχεται από το σύνδεσμο ij

M_{ij}: αριθμός οχημάτων που μετρήθηκαν από τα συστήματα WIM σε κάθε σύνδεσμο ij

και επιπλέον ορίζεται η δυαδική μεταβλητή απόφασης x_{ij} :

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{εάν γίνεται η χωροθέτηση στο σύνδεσμο } ij \\ 0, & \text{εάν όχι} \end{cases}$$

Έτσι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ορίζεται με την παρακάτω συνάρτηση μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\text{Maximize} \quad \sum_{\forall i,j \in G} \text{Maximize}(\text{Nod}_{ij} \times x_{ij}) \quad \forall \text{ od} \in \text{OD}$$

$$\text{s. t:} \quad \sum_{i,j \in G} x_{ij} \leq \text{Number of WIM(s)}$$

Ωστόσο το πρόβλημα μπορεί να γραφεί απλοποιητικά ως εξής:

$$\text{Maximize} \quad \sum_{\forall i,j \in G} M_{ij} \tag{4.30}$$

$$\text{s. t:} \quad M_{ij} \geq \text{Nod}_{ij} \times x_{ij} \tag{4.31}$$

$$\sum_{\forall i,j \in G} x_{ij} \leq \text{Number of Wim(s)} \tag{4.32}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in G \tag{4.33}$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (4.30) αποτελεί η μεγιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων που ελέγχονται μόνο μια φορά μετά την εγκατάσταση των συστημάτων WIM και η ελαχιστοποίηση των περιττών ελέγχων. Ο περιορισμός (4.31) εξασφαλίζει ότι τα οχήματα καταγράφονται εφόσον έχει χωροθετηθεί τουλάχιστον ένας σταθμός WIM. Ο περιορισμός (4.32) αποτελεί περιορισμό κόστους, καθώς εξασφαλίζει ότι ο αριθμός των σταθμών που πρόκειται να εγκατασταθούν πρέπει να είναι μικρότερος των διαθέσιμων σταθμών που προκύπτουν βάση του προϋπολογισμού. Τέλος, ο περιορισμός (4.33) ορίζει τη μεταβλητή χωροθέτησης ως δυαδική.

4.5.1 Παραδοχές Προβλήματος

Για τη διατύπωση του παραπάνω μοντέλου έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Όλοι οι σταθμοί ελέγχου έχουν το ίδιο κόστος χωροθέτησης.
- Οι σταθμοί ελέγχου WIM τοποθετούνται κατά μήκος των συνδέσμων.
- Για κάθε σύνδεσμο εξετάζεται μόνο η μια κατεύθυνση κυκλοφορίας.
- Σε κάθε σύνδεσμο μπορεί να χωροθετηθεί μέχρι ένας σταθμός.

4.5.2 Περιοχή Εφαρμογής-Δεδομένα

Για τις ανάγκες του υπό μελέτη προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που αφορούν:

- Την περιοχή μελέτης

Ως περιοχή μελέτης έχει οριστεί το Εθνικό Οδικό Δίκτυο της Ελλάδας με πιθανές θέσεις εγκατάστασης των σταθμών WIM τις θέσεις διοδίων και εξόδων, στις οποίες συγκεντρώνεται ο μεγαλύτερος κυκλοφοριακό φόρτος. Οι σταθμοί διοδίων εντοπίστηκαν μέσω ενός διαδικτυακού ιστότοπου (www.diodia.com.gr), όπου για κάθε τμήμα του Οδικού δικτύου εμφανίζει τις θέσεις των διοδίων πάνω στο χάρτη ενώ οι θέσεις των εξόδων προσδιορίστηκαν μέσω των χαρτών google maps.

- Τον κυκλοφοριακό φόρτο

Εκτιμήθηκε ο ετήσιος κυκλοφοριακός φόρτος για κάθε ζεύγος προέλευσης προορισμού λόγω του ότι δεν υπήρχαν διαθέσιμες κυκλοφοριακές μετρήσεις για την κίνηση των βαρέων οχημάτων.

- Το κόστος εγκατάστασης ενός σταθμού WIM

Το κόστος εγκατάστασης ενός σταθμού WIM ανέρχεται 180.000 €.

- Τον αρχικό προϋπολογισμό

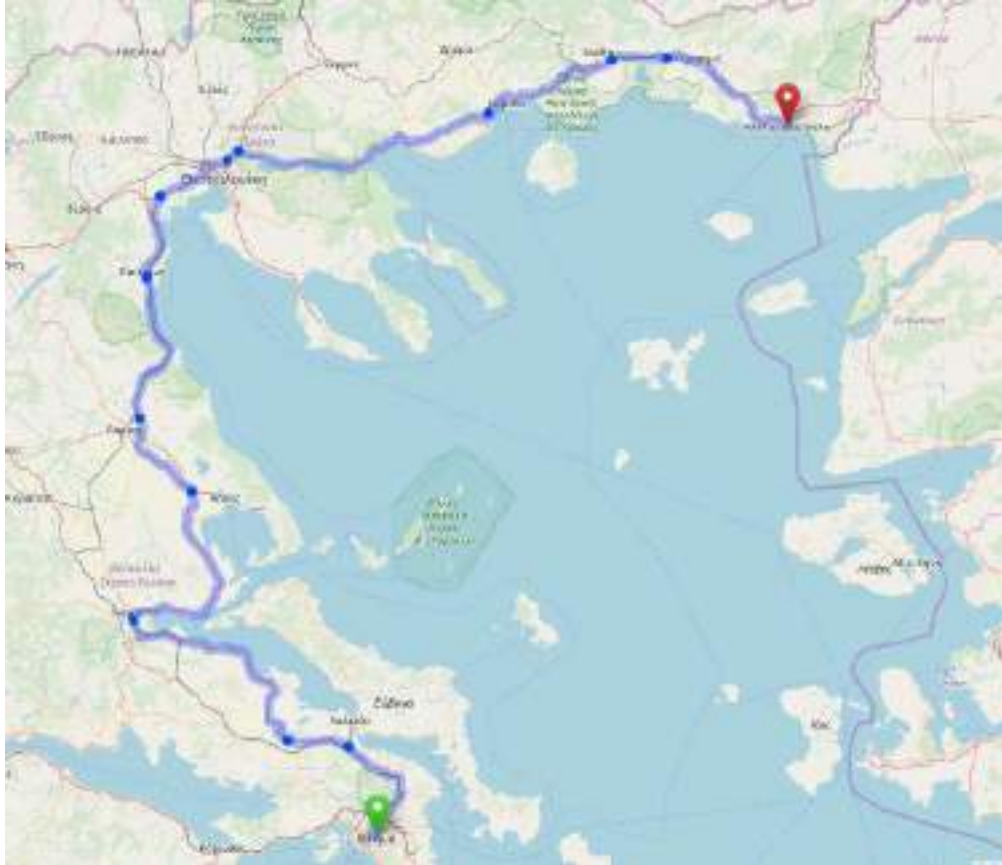
Ο αρχικός προϋπολογισμός εκτιμήθηκε ίσος με 5.000.000 €, συναρτήσει του οποίου και του κόστους εγκατάστασης ενός σταθμού WIM, υπολογίστηκε ο αριθμός των διαθέσιμων σταθμών, ο οποίος προέκυψε ίσος με 27.

Ως περιοχή εφαρμογής επιλέχθηκε το κύριο οδικό δίκτυο της Ελλάδας. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν για μελέτη τα εξής τμήματα του οδικού δικτύου:

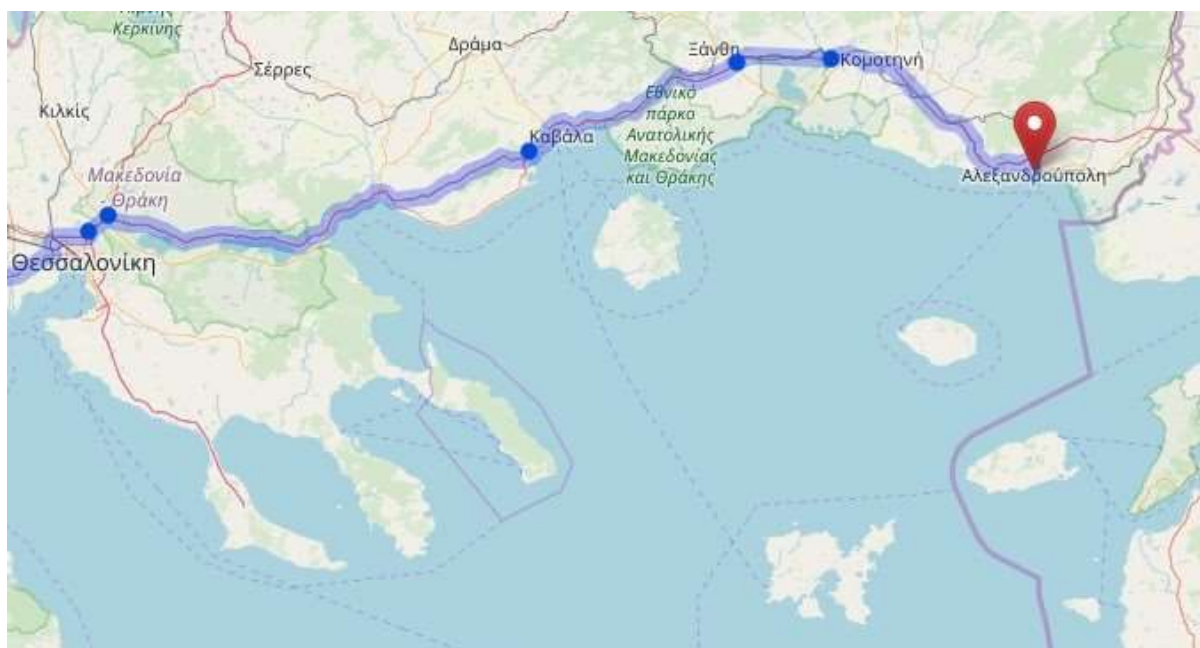
- Αθήνα-Καλαμάτα
- Αθήνα-Θεσσαλονίκη
- Αθήνα-Πάτρα
- Πάτρα-Ιωάννινα
- Θεσσαλονίκη-Ηγουμενίτσα
- Θεσσαλονίκη-Αλεξανδρούπολη

Οι σταθμοί WIM τοποθετούνται σε σημεία που παρατηρείται αυξημένος κυκλοφοριακός φόρτος ή σημεία αλλαγής του κυκλοφοριακού φόρτου, καθώς έχουν ως στόχο τον έλεγχο όσο το δυνατόν περισσότερων οχημάτων. Για το λόγο αυτό, για τις παραπάνω διαδρομές εντοπίστηκαν και μελετήθηκαν ως πιθανές θέσεις εγκατάστασης σταθμών, οι θέσεις διοδίων και εξόδων.

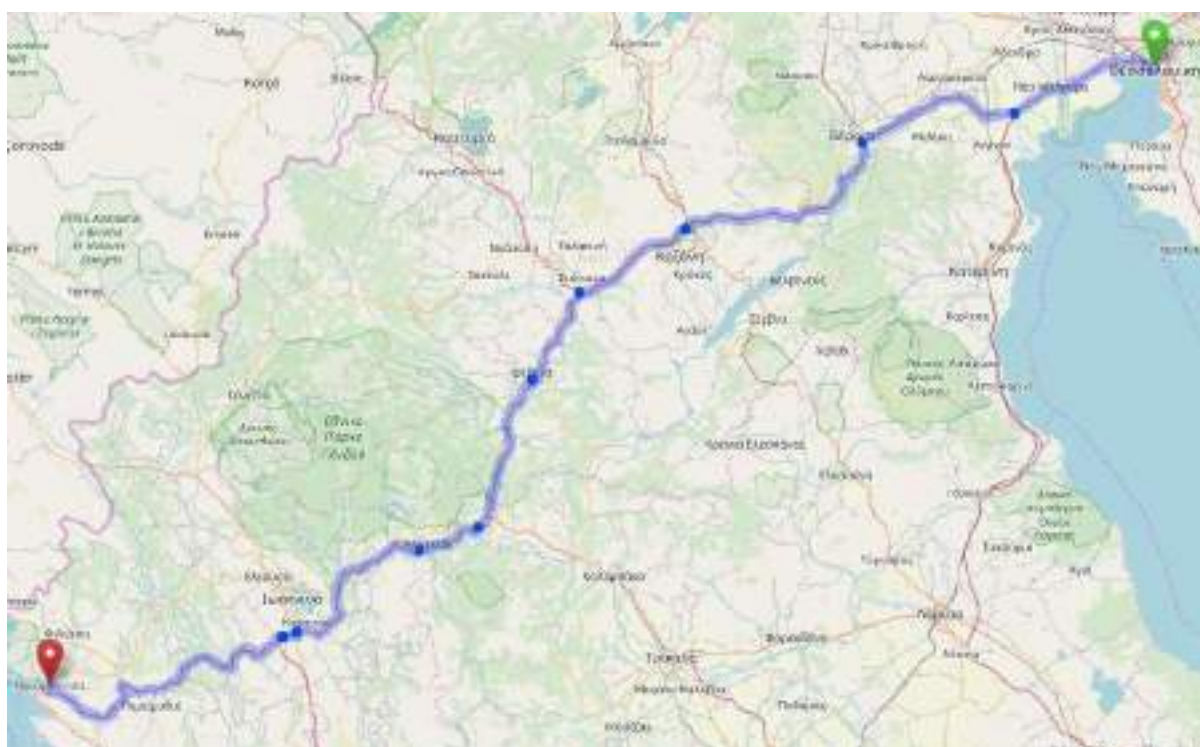
Στη συνέχεια, απεικονίζονται τα τμήματα του οδικού δικτύου σε χάρτες και παρουσιάζονται σε πίνακες τα σημεία των διαδρομών, που εξετάστηκαν ως υποψήφιες θέσεις χωροθέτησης των σταθμών ελέγχου.



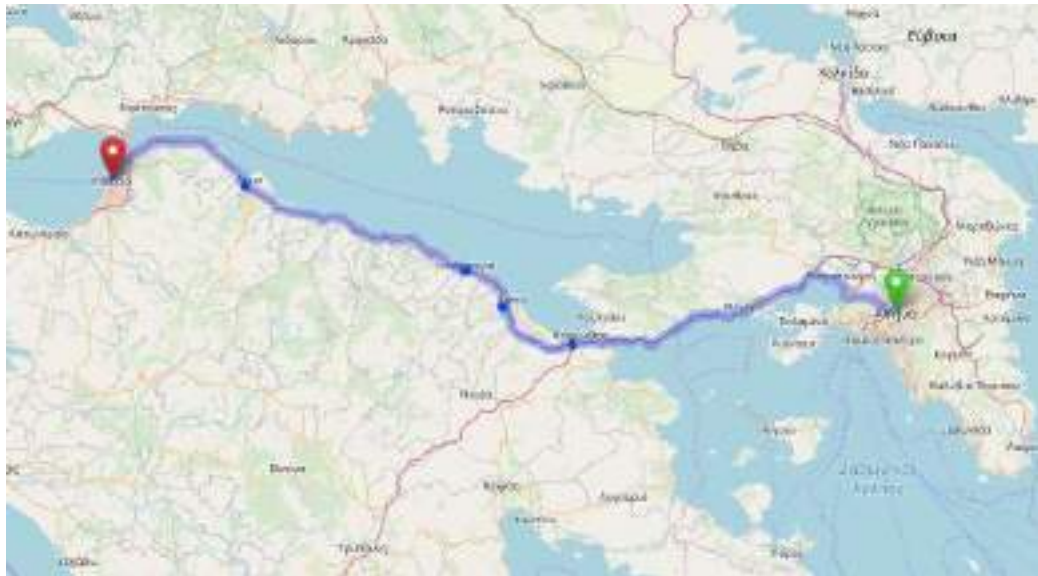
Χάρτης 4.1: Έξοδοι Αθήνα-Θεσσαλονίκη



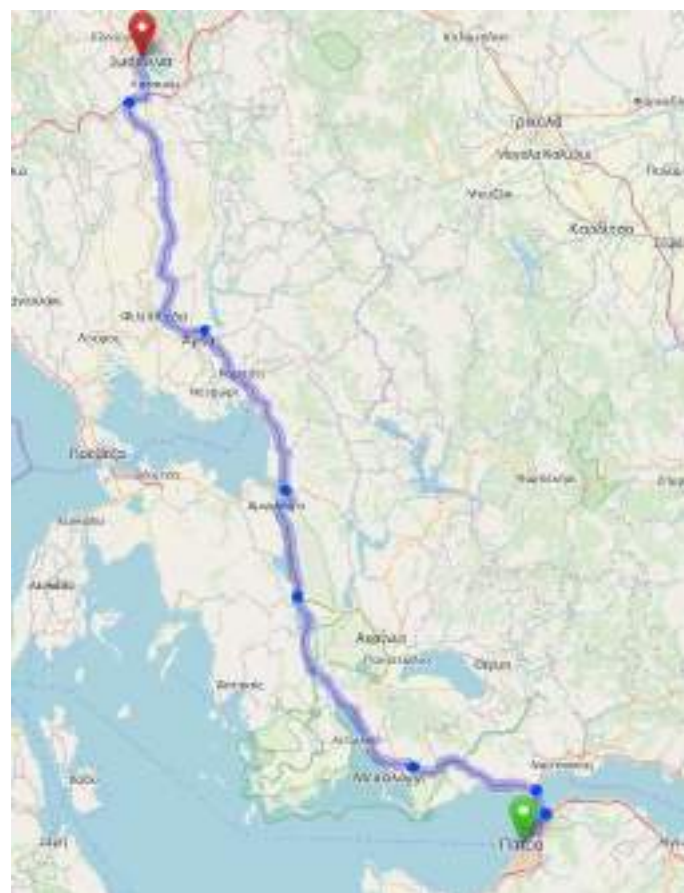
Χάρτης 4.2: Έξοδοι Θεσσαλονίκη-Αλεξανδρούπολη



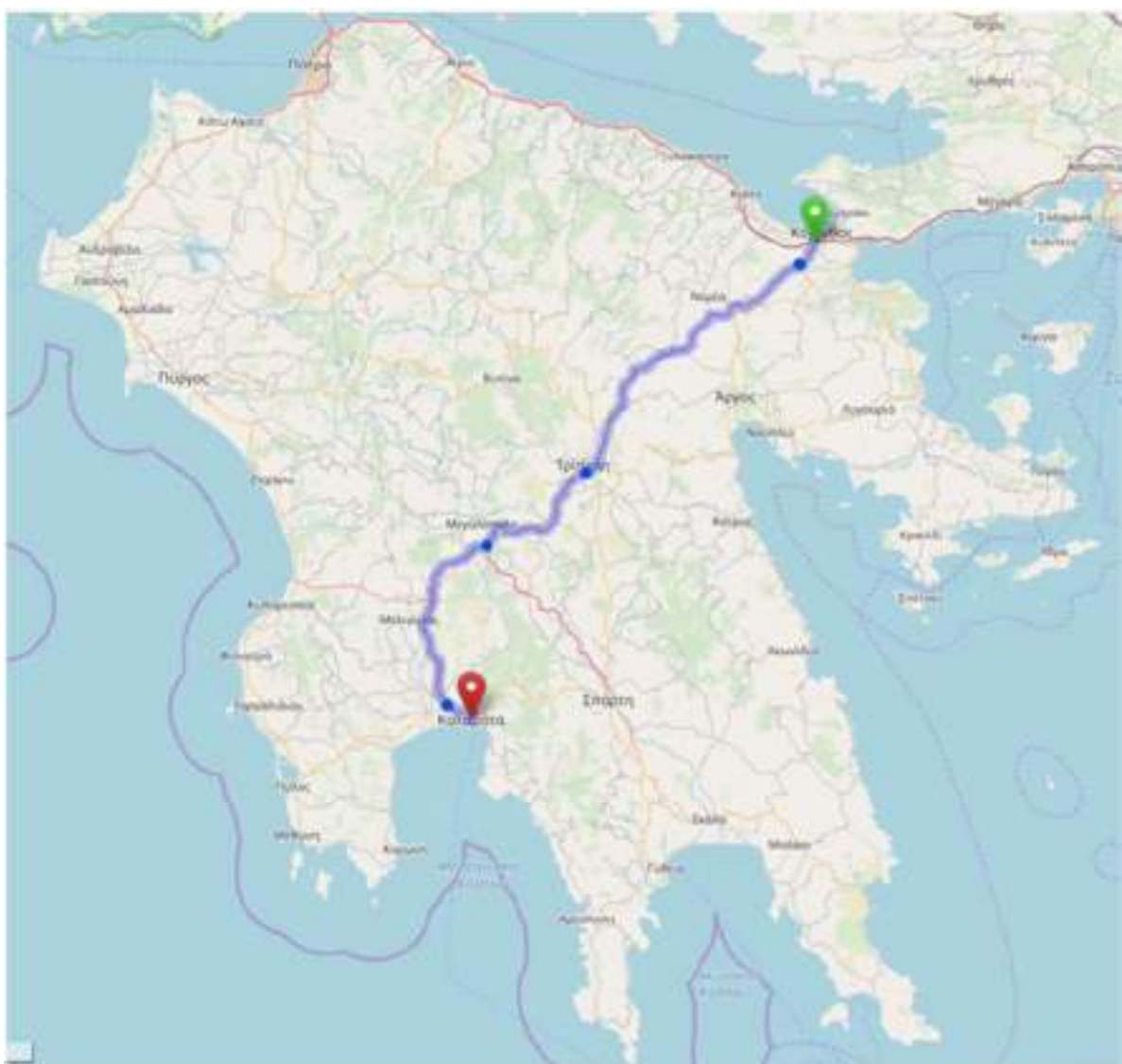
Χάρτης 4.3: Έξοδοι Θεσσαλονίκη-Ηγουμενίτσα



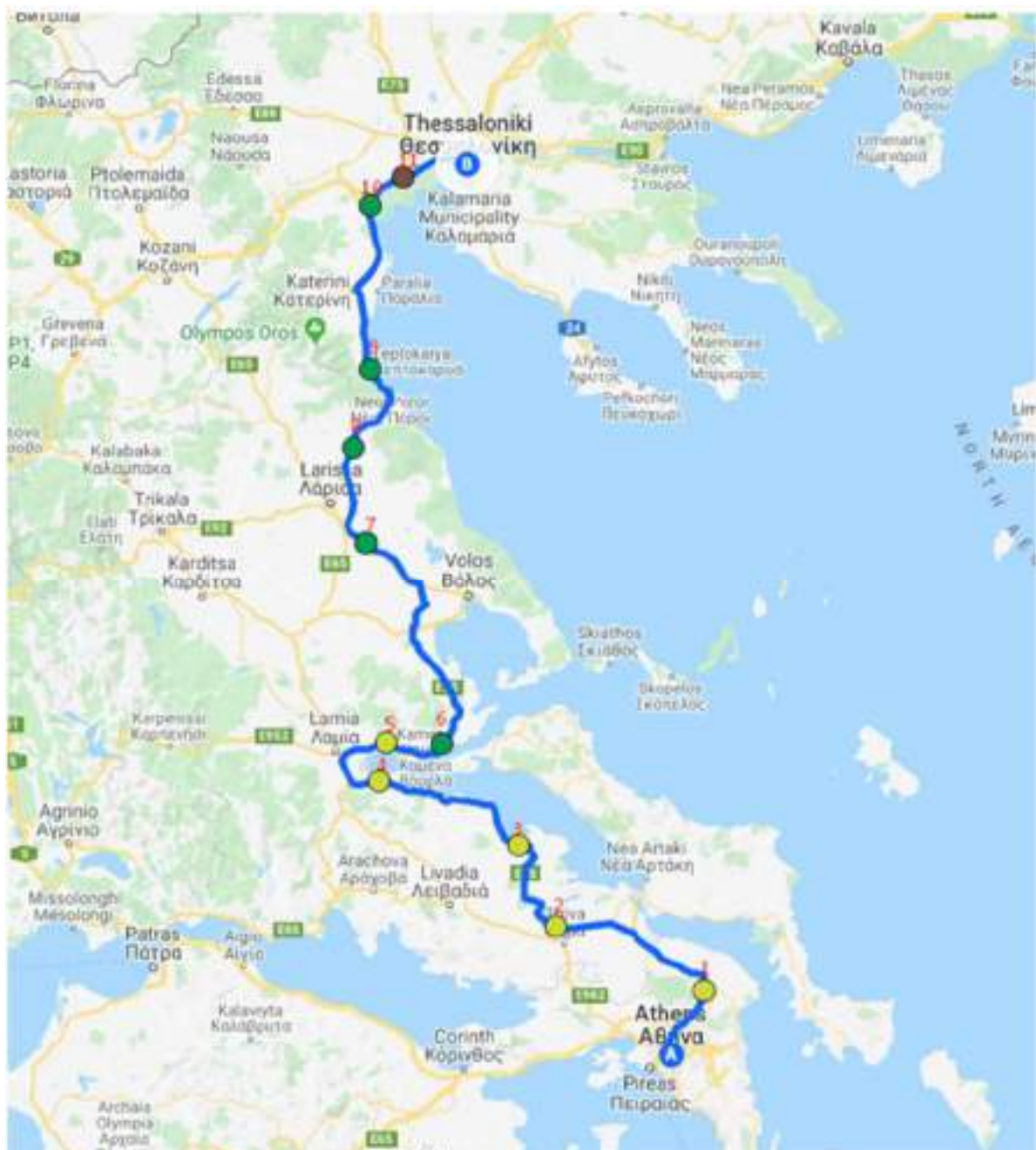
Χάρτης 4.4: Έξοδοι Αθήνα-Πάτρα



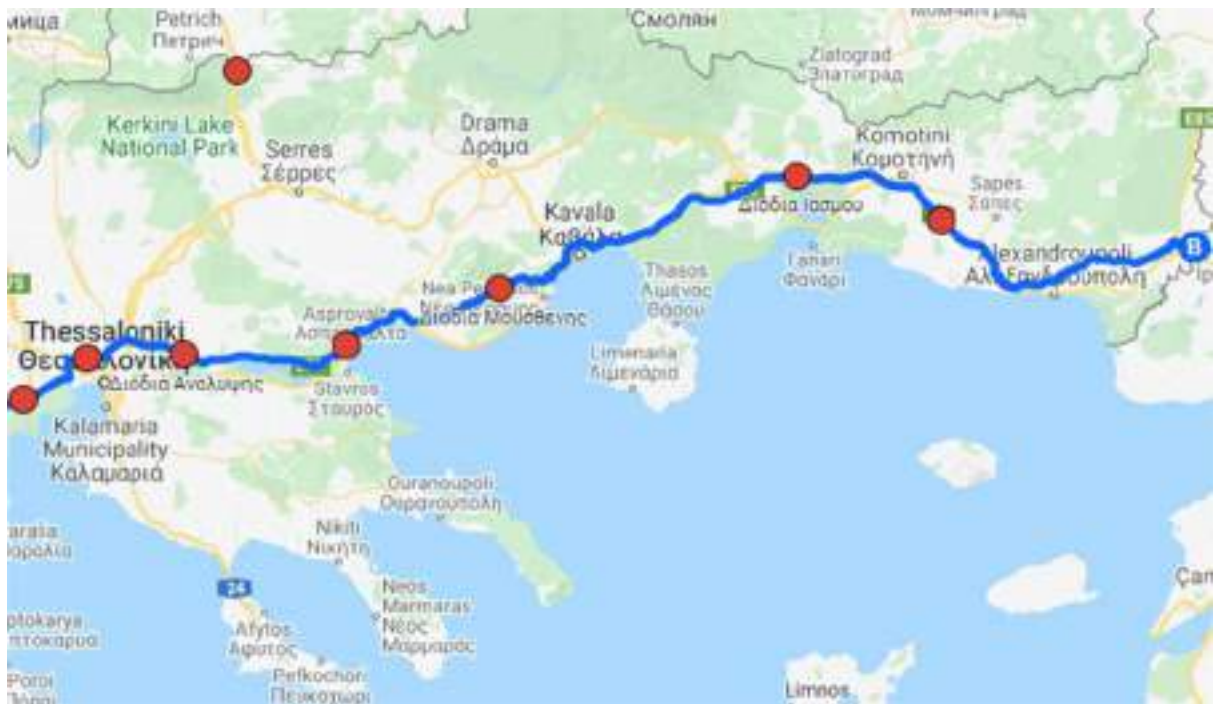
Χάρτης 4.5: Έξοδοι Πάτρα-Ιωάννινα



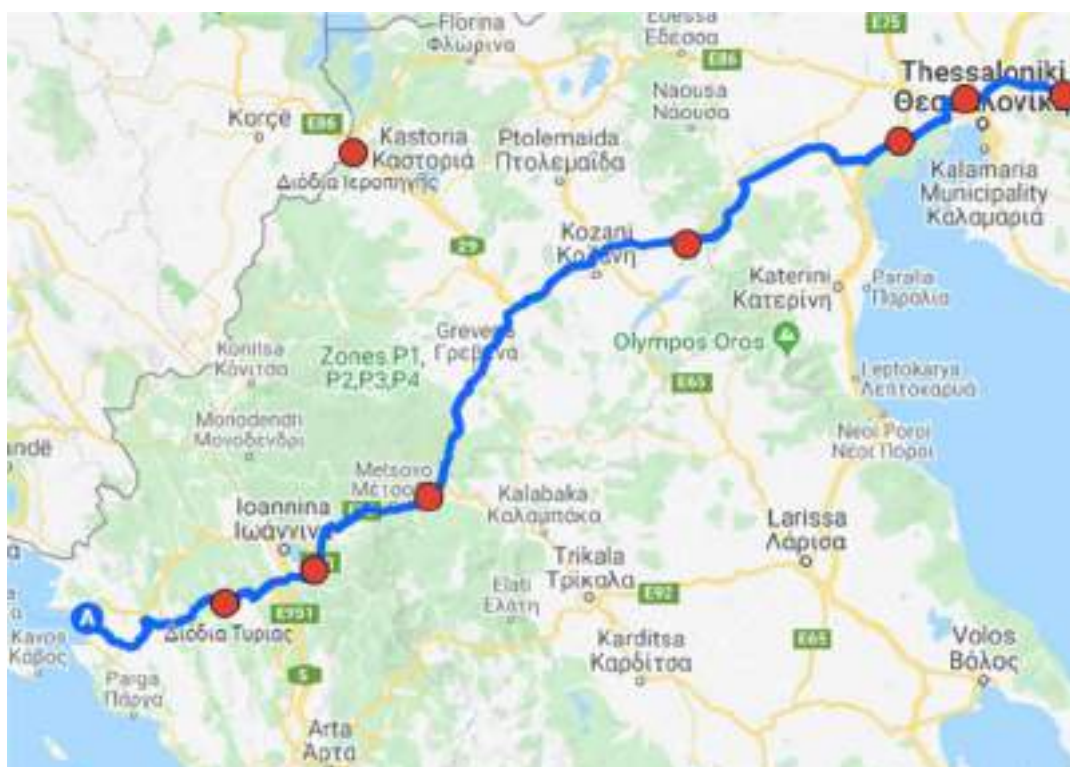
Χάρτης 4.6: Έξοδοι Κόρινθος-Καλαμάτα



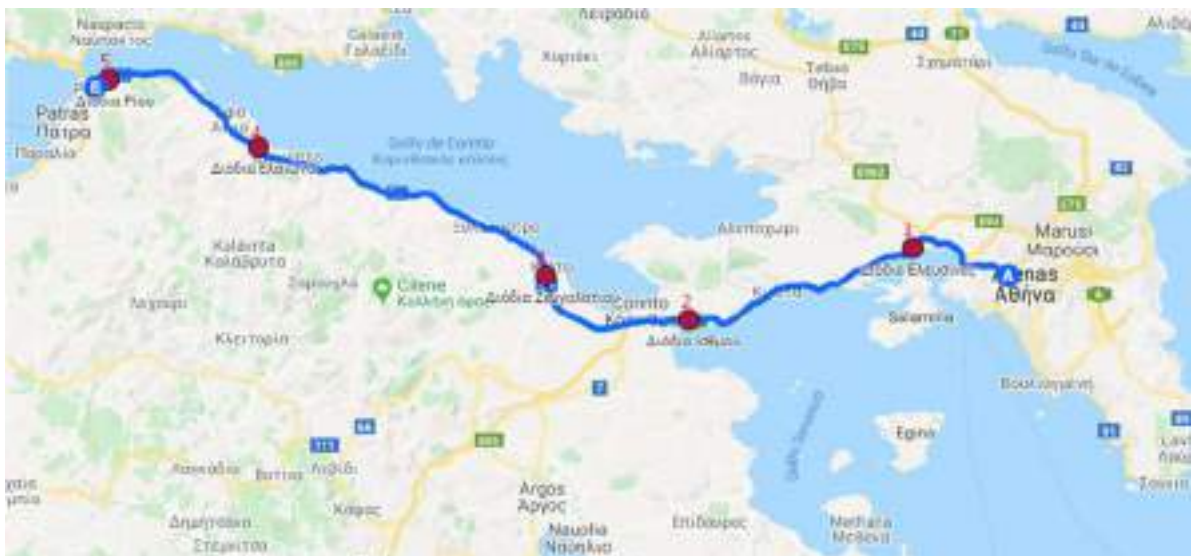
Χάρτης 4.7: Διόδια Αθήνα-Θεσσαλονίκη



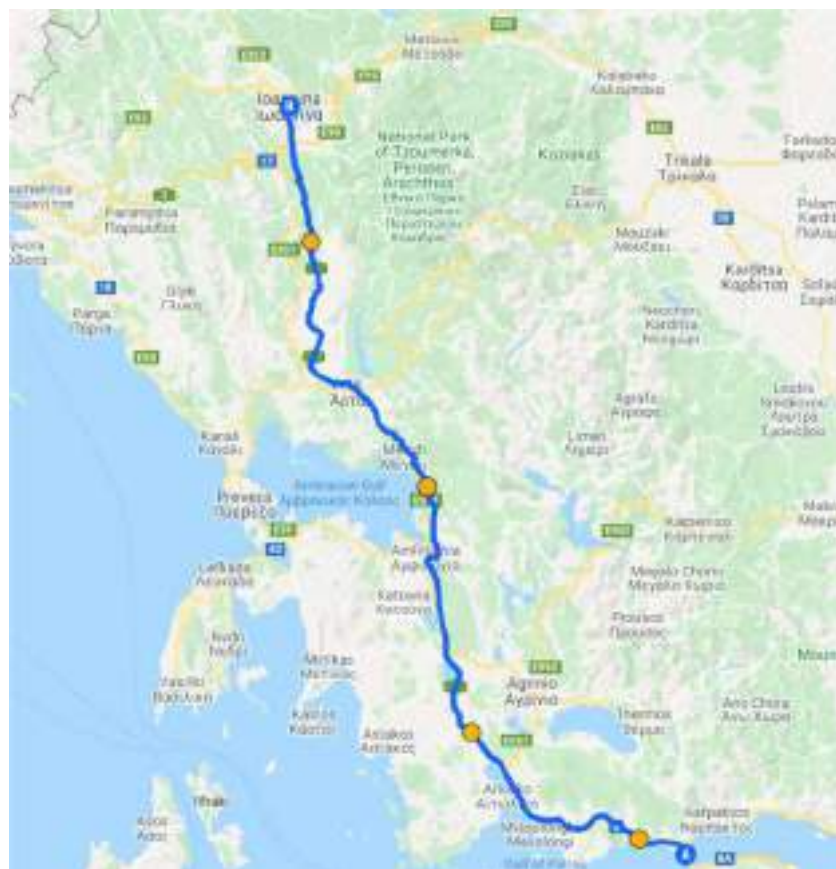
Χάρτης 4.8: Διόδια Θεσσαλονίκη-Αλεξανδρούπολη



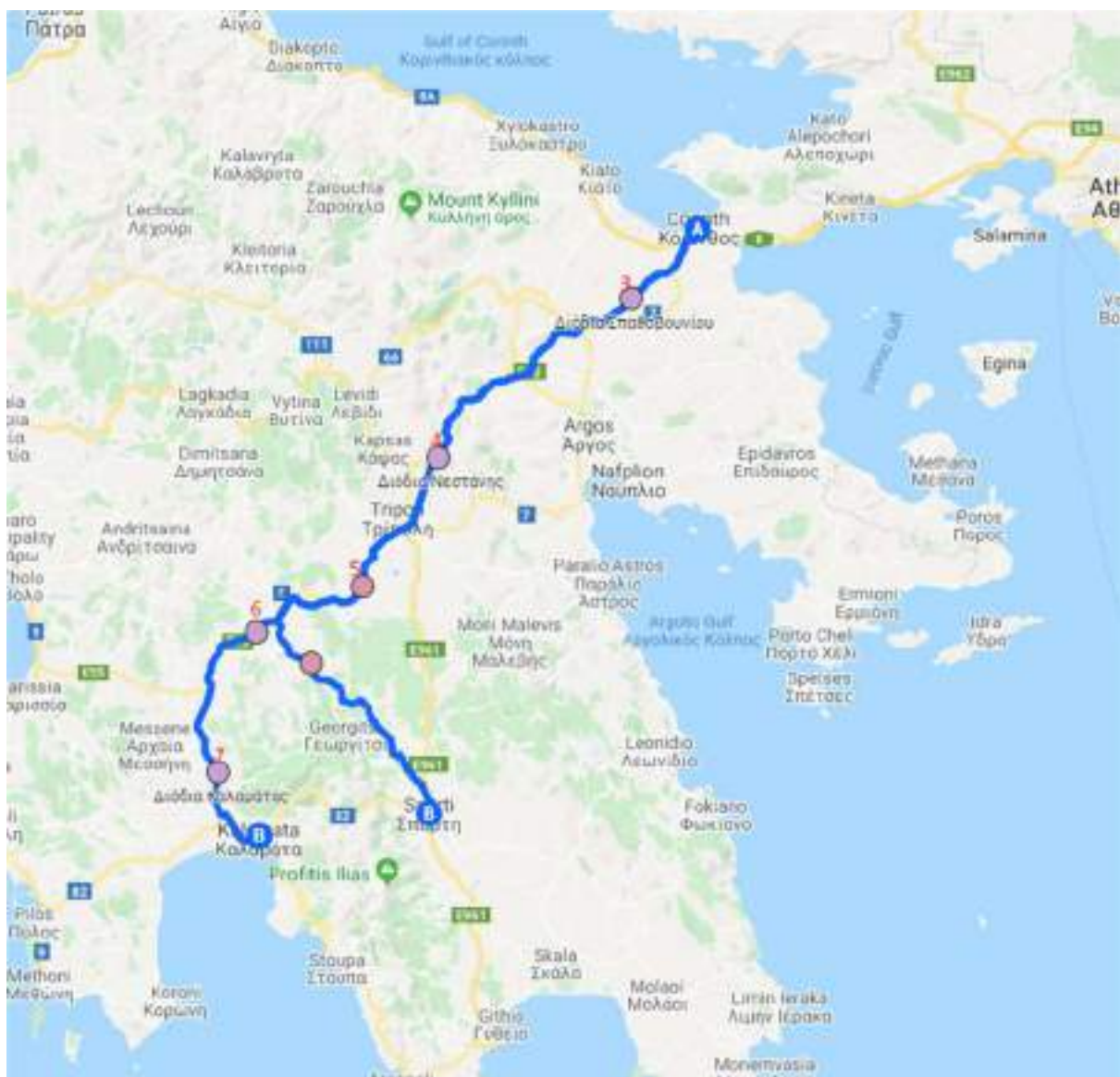
Χάρτης 4.9: Διόδια Θεσσαλονίκη-Ιωάννινα



Χάρτης 4.9: Διόδια Αθήνα-Πάτρα



Χάρτης 4.10: Διόδια Πάτρα-Ιωάννινα



Χάρτης 4.11: Διόδια Κόρινθος-Καλαμάτα

Πίνακας 4.2: Κόμβοι εξεταζόμενου τμήματος Αθήνας-Καλαμάτας

ΑΡ.ΚΟΜΒΟΥ	ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΑΘΗΝΑ-ΚΑΛΑΜΑΤΑ
(1)	ΑΘΗΝΑ
(2)	Δ.ΕΛΕΥΣΙΝΑΣ
(4)	Δ.ΙΣΘΜΟΥ
(5)	ΚΟΡΙΝΘΟΣ
(7)	Δ.ΣΠΑΘΟΒΟΥΝΙΟΥ
(8)	Δ.ΝΕΣΤΑΝΗΣ
(9)	ΤΡΙΠΟΛΗ
(10)	Δ. ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΑΝΑΡΗ
(11)	ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ
(12)	Δ.ΒΕΛΙΓΟΣΤΗΣ
(13)	Δ.ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ
(14)	ΚΑΛΑΜΑΤΑ

Πίνακας 4.3: Κόμβοι εξεταζόμενου τμήματος Αθήνας-Θεσ/νίκης

ΑΡ.ΚΟΜΒΟΥ	ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΑΘΗΝΑ- ΘΕΣ/ΝΙΚΗ
(1)	ΑΘΗΝΑ
(3)	Δ.ΑΦΙΔΝΩΝ
(20)	ΧΑΛΚΙΔΑ
(21)	Δ. ΘΗΒΑΣ
(22)	ΘΗΒΑ
(23)	Δ.ΤΡΑΓΑΝΑΣ
(24)	Δ.ΑΓΙΑΣ ΤΡΙΑΔΑΣ
(25)	ΛΑΜΙΑ
(26)	Δ.ΜΑΥΡΟΜΑΝΤΗΛΑΣ
(27)	Δ.ΠΕΛΑΓΙΑΣ
(28)	ΒΟΛΟΣ
(29)	Δ.ΜΟΣΧΟΧΩΡΙΟΥ
(30)	ΛΑΡΙΣΑ
(31)	Δ.ΜΑΚΡΥΧΩΡΙΟΥ
(32)	Δ.ΛΕΠΤΟΚΑΡΙΑΣ
(33)	ΚΑΤΕΡΙΝΗ
(34)	Δ.ΚΛΕΙΔΙΟΥ
(35)	ΚΟΜΒΟΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ
(36)	Δ.ΜΑΛΓΑΡΩΝ
(37)	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Πίνακας 4.4: Κόμβοι εξεταζόμενου τμήματος Αθήνας-Πάτρας

ΑΡ.ΚΟΜΒΟΥ	ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΑΘΗΝΑ- ΠΑΤΡΑ
(1)	ΑΘΗΝΑ
(2)	Δ.ΕΛΕΥΣΙΝΑΣ
(4)	Δ.ΙΣΘΜΟΥ
(5)	ΚΟΡΙΝΘΟΣ
(6)	Δ.ΖΕΥΓΟΛΑΤΙΟΥ
(15)	ΚΙΑΤΟ
(16)	ΞΥΛΟΚΑΣΤΡΟ
(17)	Δ.ΕΛΑΙΩΝΑ
(18)	ΑΙΓΙΟ
(19)	ΠΑΤΡΑ

Πίνακας 4.5: Κόμβοι εξεταζόμενου τμήματος Πάτρα-Ιωάννινα

ΑΡ.ΚΟΜΒΟΥ	ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΠΑΤΡΑ- ΙΩΑΝΝΙΝΑ
(65)	ΠΑΤΡΑ
(47)	ΝΑΥΠΑΚΤΟΣ
(48)	Δ.ΚΛΟΚΟΒΑΣ
(49)	ΜΕΣΟΛΟΓΓΙ
(50)	Δ.ΑΓΓΕΛΟΚΑΣΤΡΟΥ
(51)	ΑΓΡΙΝΙΟ
(52)	ΑΜΦΙΛΟΧΙΑ
(53)	Δ.ΜΕΝΙΔΙΟΥ
(54)	ΑΡΤΑ
(55)	Δ.ΤΕΡΟΒΟΥ
(56)	ΚΟΜΒΟΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ
(57)	ΙΩΑΝΝΙΝΑ

Πίνακας 4.6: Κόμβοι εξεταζόμενου τμήματος Θεσ/νίκης-Ηγουμενίτσας

ΑΡ.ΚΟΜΒΟΥ	ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΘΕΣ/ΝΙΚΗ-ΗΓΟΥΜΕΝΙΤΣΑ
(37)	ΘΕΣ/ΝΙΚΗ
(36)	Δ.ΜΑΛΓΑΡΩΝ
(35)	ΚΟΜΒΟΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ
(58)	ΒΕΡΟΙΑ
(59)	Δ.ΠΟΛΥΜΥΛΟΥ
(60)	ΚΟΖΑΝΗ
(61)	ΚΑΣΤΟΡΙΑ
(62)	ΓΡΕΒΕΝΑ
(63)	ΤΡΙΚΑΛΑ
(64)	Δ.ΜΑΛΑΚΑΣΙΟΥ
(65)	ΜΕΤΣΟΒΟ
(66)	Δ.ΠΑΜΒΩΤΙΔΑΣ
(56)	ΚΟΜΒΟΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ
(67)	Δ.ΤΥΡΙΑΣ
(68)	ΗΓΟΥΜΕΝΙΤΣΑ

Πίνακας 4.7: Κόμβοι εξεταζόμενου τμήματος Θεσ/νίκης-Αλεξ/πολης

ΑΡ.ΚΟΜΒΟΥ	ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΤΜΗΜΑ ΘΕΣ/ΝΙΚΗ-ΑΛΕΞ/ΠΟΛΗ
(37)	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
(38)	Δ.ΑΝΑΛΥΨΗΣ
(39)	Δ.ΑΣΠΡΟΒΑΛΤΑΣ
(40)	Δ.ΝΕΑΣ ΠΕΡΑΜΟΣ
(41)	ΚΑΒΑΛΑ
(42)	ΞΑΝΘΗ
(43)	Δ.ΙΑΣΜΟΥ
(44)	ΚΟΜΟΤΗΝΗ
(45)	Δ.ΜΕΣΤΗΣ
(46)	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ

4.5.3 Εργαλείο Επίλυσης

Το μοντέλο βελτιστοποίησης και η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης βρίσκουν εφαρμογή μέσω ενός εργαλείου προγραμματισμού σχεδιασμένο για το Microsoft Excel, που ονομάζεται OpenSolver. Αυτό αποτελεί μια προσθήκη του Excel που επεκτείνει τις δυνατότητες του ενσωματωμένου Solver του Excel με ισχυρότερους επιλυτές και χρησιμοποιείται για την επίλυση γραμμικών και ακέραιων προβλημάτων.

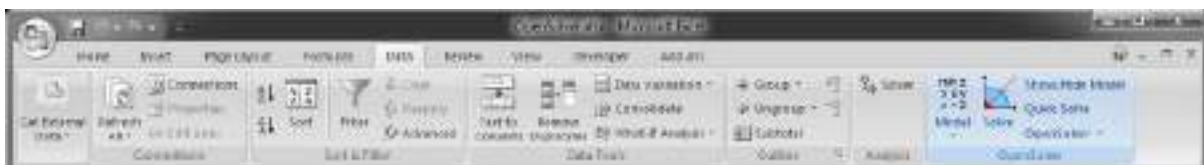
Το OpenSolver διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μια ποικιλία από προγράμματα επίλυσης, όπως είναι το Open Source, COIN-OR CBC τα οποία μπορούν να επιλύουν γρήγορα γραμμικά και ακέραια προβλήματα.
- Συμβατότητα με τα ήδη εγκατεστημένα μοντέλα επίλυσης και συνεπώς οι χρήστες του δεν απαιτείται να αλλάζουν το φύλλο εργασίας τους.
- Δεν εισάγονται τεχνητοί περιορισμοί κατά την εφαρμογή του και συνεπώς ο αριθμός των δεδομένων που εισάγονται στο πρόβλημα μπορεί να είναι μεγάλος.
- Παρέχεται δωρεάν στους χρήστες.

Εκτός από το να αντικαθιστά τα προγράμματα βελτιστοποίησης, το OpenSolver προσφέρει:

- Ένα ενσωματωμένο μοντέλο οπτικοποίησης που επισημαίνει τις μεταβλητές αποφάσεων του μοντέλου σας, τον στόχο, τις μεταβλητές και τους περιορισμούς απευθείας στο υπολογιστικό φύλλο.
- Γρηγορότερη επίλυση του προβλήματος μέσω της επιλογής "Quick solve"
- Έναν αλγόριθμο που δημιουργεί και ενημερώνει το μοντέλο χρησιμοποιώντας πληροφορίες του φύλλου που εργαζόμαστε
- Ένα εργαλείο μοντελοποίησης που βελτιώνεται με το ενσωματωμένο παράθυρο του Solver

Το εργαλείο OpenSolver εισάγεται στο Microsoft Excel ως προσθήκη κάτω από το Data Section. Η προσθήκη του εργαλείου φαίνεται στο εξής εικονίδιο:



Εικόνα 4.2: Προσθήκη Open Solver στο Microsoft Excel

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το μοντέλο βελτιστοποίησης έτσι όπως εμφανίζεται στο OpenSolver. Το OpenSolver επιτρέπει την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, μεγιστοποιώντας, ελαχιστοποιώντας ή ορίζοντας μια συγκεκριμένη τιμή που θέλουμε να πάρει η αντικειμενική συνάρτηση. Στην επιλογή objective cell υπάρχει ένα κελί που περιέχει τον τύπο της αντικειμενικής συνάρτησης και δίπλα του εμφανίζονται τρεις επιλογές: μεγιστοποίησης, ελαχιστοποίησης και ορισμός μιας συγκεκριμένης τιμής.

Κάτω από το objective cell υπάρχουν τα variable cells. Τα variable cells αντιστοιχούν σε όλα εκείνα τα κελιά του excel που περιέχουν τις μεταβλητές του προβλήματος των οποίων οι τιμές μεταβάλλονται ανάλογα με την επίλυση του μοντέλου, δηλαδή τα x_{ij} . Στο μοντέλο μας έχουμε 72 μεταβλητές απόφασης, οι οποίες είναι δυαδικές και παίρνουν τιμές 0 ή 1.

Τέλος, στο μοντέλο μας μέσω της επιλογής constraints εισάγουμε τους περιορισμούς του προβλήματος, οι οποίοι αντιστοιχούν στα κελιά των μεταβλητών x_{ij} . Πιο συγκεκριμένα σαν περιορισμούς στο μοντέλο μας έχουμε θέσει τη δυαδικότητα της μεταβλητής μας x_{ij} και ότι ο αριθμός των τοποθετούμενων σημείων ελέγχου WIM δεν μπορεί να ξεπερνά τον αριθμό των διατιθέμενων. Παρακάτω παρατίθεται η ανάπτυξη του μοντέλου στο OpenSolver για το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, επιδίδεται στο πρόβλημα μας η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης δηλαδή η

μεγιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων που διέρχονται μια φορά μετά την εγκατάσταση των σταθμών WIM.

Εικόνα 4.3: Μοντέλο Βελτιστοποίησης του συγκεκριμένου προβλήματος στο OpenSolver

Μετά την εισαγωγή των απαραίτητων πληροφοριών και πατώντας αρχικά την επιλογή Save Model αποθηκεύεται το μοντέλο μας και έπειτα με την επιλογή Solve, επιλύεται το πρόβλημα εφαρμόζοντας μια επαναληπτική διαδικασία ώστε τα κελιά που αντιστοιχούν στα x_{ij} να παίρνουν τις βέλτιστες τιμές. Μετά την ενεργοποίηση της εντολής Solve ο πίνακας με τις μεταβλητές απόφασης συμπληρώνεται με 0 ή 1 και το κελί της αντικειμενικής συνάρτησης λαμβάνει την μέγιστη δυνατή τιμή.

4.5.4 Αποτελέσματα Μοντέλου

Έπειτα από την επίλυση του μοντέλου, προέκυψαν οι θέσεις εγκατάστασης των σταθμών WIM που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.8: Θέσεις χωροθέτησης εγκαταστάσεων WIM

Προέλευση - Προορισμός	Αριθμός WIM	Θέση
Αθήνα-Θεσσαλονίκη	12	(1-3),(3-20),(20-21),(21-22),(22-23), (23-24),(24-25),(25-26),(26-27), (27-28),(28-29),(29-30)
Πάτρα-Ιωάννινα	11	(19-47),(47-48),(48-49),(49-50), (50-51),(51-52),(52-53),(53-54), (54-55),(55-56),(66-67)
Θεσσαλονίκη-Αλεξανδρούπολη	4	(37-38),(38-39),(39-40),(40-41)
Σύνολο	27	

Λόγω του περιορισμού του προϋπολογισμού, οι σταθμοί που διατίθενται για χωροθέτηση είναι 27. Από την επίλυση του μοντέλου, προέκυψε η κατανομή των σταθμών ελέγχου στις διαδρομές Αθήνα-Θεσσαλονίκη, Πάτρα-Ιωάννινα και Θεσσαλονίκη-Αλεξανδρούπολη. Πιο συγκεκριμένα 12 σταθμοί ελέγχου χωροθετούνται στο τμήμα Αθήνα-Θεσσαλονίκη, 11 στο τμήμα Πάτρα-Ιωάννινα και 4 στο τμήμα Θεσσαλονίκη-Αλεξανδρούπολη. Ο περιορισμός του προϋπολογισμού κρίνεται καθοριστικός καθώς στα τμήματα Αθήνα-Καλαμάτα, Αθήνα-Πάτρα και Θεσσαλονίκη-Ηγουμενίτσα δεν χωροθετούνται σταθμοί, με αποτέλεσμα να μην γίνεται καταγραφή των οχημάτων που διέρχονται από αυτά και να μην εντοπίζονται οι οδηγοί που μεταφέρουν παράνομα υπέρβαρα φορτία. Ωστόσο για την βέλτιστη επιλογή των τελικών θέσεων χωροθέτησης λαμβάνεται υπόψη και ο κυκλοφοριακός φόρτος του κάθε συνδέσμου. Στους συνδέσμους που επιλέχθηκαν, ως θέσεις εγκατάστασης WIM, παρατηρείται η μεγαλύτερη ροή βαρέων οχημάτων σε σχέση με τους υπόλοιπους, επιτυγχάνοντας έτσι τον κύριο στόχο του μοντέλου που είναι ο έλεγχος όσο το δυνατόν μεγαλύτερου αριθμού οχημάτων.

4.6 Ανάλυση Ευαισθησίας

Πολλές από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της βέλτιστης λύσης αλλάζουν και προσδίδουν στο πρόβλημα νέα δεδομένα. Συνεπώς, μαζί με την εύρεση της βέλτιστης λύσης, απαραίτητη είναι και η δυνατότητα διερεύνησης σεναρίων που αφορούν τη φύση και την έκταση των μεταβολών για εκείνες τις παραμέτρους του μοντέλου, που μπορούν να ανατρέψουν την άριστη απόφαση. Υλοποιείται δηλαδή, η Ανάλυση ευαισθησίας.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δημιουργούνται σενάρια τροποποιώντας τις τιμές των παραμέτρων:

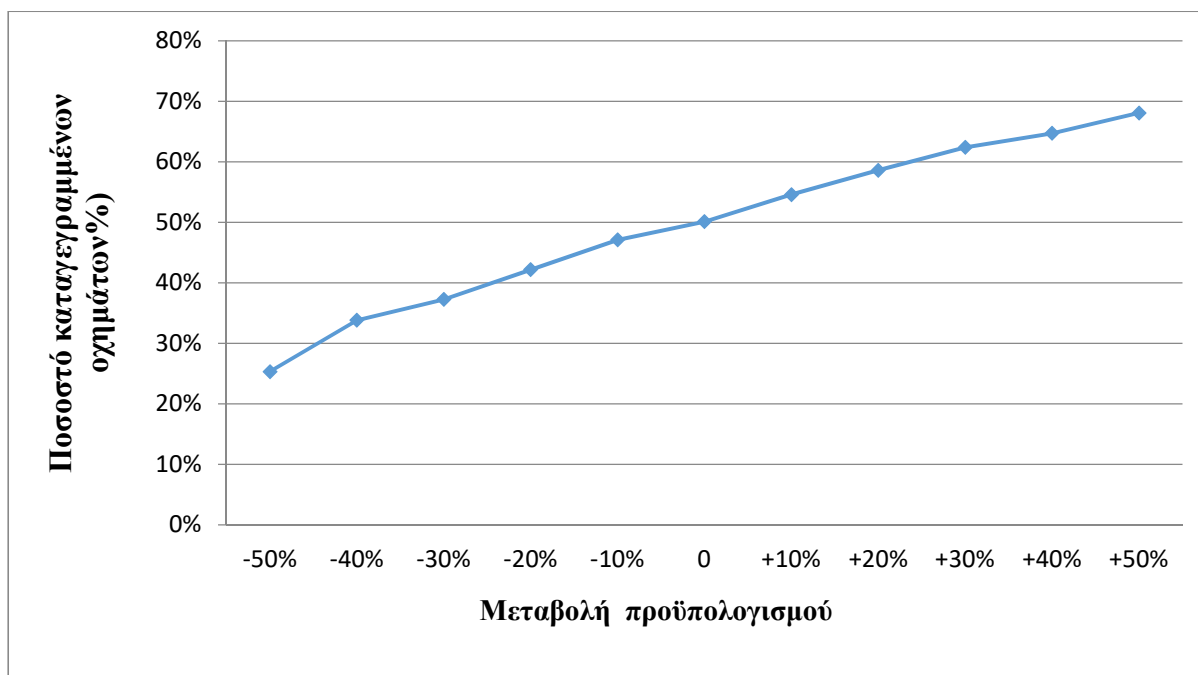
1. του αρχικού προϋπολογισμού
2. τον αριθμό των οχημάτων (ροή)

Στο πρώτο σενάριο παραμένει σταθερός ο αριθμός των οχημάτων με 19.476 οχήματα και το μέγεθος το οποίο μεταβάλλεται είναι ο αρχικός προϋπολογισμός. Το κόστος απόκτησης ενός συστήματος WIM είναι 180.000 € και έχοντας ορίσει σαν αρχικό προϋπολογισμό τα 5.000.000 € μπορούν να εγκατασταθούν μέχρι 27 σημεία ελέγχου.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η μεταβολή της ροής που ελέγχεται καθώς και το ποσοστό αυτής για μεταβολή του προϋπολογισμού από -50% έως +50% .

Πίνακας 4.9: Μεταβολή προϋπολογισμού συναρτήσει του αριθμού των εγκαταστάσεων WIM και του αριθμού των καταγεγραμμένων οχημάτων

Κόστος εγκατάστασης σταθμού WIM: 180,000 €		Προϋ/σμος (€)	Αριθμός εγκατεστημένων σταθμών WIM	Αριθμός οχημάτων	Αριθμός καταγεγραμμένων οχημάτων	Ποσοστό καταγεγραμμένων οχημάτων
		5,000,000	27	19476	9755	50%
Μείωση Προϋ/σμού	-50%	2,500,000	13	19476	4930	25%
	-40%	3,000,000	17	19476	6583	34%
	-30%	3,500,000	19	19476	7251	37%
	-20%	4,000,000	22	19476	8211	42%
	-10%	4,500,000	25	19476	9171	47%
	0	5,000,000	27	19476	9755	50%
Αύξηση Προϋ/σμού	+10%	5,500,000	30	19476	10625	55%
	+20%	6,000,000	33	19476	11412	59%
	+30%	6,500,000	36	19476	12147	62%
	+40%	7,000,000	38	19476	12603	65%
	+50%	7,500,000	41	19476	13255	68%



Διάγραμμα 4.1: Μεταβολή προϋπολογισμού συναρτήσει του ποσοστού των καταγεγραμμένων οχημάτων

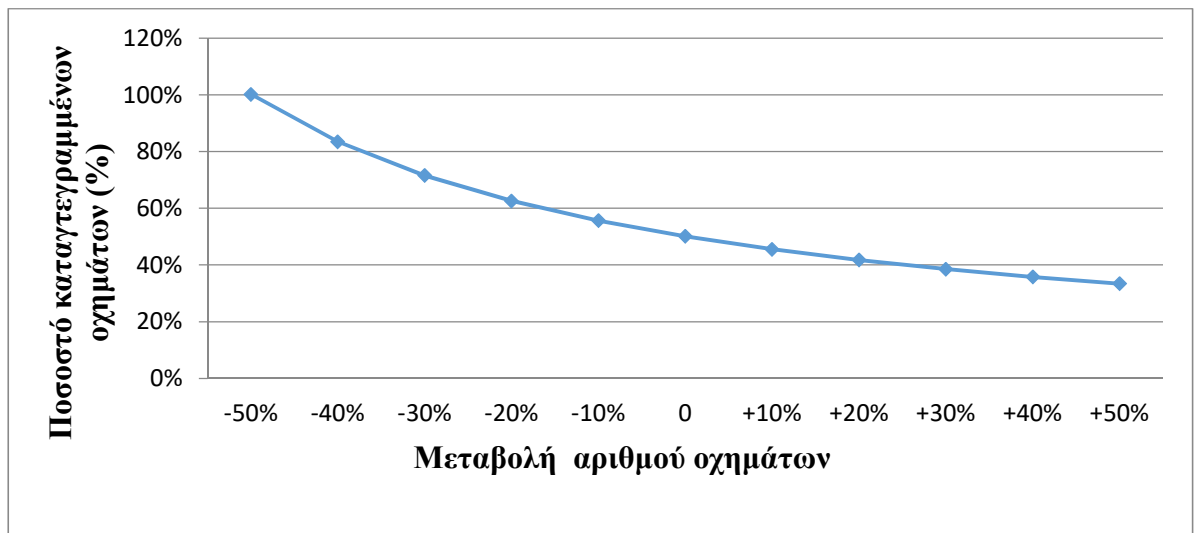
Αναλύοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών για μεταβολή του αρχικού προϋπολογισμού, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι:

- Για σταθερή ροή οχημάτων ίση με 19.476, όσο μεγαλύτερο προϋπολογισμό διαθέτουμε τόσο περισσότερες εγκαταστάσεις WIM χωροθετούνται και συνεπώς ελέγχονται περισσότερα οχήματα.
- Για αύξηση του αρχικού προϋπολογισμού κάθε φορά κατά 10%, το ποσοστό της ροής που ελέγχεται αυξάνεται 3-5%.
- Για μείωση του προϋπολογισμού κατά 10% κάθε φορά η μεταβολή του ποσοστού της ελεγχόμενης ροής δεν είναι σταθερή και όσο περισσότερο μειώνεται ο προϋπολογισμός, τόσο περισσότερο αυξάνεται το ποσοστό μεταβολής.

Στο δεύτερο σενάριο ο αρχικός προϋπολογισμός παραμένει σταθερός και συνεπώς και ο αριθμός των σημείων ελέγχου WIM, ο οποίος ισούται με 27 και το μέγεθος που μεταβάλλεται είναι ο αριθμός των οχημάτων που αρχικά είναι ίσος με 19.476 οχήματα και ύστερα μεταβάλλεται από -50% έως +50%. Στον παρακάτω πίνακα, βλέπουμε το πως μεταβάλλεται το ποσοστό της ροής που ελέγχεται για τις διάφορες μεταβολές του αριθμού των οχημάτων.

Πίνακας 4.10: Μεταβολή αριθμού των οχημάτων συναρτήσει του ποσοστού των καταγεγραμμένων οχημάτων

		Ποσοστό Μείωσης Οχημάτων					0	Ποσοστό Αύξησης Οχημάτων				
		-50%	-40%	-30%	-20%	-10%		+10%	+20%	+30%	+40%	+50%
Αριθμός εγκατεστημένων σταθμών WIM	27	27	27	27	27	27		27	27	27	27	27
	19476	9738	11686	13633	15581	17528	19476	21424	23371	25319	27266	29214
Καταγεγραμμένος αριθμός οχημάτων	9755	9755	9755	9755	9755	9755	9755	9755	9755	9755	9755	9755
Ποσοστό καταγεγραμμένων οχημάτων	50%	100%	83%	72%	63%	56%	50%	46%	42%	39%	36%	33%



Διάγραμμα 4.2: Μεταβολή αριθμού οχημάτων συναρτήσει του ποσοστού των καταγεγραμμένων οχημάτων

Αντιστοίχως για μεταβολή του αριθμού των οχημάτων παρατηρούμε:

- Για μικρή μείωση του ποσοστού της ροής εξασφαλίζεται ικανοποιητικό ποσοστό ελεγχόμενης ροής και μάλιστα με μείωση της τάξεως του 50% εξασφαλίζεται πλήρης έλεγχος του δικτύου μας.
- Για τον αριθμό σταθμών WIM που επιλέξαμε, αν αυξηθεί η ζήτηση κατά 10% καλύπτεται περίπου το μισό ποσοστό αυτής, ενώ για μεγαλύτερες αυξήσεις της ροής παρατηρούμε ότι δεν μπορεί να καλυφθεί η ζήτηση μας.
- Όσο περισσότερο μειώνεται το ποσοστό της ροής αυξάνεται το ποσοστό μεταβολής της ελεγχόμενης ροής.
- Για αύξηση του ποσοστού της ροής σταθερά κατά 10% παρατηρούμε ότι έχουμε μικρή μεταβολή της τάξεως 3-4% στο ποσοστό της ροής που ελέγχεται.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Ανασκόπηση διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η επίτευξη της βέλτιστης χωροθέτησης σταθμών ελέγχου σε τμήματα του Εθνικού Δικτύου και πιο συγκεκριμένα:

- Αθήνα-Καλαμάτα
- Αθήνα-Θεσσαλονίκη
- Αθήνα-Πάτρα
- Πάτρα-Ιωάννινα
- Θεσσαλονίκη-Ηγουμενίτσα
- Θεσσαλονίκη-Αλεξανδρούπολη

Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης που στόχο είχε τη ρεαλιστική προσέγγιση του εξεταζόμενου προβλήματος χωροθέτησης.

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία αναζητήθηκαν οι βέλτιστες θέσεις εγκατάστασης των σταθμών WIM με σκοπό το μέγιστο έλεγχο της ροής των οχημάτων που διέρχονται από το δίκτυο. Επειδή κριτήριο για τη χωροθέτηση αποτέλεσε η κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ζήτησης, αποφασίστηκε η εξέταση ως πιθανών θέσεων για εγκατάσταση των σταθμών των σημείων που συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο κυκλοφοριακό φόρτο στο οδικό δίκτυο δηλαδή τα σημεία εξόδων και τα διόδια. Το μοντέλο που κρίθηκε κατάλληλο για την επίτευξη του στόχου της εργασίας είναι μια παραλλαγή του μοντέλου μέγιστης κάλυψης. Αφού διατυπώθηκε το πρόβλημα εισάγοντας τις κατάλληλες μεταβλητές και περιορισμούς, στη συνέχεια έγινε η επίλυση με τη χρήση ενός πρόσθετου εργαλείου του Excel και πιο συγκεκριμένα του OpenSolver. Λόγω ότι το πρόβλημα μας αποτελεί πρόβλημα μη ακέραιου προγραμματισμού, επιλέχθηκε από το OpenSolver, μια μηχανή επίλυσης κατάλληλη για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων, που ονομάζεται Nomad. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για διάφορα σενάρια με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση των μεταβολών των παραμέτρων στο τελικό αποτέλεσμα.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η επίλυση του προβλήματος της παρούσας εργασίας, επήλθε έπειτα από συγκεκριμένες λογικές θεωρήσεις και παραδοχές. Στη συνέχεια, παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα με σκοπό την επέκταση και τη βελτίωση του προβλήματος που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία.

- Στην συγκεκριμένη εργασία, για τη διαμόρφωση του προβλήματος χωροθέτησης σταθμών WIM, επιλέχθηκε η χρήση ενός μοντέλου κάλυψης (FCP). Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο σε αυτά τα μοντέλα γίνεται η υπόθεση ότι οι οδηγοί ακολουθούν την προκαθορισμένη τους διαδρομή και επομένως όλοι οι οδηγοί ελέγχονται από τους σταθμούς που είναι εγκατεστημένοι στο δίκτυο. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν είναι ρεαλιστικό, καθώς υπάρχουν και οδηγοί που δεν συμμορφώνονται επιλέγοντας να ακολουθήσουν διαδρομές όπου δεν καλύπτονται από σταθμούς ελέγχου. Έτσι απαιτείται η επιλογή ενός άλλου μοντέλου κάλυψης, του EFCP (Evasive Flow Capturing Problem), όπου λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι κάποιοι οδηγοί δεν διέρχονται από διαδρομές που είναι εγκατεστημένοι σταθμοί ελέγχου.
- Επιπρόσθετα, κάτι που θα έκανε πιο ρεαλιστικό το μοντέλο μας θα ήταν η εισαγωγή και η εξέταση και άλλων κριτηρίων χωροθέτησης όπως το κόστος χωροθέτησης των σταθμών ή το κόστος συντήρησης των οδοστρωμάτων λόγω των φθορών που υφίστανται από τα υπερφορτωμένα βαρέα οχήματα που διέρχονται από το δίκτυο.
- Για το μοντέλο που διατυπώθηκε στην παρούσα εργασία βρέθηκαν οι θέσεις των σημείων ελέγχου, ωστόσο ένα από τα βασικά κριτήρια για τη χωροθέτηση των σταθμών WIM αποτελεί η κατάσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος. Έτσι, απαραίτητη κρίνεται η επί τόπου αυτοψία και αξιολόγηση της καταλληλότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος στα τμήματα όπου θα γίνει τελικά η χωροθέτηση των σταθμών WIM καθώς θα πρέπει να τηρούνται οι προδιαγραφές που αναφέρθηκαν στην παράγραφο (4.2).
- Όσον αφορά την επίλυση του προβλήματος, η οποία έγινε με χρήση του λογισμικού OpenSolver ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και η επίλυση του προβλήματος με χρήση κάποιου άλλου λογισμικού (π.χ Γενετικού Αλγόριθμου) για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή των κατάλληλων συμπερασμάτων.
- Τέλος, ανεξάρτητα από την επιλογή του μοντέλου για τη χωροθέτηση των σταθμών, χρήσιμη θα ήταν η μελέτη των υποψηφίων τμημάτων και η συλλογή δεδομένων για τις κυκλοφοριακές συνθήκες που επικρατούν στα επιμέρους τμήματα του οδικού δικτύου.

6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ORIGIN	DESTINATION	FLOW(NODij)	(1-2)	(1-3)	(2-4)	(3-20)	(4-5)	(5-6)	(5-7)	(6-15)
ΑΘΗΝΑ(1)	ΚΑΛΑΜΑΤΑ(14)	653	210	0	210	0	210	0	108	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	443	0	443	0	443	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΠΑΤΡΑ(19)	210	210	0	210	0	210	102	0	102
ΠΑΤΡΑ(19)	ΙΩΑΝΝΙΝΑ(57)	396	0	0	0	0	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΗΓΟΥΜΕΝΙΤΣΑ(68)	290	0	0	0	0	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ(46)	320	0	0	0	0	0	0	0	0
sumproduct	19476	wim_{x1-14}	1	0	1	0	1	0	1	0
		wim_{x1-37}	0	1	0	1	0	0	0	0
		wim_{x1-19}	1	0	1	0	1	1	0	1
		wim_{x1-57}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim_{x37-68}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim_{x37-46}	0	0	0	0	0	0	0	0
number of available wims	27									

($x=1 \Rightarrow wim, x=0$ no wim)

x_{ij}	b	0 b	1 b	0 b	1 b	0 b	0 b	0 b	0
----------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

NODij * x_{ij}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	443	0	443	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

flow captured on link ij

MU	0	443	0	443	0	0	0	0	0
----	---	-----	---	-----	---	---	---	---	---

ORIGIN	DESTINATION	FLOW(NODij)	(7-8)	(8-9)	(9-10)	(10-11)	(11-12)	(12-13)	(13-14)	(15-16)
ΑΘΗΝΑ(1)	ΚΑΜΜΑΤΑ(14)	653	108	108	75	75	52	52	52	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	443	0	0	0	0	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΠΑΤΡΑ(19)	210	0	0	0	0	0	0	0	87
ΠΑΤΡΑ(19)	ΙΟΑΝΝΙΝΑ(57)	396	0	0	0	0	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΗΓΟΥΜΕΝΙΤΣΑ(68)	290	0	0	0	0	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΛΕΓΓΑΝΑΡΟΥΤΙΟΛΗ(46)	320	0	0	0	0	0	0	0	0
sumproduct	19476	wim_{k1-14}	1	1	1	1	1	1	1	0
		wim_{k1-37}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim_{k1-19}	0	0	0	0	0	0	0	1
		wim_{k1-57}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim_{k37-68}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim_{k37-46}	0	0	0	0	0	0	0	0
number of available wims	27									

($x=1 \Rightarrow wim, x=0$ no wim)

x_{ij}	b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0
----------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

NODij * x_{ij}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

flow captured on link ij

MU	0	0	0	0	0	0	0	0	0
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---

ORIGIN	DESTINATION	FLOW(NODij)	(16-17)	(17-18)	(18-19)	(19-47)	(20-21)	(21-22)	(22-23)	(23-24)
ΑΘΗΝΑ(1)	ΚΑΛΑΜΑΤΑ(14)	653	0	0	0	0	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	443	0	0	0	0	415	415	398	398
ΑΘΗΝΑ(1)	ΠΑΤΡΑ(19)	210	79	79	65	0	0	0	0	0
ΠΑΤΡΑ(19)	ΙΩΑΝΝΙΝΑ(57)	396	0	0	0	396	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΛΙΤΟΥΜΕΝΙΤΣΑ(68)	290	0	0	0	0	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ(46)	320	0	0	0	0	0	0	0	0
sumproduct	19476	wim _{x1-14}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-37}	0	0	0	0	1	1	1	1
		wim _{x1-19}	1	1	1	0	0	0	0	0
		wim _{x1-57}	0	0	0	1	0	0	0	0
		wim _{x37-68}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x37-46}	0	0	0	0	0	0	0	0
number of available wims	27									

(x=1=>wim,x=0 no wim)

xij	b	0 b	0 b	0 b	1 b	1 b	1 b	1 b	1
-----	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

NODij * xij	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	415	415	398	398	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	396	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

flow captured on link ij

MU	0	0	0	396	415	415	398	398	
----	---	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	--

ORIGIN	DESTINATION	FLOW(NODij)	(24-25)	(25-26)	(26-27)	(27-28)	(28-29)	(29-30)	(30-31)	(31-32)
ΑΘΗΝΑ(1)	ΚΑΛΑΜΑΤΑ(14)	653	0	0	0	0	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	443	398	334	334	334	292	292	256	256
ΑΘΗΝΑ(1)	ΠΑΤΡΑ(19)	210	0	0	0	0	0	0	0	0
ΠΑΤΡΑ(19)	ΙΩΑΝΝΙΝΑ(57)	396	0	0	0	0	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΗΓΟΥΜΕΝΙΤΣΑ(68)	290	0	0	0	0	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΙ(46)	320	0	0	0	0	0	0	0	0
sumproduct	19476	wim _{x1-14}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-37}	1	1	1	1	1	1	1	1
		wim _{x1-19}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-57}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x57-68}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x57-46}	0	0	0	0	0	0	0	0
number of available wims	27									

(x=1=>wim,x=0 no wim)

xij	b	1 b	1 b	1 b	1 b	1 b	1 b	0 b	0
-----	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

NODij * xij	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	398	334	334	334	292	292	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	

flow captured on link ij

MU	398	334	334	334	292	292	0	0	
----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---	---	--

ORIGIN	DESTINATION	FLOW(NODij)	(32-33)	(33-34)	(34-35)	(35-36)	36-35	(35-58)	(36-37)	37-36
ΑΘΗΝΑ(1)	ΚΑΛΑΜΑΤΑ(11)	653	0	0	0	0	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	443	256	224	224	196	0	0	196	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΠΑΤΡΑ(19)	210	0	0	0	0	0	0	0	0
ΠΑΤΡΑ(19)	ΙΩΑΝΝΙΝΑ(57)	396	0	0	0	0	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΗΓΙΟΥΜΕΝΙΤΣΑ(68)	290	0	0	0	0	290	247	0	290
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ(46)	320	0	0	0	0	0	0	0	0
sumproduct	19476	wim _{x1-14}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-37}	1	1	1	1	0	0	1	0
		wim _{x1-19}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-57}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x37-68}	0	0	0	0	1	1	0	1
		wim _{x37-46}	0	0	0	0	0	0	0	0
number of available wims	27									

(x=1=>wim,x=0 no wim)

xij	b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0
-----	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

NODij * xij	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

flow captured on link ij

MIJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

ORIGIN	DESTINATION	FLOW(NODij)	(37-38)	(38-39)	(39-40)	(40-41)	(41-42)	(42-43)	(43-44)	(44-45)
ΑΘΗΝΑ(1)	ΚΑΛΑΜΑΤΑ(18)	653	0	0	0	0	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	443	0	0	0	0	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΠΑΤΡΑ(19)	210	0	0	0	0	0	0	0	0
ΠΑΤΡΑ(19)	ΙΩΑΝΝΙΝΑ(57)	396	0	0	0	0	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΗΙΩΥΜΕΝΙΤΖΑ(68)	290	0	0	0	0	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΙ(46)	320	320	320	320	320	275	232	232	183
sumproduct	19476	wim _{x1-14}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-37}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-29}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-57}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x37-68}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x37-46}	1	1	1	1	1	1	1	1
number of available wims	27									

(x=1=>wim,x=0 no wim)

xij	b	1 b	1 b	1 b	1 b	0 b	0 b	0 b	0
-----	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

NODij*xij	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	320	320	320	320	0	0	0	0	0

flow captured on link ij

MU	320	320	320	320	0	0	0	0
----	-----	-----	-----	-----	---	---	---	---

ORIGIN	DESTINATION	FLOW(NODij)	(45-46)	(47-48)	(48-49)	(49-50)	(50-51)	(51-52)	(52-53)	(53-54)
ΑΘΗΝΑ(1)	ΚΑΛΑΜΑΤΑ(14)	653	0	0	0	0	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	443	0	0	0	0	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΠΑΤΡΑ(19)	210	0	0	0	0	0	0	0	0
ΠΑΤΡΑ(19)	ΙΩΑΝΝΙΝΑ(57)	396	0	387	387	374	374	369	357	357
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΗΡΑΚΛΕΙΑ(68)	290	0	0	0	0	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ(46)	320	183	0	0	0	0	0	0	0
sumproduct	19476	wim _{x1-14}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-37}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-49}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-57}	0	1	1	1	1	1	1	1
		wim _{x37-68}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x37-46}	1	0	0	0	0	0	0	0
number of available wims	27									

(x=1=>wim,x=0 no wim)

xij	b	0 b	1 b	1 b	1 b	1 b	1 b	1 b	1 b	1
-----	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

NODij*xij	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	387	387	374	374	369	357	357		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

flow captured on link ij

MU	0	387	387	374	374	369	357	357		
----	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	--	--

ORIGIN	DESTINATION	FLOW(NODij)	(54-55)	(55-56)	(56-57)	(56-66)	(56-67)	(58-59)	(59-60)	(60-61)
ΑΘΗΝΑ(1)	ΚΑΛΑΜΑΤΑ(14)	653	0	0	0	0	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	443	0	0	0	0	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΠΑΤΡΑ(19)	210	0	0	0	0	0	0	0	0
ΠΑΤΡΑ(19)	ΙΟΑΝΝΙΝΑ(57)	396	320	320	290	0	0	0	0	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΗΡΟΥΜΕΝΙΤΣΑ(68)	290	0	0	0	0	138	214	214	195
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΔΙΕΞΑΝΑΡΟΥΠΟΛΗ(46)	320	0	0	0	0	0	0	0	0
sumproduct	19476	wim _{k1-14}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{k1-37}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{k1-19}	0	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{k1-57}	1	1	1	0	0	0	0	0
		wim _{k57-68}	0	0	0	0	1	1	1	1
		wim _{k37-46}	0	0	0	0	0	0	0	0
number of available wims	27									

(x=1=>wim,x=0 no wim)

x _{ij}	b	1 b	1 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0
-----------------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

NODij*x _{ij}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	320	320	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

flow captured on link ij

MU	320	320	0	0	0	0	0	0	0
----	-----	-----	---	---	---	---	---	---	---

ORIGIN	DESTINATION	FLOW(NODij)	(61-62)	(62-63)	(63-64)	(64-65)	(65-66)	66-56	(66-57)
ΑΘΗΝΑ(1)	ΚΑΛΑΜΑΤΑ(14)	653	0	0	0	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	443	0	0	0	0	0	0	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΠΑΤΡΑ(19)	210	0	0	0	0	0	0	0
ΠΑΤΡΑ(19)	ΙΩΑΝΝΙΝΑ(57)	396	0	0	0	0	0	0	338
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΗΓΟΥΜΕΝΙΤΣΑ(68)	290	175	163	142	142	133	85	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ(46)	320	0	0	0	0	0	0	0
sumproduct	19476	wim _{x1-14}	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-37}	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-19}	0	0	0	0	0	0	0
		wim _{x1-57}	0	0	0	0	0	0	1
		wim _{x37-68}	1	1	1	1	1	1	0
		wim _{x37-46}	0	0	0	0	0	0	0
number of available wims	27								

(x=1=>wim,x=0 no wim)

xij	b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	1
-----	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

NODij*xij	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	338
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

flow captured on link ij

MIJ	0	0	0	0	0	0	0	0	338
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	-----

ORIGIN	DESTINATION	FLOW(NODij)	(67-68)
ΑΘΗΝΑ(1)	ΚΑΛΑΜΑΤΑ(14)	653	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	443	0
ΑΘΗΝΑ(1)	ΠΑΤΡΑ(19)	210	0
ΠΑΤΡΑ(19)	ΙΟΑΝΝΙΝΑ(57)	396	0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΗΓΟΥΜΕΝΙΤΣΑ(68)	290	115
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ(37)	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ(46)	320	0
sumproduct	19476	wim_{x1-14}	0
		wim_{x1-37}	0
		wim_{x1-19}	0
		wim_{x1-57}	0
		wim_{x37-68}	1
		wim_{x37-46}	0

number of available wims 27 $\text{total located} \geq 27$

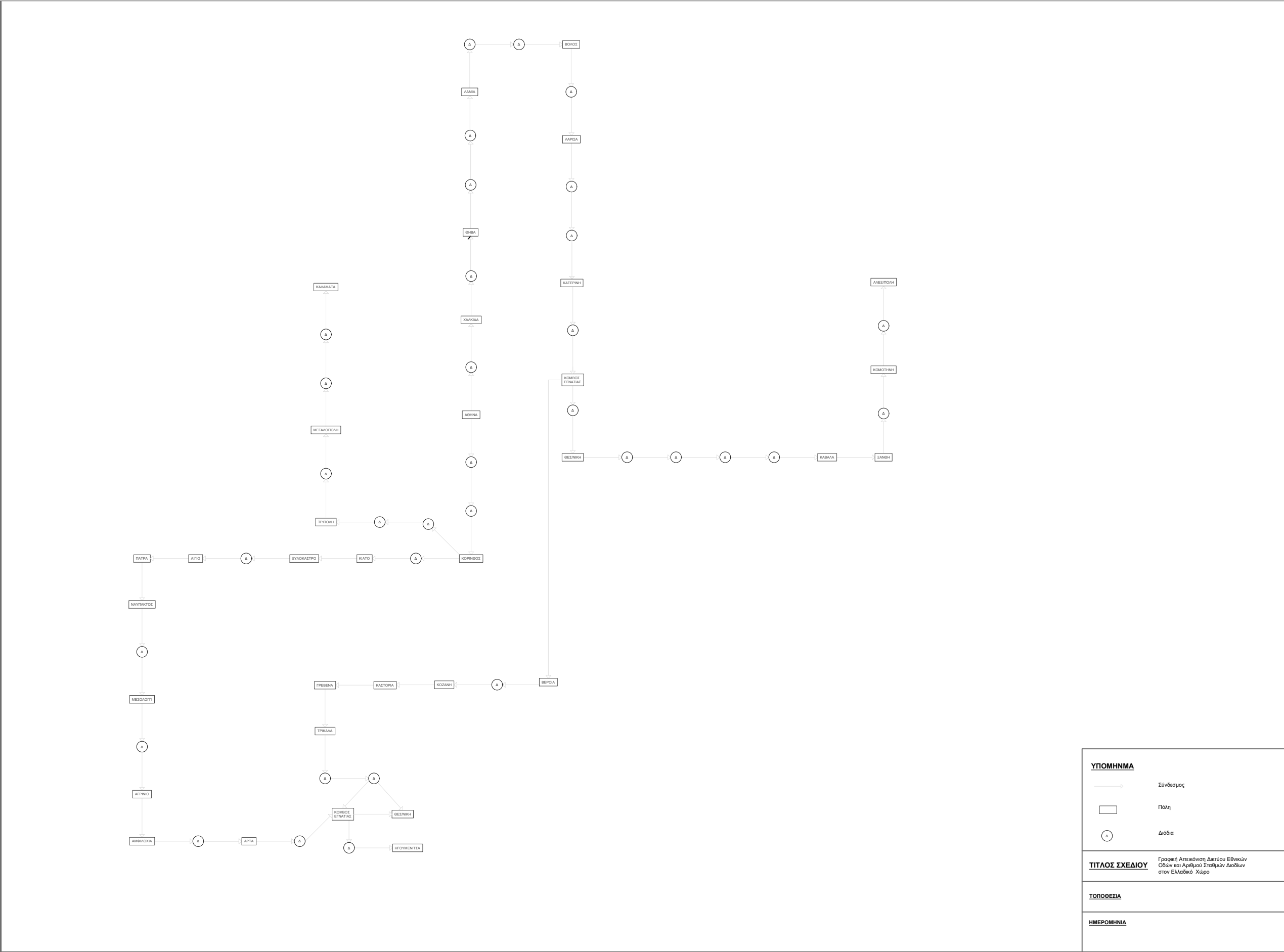
($x=1 \Rightarrow wim, x=0$ no wim)

xij b 0

NODij*xij	0
	0
	0
	0
	0
	0

flow captured on link ij

MIJ 0 ^{max} 9755



7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. AlGadhi, S. A. H (2002). Optimizing Truck Weigh Stations' Locations on the Highway Network of Saudi Arabia. *Journal of King Saud Univeristy- Engineering Sciences*, vol. 14, no. 2.
2. Alumur, S. & Kara, B.Y. (2008). Network Hub Location Problems: The State of the Art. *European Journal of Operational Research*. 190, pp. 1-21.
3. Arslan, O., Jabali, O. & Laporte, G. (2018). Exact Solution of the Evasive Flow Capturing Problem. *Operations Research*. 66(6).
4. Bell, T. & Church, R.L. (1985). Location-allocation Theory in Archaeological Settlement Pattern Research: Some Preliminary Applications. *World Archaeology*. 16, pp. 354-371.
5. Berge, C. (1957). Two Theorems in Graph Theory. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*. 43, pp. 842-844.
6. Bogyrbayeva, A.& Kwon, C. (2020). Pessimistic Evasive Flow Capturing Problems.
7. Bryan, D.L. & O' Kelly M.E. (1999). Hub-and-Spoke Networks in Air Transportation: An analytical Review. *Journal of Regional Science*. 39, pp. 275-295.
8. Campbell, J.F. (1990). Locating Transportation Terminals to Serve an Expanding Demand. *Transportation Research, Part B: Methodological*. 24(3), pp. 173-192.
9. Campbell, J.F. (1994a). Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problems. *European Journal of Operational Research*. 72(2), pp. 387-405.
10. Campbell, J.F. & O' Kelly, M.E (2012). Twenty Five Years of Hub Location Research. *Transportation Science*. 46, pp. 153-169.
11. Carrizosa, E. & Plastria, F. (1998b). Polynomial Algorithms for Parametric Minquantile and Maxcovering Planar Location Problems with Locational Constraints. *TOP*. 6, PP. 179-194.
12. Ceria, S., Nobili, P. & Sassano, A. (1998). A Lagrangian-based Heuristic for Large-scale Set Covering Problems, *Mathematical Programming*. 81, pp. 215-228.
13. Church, R.L. & Garfinkel, S. (1978). Locating an Obnoxious Facility on a Network. *Transportation Science*. 12, pp. 107-118.
14. Church, R.L & Meadows, M.E. (1979). Location Modeling Utilizing Maximum Service Distance Criteria. *Geographical Analysis*. 11(4), pp. 358-373.
15. Church, R.L. & ReVelle, C. (1974). The Maximal Covering Location Problem. *Papers in Regional Science*. 32(1), pp. 101-118.
16. Church, R.L., Stoms, D.M. & Davis, F.W. (1996). Reserve Selection as a Maximal Covering Location Problem. *Biological Conservation*. 76, pp. 105-112.
17. Current, J., Daskin M.S. & Schilling, D. (2002). Basic Facility Location Models. *Facility Location Applications and Theory*. 3.1, pp. 82-97.
18. Daskin, M.S. (1995). *Network and Discrete Location*. New York: J. Wiley and Sons.
19. Daskin, M.S. (2013). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications, 2nd Edition*. Hoboken: Wiley.
20. Drezner, Z. & Hamacher, H.W. (Eds) (2002). *Facility Location: Applications and Theory*. Berlin: Springer.
21. Erkut, E. & Neuman, S. (1989). Analytical Models for Locating Undesirable Facilities. *Annals of Operations Research*. 40 (3), pp. 275-291

22. Ernst, A.T. & Krishnamoorthy, M. (1996). Efficient Algorithms for the Uncapacitated Single Allocation P-Hub Median Problem. *Location Science*. 4, pp.139-154.
23. Feo, T.A & Resende, M.G.C. (1989). A Probabilistic Heuristic for a Computationally Difficult Set Covering Problem. *Operations Research Letters*. 8(2), pp. 67-71.
24. Garey, M.R. & Johnson, D.S. (1979). Computer and Intractability. *A Guide to Theory of NP-Completeness*. S. Francisco
25. Galvao, R.D. & ReVelle, C. (1996). A Lagrangian Heuristic for the Maximal Covering Location Problem. *European Journal of Operational Research*. 31, pp. 9-18.
26. Goldman, A.J. (1969). Optimal Locations for Centers in a Network. *Transportation Science*. 3(4), pp. 352-360.
27. Hakimi, S.L. (1964). Optimum Locations of Switching Centers and Absolute Centers and Medians of a Graph. *Operations Research*. 12(3), pp.450-459.
28. Hakimi, S.L. (1965). Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Network and Some Related Graph Theoretic Problems. *Operations Research*. 13(3), pp. 462-475.
29. Handler, G.Y. & Mirchandani, P.B. (1979). *Locations ins Networks: Theory and Algorithms*. Cambridge: M.I.T Press.
30. Handler, G.Y. (1990). P-Center Problems. In P.B Mirchandani & R.L. Francis (Eds), *Discrete Location Theory*. New York: Wiley.
31. Hansen, P., Peeters D., Richard, D. & Thisse, J.F (1981). On the location of an Obnoxious Facility. *Sistemi Urbani*. 3, pp. 299-317.
32. Hooshmand, M. J. & MirHassani, S. (2018). An effective bilevel programming approach fo the evasive flow capturing location problem. *Networks and Spatial Economics*.
33. Jacob, B. & Feypell-de La Beaumelle, V., (2010). Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology, *IATSS Research*, 34(1).
34. Klincewicz, J.G. (1998). Hub Location in Backbone/Tributary Network Design: A Review. *Location Science*. 6, pp. 307-335.
35. Klose, A. & Drexl, A. (2005). Facility Location Models for Distribution System Design. *European Journal of Operational Research*. 162(1), pp. 4-29.
36. Kuby, M.J. (1987). Programming Models for Facility Dispersion: The P-Dispersion and Maxisum Dispersion Problems. *Geographical Analysis*. 19(4), pp. 315-329.
37. Kuby, M.J. & Gray, R.G. (1993). The Hub Network Design Problem with Stop Feeders: The case of Federal Express. *Transportation Research*. 27A, pp. 1-12.
38. Laporte, G., Nickel, S. & Saldanha da Gama, F. (Eds) (2015). *Location Science*. Heidelberg: Springer.
39. Mahmoudabadi, A & Seyedhosseini, S.M., (2013). Improving the efficiency of weigh in motion systems through optimized allocating truck checking oriented procedure. *IATSS Research*, vol. 36, no.2.
40. Markovic N., Ryzhov I.O. & Schonfeld P. (2015). Evasive flow capture: Optimal location of weigh- in- motion systems, tollbooths, and security checkpoints, *Networks*, vol. 65, no. 1.
41. Markovic N., Ryzhov IO, Schonfeld P. (2017). Evasive flow capture: a multi-period stochastic facility location problem with independent demand. *European Journal of Operational Research*. 257(2).
42. Megiddo, N., Zemel, E. & Hakimi, S.L. (1983). The Maximal Coverage Location Problem. *SIAM Journal of Algebraic and Discrete Methods*. 4, pp. 253-261.

43. Melo, T., Nickel, S. & Saldanha de Gama, F. (2009). Facility Location and Supply Chain Management: A Review. *European Journal of Operational Research*. 196, pp.401-412.
44. Niaki, S.T.A. (2016). A Capacitated Maximal Covering Location Problem with Different Transportaion Models, Facilities and Set up Costs. *Paper Presented at the 12th International Conference on Industrial Engineeiring (ICIE 2016)*. Tehran, Iran, 25-26 January.
45. O' Kelly, M.E. (1986). The Location of Interacting Hub Facilities. *Transportation Science*. 20(2), pp. 92-106.
46. O' Kelly, M.E. (1986). Activity Levels at Hub Facilities in Interacting Networks. *Geographical Analysis*. 18, pp. 343-356.
47. Owen S.H. & Daskin, M.S. (1998). Strategic Facility Location: A Review. *European Journal of Operational Research*. 11, pp. 423-447
48. Roth, R. (1969). Computer Solutions to Minimum-cover Problems. *Operations Research*. 17, pp. 455-465.
49. Selmic, M., Besinovic, N. & Teodorovic, D. (2011). Locating weigh-in-motion checkpoionts in traffic networks using genetic algorithm. *E-Society Journal research and applications*-vol. 2, no 1.
50. Storbeck, J.E., Vohra, R.V., (1988). A Simple Trade-off Model for Maximal and Multiple Coverage. *Geographical Analysis*. 20, PP. 220-230.
51. Ting, S.S. (1984). A Linear-Time Algorithm for Maxisum Facility Location on Tree Networks. *Transportation Science*. 18, pp. 76-84.
52. Toregas, C. & ReVelle, C. (1972). Optimal Location under Time or Distance Constraints. *Papers in Regional Science Association*. 28(1), pp. 133-144.
53. Toregas, C., Swain, A., ReVelle, C. & Bergman, L. (1971). The Location of Emergency Service Facilities. *Operations Research*. 19(6)., pp. 1363-1373.
54. Vasko, F.J., Wolf F.E. & Stott K.L (1989). A Set Covering Approach to Metallurgical Grade Assignment. *European Journal of Operational Research*. 38(6), pp. 27-34.
55. Αλεξανδρή, Γ.Π. (2009). Προσδιορισμός Βελτιωμένων Μοντέλων Χωροθέτησης-Κάλυψης με Εξερεύνηση των Δυνατοτήτων των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. (Διδακτορική Διατριβή). Τμήμα Πληροφορικής. Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
56. Αργυροπούλου, Κ. (2017). Μοντέλο Βελτιστοποίησης Προγραμματισμού Εργασιών Συντήρησης των Γραμμών 2 & 3 του Μετρό της Αθήνας (Διπλωματική Εργασία). Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης. Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ.
57. Γιαννής, Γ. & Αντωνίου, Κ. (2000). Σταθμοί εν κινήσει ζύγισης οχημάτων και διαχείριση του οδικού δικτύου. «Μεταφορές και Νέες Τεχνολογίες». Ελληνική Εταιρία Επιχειρησιακής Έρευνας. 13^ο Εθνικό Συνέδριο.
58. Καρλαύτης, Μ.Γ & Λαγάρος, Ν.Δ (2010). Επιχειρησιακή Έρευνα και Βελτιστοποίηση για μηχανικούς. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.
59. Κωνσταντίνου, Θ. (2016). Ανάπτυξη Μοντέλου Χωροθέτησης Κινητών Μονάδων Ελέγχου Κausσαερίων. (Διπλωματική Εργασία). Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης. Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ.
60. Σατρατζέμη, Μ.Α. (1991). Επίλυση Προβλημάτων Χωροθέτησης Κέντρων Παροχής Υπηρεσιών. (Διδακτορική Διατριβή). Τομέας Εφαρμοσμένης Πληροφορικής. Πανεπιστήμιο Μακεδονίας.

61. Σκούτα, Μ. (2013). Δυναμικά Μοντέλα Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων (Μεταπτυχιακή Εργασία. Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων. Πανεπιστήμιο Πατρών.

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής διαδικτυακές πηγές:

62. <http://www.diodia.com.gr>
63. <http://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/knowledgecenter>
64. <http://google.gr/maps/>
65. <http://www.is-wim.org/>
66. <http://pavementinteractive.org/reference-desk/design/design-parameters/weigh-in-motion/>